

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI**

ENDÜSTRİYEL BİR KURUTMA FIRININ TERMNODİNAMİK ANALİZİ

**Yazar
Gökçenur TİMİNCİOĞLU**

Prof.Dr. Leyla ÖZGENER



MANİSA-2023

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Gökçenur TİMİNCİOĞLU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER DİZİNİ	II
ALT SİMGELER LİSTESİ	IV
KISALTMALAR DİZİNİ.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLO DİZİNİ.....	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
3. TAVLAMA FIRINI VE TAVLAMA İŞLEMİ.....	15
3.1 Çeliklerde tavlama işlemi	16
3.2 Kamara Tipi Fırınlarda Kullanılan Isı Yalıtım Malzemeleri	18
4. DURUM ÇALIŞMASI.....	21
5. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	27
5.1 Ekserji Ve Enerji Kavramları.....	27
5.2 Kütlenin Korunumu, Enerji Ve Ekserji Eşitlikleri Denklemleri	28
5.3 BELİRSİZLİK HESABI.....	32
5.3.1 Belirsizlik Hesabı Ve Hata Analizi.....	32
5.3.2 SAT & TUS Testi.....	34
5.3.2.1 Sıcaklık Homojenlik Testi (TUS)	35
5.3.2.2 Sistem Doğruluk Testi (SAT)	36
5.3.3 Ölçüm Cihazları Özellikleri Ve Hata Oranları	37
5.4 Termodinamik Parametreler	39
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	40
6.1 Geliştirilebilirlik Potansiyeli (IP)	46
6.2 Eksergoekonomik Analiz.....	46
6.3 Enerji Sürdürülebilirliği.....	53
6.4 Yaşam Döngüsü Analizi (Lca).....	56
6.4.1 Sistem Girdi Ve Çıktılarının Analizi	57
6.4.2 Sistemdeki CO2 Emisyon Hesabı.....	57
6.4.3 Ürün Yaşam Döngüsü Analizi Yorumu	57
6.5 Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi.....	58
6.6 Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi.....	59

6.7. Sürdürülebilir Ve Yenilenebilir Kaynaklar.....	59
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKÇA	62



SİMGELER DİZİNİ

A	yüzey alanı (m ²)
C	özellül ısı (kJ/kg K)
$\dot{E}$	enerji oranı (kW)
$\dot{E}_x$	ekserji oranı (kW)
h	özellül entalpi (kJ /kg)
$\dot{I}$	tersinmezlik (ekserji yıkımı) oranı (kW)
L	termodinamik kayıp değeri (kW)
$\dot{m}$	kütle akış hızı (kg/s)
$\dot{Q}$	ısı transfer oranı (kW)
r	hava geri dönüşüm oranı (boyutsuz)
R	termodinamik kayıp oranı (W/USD), sabit hata miktarı
R _a	gaz sabiti (kJ /kgK)
R _b	buhar sabiti (kJ /kgK)
$\dot{S}$	entropi oranı (kW/K)
s	özellül entropi (kJ/kg K)
T	sıcaklık (°C)
T _k	sıcaklık (K)
T _{CW}	fırının iç duvarlarını sıcaklığı (C°)
T _∞	fırının yüzey sıcaklığı (C°)
U	kurutma odası duvarlarının toplam ısı transfer katsayısı (kW/m ² K)
$\dot{W}$	güç (kW)
W	sıcak Su (°C)
W _x	bağımsız değışkene ait sabit hata

X relatif tersinmezlik (%)

Greek Harfleri

ε ekserji verimliliği (%)

ε_i verimlilik eksikliği (%)

ξ eksergetik faktör (%)

η enerji verimliliği (%)

ψ özgül ekserji (kJ /kg)

ρ özgül kütle (kg/m^3)

δ_i yakıt Tüketim oranı (kW)

ω özgül nemlilik oranı ($\text{kg}_{\text{su}}\text{kg}_{\text{hava}}^{-1}$)

ω_0 referans durumda havadaki su buharının nem oranı ($\text{kg}_{\text{su}}\text{kg}_{\text{hava}}^{-1}$)

ALT SİMGELER LİSTESİ

a hava

av ortalama

ç çıkış

dest yıkım

f fırın

g giriş

gen üretilen

i iç kısım

loss kayıp

p ürün

sis sistem

s_g sisteme Giren

s_{ϕ}	sistemden çıkan
y	yakıt
x	bağımsız Değişken
1,2,3,4,5,6	durum numaraları
0	referans Durum



KISALTMALAR DİZİNİ

AD	Sistemde Tüketilen ya da Üretilen Yakıt Türü
CF	Sistemde Tüketim Sonucu Ortama Salınan <i>CO2</i> Miktarı
EF	Yakıtın Birim Yüğü
IP	İyileştirilebilirlik Potansiyeli
K	Proses Bedeli
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
LCC	Yaşam Döngüsü Maliyeti
LCI	Yaşam Döngüsü Envanter Analizi
LCIA	Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi
TUS	Thermal Utility System Test
SAT	System Accuracy Test

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1- Kamara Tipi Fırın	13
Şekil 2- İş Akış Şeması	19
Şekil 3- Enerji giriş-çıkışları ve Sistem kayıpları	20
Şekil 4-a İşlem Gören Parça.....	21
Şekil 4-a Tavlama Fırını önden görünüş	21
Şekil 4-c Tavlama Fırını yandan görünüş.....	21
Şekil 4-d Tavlama Fırını iç görünüş.....	22
Şekil 5- Fırının sistemi (1) giren kuru hava, (2) çıkan nemli hava, (3) ürün, 4) ısınan ürün,	29
Şekil 6- Belirsizlik Grafiği	33
Şekil 7- Tüm Sürecin Enerji Akış Şekli	44
Şekil 8- Tüm Sürecin Ekserji Akış Şekli.....	45
Şekil 9- Ekserji verimliliğinin, sisteme giren hava sıcaklığına göre değişimi	45
Şekil 10- Hava Sıcaklığının değişimine göre IP Grafiği	46
Şekil 11-Eksergoekonomik (<i>Ren</i>) Grafiği	51
Şekil 12-Eksergoekonomik (<i>Rex</i>) Grafiği	52
Şekil 13- Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç (MW) Grafiği.....	55

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1- Fırın Yalıtım Malzemeleri	19
Tablo 2 –Isıl işlem öncesi ve sonrası sertlik değerleri	24
Tablo 3- Ölçülen değerler	34
Tablo 4- Ölçüm Cihazları.....	38
Tablo 5 Ölçülen Değerlere Ait Belirsizlikler	38
Tablo 6- Türetilen Nicelikler.....	38
Tablo 7- Fırın Yüzey Alanları.....	40
Tablo 8- Parça sıcaklıkları.....	40
Tablo 9-Isıl işlem öncesi fırın yüzey sıcaklıkları	40
Tablo 10-Isıl işlem sonrası fırın yüzey sıcaklıkları	41
Tablo 11- Analizde kullanılan Termal Veriler	41
Tablo 12- Ekserji- Enerji Hesaplamaları.....	42
Tablo 13-Sonuçlar	43
Tablo 14- Sistemin Eksergoekonomik Parametreleri.....	47
Tablo 15- <i>Ren</i> Hesaplamaları	49
Tablo 16- <i>Rex</i> Hesaplamaları	50
Tablo 17-Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç (MW)	54

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi ve tecrübesiyle her ihtiyaç duyduğumda bana destek olan, harekete geçmem ve başarmam için daima arkamda duran çok değerli danışmanım Prof. Dr. Leyla ÖZGENER başta olmak üzere, bu çalışmanın yazılması aşamasında beni destekleyen ve gerekli verilerin temini konusunda bana yardımcı olan Orhan KARABULUT, Caner EŞ ve tüm Dönmez Debriyaj ailesine, her zaman yanımda olan ve kararlarımı hep destekleyen çok değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gökçenur TİMİNCİOĞLU
Manisa, 2023

ÖZET

Yüksek Lisans

Gökçenur TİMİNCİOĞLU

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Leyla ÖZGENER

Ekserji analizi, son yıllarda, değişik ısı sistemlerinin tasarımı, işletilmesi ve performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekserji analizi aracılığıyla sistemdeki verimsizlikler gerçekçi şekilde saptanabilir. Bu sayede kayıplar ve kaçaklar belirlenip sistem enerji verimliliği açısından iyileştirilir. Endüstriyel fırınlar termal proses olarak ele alınırlar ve termodinamiğin birinci ve ikinci yasası kapsamında analiz edilirler. Endüstriyel fırınlarda harcanan enerjinin büyük bir kısmı kayıp olarak gerçekleşmektedir. Sistemdeki kayıpların azaltılması ve sistemin en yüksek enerji ile çalışması için gerçekleştirilen iyileştirme faaliyetleri enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik adına hayati önem taşıyan çalışmalardır. Araştırma Dönmez Debriyaj firmasının, ısı işlem bölümünde gerçekleştirilmektedir. Firma bünyesindeki tavlama fırınları ve diğer ısı işlem fırınlarının yanı sıra Debriyaj sektöründe gerek dünyada gerekse Türkiye’de geniş pazar payına sahiptir. Bu çalışmada Firma bünyesinde bulunan tavlama fırının termodinamik analizi gerçekleştirilecektir. Tavlama fırınının kütle, enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş olup enerji ve ekserji verimleri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma işlemi, enerji, ekserji, fırın, ısı işlem, tavlama fırını

2023, 67 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.

Gökçenur TIMINCIGLU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Leyla ÖZGENER

Exergy analysis has been widely used in the design, operation, and performance evaluation of various thermal systems in recent years. With an exergy analysis, inefficiencies in the system can be determined realistically. In this way, losses and leaks are detected, and the system is improved in terms of energy efficiency. Industrial furnaces are considered thermal processes and are examined within the scope of the first and second laws of thermodynamics. In industrial furnaces, a significant amount of energy is lost, so improvements aimed at reducing losses and operating with maximum efficiency are essential. The research is done at the Dönmez Debriyaj San. Tic. heat treatment department. In addition to tempering furnaces and other heat treatment furnaces, it has a significant market share in the clutch sector, both around the world and in Turkey. In this study, a thermodynamic analysis of the annealing furnace within the company will be made. By defining the mass, energy, and exergy balances of the furnace, energy and exergy efficiencies were calculated. The results obtained are interpreted.

Keywords: Drying process, energy, exergy, furnace, heat treatment, annealing furnace

2023, 67 pages

1. GİRİŞ

Günümüzde hem dünyada hem de Türkiye’de enerji ihtiyacı sürekli olarak artması ile yenilenemez enerji kaynakları da hızla tükenmektedir. Enerji, insanlık tarihinde denklemdaki en önemli unsurlardan biri olmuştur. Günlük hayatımızdan savunma sanayiye kadar hayatımızın her alanında yapı taşı olan enerjiyi kullanırken artan enerji maliyetlerinin en aza indirilmesi doğru bir enerji analizi ile gerçekleşir. Kaybolan dengeyi en aza indirmek için artan enerji maliyetlerinin analizi her geçen gün önem kazanmaktadır. Termodinamiğin birinci yasası, yüksek seviye enerji verimliliği elde etmekte yetersiz ve zayıf kalınca termodinamiğin ikinci yasası olan ekserji analizi daha popüler hale gelmiştir.

Termodinamik analizler sayesinde sistemlerdeki kullanılabilir olmayan yani atıl haldeki enerji türlerinin boyutunu ve nedenini tespit edebilmekteyiz. Termodinamik analizlerde ekserji kayıplarının tespiti ile tasarımsal olarak daha verimli metotlar ve daha verimli kaynak kullanımı mümkündür. Ekserji ve enerji analizleri ile tespit edilen kaçaklar, ekonomik açıdan daha gerçekçi ve tutarlı analizler yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [1].

Dünyadaki enerji krizinden otomotiv endüstrisi her geçen gün daha çok etkilenmektedir. Gerek karlılık gerek devamlılık ve sürdürülebilirlik açısından üretim alanlarındaki kaçakların tespiti ve bunların giderilmesi otomotiv sektöründeki bir firmayı rekabet alanında ileriye taşıyacaktır. Bu çalışmada Avrupa tipi hafif ve ağır ticari araçlar için baskı, disk, rulman, volan ve turbo üreten bir fabrikada ısıtım işlem hattındaki tavlama fırının termodinamik analizi yapılmıştır. Bu çalışmada incelenecek fırın seçilirken optimum fırın olarak seçilen fırının proses zamanı, fırının kullanım sıklığı, termal verilerin toplanabilme kolaylıkları gibi faktörler göz önüne alınmıştır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları ile tavlama fırının termodinamik analizi yapılmıştır.

Bu çalışma için kaynak oluşturan motivasyonlar, ilgili işletmenin sektördeki yerini ve sürecin toplam üretim sürecine göre enerji tüketim miktarını göz önüne aldığımızda şu şekilde sıralanmaktadır,

- Alanında Türkiye'deki nadir ve Avrupa'da yüksek pazar payına sahip bu işletmede gözlem yaparak gerekli ölçüm ve işletme verilerini elde etme imkânına sahip olmak.
- Çeliklerin işlenilebilirliği üretimin devamı için hayati önem taşımaktadır. Çelikleri işlenebilir hale getirme metotlarından biri de tavlama prosesidir. Bu proseste kullanılan tavlama fırınları yüksek enerji tüketim maliyetleri ile tasarrufa açık bir alan olmaktadır.
- Bu işletmede tespit edilecek kaçaklar ve bu kaçakların giderilmesi için uygulanacak enerji tasarrufu metotları benzer imalat sürecine sahip farklı alanlardaki firmalarda da kullanılabilir. Dünyada büyük bir pazar payına sahip otomotiv ve çelik şekillendirme ve işleme üreticileri düşünülünce bu çalışmanın dünya çapında enerji tasarrufu için büyük bir fırsat sunduğu söylenebilir.
- Üretim süreçlerinde kayıpların azaltılması, enerji tasarrufu ile bütçelerin yeniden düzenlenerek cari açığın kapatılması ve bu sayede daha verimli kaynak kullanımı çalışmanın motivasyonları içinde yer almaktadır.

Bu çalışmanın amaçları;

- Sistemin enerji ve ekserji parametrelerinin analiz edilmesi,
- Proseste enerji ve ekserji kayıplarının en aza indirilmesi,
- Proses ekserji ve enerji veriminin en üst seviyeye çıkarılması olarak belirlenmiştir.

2023 yılı haziran ayında tamamlanan literatür araştırmaları sonucunda Web of Science sitesinde yapılan taramalarda “endüstriyel kurutma” anahtar kelimesiyle 53.860 ; “Endüstriyel çelik kurutma işlemi” anahtar kelimesi ile 169.790 çalışma ve bu makalede incelenen konu olan “tavlama fırınında kurutma işlemi” anahtar kelimesi ile 22 adet makale bulunmuştur. Bu çalışma esnasında geçmişte yapılmış birçok çalışma incelenmiştir. Literatürde kurutma sistemlerinin termodinamik analizi ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen mevcut araştırmalara göre kamara tipi bir tavlama fırınının ekserji-enerji analizi ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Bu araştırma, bir kamara tipi tavlama fırının termodinamik analizinin gerçekleştirilmesi ve literatüre kazandırılması amacıyla yapılmıştır. Enerji ve ekserji analizleri yapılarak sonuçlara göre iyileştirme önerileri sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Ekserji analizi, her süreçte en verimsiz aşamaları ve bunların nedenlerini ortaya çıkarmak için kullanılabileceği gibi, çeşitli süreçlerin ortak bir zeminde tutarlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için de kullanılabilir [2]. Bir süreci yaratan bir tasarımcının, mevcut teknolojik, ekonomik ve etik, ekolojik ve sosyal sonuçlar altında asgari masraf ve yasal kısıtlamalarla en iyi potansiyel mühendislik performansını elde etmesi beklenir [3,4,5]. Geçmişten günümüze birçok farklı ve yararlı çalışmada termodinamik denklemler kullanılarak ekserji ve enerji analizleri gerçekleştirilmiştir.

Moraitis ve arkadaşları, kurutucudan çıkan buharın gizli ısısının bir kısmının geri kazanılmasıyla endüstriyel kurutmada enerji tasarrufu ele alınmıştır. Bu ısı geri kazanımı, iki aşamalı bir ısı eşanjör sistemi aracılığıyla gerçekleştirilir; burada birinci aşama, birincil devreyi buhar doyma koşullarına getirirken, ikinci aşama bir kondansatör görevi görür [6].

Özgener ve arkadaşları, 1998 yılında yayınladıkları çalışmalarında Balçova Jeotermal Merkezi Isıtma Sistemlerinde (BGDHS) kullanılan aygıt ve cihazlar için sermaye maliyetleri ve termodinamik kayıpların analizi gerçekleştirmişlerdir. Tüm sistem ve sistemin bileşenleri için termodinamik kayıp oranı ile sermaye maliyeti oranları kullanılarak sermaye maliyeti ile toplam veya dahili ekserji kaybı arasında sistematik ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki ile başarılı bölgesel ısıtma sistemlerindeki cihazların, tüm sistemin ve aygıtların ve ekonomik özelliklerini dengeleyerek en verimli tasarıma sahip olacak şekilde yapılandırıldığı bağlamına ulaşılabilir [7].

Çamdallı ve arkadaşları, “Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company” makalesinde çelik üretim prosesinde ısı işleme fırınlarının yerini anlatmış ve fırınların çalışma prensibinden bahsetmiştir. Termodinamiğin yasalarından faydalanarak ısı kayıpları ve verimden hesaplamaları yapılmıştır [8].

Dinçer, 2002 yılında yayınladığı çalışmasında kurutma sistemlerinin enerjik, ekserjetik ve çevresel yönleri hakkında kapsamlı inceleme yapmıştır. Artan enerji ve ekserji verimlerine ilişkin bazı teorik ve pratik sınırlamalar ve enerji ve ekserji ile çevre arasındaki ilişkiler üzerinde durmuştur [9]. Dinçer yine aynı yıl yayınladığı bir diğer çalışmasında enerji kaynaklarının nicelik ve kalitesinin bir ölçüsü olduğundan bahsetmiş ve enerji politikası oluşturma uygulamaları için verimli bir araç olarak ekserjinin kullanımını ele almıştır [10] .

Çamdallı ve Tunç, 2003 yılında yayınladıkları çalışmalarında AC elektrik ark ocağında çelik üretim süreci ele alarak Türkiye'deki bir alaşımlı çelik üreticisi için bir ön ısıtmalı ark ocağının ekserji analizi yapılmıştır. Bu analizde en verimli tasarım parametrelerini ve çalışma koşullarını elde etmek amaçlanmıştır [11].

Özgener ve arkadaşlarının VI. Ulusal Tesisat mühendisliği Kongresi ve Sergisi'nde yayınlanan çalışmalarında ele alınan HVAC sistemlerinin analizinde Ekserji analizi önemi vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen analizlerin mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemleri tasarlanmasının mümkün olup olmayacağını saptamak amaçlanmıştır [12].

Mujumdar, 2004 yılında yayınladığı çalışmasında kurutma teknolojilerindeki yeni gelişmeleri özetlemiş, son gelişmeler tespit etmiş ve gelecekte beklenebilecek trendler hakkında tahminler sunmuştur [13].

Dinçer ve Şahin, 2004 yılında yayınladıkları makalede ekserji metodu ile kurutma proseslerinde kullanılabilecek yeni bir termodinamik analiz modelinden bahsetmişlerdir. Ekserji verimi ısı ve kütle transfer sürecinin fonksiyonları olarak elde edilir. Bu metot, kurutma işlemlerinin termodinamik değerlendirmelerinde ekserji analizinin yararlılığının yanı sıra bu sistemin performansları ve verimlilikleri hakkında bilgi vermeyi amaçlamıştır [4]. Dinçer ve arkadaşları 2004 yılında yayınladıkları çalışmalarında 1990 ve 2001 yılları arasındaki enerji ve ekserji akışlarını göz önünde bulundurarak Suudi Arabistan'ın kamu ve özel sektöründe enerji ve ekserji kullanımının ve ekserji verimliliklerini analizini sunmuşlardır. Suudi Arabistan'a enerji verimliliği ve/veya enerji tasarrufu önlemleri yoluyla enerji tasarrufu sağlanmasını ve endüstride enerji planlaması gibi diğer planlama süreçlerinde uygulamayı kolaylaştırmak amaçlanmıştır [14].

Hepbaşı ve Özgener, 2004 yılında yayınladıkları çalışmalarında Türkiye'de jeotermal enerji kullanımının gelişimini incelemişlerdir. Çalışmalarının amacı, Türkiye'de jeotermal enerji (GE) kullanımının gelişimini, tarihsel gelişimini ve fırsatlarını vererek gözden geçirmektir [15].

Özgener ve arkadaşları, 2005 yılında yayınladıkları makalede, Balıkesir, Türkiye'deki Gönen jeotermal merkezi ısıtma sisteminin (GGDHS) enerji ve ekserji analizlerine dayalı bir performans değerlendirmesini sunmuşlardır. Termodinamik analiz sonucunda sistemdeki ekserji yıkımlarının, öncelikle pompalar, ısı eşanjörleri ve boru hatlarındaki kayıpların yanı sıra rezervuara geri enjekte edilen soğutulmuş jeotermal sularla ilişkili olduğu görülmüştür [16].

Hepbaşı ve arkadaşları 2005 yılında yayınladıkları çalışmalarında Jeotermal merkezi ısıtma sistemleri (GDHS'ler) ve termodinamik kayıplar ile yatırım maliyetleri arasındaki ilişkiler incelemiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bir model önerilmiş ve daha sonra önerilen model gerçek veriler kullanılarak Türkiye'de Kurulu bir GDHS'ye uygulanmıştır. Çalışma, özellikle GDHS'ler ve genel olarak enerji sistemleri için enerjik ve ekserjetik kayıplar ile sermaye maliyetleri arasındaki ilişkileri saptayan bulgular sunmaktadır [17].

Özgener ve arkadaşları, 2005 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında Manisa, Türkiye'deki Salihli jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin (SGDHS) enerji ve ekserji analizini ele almaktadır. Yapılan analizde, bölgesel ısıtma sistemi performansını, termodinamik açıdan verimliliklerini, özgül ekserji indeksini, ekserji iyileştirme potansiyelini ve ekserji kayıplarını değerlendirmek için gerçek sistem verileri kullanılmıştır [18].

Özgener ve Özgener, 2006 yılında yayınladıkları makalede bir endüstriyel makarna kurutma işleminin enerji ve ekserji modellemesi yapılarak performans değerlendirmesi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analiz yapılırken gerçek sistem verilerini kullanılmış olup çevreye ısı kayıpları ve genel sistemdeki enerji ekserji yıkımları hesaplanmıştır [19]. Aynı yıl içerisinde yayınladıkları bir diğer çalışmalarında endüstriyel nihai makarna kurutma işleminin enerji ve ekserji modellemesi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde gerçek sistem verilerini kullanılmış olup endüstriyel makarna kurutma işleminin enerji ve ekserji verimlilikleri ve sistem ekserji yıkımları yoluyla bir performans değerlendirmesi yapılmıştır [19].

Özgener ve arkadaşlarının 2006 yılında yayınladığı bir makalede referans sıcaklığının 0 ila 25 °C arasında değişmesinin Balçova jeotermal merkezi ısıtma sisteminin (BGDHS) enerji ve ekserji verimliliklerini nasıl etkileyeceğini araştırılmıştır. Bunlara ek olarak, sistemi iyileştirmek için enerji ve ekserji verimlerini hesaplanmış ve analiz edilmiştir [20].

Özgener ve arkadaşlarının 2006 yılında gerçekleştirdiği başka bir çalışmada ise Türkiye- Balçova jeotermal bölgesel ısıtma sistemi (BGDHS) ve Salihli jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin (SGDHS) bina uygulamaları için enerji performansı incelenmiştir. Jeotermal merkezi ısıtma sistemlerinin temel bileşenleri (ör. Pompalar, ısı eşanjörleri) modellemeye dâhil edilmiştir. Mevcut model, jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin sistem analizi ve enerjik performans değerlendirmesi için kullanılmaktadır [21].

Baba ve arkadaşlarının 2006 yılında yayınladıkları çalışmalarında öncelikle jeotermal enerjinin çevresel ve ekserji yönü yani hızlı etki değerlendirme matris yöntemi ve özgül ekserji indeksi incelenmiştir. Daha sonra sırasıyla Çanakkale'deki Tuzla jeotermal sahasına ve İzmir'deki Balçova jeotermal sahasına uygulama yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışma içerisinde verilmiş ve yorumlanmıştır [22] .

Özgener, 2007 yılında yayınladığı çalışmasında endüstriyel bir makarna son kurutma işleminde sistemdeki cihazlar için sermaye maliyetleri ve termodinamik kayıplar arasındaki ilişkiler incelenerek sistemin eksergoekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Termodinamik kayıp oranı-sermaye maliyeti oranları, cihazlar ve genel sistem için sermaye maliyeti ile ekserji kaybı arasında sistematik bir ilişkinin olsa da sermaye maliyeti ile enerji kaybı veya harici ekserji kaybı arasında sistematik bir ilişkinin olmadığını göstermek için kullanılır. Çalışmanın amacı sistemdeki proseslerin enerjik ve ekserjetik verimlilikleri hesaplanarak sistemin eksergoekonomik olarak değerlendirmesini sunmaktır [5].

Özgener ve arkadaşları, 2007 yılında gerçekleştirdikleri vaka çalışmasında Manisa, Türkiye'deki Salihli Jeotermal Merkezi Isıtma Sisteminden (SGDHS) alınan gerçek sistem verilerini kapsayan verilerle sistemin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin optimum termodinamik ve ekonomik özelliklerinin saptanabileceği parametrik bir çalışma sunulmuştur [23].

Özgener ve Özgener, 2007 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında üç kanatlı, 3 m çapında yatay eksenli bir rüzgâr türbininin sisteminin ekserji ve güvenilirlik analizini incelemiş olup Türkiye'deki yerel bir sistem için küçük rüzgâr türbini jeneratörünün ekserji performansı ve güvenilirliği değerlendirilmiştir [24]. Özgener ve arkadaşları, 2007 yılında Türkiye'deki Salihli jeotermal bölgesel ısıtma sistemi (SGDHS) için Kütle, enerji, ekserji ve maliyet muhasebesi analizleri yoluyla jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin eksergoekonomik bir vaka çalışması sunmuştur. Termodinamik kayıp oranı-sermaye maliyeti oranları, cihazlar ve genel sistem için, ekonomik maliyet ile toplam sistem ekserji kaybı arasındaki sistematik ilişki incelenmiştir [25].

Özgener ve arkadaşları, 2007 yılında yayınladıkları makalede jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin detaylı bir analiz sunmaktadırlar. İnceleme kapsamında, enerji ve ekserji açısından termodinamik yönleriyle Balçova jeotermal bölgesel ısıtma sistemi (BGDHS), Salihli jeotermal bölgesel ısıtma sistemi (SGDHS) ve Türkiye'deki Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sistemi (GGDHS) vaka çalışmaları sunulmaktadır. Jeotermal ısıtma sistemlerinin sistematik analizi ve performans değerlendirmesi için enerji ve ekserji analizleri kullanılmış olup bu analiz sonuçlarına göre sistemlerin performansları değerlendirilmiştir. Enerji ve ekserji analizlerinde gerçek sistem işletim verileri kullanılmıştır. Yerel üç bölgesel ısıtma sistemi karşılaştırıldığında, SGDHS'nin en yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu, GGDHS'nin ise en yüksek ekserji verimliliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır [26] .

Özgener ve Özgener, 2009 yılında yayınladıkları çalışmada güneş seralarında kurutma prosesi esnasındaki ekserji değişimini incelemiştir. Dinçer ve Şahin'in modelini doğrulamak ve modelin farklı kurutma havası sıcaklıklarında gerçek kurutma işlemlerine uygulanabilirliğini göstermek ve ekserji analizinin kurutma işlemlerin performansları ve verimlilikleri hakkında fikir vermek amaçlanmıştır [27]. Özgener ve Özgener, yine aynı yıl yayınladıkları çalışmalarında, jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin (GDHS'ler) işletiminin son ısıtma döneminin enerji ve ekserji verimliliği analiz edilmiştir. Vaka incelemeleri, Türkiye'de Afyon ve Salihli GDHS'lerindeki sistemlerden alınan gerçek sistem verileri ile yapılan termodinamik analizlerden elde edilen sonuçlarla, GDHS'lerin ortalama teknik elverişliliği, gerçek kullanılabilirliği, kapasite faktörü ile enerji ve ekserji verim değerleri analiz edilmiştir [28].

Aljundi'nin 2009 yılında yayınladığı makalede Al-Hussein santralının enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, sistem bileşenlerini ayrı ayrı analiz etmek ve en büyük enerji ve ekserji kayıplarının bulunduğu bölgeleri belirlemek ve ölçmektir. Bunlara ek olarak çalışmada gerçekleştirilen analizin üzerinde referans ortam durumunun değişiminin etkisi de sunulmaktadır. Tesisteki performans, bileşen bazında bir modelleme kullanılarak tahmin edilmiş ve enerji ve ekserji kayıplarının ayrıntılı bir dökümü sunulmuştur [29].

Özgener ve Özgener, 2009 yılında yayınladıkları bir vaka çalışmasında Türkiye, Gaziantep'teki endüstriyel makarna işleme sisteminin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji ve ekserji verimlilikleri açısından performans değerlendirmesi için gerçek termodinamik veriler kullanılarak analiz yapılmıştır. Çalışmada ayrıca en iyi performans ve çalışma koşulları için değişen sistem durum özelliklerinin, sistemin enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkisinin parametrik bir çalışması yapılmış ve açıklanmıştır [30].

Özgener ve arkadaşları, 2009 yılında yayınladıkları çalışmalarında bir rüzgâr türbini sistemi için eksergoekonomik parametrelerini incelemektedir. Değişen rüzgâr hızının rüzgâr türbini sisteminin eksergoekonomik parametrelerini nasıl etkileyeceği incelenmiş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin pratik uygulamaları için termodinamik kayıp oranının sermaye maliyetine oranı ve rüzgâr hızı arasında sistematik bir ilişki geliştirmek amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır [31].

Özgener ve Özgener, 2010 yılında yayınladıkları çalışmalarında bir yer altı hava tüneli sistemi için bazı eksergoekonomik parametreleri araştırmıştır. Sistem için ürün/yakıt bazında genel ekserji verimliliği hesaplanmıştır [32].

Baskut ve arkadaşlarının 2010 yılında yayınladıkları makalede Rüzgâr Türbini Enerji Santralleri'nin (ATPP'ler) ekserji verimliliği sonuçlarını ele almaktadır. Meteorolojik değişkenler olarak hava yoğunluğu, durum noktaları arasındaki basınç farkı, nem ve ortam sıcaklığı gibi faktörlerin ekserji verimliliği üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Üç farklı türbin için bazı temel parametreler aylık olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, AAT'lerin planlanması sürecinde meteorolojik değişkenlerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [33].

Özgener'in 2010 yılında yayınladığı makalede Manisa Celal Bayar Üniversitesi Muradiye Kampüsü'nün rüzgâr enerjisi potansiyelini incelemektir. Deneysel sistem, Kasım 2006'da devreye alınmış ve o zamandan beri performans izleme testleri yapılmaktadır. Çalışmanın amacı rüzgâr hızlarının değişimi ile rüzgar türbini sisteminin elektrik üretimi üzerindeki etkisini araştırmak ve jeneratörün nominal gücüne göre ortalama güç çıkışının oranı olan bir kapasite faktörünü tahmin etmektir. Toplanan veriler, karşılaştırma amaçlarıyla Kasım 2006 ile Aralık 2007 tarihleri arasındaki dönemi kapsayan tablolarda gösterilmektedir [34].

Özgener ve Özgener 2010 yılında yayınladıkları çalışmalarında Ege Üniversitesi, Güneş Enerji Enstitüsü, Türkiye'de tasarlanan bir yeraltı hava tünelinin sera soğutması için ekserjik performans özelliklerini incelemişlerdir. 47 m yatay, 56 cm nominal çapa sahip U-bükme galvanizli yeraltı ısı değiştirici kullanılarak oluşturulan bu sistem, yeraltı hava tünellerinin çok kullanışlı ısıtma, soğutma ve hava ısıtma sistemleri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu sistemler henüz Türk pazarında kullanılmamıştır. Türkiye'nin tarım sektöründe sera kullanımı önemli ekonomik potansiyele sahiptir. Seralarda en uygun büyüme koşullarını sağlamak için mümkün olduğunca yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmalıdır. Bu çalışma, modern seralarda uygun teknolojiye sahip yeraltı hava tünellerinin etkin kullanımının Türkiye'de gelecekte öncü bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Deneysel sonuçlar, ölçülen ortalama parametrelere dayanarak sistem bileşenleri arasındaki ekserji transferini ve her bileşende meydana gelen ekserji kayıplarını belirlemektedir. Ayrıca, sistem bileşenlerinin bireysel performanslarını değerlendirmek amacıyla ekserjik verimleri de hesaplanmış ve potansiyel iyileştirme olanakları sunulmuştur [35].

Özgener ve Özgener 2010 yayınladıkları başka bir çalışmalarında U-bükme galvanizli yeraltı ısı değiştiricisi ile sera ısıtması için bir yeraltı hava tünelinin (YHT) performans özelliklerini araştırmışlardır. Bu sistem, Ege Üniversitesi Solar Enerji Enstitüsü'nde İzmir, Türkiye'de kurulmuştur. Isıtma modunda yapılan ölçümlere dayanarak, topraktan alınan ortalama ısı çekme hızı 3.77 kW veya tünel uzunluğu başına 80.21 W/m olarak bulunmuştur. Isıtma kapasitesi başına gereken tünel uzunluğu ise kW başına 12.46 olarak elde edilmiştir. Tünele giren hava sıcaklığı 14.3 ila 21.5°C arasında değişmekte olup ortalama değeri 15.5°C'dir [36].

Hasanuzzaman ve arkadaşları, 2011 yılında yayınladıkları çalışmalarında bir tavlama fırınının enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmişlerdir. Fırının enerji ve ekserji verimleri, enerji ve ekserji kayıpları, enerji tasarruflarını araştırmak için faydalı enerji ve ekserji kullanımı kavramı analiz edilmiştir [37].

Dinçer, 2011 yılında yayınladığı çalışmasında kurutma sistemlerini enerji, ekserji, çevresel etki, sürdürülebilirlik ve ekonomi açılarından ele almış ve kurutma sistemlerinin nasıl daha sürdürülebilir olabileceğine odaklanmıştır. Kurutma sistemlerinin verimliliği ve performansının enerji analizi ile elde edilenden daha gerçekçi değerlendirmeler elde etmek için ekserji analizinin kullanılmasının önemi üzerinde durulmuştur [38].

Başkut ve arkadaşlarının yayınladıkları çalışmalarında Rüzgâr Türbini Enerji Santrallerinin enerji ve ekserji verimlilik sonuçları sunulmaktadır. Ekserji, enerji ve teknik erişilebilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Vaka çalışması, İzmir Çeşme'deki bir Rüzgâr Türbini Enerji Santralinin sisteminin gerçek verilerinden elde edilmiştir. Genel enerji, ekserji ve diğer performans parametreleri de sunulmuştur. İncelenen Rüzgâr Türbini Enerji Santrali, Türkiye'nin ilk kurulu rüzgâr santrali (1.50 MW) olup İzmir'de yer almaktadır. Santralin ekserji verimliliği %68,20 bulunmuştur. Aylık ortalama teknik erişilebilirlik değerleri sırasıyla 1. türbin için %96,11, 2. türbin için %98,71 ve 3. Türbin için %98,52'dir [39].

Özgener'in 2011 yılında yayınladığı makalede Şubat 2011 sonuna kadar Türkiye'de ve dünya genelinde EAHE (yerden havaya ısı değiştirici) sistemlerinin deneysel ve analitik analizleri üzerine yapılan çalışmaları gözden geçirmektedir. EAHE sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalar, açık döngülü alan ısıtma/soğutma ve kapalı döngülü alan ısıtma/soğutma sistemleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu makale, yeraltı hava tüneli sistemleri olarak da bilinen EAHE 'ler üzerinde yapılan çalışmaları incelemek amaçlanmıştır [40].

Baskut ve Özgener, 2012 yılında yayınladıkları çalışmalarında rüzgâr türbini güç santrallerinin eksergoekonomik sonuçlarıyla ilgili ilk çalışmalardandır. Serbest maliyet ile ekserji kaybı oranı-grafikleri ve ilişkisi sunulmuştur. Ayrıca, üç türbin için aylık eksergoekonomik sonuçları da sunulmuştur. Rüzgâr hızına bağlı olarak ekserji kaybı oranı-sermaye maliyeti ve enerji kaybı oranı-sermaye maliyeti ilişkileri incelenmiştir [41].

Yıldırım ve Özgener'in 2012 yılında yayınladıkları çalışmalarında, Aydın-Salavatlı jeotermal sahasının özellikleri ve bölgedeki 2 güç santralinin (DORA 1 ve DORA 2) çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmektedir. Güç santrallerinin enerji ve ekserji verimlilikleri, özellikle güç santrallerinde kullanılan termal akışkanların etkileri üzerine odaklanılarak hesaplanmıştır. Güç santrallerinde ekserji kaybına neden olan bölümler belirlenmiştir. Bu doğrultuda, iyileştirme önerileri sunulmuştur. Ayrıca, güç santrallerinin yatırım maliyetleri ve donanım bakım maliyetleri dikkate alınarak eksergoekonomik analizler gerçekleştirilmiştir [42].

Takla ve arkadaşları, enerji ve ekserji analizini iki adet gerçek, bir adet de teorik silikon üretimi prosesi için gerçekleştirmişlerdir [43] . Literatürde farklı alanlarda ekserji ve enerji verimliliği ile ilgili detaylı çalışmalar bulunmaktadır.

Özgener ve Özgener, 2013 yılında yayınladıkları makalede bir prototip EAHE sisteminin termo-ekonomik parametrelerini izlemek amaçlamaktadır. Sistemdeki cihazlar için sermaye maliyetleri ile termodinamik kayıplar arasındaki ilişkiler araştırılmış ve karar vericilere ve okuyuculara sunulacak sonuçlar elde edilmiştir [44]. Özgener ve arkadaşlarının yine aynı yıl yayınladıkları çalışmalarında derinlik ve zamana bağlı olarak günlük toprak sıcaklıklarını tahmin eden bir modeli geliştirmeyi amaçlamaktadırlar. Toprak sıcaklık ölçümleri, Ege Üniversitesi Solar Enerji Enstitüsü'nde kurulu olan yer-hava ısı değiştirici sistemi (EAHE) üzerinde 3 m derinlikte yapılmıştır. İzmir İl Meteoroloji İstasyonu'ndan günlük ortalama toprak sıcaklıkları 5 cm, 10 cm ve 20 cm derinliklerinde alınmıştır. Son olarak, güneş dalgalanmalarının 5 cm ila 300 cm derinlik ve zaman bağlamında toprak sıcaklığı üzerindeki etkilerini analiz edilmiştir [45].

Özgener ve Özgener, 2015 yılında yayınladıkları vaka çalışmasında jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin enerji ve ekserji verimliliği izleme sonuçları, elde edilen sonuçların teknik kullanılabilirlik analizi ve eksergoekonomik parametrelerinin izlenmesini sunmuşlardır. Gerçekleştirilen incelemeler, Türkiye'de Afyon ve Salıhlı GDHS'lerindeki sistemlerden alınan gerçek sistem verilerini kapsamaktadır. Bunlara ek olarak GDGH'lerin gerçek kullanılabilirliği, kapasite faktörü ile enerji ve ekserji verim değerleri analiz edilmiştir [46] . Yine aynı yıl içinde yayınladıkları bir başka çalışmalarında Türkiye'de Ocak 2015'ten itibaren EAHE (yer-hava ısı değiştirici sistemleri) üzerinde yapılan çalışmaları gözden geçirmektedir [47].

Ersayın ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada faaliyette olan bir güç santralinin performans analizi, santralden elde edilen gerçek çalışma verileri kullanılarak yapılmaktadır. Sistemin her bileşeninin enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanmış olup parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre, iyileştirme ve değişiklik önerileri sunulmaktadır [48]. Aynı sene, Neşeli ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir Turbo Expanders ile Basınç Düşürme İstasyonunun ekserji analizleri yapılmıştır. Bu çalışma, İzmir'deki doğal gaz basınç düşürme istasyonlarından enerji elde etmek için yapılan ilk tahmin çalışmasıdır. Çalışmanın temel amacı, İzmir'deki bir doğal gaz basınç düşürme istasyonunda geri kazanılacak elektriği hesaplamak için bir vaka çalışması yapmaktır [49].

Özgener ve arkadaşları, 2017 yılında yayınladıkları çalışmalarında bir kapalı döngü dikey ve yatay yer altı hava tüneli ısı değiştiricisinin ısınma modunda termodinamik verimini deneysel olarak incelemişlerdir. Kullanılan veriler, Ege Üniversitesi Bornova Kampüsü'ndeki Solar Enerji Enstitüsü'nde 2009-2016 yılları arasındaki ısıtma dönemleri için saatlik ölçüm kayıtlarından oluşmaktadır. Sistem ve bileşenler termodinamik açıdan analiz edilmiştir. Ayrıca, sistem ve bileşenlerinin aylık ve yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri çeşitli referans durumlarında belirlenmiştir [50].

Gürtürk ve arkadaşlarının 2018 yılında yayınladıkları çalışmalarında birçok güneş enerjisi santralini temizlik işlemi ve rüzgârın taşıdığı tozun hasar etkisi vb. gibi parametreler belirlenerek incelenmiştir. Deneylerde kullanılan örnekler, "öncesi ve sonrası" kavramına göre değerlendirilmiştir [51].

Yüksel ve arkadaşları, 2019 yılında yayınladıkları çalışmalarında çevreye duyarlı ve sürdürülebilir enerji kazanımları için hidrojen üretimi ile sıvılaştırma ve güneş enerjisi kulesi destekli çoklu üretim sisteminin termodinamik analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, değişen ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu yoğunluğunun mevcut çoklu üretim sistemi ve bileşenleri için tersinmezlik ve ekserjetik performans üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir [52].

Doğru ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yayınladıkları Manisa'da ekstrüzyon yöntemiyle bir contalama profili üretimindeki kurutma sürecinin enerji ve ekserji analizi gerçek işletme verileri kullanılarak yapılmıştır. Kurutma sistemi, ambiyans sıcaklığı (0-30°C) ve kurutma havası sıcaklığı (75-105°C) değişimleri dikkate alınarak analiz edilmiştir [53]. Yine aynı sene Doğru & Camcıoğlu ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada Manisa'da yıllık 150.000 ton üretim kapasitesine sahip bir tuğla fabrikasının enerji ve ekserji analizleri gerçek işletme verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürecin ve tüm sistemin her bir bileşeni için enerji ve ekserji çıkış değerleri ve ekserji kayıpları ortam sıcaklığı (0°C-20°C) ve kurutma hava sıcaklığı değişikliklerine (75°C-105°C) göre analiz edilmiştir [54].

Ayvalı ve arkadaşlarının 2023 yılında yayınladıkları çalışmalarında gerçek çalışma verileri ile boya kurutma fırınları için bir kurutma sürecini incelenmiştir. Bu çalışma, incelenen firma göz önüne alınarak sektörel olarak enerji ve ekserji yoğunluklarını belirleyerek verimlilik analizi yapmayı amaçlamaktadır [1].

3. TAVLAMA FIRINI VE TAVLAMA İŞLEMİ

Endüstriyel fırınlar, metalurjik üretimlerde, toprak sektörü üretimlerinde, metal sanayi, gıda sanayi gibi alanlarda ısıtma, ısı işlem, temperleme, pişirme, kurutma, fermentasyon amaçlı kullanılmaktadır. Isıl işlem fırınlarında ısıtma ve sıcak şekillendirme için tavlama ya da sertleştirme, meneviş, ıslah, yumuşak tavlama, normal tavlama, gerilim giderme tavlama, sementasyon, nitrasyon, temperleme gibi ısı işlemlerin gerçekleştirilmesi için yapılır [55].

Amaca bağlı olarak, fırınlar birbirlerine göre büyük konstrüktif farklılıklara sahiptirler. Fırın tipinin belirlenmesinde birçok etken vardır. Bu parametreler parçaların formu, büyüklüğü, miktarı ve fırın kapasitesidir. Tavlama hatalarını en aza indirmek için bu parametrelerin bir arada düşünülmesi gerekir. Plastik şekil verme, diğer adıyla sıcak şekillendirme prosesi için tavlama fırını olarak, büyük kapasitelerde kuyu tipi fırınlar ve itme fırınlar, daha az kapasitelerde ise arabalı, tamburlu, döner tabanlı ve çan tipi fırınlar kullanılmaktadır [55]. Tavlama fırınları, elektrik ve gazlı olarak tedarik edilen ısı işlem proseslerine uygun olarak tasarlanan fırınlardır. Fırın iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar yanma sistemi ile entegre fırın gövdesidir. Bu çalışmada kullanılan Fırın Şekil 1’deki gibidir.



Şekil 1- Kamara Tipi Fırın

Kamara tipi tavlama fırınının çalışma prensibi, ısıtıcı rezistansların yardımıyla fırın içindeki havanın ısıtılmasına dayanır. Sıcaklık kontrolü, sıcaklığın hassas olarak ayarlanmasının önemli olduğu fırınlarda, PID kontrollü elektronik kontrol ünitesi yardımıyla yapılır.

Bu tip fırınlarda soğutma sistemi bulunmazken, soğutma çok güçlü olmayan fan sistemi ile yapılabilir. Isıl işlem görecekt parça firmaya girişinden itibaren iş akış aşamaları sırasıyla; *giriş kalite kontrol, dik işlem frezeleme işlemi, su verme işlemi, gerilim giderme /tavlama, sertlik kontrolü, montaj, final kalite kontrol ve sevkiyattır.* Fırın çalışırken iki kısım arasındaki sızdırmaz kapı, kapalı şekilde tutulmaktadır. Bu sayede ısıtma kısmındaki yüksek ısının soğuk kısma geçişi önlenmiş olur.

Isıl işlem ve tavlama, metallerin, camların ve diğer malzemelerin daha az kırılğan ve daha işlenebilir hale getirildiği bir prosestir. Tavlama fırını metal endüstrisinde çok yaygındır. İkinci yasanın termik santrallerde uygulanması ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Miktar olarak yetersiz olmakla birlikte, demir çelik sektörlerine ilişkin bazı çalışmalar bulunmaktadır [4].

3.1 Çeliklerde tavlama işlemi

Çeliklerde sertleştirme sonrası oluşan gerilim ve çarpılmaları gidermek için tavlama işlemi uygulanmaktadır. Sertleştirme, çelikleri aşınmaya dayanıklı hale getirilmesi işlemi olarak özetlenebilir.

Çelikleri sertleştirmek için, çelik parçanın ostenit faz sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulup daha sonra hızla soğutulması işlemi gerçekleştirilir [56]. Çelik parçayı Ostenit sıcaklığında tutma süresini çeliğin ostenit fazda homojen bir yapıya ulaşması belirlemektedir. Bu işlem sonrasında parçaya su verilerek sertleştirilir. Çelik parça bu soğutulma işleminden sonra kırılğan bir yapıya sahip olur. Parçada oluşan gevrek yapıyı ve yüzey çatlaklarını gidermek için ısıtılır ve sonra soğutulur [56]. Çeliklerde tavlama birkaç farklı tavlama çeşitleri bulunmaktadır. Bunlar Normalleştirme tavı, Yumuşatma tavı, gerilim giderme tavı ve yeniden kristalleştirme tavıdır [57].

Normalleştirme tavı; malzemedeki tane yapısını inceltmek, çekme dayanımı ve süneklik gibi işlenebilirliğe direkt etkisi olan özellikleri iyileştirmek amacıyla uygulanır [57].

Yumuşatma tavlı; su verme işlemi sonrası meydana gelen sertliğini gidermek amacıyla uygulanır [57].

Küreselleştirme tavlı %0,5'ten daha çok karbon içeren çeliklere uygulanmaktadır. İşlemin amacı, talaşlı imalat, haddeleme, bükme ve eğme vb. işlemler öncesinde çeliklere sünek bir hal kazandırmaktır [58].

Gerilim giderme tavlı; parçanın gördüğü çeşitli ısı işlemler sonucu yapısında oluşan gerilmeleri gidermek amacıyla uygulanır [57]. Gerilim giderme olayında sıcaklık-zaman dönüşüm değerleri önemlidir. Parçaya göre belirlenen zaman-sıcaklık-dönüşüm grafikleri yardımıyla malzeme ısıtılır ve ardından soğutulur. Parçanın istenilen yapıda olması için ısı işleminde kullanılacak fırının en uygun şartlara ayarlanmış olması önemlidir [59].

Yeniden kristalleştirme tavlı; soğuk şekil değiştirme sonrası parçada oluşan değişiklikleri gidermek ve soğuk işlem öncesi özelliklerini kazandırmak amaçlanır. Malzemede bir faz dönüşümü meydana gelmemektedir [60].

Tane irileştirme tavlama, düşük karbonlu (%0,3 veya daha az karbon içeren) çeliklerde yumuşatma ve talaşlı şekillendirme özelliklerini arttırmak amacıyla uygulanan işlemdir [58].

Temperleme (menevişleme), su verme işlemi aracılığıyla, oluşan martenzitik yapının gevrekliğini azaltmak ve parçanın sertliğini ayarlamak için dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta uzun olmayan bir süre tutulması işlemidir [58]. Hızlı soğuma sonucu parçada yüksek gerilim oluşma riskini azaltmak ve dolayısıyla parçanın gevrekliğini giderip tok bir yapı kazandırmak ve oluşan iç gerilimlerini azaltmak amacıyla menevişleme (temperleme) ısı işleminde uygulanır [56].

Parçanın sertleştirilme işlemi gerçekleştirildikten sonra sertliğini ölçmek için Jominy sertlik testi uygulanır. Parça fırında ostenit sıcaklığında homojen olarak yaklaşık 30 dakika ısıtılır. Daha sonra fırından alınan parçanın alt kısmı su tankında 10-15 dk kadar su püskürtülerek soğutulur. Parça, test soğutulduktan sonra yüzeyinden Rockwell C sertlik ölçümleri yapılır. Jominy deneyinin iki amacı vardır. Bunlar su verme sonrası elde edilebilecek maksimum sertlik değeri ve sertleşme derinliği tespitidir [56]. Parçayı sertleştirme sırasında oluşan içyapı işlemek için fazla sert ve gevrek olduğu için darbelere karşı direnci de düşüktür.

Çeliklerde tavlama işlemine etkiyen 4 ana parametre vardır [56];

- **Parçayı Isıtma Sıcaklığı:** Çeliklerde tavlama işlemi için çelik parçanın belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Bu sıcaklık, çeliğin bileşimine, özelliklerine ve istenen sonuçlara bağlı olarak değişebilir.
- **Bekleme Süresi:** Çeliğin uygun sıcaklığa eriştikten sonra belirli bir sıcaklıkta bir süre bekletilmesi gerekebilir. Bu bekletme süresi, çeliğin homojen bir sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmesi için gereklidir. Çeliğin bekleyeceği süre, çelik parçanın kalınlığına, bileşimine vb. parametrelere bağlı olarak değişebilir.
- **Soğutma Hızı:** Tavlama işlemi sırasındaki soğutma hızı, çeliğin sahip olacağı mikroyapısını ve özelliklerini belirler. Yavaş soğutma, çeliğe daha yumuşak bir yapı kazandırırken, hızlı soğutma daha sert bir yapı kazandıracaktır. Soğutma hızı, çeliğin tavlama işlemi için kullanılan çevre şartlarına (hava, yağ, su, vb.) ve istenen sonuca göre değişebilir.
- **Ön Isıl İşlem:** Çelik, istenilen özellikleri kazanması için tavlama işleminden önce bir ön işlem görür. Bu ön işlem, çeliğin sertleştirilmesi veya normalleştirilmesi gibi işlemleri içerir. Bu ön işlem, çeliğin tavlama işlemi için daha uygun bir yapı kazandırmak amacıyla uygulanır.

3.2 Kamara Tipi Fırınlarda Ve Fırınlarda Kullanılan Isı Yalıtım Malzemeleri

Fırınlarda, geniş bir kimyasal reaksiyon yelpazesini kolaylaştırmak veya bazı durumlarda tavlama veya kurutma gibi fiziksel süreçler için kullanılabilirler. Kamara fırınlar diğer fırınlara göre daha küçük boyutludur. Fırın tabanı, yan duvarlar ve tavan sabittir. Fırın duvarlarından birine fırın kapağı bulunmaktadır. Bu tip fırınlar kesintili çalışıp fırın soğukken fırına parça yerleştirilir. Uygulanan ısıtılma işlemi bittikten sonra fırını boşaltmak için fırının soğuması beklenir. Sertleştirme, normal tavlama gibi prosesler için kullanılır [61]. Fırınlarda genelde tavlama işlemlerinin gerçekleştiği üç ana bölümü içerir. Bu ana bölümler ısıtma bölümü, soğutma bölümü ve homojenizasyon bölümüdür. Isıtma bölümünde, parça diğer işlemler için gereken sıcaklığa ulaşmak üzere ısıtılır. Soğutma bölümünde parça sıcaklığı kademeli olarak düşürülür ve yaklaşık homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi amaçlanır. Homojenizasyon bölümünde, Soğutma bölümünün sonunda, şerit, sıcaklığını biraz artırmak için bazı elektriksel elemanlardan geçirilir ve nihayet çinko eriyen havuza girer [62].

Çalışmada incelenen fırında homojenizasyon bölümü bulunmamaktadır. Fırınlara amaçlarına, yakma şekline, şekillerine veya şarj yöntemine göre gruplandırılabilirler. Tavlama işleminin temel amacı, devam eden işlemler için uygun bir sıcaklık elde etmektir.

Isı yalıtımı, ısı geçişini en aza indirmek için kullanılır. Endüstriyel olarak yaygın kullanılan yalıtım malzemeleri 3'e ayrılmaktadır. Soğuk hatlar için kullanılan malzemeler (-40°C ile +20°C arası), ılık hatlar için kullanılan malzemeler (+20°C ile +70°C aras) ve sıcak hatlar için kullanılan malzemeler (+70°C ile 1250°C arası) [63].

Aşağıdaki Tablo 1'de sıcaklıklara göre yalıtım malzemelerinin kullanımları görülmektedir.

Tablo 1- Fırın Yalıtım Malzemeleri

Soğuk hatlar	Ilık Hatlar	Sıcak hatlar
Polietilen	Polietilen	Cam yünü
Kauçuk Köpüğü	Kauçuk Köpüğü	Taş yünü
Cam yünü	Cam yünü	Seramik Yünü
Taş yünü	Taş yünü	Kauçuk Köpüğü
Cam köpüğü		

Aşağıda fırınlarda kullanılan izolasyon malzemelerinden en yaygın olanlar tanımlanmıştır [63].

Polietilen köpüğü: Ekstrüzyon yöntemiyle boru veya levha şeklinde üretilen bir polietilen tabanlı malzemedir. Bu malzemeler, tesisat yalıtımı için alüminyum folyo kaplamalı veya kaplamasız olarak üretilir. Soğuk ve ılık hatlarda kullanıma uygunlardır.

Elastomerik köpüğü: Ekstrüzyon yöntemiyle boru veya levha olarak üretilen bir elastomerik kauçuk köpük malzemesidir. Tesisat yalıtımı için alüminyum folyo kaplamalı veya kaplamasız olarak üretilir. Soğuk ve ılık hatlarda kullanılır.

Cam yünü: Silis kumun yüksek basınç ve sıcaklık altında eritilerek elyaf haline getirildiği bir malzemedir. Farklı yoğunluklarda levha ve boru şeklinde üretilir. Sıcak hatlarda, iklimlendirme ve havalandırma kanallarında kullanılır.

Taş yünü: bazalt ve diabaz taşlarının yüksek sıcaklıkta eritilerek elyaf haline getirildiği bir malzemedir. Farklı yoğunluklarda, levha ve boru olarak üretilir. Sıcak hatlarda, havalandırma kanallarında ve yangın yalıtımında kullanılır.

Ekstrüde polistren köpüğü: Polistiren malzemenin ekstrüzyon yöntemiyle üretilmesiyle oluşan kapalı gözenekli ısı yalıtım malzemeleridir. Farklı yoğunluklarda üretilirler.

Cam köpüğü: Levha ve boru şeklinde üretilen bir yalıtım malzemesidir. Suya ve yüksek basınca karşı dayanıklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle endüstriyel tesislerde borular, tanklar ve yüzeyler için kullanılmakta olup, aynı zamanda stoklama tanklarının taban yalıtımında da tercih edilmektedir.

Refrakter Tuğla: Refrakter tuğla, dayanıklı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir izolasyon malzemesidir. Tuğla şeklinde olduğu için farklı şekillerde kullanılabilir ve fırın içinde yüksek sıcaklıklarda ısıyı yalıtım için kullanılır.



4. DURUM ÇALIŞMASI

Isıl işlem gören parça, sementasyonun amacına uygun olarak süreç boyunca yüzeyindeki karbon kütlesini artırır. Ancak bu artış, karbon oranı %0,2 'den az olan çeliklerin %0,8 ile %1,3 arasındaki bir artış ile sınırlıdır. Bu artışın dışında parçanın kütlesinde bir değişiklik gerçekleşmemektedir. Malzeme kütlesindeki bu artış küçük olduğundan göz ardı edilmiş ve parçanın kütlesi korunuyor kabul edilmiştir. ($\Sigma m = \text{sabit}$). İncelenen operasyon parçanın tavlama ısıl işlemine tabii olduğu adımdır.

Süreç 3 ana adımdan oluşur. Parça önce sertleştirilmek amacıyla tavllanır. Daha sonra soğuması için su verme işlemi görür.

Bu adımdan sonra yüzeyde oluşan çatlakların giderilmesi için menevişleme işlemi yapılır. Isıl işlem görecektir parçanın firmaya girişinden itibaren iş akış aşamaları sırasıyla aşağıdaki şemada (Şekil 2) gösterilmiştir.

Firmaya girişi yapılan parçanın kalite kontrolü gerçekleşmesi için GKK (giriş kalite kontrol) birimine gelir. Buradaki kontroller sonrası parça nihai halini almak üzere dik işlem (freze) bölümünde işlenir. Parçanın istenilen sertliğe ulaşması için önce tavlama fırınında ısıl işlem görür ve daha sonra soğutulması için su verme işlemi uygulanır. Bu aşamadan sonra, parçanın yüzeyinde oluşan martenzit yapıyı gidermek ve işlenebilirliği arttırmak için parça menevişleme fırınında 2 saat bekletilir. Bu işlem ile yüzeydeki gerilimler giderilmiş olur.

Bu çalışmada, öncelikle kütlenin korunumu ilkesi göz önünde bulundurulmuş ve ardından termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarıyla sistemin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımlar kullanılarak enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanmıştır. Yalnızca fırın ünitesi kontrol hacmi olarak seçilmiş ve enerji analizi yapılmıştır.

İşlem, gaz (hava) ve katı (pim) arasındaki eş zamanlı ısı ve kütle transferi nedeniyle izobarik bir işlem sırasında meydana gelir. Endüstriyel kurutma süresi ve sıcaklıkları parçanın ve kapasitesine göre değişmektedir. Genellikle kurutma işlemi 4 ile 16 saat arasında sürer ve kuru ürün %1,23 bağıl nem (su içeriği) olur. Parça sert bir malzemeden üretilmiştir. Ham kalıplarda merkezleme kaçık olmaması amacıyla kullanılmaktadır.

Darbelere dayanıklı olması gerektiğinden kurutma işlemi aracılığıyla sertlik kazandırılır. Kuyu tipi fırın içerisine yerleştirilerek 4 saat boyunca işleme tabii tutulur. Daha sonra hava aracılığı ile soğutulur. Parça fırından çıktığında yüzey sıcaklığı ortalama 125 Cdir. Parçanın fırına girmeden önceki kütlesi ile fırından çıktıktan sonraki kütlesinde değişim gözlenmektedir. Parça fırın içinde bulunan tepsiye yerleştirilir. Dahili fanlar havayı tepsideki parçada gezdirir.

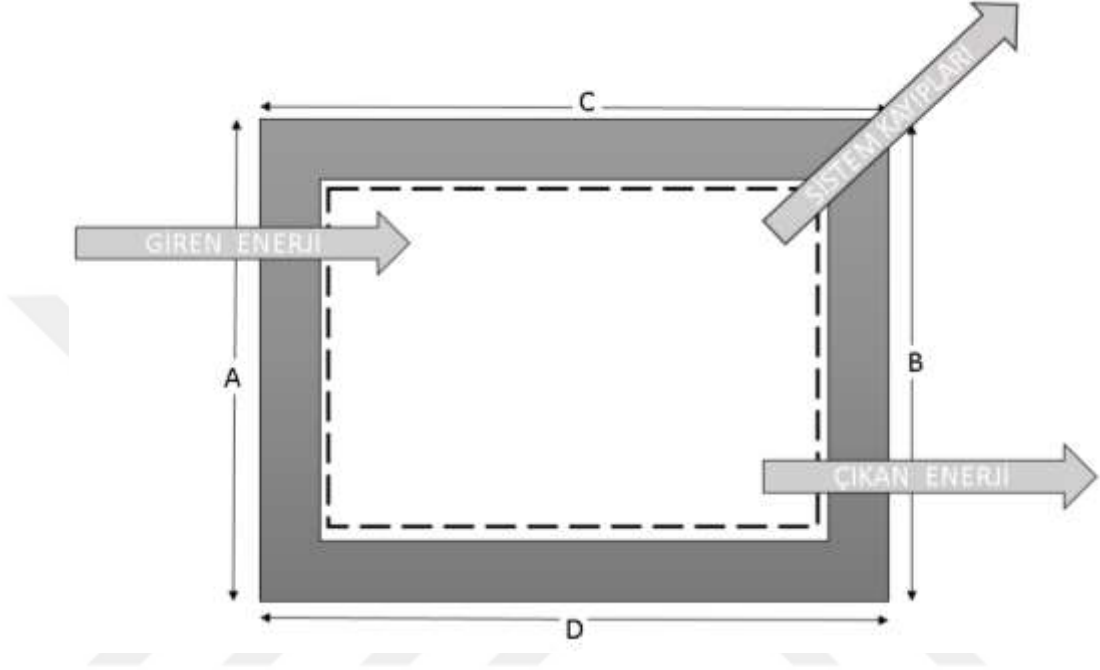
Tavlama işleminde parçanın işlenebilecek şekle erişmesi amacıyla sertleştirilme işlemi gerçekleştirilir. Bu adıma parçanın, tavlama fırının sıcaklığı çok önemlidir. Tavlama fırınının sıcaklığının istenilenden fazla olması parçanın sertlik değerini düşürmektedir. Aynı şekilde fırın sıcaklığı istenilen değerden az olursa parça sertliği gerekenden az olur, işlenebilirliğini düşürür.



Şekil 2- İş Akış Şeması

Yanma odası fırının en önemli kısmıdır. Isı, rezistanslar aracılığıyla üretilir. Yanma odasını oluşturan kısımlar genellikle çevreye olan ısı yayılımını azaltmak için iyi yalıtılmıştır. Bu nedenle ısı yayılımı neredeyse sıfır olarak kabul edilir. Akışkan akımlarının herhangi bir işi, kinetik ve potansiyel enerjilerini yapma katılımı genellikle ihmal edilebilir düzeydedir.

Bu nedenle, analizde yalnızca giriş enerjisi ve çıkış enerjisi dikkate alınmalıdır. Fırın, sabit bir sıcaklıkta süresiz olarak ısı sağlayan bir ısı deposu olarak modellenebilir. Bu ısı enerjisinin ekserjisi, faydalı iş potansiyeli, yani mümkün olan maksimum iş miktarıdır [2] . Şekil 3'te fırının enerji giriş-çıkışları ve sistem kayıpları şematize edilmiştir.



Şekil 3- Enerji giriş-çıkışları ve Sistem kayıpları

Tavlama fırının yüzeylerin, taban ve tavanın yüzey sıcaklıkları ile alanları Tablo 4 ve Tablo 5'te belirtildiği gibidir. Fırın içinde üç ayrı noktadan üç kez ölçüm yapılmış olup hesaplamalar için bu değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda ilgili denklemler aracılığıyla yapılan hesaplamalar ile Tablo 8'deki değerler elde edilmiştir. Isı transferini büyük miktarda arttıracak şekilde girinti çıkıntılar olmadığı için tüm yüzeyler düzgün geometride kabul edilmiştir. Fırın izolasyonu için tuğla, refrakter ve seramik elyaf battaniye kullanılmıştır. Kamara tipi tavlama fırınları sürekli çalışmaya uygundur. Fırın haznesinde hafif ateş tuğlaları ile yalıtım donanımı mevcuttur. Bu tip fırınların ilk ısınma süreleri kısa ve ısı kayıpları az olup verimleri yüksektir.

Tesiste bulunan kamara tipi tavlama fırının ve parçanın görselleri aşağıdaki gibidir. Parçanın ısı işlem öncesi ve sonrası sertlik (HRC) değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 –Isıl işlem öncesi ve sonrası sertlik değerleri

Isıl işlem öncesi sertlik değeri (HRC)	Isıl işlem sonrası sertlik değeri (HRC)
15	45



Şekil 4-a- İşlem Gören Parça



Şekil 4-b- Tavlama Fırını önden görünüş



Şekil 4-c- Tavlama Fırını yandan görünüş



Şekil 4-d- Tavlama Fırını iç görünüş

Hesaplamalar sırasında aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir,

- Manisa'nın Turgutlu ilçesinin son beş yılına ait ort. çevre basınç ve sıcaklık değerleri (ölü hal durumu) $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$ ve $T_0 = 20 \text{ °C}$ olarak kabul edilmiştir.
- Sabit basınçta Özgül ısı değerleri C_{phava} ve C_{pb} sıcaklık değerine göre değişmektedir, hesaplamalar sırasında bu parametreler termodinamik tablolardan elde edilmiştir.
- Gaz sabiti ve buhar sabiti $R_a = 0,287 \text{ kJ/kgK}$; $R_b = 0,4615 \text{ kJ/kgK}$ olarak kabul edilmiştir.
- Ortalama nem değeri $0,45 \text{ kg(su)/kg(hava)}$ Turgutlu'nun aylık ortalama nem değeri olarak alınmıştır.

- Hesaplamaların yapıldığı verilerin ait olduğu ölçüm sırasında fırında işlem gören tüm ürünler aynı ürün grubu içinde ve birbirinin eş ürünlerdir. Ürün giriş sıcaklıkları ortalama 27°C'dir.
- Termokupllar ile elde edilen sıcaklıklar sırasıyla; Fırın içindeki kuru hava sıcaklığı 200 C°, Nemli hava sıcaklığı 88 C°, ürünün fırına giriş sıcaklığı 27 C° ve ürünün fırından çıkış sıcaklığı 125 C° olarak ölçülmüştür.
- Isıl işlemin ve kimyasal reaksiyonların kinetik ve potansiyel enerji etkileri göz ardı edilmiştir.
- İşleme sırasında radyan ısı kaybı göz ardı edilmiştir.
- Hesaplamalarda 2022 yılının eylül-ekim-kasım-aralık ayına ait gerçek veriler kullanılmıştır.
- Kimyasal reaksiyonlar ihmal edilmiştir.
- Kinetik ekserji, kimyasal ekserji ve potansiyel ekserji ihmal edilmiştir.
- Sürtünme kayıpları göz ardı edilmiştir.
- Özgül ısı, özgül kütle değerleri ve termodinamik tabloları kaynak kitaplardan alınmıştır [2].
- Hammadde özgül ısı değerleri ilgili tedarikçilerden kişisel iletişimlerle sağlanmıştır.
- Parçanın özgül sıcaklığı $C_{\text{çelik}} = 0,45 \text{ kJ/kgK}$
- Fırın elektrik ile çalışmaktadır.
- Kurutma işlemi kararlı durum olarak varsayılmıştır.

5. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu kısımda fırına giren ve çıkan maddeler arasındaki kütle denge analizi yapılmıştır. T_0 , P_0 , sırasıyla 23°C (295K) ve 101.325 kPa olarak alınmıştır. Bu aşamada hesaplamalar yapılırken kullanılan formüller aşağıda tanımlanmıştır.

Ekserji yöntemi, atıkların ve kayıpların konumlarının, türlerinin ve gerçek büyüklüklerinin belirlenmesini sağladığından, daha verimli enerji kaynağı kullanımı hedefine yardımcı olur. Bu nedenle ekserji analizi, mevcut verimsizliklerin kaynaklarını azaltarak daha verimli termal sistemler tasarlamının mümkün olup olmadığını ve ne kadar mümkün olduğunu ortaya çıkarır [64].

5.1. Ekserji Ve Enerji Kavramları

Ekserji özelliği, belirli bir çevrede bulunan bir sistemin iş potansiyelidir ve sistemin, çevre ile dengeye gelmesiyle elde edilebilen en fazla yararlı iş miktarını gösterir. Termodinamiğin birinci yasası, yalnızca enerji kayıplarını ve kaynakların etkin kullanımını tanımlayan enerji analizini içerir. Ancak termodinamiğin ikinci yasası, tersinmezlikleri de dahil ederek entropi kısmını dikkate alır [65]. Ekserji, çevresiyle dengede belirli bir son durumda olduğu gibi maksimum faydalı işin bir ölçüsüdür. Ekserji yıkımı, performans kaybının kaynağı olan tersinmezliğin bir ölçüsüdür [66]. Herhangi bir gerçek süreçteki tersinmezlikler nedeniyle ekserji tüketilebilir veya yok edilebilir. Bir işlem sırasındaki ekserji tüketimi, işlemle ilişkili tersinmezliklerden dolayı oluşan entropi ile orantılıdır. Sektörel enerji kullanımında ekserji analizinin ve ekserjinin enerji faaliyetlerindeki rolünün çok önemli olduğu vurgulanabilir [11]. Enerji farklı biçimlerde bulunur (ısı veya iş) ve enerji bir nicelik ölçüsüdür. Bir enerji kaynağı yalnızca miktarına göre değerlendirilemez. Termal enerji için Carnot verimi işe dönüştürülebilen enerjiyi gösterir [11]. Ekserji analizi incelenen sürecin termodinamik eksiklikleri nedenlerini tespit etmek ve nicel olarak değerlendirmek için kullanılır [16]. Dolayısıyla ekserji analizi, sürecin termodinamik açıdan nasıl iyileştirilebileceğini belirleyebilir. Ekserji analizi, enerji kaynaklarının kullanımında önemli bir yere sahiptir. Ekserji analizi bir bakımdan enerji analizinin bir parçasını oluşturur çünkü temelde mevcut enerji analizi teorisi bulunmaktadır. Ekserji, mevcut enerji ve erişilebilirlik kavramları açısından temelde benzerdir [18].

5.2. Kütlenin Korunumu, Enerji Ve Ekserji Eşitlikleri Denklemleri

Bir kapalı sistem için kütlenin korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\chi \quad (1)$$

Burada $\dot{m}_g$ sisteme giren kütle akışını, $\dot{m}_\chi$ ise sistemden çıkan enerji akışını temsil etmektedir.

Diğer kütle korunumu eşitlikleri [64];

$$\text{Hava } \dot{m}_a = \dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} \quad (2a)$$

$$\text{Ürün } \dot{m}_p = (\dot{m}_p)_3 = (\dot{m}_p)_4 \quad (2b)$$

Genel enerji denklemi aşağıda gösterildiği şekilde giren toplam enerjinin çıkan toplam enerjiye eşit olarak ifade edilir [64];

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\chi \quad (3a)$$

$$\sum \dot{m}_g h_g = \sum \dot{m}_\chi h_\chi \quad (3b)$$

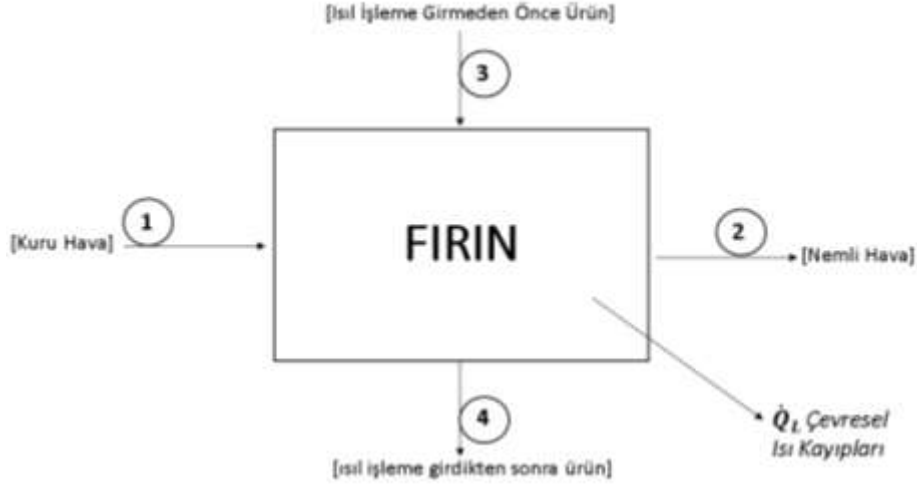
$$(\dot{m}_a)_1 h_1 + (\dot{m}_p)_3 h_{p3} = \dot{m}_{a_2} h_2 + (\dot{m}_p)_4 h_{p4} + \dot{Q}_L \quad (3c)$$

$$h_1 = (h_a)_1 + w_1 h_{v_1} \text{ ve } h_2 = (h_a)_2 + w_2 h_{v_2} \quad (3d)$$

Burada h_1 ve h_2 psycometric tablodan bulunabilir. Fırın iç kısmındaki ısı kaybı oranı genel olarak Newton'un soğutma yasası kullanılarak yazılırsa [64];

$$\dot{Q}_L = UA(T_{Cw} - T_\infty) \quad (4)$$

Burada T_{Cw} fırının iç duvarlarını T_∞ ise fırının yüzey sıcaklığını temsil etmektedir. U Fırın duvarlarında gerçekleşen ısı transferi katsayısıdır [64];



Şekil 5- Fırının sistemi (1) giren kuru hava, (2) çıkan nemli hava, (3) ürün, (4) ısınan ürün,

Ürün ısıtma prosesi: (1) – (2) ve (3) – (4) tüm sistem: (1) – (2); (3) – (4) ve $\dot{Q}_L$

Genel Ekserji oranı eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\sum \dot{E}_{x_g} - \sum \dot{E}_{x_\varphi} = \sum \dot{E}_{x_{dest}} \quad (5a)$$

Daha ayrıntılı yazmak gerekirse;

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_L - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi = \sum \dot{E}_{x_{dest}} \quad (5b)$$

Burada $\dot{Q}_L$ fırının dış yüzeyinde T_k sıcaklığında sınırı geçen ısı transfer kayıp oranıdır. $\dot{W}$ iş oranı, ψ ekserji akışı, h entalpi, s entropi ve P_0 ve T_0 ölü haldeki özellikleri gösterir.

Genel termal sistem için özgül ekserji ve ekserji oranları aşağıdaki gibi tanımlanabilir [64];

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \text{ ve } \dot{E}_x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (6a)$$

Sıkıştırılmaz bir maddenin ekserjisi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\psi = C(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0}) \quad (6b)$$

Burada C özgül ısıdır.

Havanın toplam ekserji akışı denklem (6c) den hesaplanır;

$$\psi_a = \left[(C_{pa} + \omega C_{pv})(T - T_0) - T_0 \left[(C_{pa} + \omega C_{pv}) \ln \frac{T}{T_0} - (R_a + \omega R_v) \ln \frac{P}{P_0} \right] \right] + T_0 \left[(R_a + \omega R_v) \ln \left[\frac{(1 + 1.6078 \omega_0)}{(1 + 1.6078 \omega)} + 1.6078 \omega R_a \ln \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \right] \quad (6c)$$

Özgül nem oranı

$$\omega = \dot{m}_w / \dot{m}_a \quad (7)$$

T_0, P_0 , sırasıyla 22°C (295 K) ve 101.325 kPa alınan referans sıcaklık ve atmosfer basıncıdır.

Tavlama (menevişleme) işlemi sabit atmosfer basıncında gerçekleşir, dolayısıyla P 'nin P_0 'a eşit olduğu kabul edilmiştir. Su ve ısıtılmış su, ürün ve havanın belirli ekserji oranlarını tanımlamak için Denklemler (6a) – (6c) kullanılarak çözümleme yapılır.

Ekserji yıkımı, entropi üretimi $\dot{S}_{gen}$ hesaplandıktan sonra aşağıdaki eşitlik yazılır [64];

$$\dot{I} = \dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (8)$$

Figüre 1’de gösterilen sistemin giren ve çıkan verilere göre enerji dengesi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Dincer and Sahin, 2004);

$$\dot{m}_{a1}\psi_1 + \dot{m}_{p3}\psi_{p3} + \dot{m}_{a2}\psi_2 + \dot{m}_{p4}\psi_{p4} + \dot{E}x_L + \dot{E}x_{dest} \quad (9)$$

Tavlama (menevişleme) işleminin enerji verimliliği şu şekilde tanımlanabilir (Dinçer ve Şahin, 2004);

$$\eta_{dp} = \text{Katıya iletilen enerji/Kurutma havasında bulunan enerji} \quad (10a)$$

$$\eta_{dp} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) / \dot{E}_1 \quad (10b)$$

ya da

$$\eta_{dp} = (\dot{E}_3 - \dot{E}_4) / \dot{E}_1 \quad (10c)$$

$$\eta_{s,s} = \Sigma \dot{E}_{çıkan} / \Sigma \dot{E}_{giren} = (\dot{E}_2 + \dot{E}_4) / (\dot{E}_1 + \dot{E}_3) \quad (10d)$$

Ekserji verimliliğini, toplam ekserji çıktısının toplam ekserji girdisine oranı olarak tanımlayarak aşağıdaki denklem yazılır [64];

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_g} \quad (11a)$$

Burada ‘‘çıkan’’ ifadesi net çıktı anlamına veya ‘‘ürün’’, ‘‘istenen değer’’ anlamına gelir. ‘‘giren’’ ise ‘‘verilen’’ veya ‘‘kullanılan’’ anlamına gelir [64].

Ekserji genellikle enerji olarak korunmaz, sistemde yok edilir. Ekserji yıkımı, performans kaybının kaynağı olan tersinmezliğin ölçüsüdür. Ekserji kullanımının sisteme sağlanan sıcak havanın ekserjisine oranı olarak herhangi bir fırın sistemi için ekserji verimliliği aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\varepsilon_{dp} = \frac{(\dot{m}_w)_{ev}(\psi_{v2} - \psi_{w3})}{\dot{m}_{a,1}\psi_1} \quad (11b)$$

$$(\dot{m}_w)_{ev} = \dot{m}_{w3} - \dot{m}_{w4} \quad (11c)$$

Özet olarak ekserji verimliliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\varepsilon_{sis} = 1 - \frac{\dot{E}x_{loss} + (\Sigma \dot{E}x_{dest})}{\Sigma \dot{E}x_{in}} = 1 - \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_{a_i}} \right) \dot{Q}_L + \frac{(\dot{E}x_{dest_A} + \dot{E}x_{dest_P})}{(\dot{E}x_{A_1})} + \dot{E}x_{P_3} \right] \quad (11d)$$

Hava akısında harcanan ekserji şu şekilde ifade edilir [64];

$$\dot{E}x_{dest_A} = (\dot{E}x_{H_i}) - (\dot{E}x_{H_o}) \quad (11e)$$

Üründe harcanan ekserji ve ısıtılan su akışı (çevreye yapılan ısı transferini ihmal ederek) şu şekilde değerlendirilir [43];

$$\dot{E}x_{dest_P} = (\dot{E}x_{P_i}) - (\dot{E}x_{P_o}) \quad (11f)$$

Fırının genel enerji verimliliği aşağıdaki formül kullanılarak elde edilebilir [37]:

$$\eta_F = \frac{\dot{Q}_f}{m_y h_y} \quad (12)$$

Tavlama fırını, ısının tavlama odasına girdiği rezervuar olarak kabul edilir. Tavlama odasındaki sıcaklık dikkatlice kontrol edilir. Analizlerde, tavlama odasının sıcaklığı, tavlama işleminin ortalama sıcaklığı olarak kabul edilir. Fırını ısı motoru olarak ele alırsak, enerji verimliliği (ısı verim) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [37].

$$\eta_{Ac} = 1 - \frac{T_{f,i}}{T_f} \quad (13)$$

Enerji farklı biçimlerde bulunur (örneğin, ısı veya iş) ve enerji bir nicelik ölçüsüdür. Bir enerji kaynağı sadece miktarına göre değerlendirilemez. Enerjinin kalitesinin bir ölçüsü, belirli bir ortamdaki enerjinin iş potansiyeli olan ekserjisidir. Termal enerji için Carnot verimliliği, enerjinin işe dönüştürülebilen kısmını temsil eder [55].

Tavlama odasının ekserji yıkımı (destruction) oranı aşağıdaki Denklem ile hesaplanabilir:

$$\dot{I}_f = \dot{m}_p(\varepsilon_p - \varepsilon_g) - \left(1 - \frac{T_{f,i}}{T_f} \right) \dot{Q}_f \quad (14)$$

5.3. BELİRSİZLİK HESABI

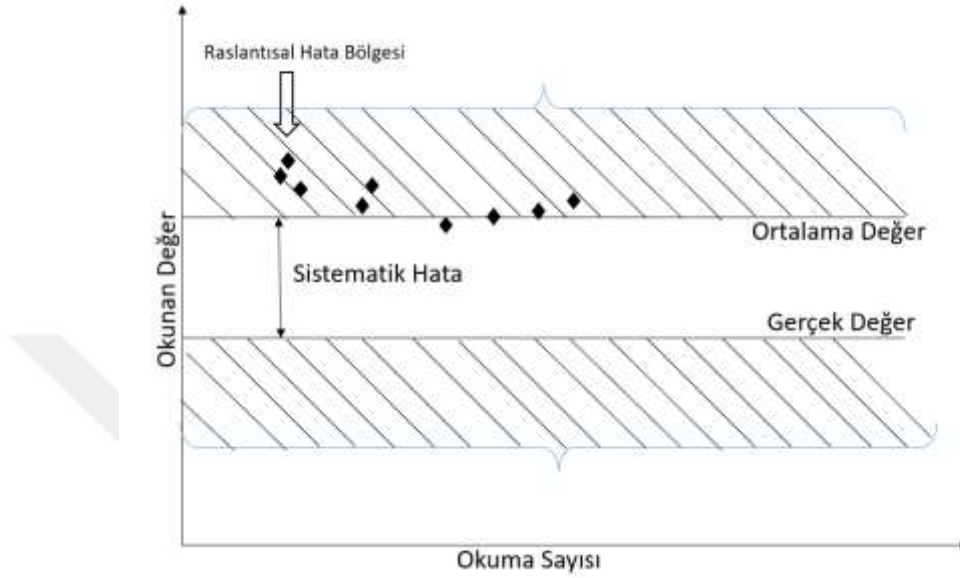
5.3.1 Belirsizlik Hesabı Ve Hata Analizi

Belirsizlik hesaplamaları, bir değerin bulunması için yapılan ölçümlerdir. Deneysel sonuçların geçerliliğinin belirlenebilmesi için mutlaka bir hata analizi yapmak gerekmektedir. Ölçüm işleminde öncelikli olarak, ölçülecek nicelik, ölçüm metodu ve ölçüm işlemi tanımlanmalıdır [67]. Tekrarlanan gözlemlerdeki farklılıklar, ölçüm sonucunu etkileyen fakat ölçülemeyen faktörler nedeniyle meydana geldiği kabul edilir [67,68].

Yapılan ölçümlerdeki kesinliğin tam olarak sağlanamaması nedeniyle, ölçüm sonucu küçük de olsa hata içerebilir Deneysel hata, ölçülen iki değerin arasındaki farktır. Deneysel hata doğruluk ve kesinlik ile tespit edilir. Doğruluk ise, ölçülen değerin doğru değere ve kabul edilen değere ne kadar yakın olduğunun belirteçidir. Kesinlik, iki veya daha fazla ölçümün birbirlerine ne kadar yakın olduklarının ölçütüdür. Fiziksel bir niceliğin doğru değeri veya kabul edilen değeri bilinmediğinde, bazı durumlarda ölçümün doğruluğunu belirlemek mümkün olmayabilir [68].

Hata, rastgele hata ve sistematik hata olarak ikiye ayrılır [69]. Sistematik hatalar ölçüm doğruluğunu etkileyen hatalardır. Sistematik hatalar, ölçüm cihazının kalibrasyonundan, insan hatasından, cihazın durumundan, ölçüm tekniği ve ölçüm işleminden kaynaklanır. Sistematik hatadan kaynaklanan ölçüm hatası gözlem sayısını arttırmakla yok edilememektedir ve istatistik yöntemlerle incelenmesi basit değildir. Sistematik hataların ölçüm sonucuna etkisinin belirlenmesi oldukça zordur, ancak doğru ölçüm yöntemi veya ölçüm tekniği ile iyileştirerek etkisi ve değeri düşürülebilmektedir. Rasgele hatalar, ölçüm kesinliğini etkileyen hatalardır. Rasgele hatalar tekrarlanan ölçümlerde sonuç, doğru veya kabul edilen değerin etrafında değişir. Tanımlanamayan ve kontrol edilemeyen birbirinden bağımsız etkiler ve/veya çevre nedeniyle ölçüm sonucu tekrarlanan gözlemlerde farklılık gösterir.

Rasgele hataya bağlı olarak ölçüm kesinliği, gözlem sayısını arttırarak iyileştirilebilir ve bu tip hatalar, istatistiksel yöntemlerden yararlanılarak incelenebilir. Bu hata tipinde de ölçüm yöntemi, ölçüm tekniği iyileştirilip gözlem sayısı arttırılarak rasgele hatalar daha küçük değerlere indirilebilir [68].



Şekil 6- Belirsizlik Grafiği

Herhangi bir deney için tespit edilmesi yani hesaplanması gereken büyüklük R olsun. Bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda aşağıdaki hesaplama takip edilecektir [69].

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (16)$$

Her bir bağımsız değişkene ait sabit hata (belirsizlik) $\pm w_{x_1}, \pm w_{x_2}, \pm w_{x_3}, \dots, \pm w_{x_n}$ ile ifade edilir. Bu durumda R büyüklüğünün sabit hata miktarı (belirsizliği) $\pm w_{x_R}$ ise;

$$W_R = \left[\left[\frac{R}{x_1} w_{x_1} \right]^2 + \left[\frac{R}{x_2} w_{x_2} \right]^2 + \left[\frac{R}{x_3} w_{x_3} \right]^2 \dots \dots \dots \left[\frac{R}{x_n} w_{x_n} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

5.3.1.1 Su Isı Geçişi İçin Belirsizlik Hesabı

Su tarafında olan ısı geçişi;

$$\dot{Q}_L = UA(T_{cw} - T_{\infty}) \equiv \rho_s \dot{V}_s C p_s (T_{sg} - T_{s\zeta}) \text{ Denklemi ile hesaplanır.}$$

Bu denklem ile yola çıkıldığında;

$$\frac{W_{QL}}{Q_L} = \left[\left(\frac{W_p}{\rho_s} W_{QL} \right)^2 + \left(\dot{v}_s \right)^2 + \left(\frac{W_{Cps}}{W_{Cps}} W_{QL} \right)^2 + \left(\frac{W_{TSg}}{W_{TSg} - W_{TSç}} W_{QL} \right)^2 + \left(- \frac{W_{TSç}}{W_{TSg} - W_{TSç}} W_{QL} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Elde edilir.

5.3.1.2 Hava Isı Geçişi İçin Belirsizlik Hesabı

Hava tarafında olan ısı geçişi;

$$\dot{Q}_h = UA(T_{CW} - T_{\infty}) = \rho_n V_n (ab) C_{ph} (T_{hç} - T_{hg}) \text{ Denklemi ile hesaplanır.}$$

Bu denklem ile yola çıkıldığında;

$$\frac{W_{Qh}}{Q_h} = \left[\left(\frac{W_{ph}}{\rho_h} W_{Qh} \right)^2 + \left(\frac{W_{vh}}{V_h} W_{Qh} \right)^2 + \left(\frac{W_a}{a} W_{Qh} \right)^2 + \left(\frac{W_b}{b} W_{Qh} \right)^2 + \left(\frac{W_{Cph}}{C_h} W_{Qh} \right)^2 + \left(- \frac{W_{Thg}}{T_{hç} - T_{hg}} W_{Qh} \right)^2 + \left(\frac{W_{Thç}}{T_{hç} - T_{hg}} W_{Qh} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Elde edilir.

Bu çalışmada termofiziksel özelliklerin belirsizliği hesaplanan değerin %5'i olarak alınmıştır. Geometrik parametrelerin belirsizliği hesaplanan değerinin %2'si olarak ele alınmıştır. Buradan hava için $\dot{Q}_h$ hesaplanacak olursa;

Tablo 3- Ölçülen değerler

ρ_n	$1,28 \frac{kg}{m^3} \pm 0,02$
V_n	$0,21 \pm 0,02$
C_{ph}	$1,005 \pm 0,05$
$T_{hg} - T_{hç}$	$68^\circ C \pm 0,05$
Alan	$0,928 m^2 \pm 0,02$

Tablo 3'teki bilgiler ile hesaplama sonucu $W_{Qh} = 0,29907 \text{ kW}$ ve $\%W_{Qh}$ ise $\% \pm 2,270$ olarak bulunmuştur.

5.3.2 SAT & TUS Testi

Fırınlarda sistemin tasarım gereksinimlerine ve beklentilere uygun olarak çalışıp çalışmadığını doğrulamak için ve fırın içinde sıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek amacıyla SAT ve TUS testleri yapılmaktadır [70].

Fırının stabilizasyonu, güven, verim vb. birçok kriter ile incelenmesi bu testler aracılığıyla sağlanmaktadır. TUS/SAT testleri, sürdürülebilirliği ve envantere olan güveni artırır. Bu testler, CQI-9, AMS2750E ve diğerleri gibi çeşitli ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak ve müşterilerin isteklerine göre yapılır. Aşağıdaki alt başlıklarda bu kavramlar ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

5.3.2.1 Sıcaklık Homojenlik Testi (TUS)

Günümüz şartlarında, havacılık, otomotiv, savunma sanayi gibi sektörlerde ısıtma işlemi hata paylarını yok etmek için dünya genelinde kabul edilmiş CQI-9 ve AMS 2750E gibi standartlara uygun olarak fırınlara Homojenlik Testi yani bir diğer adı ile TUS testi yapılmaktadır [70]. "Thermal utility system testi" terimi genellikle bir binanın veya tesisin ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek amacıyla yapılan bir testi ifade edebilir. Bu tür bir test, enerji verimliliğini artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve çevresel etkileri minimize etmek amacıyla gerçekleştirilir.

TUS/SAT testleri, üretimin tekrarlanabilirliğini sağlamak, müşteri gereksinimlerini karşılamak, sıcaklık sabitliğinin doğrulanması, müşteri şikâyet miktarını azaltmak, sıcak ve soğuk nokta tespiti ile önleyici bakım amacıyla gerçekleştirilir.

TUS testi (Thermal utility system testi) yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilir:

- 1. Adım Veri Toplama ve Analiz:** bu ilk adımda amaç sistemin mevcut ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerinin verilerini toplamak ve analiz etmektir. Bu adım, mevcut enerji tüketimi, sistem bileşenleri ve işletim durumu hakkında bilgi sağlar.
- 2. Adım Sistem Kontrolleri ve Performans Değerlendirmesi:** Sistem testi, ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerinin performansını değerlendirmeyi içerir. Sistemdeki kontrollerin doğru çalışıp çalışmadığı, sıcaklık ve basınç değerleri, enerji tüketimi gibi faktörler incelenir.
- 3. Adım Verimlilik İyileştirmeleri:** Mevcut sistemdeki eksiklikler, düşük verimlilik noktaları ve enerji kayıpları belirlenir. Bu veriler göz önünde bulundurularak sistemde iyileştirmeler yapmak için öneriler üretilir ve çözüm yolları geliştirilir.

- 4. Adım Ekipman Değerlendirmesi:** Gelişen teknoloji ve daha verimli donanımlar göz önüne alınarak, mevcut sistemdeki bileşenlerin, ekipmanların yenilenmesi veya güncellenmesi ihtiyacı değerlendirilir.
- 5. Adım Maliyet Analizi:** Sistemde yapılacak değişikliklerin enerji tasarrufuna nasıl etki edeceği simülasyonlarla değerlendirilir. Aynı zamanda, maliyet analizi yapılır ve yatırımın ne kadar sürede geri döneceği hesaplanır.
- 6. Adım Uygulama ve İzleme:** Önerilen iyileştirmeler uygulanır ve sonrasında sistemin performansı izlenir. Enerji tüketimi, verimlilik ve maliyetlerdeki değişimler takip edilir. Dönmez Debriyaj bünyesindeki fırınlarda dışarıdan bir kuruluş aracılığıyla TUS testleri gerçekleştirilmektedir.

5.3.2.2 Sistem Doğruluk Testi (SAT)

Sistem doğruluk testleri, bir tasarım gereksinimlerine uygunluğunu teyitlemek için olası senaryoları simüle ederek, potansiyel hataları tespit etmeyi ve düzeltmeyi amaçlar. Bu testler, bir sistemin işlevselliğini, güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek için kullanılır. Sistem doğruluk testi, aynı zamanda sistemin performansını ve güvenilirliğini artırmayı hedefler [70].

Sistem doğruluk testi, genellikle aşağıdaki adımlardan oluşur:

- 1. Adım Test Stratejisinin Belirlenmesi:** Bu aşamada, test stratejisi belirlenir. Kullanılacak test yöntemleri ve senaryolar planlanır. Testin hedefleri ve kapsamı netleştirilir. Test stratejisi, sistemin özelliklerine, karmaşıklığına ve tasarım gereksinimlerine uygun olarak oluşturulmalıdır.
- 2. Adım Test Senaryolarının Oluşturulması:** Test senaryoları, farklı durum ve koşullarda sistemin nasıl davrandığını anlamak için kullanılır. Bu senaryolar, gerçek dünya kullanımını yansıtmalıdır. Senaryoların oluşturulması, sistemin farklı yönleri ve bileşenleri üzerinde kapsamlı bir inceleme gerektirir.
- 3. Adım Test Ortamının Hazırlanması:** Testin yapılacağı ortam, donanım ve yazılım gereksinimleri doğrultusunda hazırlanır. Gerçek ortam koşullarını simüle edebilecek bir test ortamı sağlanması bu adımda çok önemlidir. Bu adım, testin güvenilir sonuçlar üretmesi için hayati öneme sahiptir.
- 4. Adım Testin Uygulanması:** Hazırlanan test senaryoları, belirlenen test ortamında uygulanır. Sistem, farklı senaryolara maruz bırakılarak test edilir.

Test senaryolarının sisteme uygulanması, sistemin istenilen performansı gösterip göstermediğini değerlendirmeyi sağlar.

- 5. Adım Sonuçların Değerlendirilmesi:** Bu adımda Test sonuçları analiz edilir. Sistemin tasarım gereksinimlerine uygun olarak çalışıp çalışmadığı ve potansiyel hataların varlığı değerlendirilir. Sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesi, sistemin güvenilirliği ve performansı hakkında bilgi sağlar.
- 6. Adım Raporlama ve Düzeltme:** Elde edilen sonuçlar raporlanır. Eğer test sonuçları, tasarım gereksinimlerine uygun değilse, gerekli düzeltmeler ve iyileştirmeler yapılır, sistemin optimize edilerek istenilen performans ve güvenilirlik seviyesine ulaştırılmasını sağlar.

Sistem Doğruluk Testi (System Accuracy Test), sistemin tasarım gereksinimlerine uygun olarak çalışıp çalışmadığını belirlemek ve tasarım hatalarını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilir. Her adımın dikkatle planlanması ve uygulanması, sistemin başarılı bir şekilde doğrulanmasını sağlar [70].

5.3.3 Ölçüm Cihazları Özellikleri Ve Hata Oranları

Doğruluk kavramının, iki önemli bileşeni, tekrarlanabilirlik ve çözünürlüktür. Tekrarlanan ölçüm sonuçlarındaki kararlılık, tekrarlanabilirlik olarak adlandırılır. Düzenli kalibrasyon yapılarak ölçüm cihazlarının tekrarlanabilirliği sağlanır. Bir aletin kalibrasyonunun yapılması için üç ana neden gösterilebilir;

- Ölçü aleti tarafından ölçülen değer, diğer ölçüm değerleri ile tutarlılığının ispatlanması.
- Ölçü aletinin, ölçüm değerlerinin doğruluğunun tespiti,
- Ölçü aletinin ölçüm güvenilirliğini sağlamak.

Tavlama fırınlarında termokupl seçimi, kullanılan sıcaklık aralığı, hassasiyet gereksinimleri ve uygulama türüne göre değişmektedir. Ölçülen verilerdeki okuma hatalarını en aza indirmek için termokupl ile ölçümler üçer kez tekrarlanmıştır. Fırın yüzey sıcaklık ölçümü için CEM DT-836 dijital termometre ve ELIMKO E80 tip ve E-MI04-1K30 termokupl kullanılmıştır.

Bu tip termokupllar Uzun tünel fırınlarda araba altı sıcaklığını takip etmek için veya bir fırının sıcaklık profilini çıkarmak için kullanılmaktadır. E-RHT-10 seri bağıl nem ve sıcaklık transmitteri kullanılmıştır. Kullanılan termokupllar ve transmitterler EMF karakteristikleri DIN 43710 ve IEC 584 standartlarına uygundur. Bu termometrede K

ve J tipi termokupllar ile ölçüm yapılabilmektedir. Termokupl ile -50 ve +1350 °C arası ölçüm alınabilmektedir. Bu termometrenin çözünürlüğü 0,1 °C veya 1 °C olarak ayarlanabilmektedir. Termometre kullanılmadan önce kalibrasyon yapılmıştır. Fırın içindeki nemlilik oranını belirlemek için DewPro nem transmidi teri ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçülen değere ait belirsizlikler Tablo 5 ve Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 4- Ölçüm Cihazları

Ölçüm Cihazları			
Cihaz adı	Ölçme türü	Birimi	(%) Oran
Termokupllar	Sıcaklık	°C	% ± 1,5
CEM DT-836	Sıcaklık	°C	0,2
E-RHT-10	Nem Transmitteri	-	% ± 2

Tablo 5- Ölçülen Değerlere Ait Belirsizlikler

Ölçülen Değer	Birim	Toplam Belirsizlik
Hava giriş sıcaklığı	°C	± 0,15
Hava çıkış sıcaklığı	°C	± 0,15
Ürün giriş sıcaklığı	°C	± 0,15
Ürün çıkış sıcaklığı	°C	± 0,15
Fırın içi bağıl nem değeri	%	± 2,0

Tablo 6- Türetilen Nicelikler

Nicelik	Birim	Toplam Belirsizlik (%)
Enerji akımı	kW	± 0,95
Ekserji akımı	kW	± 0,86
Ekserji verimi	ε	± 0,81
Enerji verimi	η	± 1,2

5.4. Termodinamik Parametreler

Tavlama fırının sistem performans ölçümü ve iyileştirilmesi için yapılan değerlendirmelerde termodinamik parametreler de göz önünde bulundurularak yorumlar yapılmıştır [18, 26].

Eksergetik Faktör,

$$\xi_i = F_i / F_{\text{Toplam}} \quad (19)$$

Yakıt Tüketim oranı,

$$\delta i = \frac{F_i}{F_{\text{toplama}}} \quad (20)$$

Relatif tersinmezlik;

$$X_i = \frac{i_i}{i_{\text{Toplam}}} \quad (21)$$

Verimlilik eksikliği;

$$\varepsilon_i = \frac{i_i}{\dot{P}_{\text{Toplam}}} \quad (22)$$

İyileştirilebilirlik Potansiyeli;

$$IP = (1 - \varepsilon) \times (\dot{E}x_{\text{giriş}} - \dot{E}x_{\text{çıkış}}) \quad (23)$$

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tavlama fırınında, parçada oluşmuş kırılğan yapıyı gidermek amacıyla yapılan işlemler ve süreç boyunca giren-çıkan ısı, kayıplar ve fırının ekserji & enerji analizleri hesabı bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Kuru hava + su (buhar) fırına Durum 1'i, nemli hava ve çıkan su buharı Durum 2'yi, yaş ürün ve su Durum 3'ü, kuru ürün ve serbest su Durum 4'ü temsil etmektedir.

Tablo 7'te fırının yüzey alanları verilmiştir. Tablo 8, ısıtma işlemi görecektir Parçanın ısıtma işlemi öncesi ve sonrası yüzey sıcaklığı verilmiştir. 3 ayrı ölçüm yapılmış olup bu ölçüm sonuçlarının ortalaması analizlerde kullanılmıştır.

Tablo 7- Fırın Yüzey Alanları

Yüzey	Alan
Sol Yan yüzey (A)	120cmx90cm= 10800 cm ²
Sağ yan yüzey (B)	120cmx90cm= 10800 cm ²
Tavan (C)	95cmx90cm= 8550 cm ²
Taban (D)	95cmx90cm= 8550 cm ²
Kapı	96cmx80cm= 7680 cm ²

Tablo 8- Parça Sıcaklıkları

	Ölçüm 1 (°C)	Ölçüm 2 (°C)	Ölçüm 3 (°C)	Ortalama (°C)
Parça yüzey sıcaklığı (ısıtma işlemi öncesi)	26.2	26.3	26.2	26.23
Parça yüzey sıcaklığı (ısıtma işlemi sonrası)	140	115	120	125

Tablo 9 ve Tablo 10'da ısıtma fırının ısıtma işlemi öncesi ve ısıtma işlemi sonrası yüzey sıcaklıkları verilmektedir.

Tablo 9-Isıtma İşlemi Öncesi Fırın Yüzey Sıcaklıkları

	Ölçüm 1 (°C)	Ölçüm 2 (°C)	Ölçüm 3 (°C)	Ortalama (°C)
Sol Yan yüzey	72	73	75,2	72,8
Sağ yan yüzey	66	60,8	75	67,2
Tavan	78,2	76	75	76.4
Taban	117	150	141	136

Tablo 10-Isıl İşlem Sonrası Fırın Yüzey Sıcaklıkları

	Ölçüm 1 (C°)	Ölçüm 2 (C°)	Ölçüm 3 (C°)	Ortalama (C°)
Sol Yan yüzey	264	234.7	201.3	233,3
Sağ yan yüzey	240	230.10	165,1	211,7
Tavan	116,03	122,4	104,5	114,3
Taban	100	55,06	65,3	73,4

Tablo 11- Analizde Kullanılan Termal Veriler

Kuru hava sıcaklığı	200 C°
Nemli hava sıcaklığı	88 C°
Ürün kütle akışı	1.02 kg/s
Ürün giriş sıcaklığı (ort)	27 C°
Ürün çıkış sıcaklığı (ort)	125 C°
Ürünün özgül sıcaklığı (C_{p_p})	0,45 kJ kg ⁻¹ K
Havanın özgül sıcaklığı (C_{p_a})	1.005 kJ kg ⁻¹ K
Buhar girişi özgül ısısı (C_{p_v})	1.8723 kJ kg ⁻¹ K
Buhar çıkış özgül ısısı (C_{p_v})	1.8108 kJ kg ⁻¹ K
Gaz sabiti R_a	0,29 kJ kg ⁻¹ K
Buhar sabiti R_v	0,46 kJ kg ⁻¹ K
Basınç (P)	101,33 kPa
Kurutma yüzey alanı (A)	0.9276 m ²
Referans durumda havadaki su buharının nem oranı ω_0	0,45 kg _{su} kg _{hava} ⁻¹
Özgül nemlilik oranı ω	0,48 kg _{su} kg _{hava} ⁻¹

Tablo 12- Ekserji- Enerji Hesaplamaları

<i>Durum No</i>	<i>Akış Tipi</i>	<i>Sıcaklık C° / K</i>		<i>Basınç kPa</i>	<i>Özgül Entalpi kJ/kg</i>	<i>Özgül Entropi kJ/kg K</i>	<i>m Kg/s</i>	<i>Enerji (kW)</i>	<i>Özgül ekserji Ψ kJ/kg</i>	<i>Ekserji oranı EX (kW)</i>
0	W	20	293	101,325	83,9	0,30	-	-		-
0	A	20	293	101,325	5,28	-	-	-		-
0	P	20	293	101,325	130,09	0,44	-	-		-
0	V	20	293	101,325	2537,4	8,67	-	-		-
1	A+V	200	473	101,325	472,24	-	0,21	98,06	71,62	15,04
	V	200	473	101,325	2792	6,43	1,00E-03	0,26	75,41	0,08
2	A+V	88	361	101,325	360,58	-	0,21	74,61	9,30	1,95
	V	88	361	101,325	2659,6	7,47	1,00E-03	2,65	22,48	0,02
3	P+W	50	398	101,325	187,86	-	0,202	11,66	7,70	1,55
	W	50	398	101,325	524,83	1,58	1,00E-03	0,44	186,30	0,18
4	P+W	27	300	101,325	133,2	-	0,2023	0,629	0,90	0,18
	W	27	300	101,325	115,28	0,40	1,00E-03	0,03	157	0,15

Tablo 13-Sonuçlar

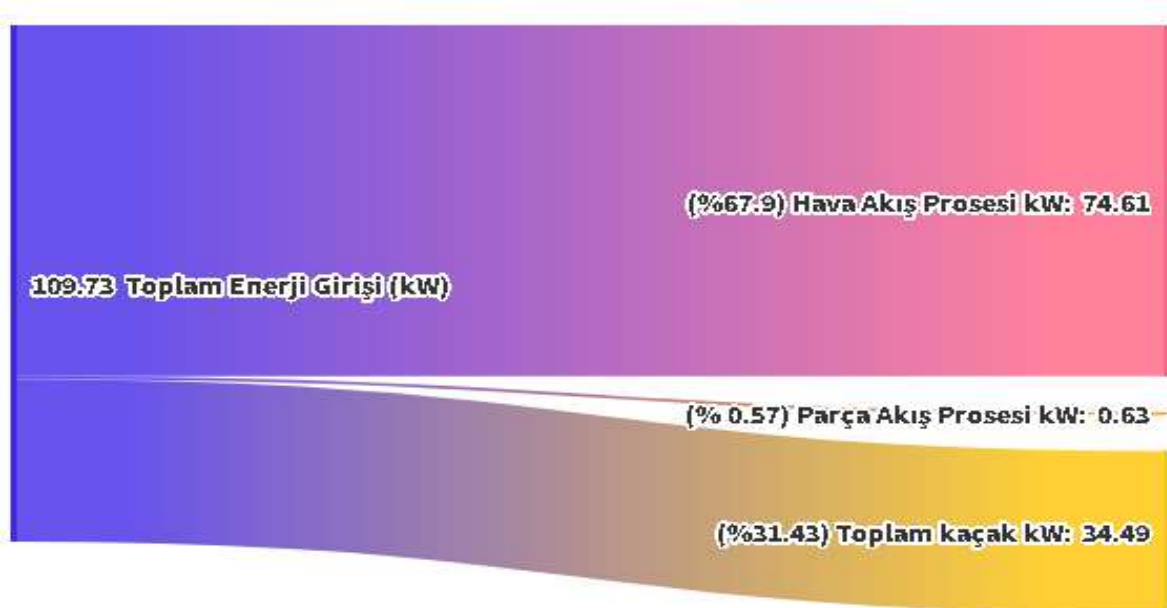
Proses	Giren Enerji (kW)	Çıkan Enerji (kW)	Giren Ekserji (kW)	Çıkan Ekserji (kW)	$\dot{E}x_{dest}$ ve Kayıplar (kW)	P (kW)	F (kW)	Enerji Verimliliği η (%)	Ekserji Verimliliği ϵ (%)
Hava prosesi (1-2)	98,06	74,61	15,04	1,95	13,09	1,95	15,04	-	12,98
Parça (3-4)	11,67	0,63	1,55	0,18	0,18	0,18	1,55	-	11,71
Toplam Kayıp	-	18,16	-	13,40	-	-	-	-	-
Tüm Proses	109,73	98,40	16,60	15,14	12,91	2,14	16,60	68,57	12,87

Not: 20 C° referans sıcaklığı ve 200 C° e kurutma sıcaklığı

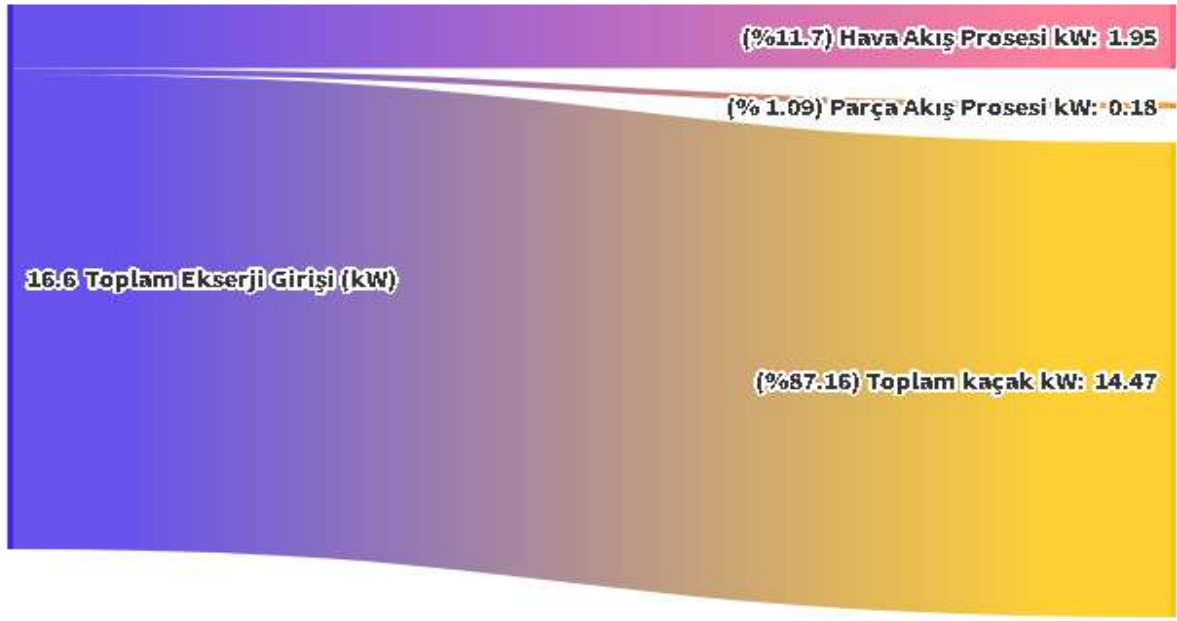
Bu çalışmada tüm sürecin toplam enerji tüketimi incelenmiştir. Buna göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranları tespit edilmiştir. Enerji verimi parçanın istenen sıcaklığa getirilmesi için gerekli net enerjinin, toplam enerji girişine oranı olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimi de aynı şekilde parçanın ekserji değişiminin, toplam giren ekserjiye oranı olarak hesaplanmıştır. Ürünün fırın ısııl işlem öncesi ve sonrası sıcaklığı, fırın yüzeylerinin ısııl işlem öncesi ve sonrası sıcaklıkları Tablo 8,9 ve 10’da verilmiştir. Fırın yüzeylerinin ısııl işlem öncesi ve sonrası olmak üzere 3’er sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Elde edilen sıcaklıkların her bir yüzey için (ısııl işlem öncesi ve sonrası olmak üzere) ortalamaları alınıp fırın sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Tavlama fırını için yapılan teorik hesaplamalar doğrultusunda yapılan enerji ve ekserji analizi sonuçları ve üretim hattından alınan veriler Tablo 11 ve 12’de detaylı olarak verilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda (ölçülen 200°C kurutma havası ve 20°C ortam sıcaklığı kabul verileri dikkate alındığında) sistemin toplam ekserji kaybı 12,91 kW ve toplam ekserji verimi %22,23 olarak hesaplanmıştır. Şekil 8’de görüldüğü gibi bu sistemde ekserji yıkımı ve kayıp oranı yüksektir (%87,16). Fırın içi, (4) denklemine göre ısı kaybı hesaplandığında yaklaşık 34,49 kW’lık bir kaçak değerle karşılaşılır. Bu tespit sonucunda çalışmada incelenen noktalarda ekserji yıkımına neden olan en önemli faktör, yeterli yalıtım sağlanamaması ve/veya yetersiz ürün debisi olduğu ifade edilebilir.

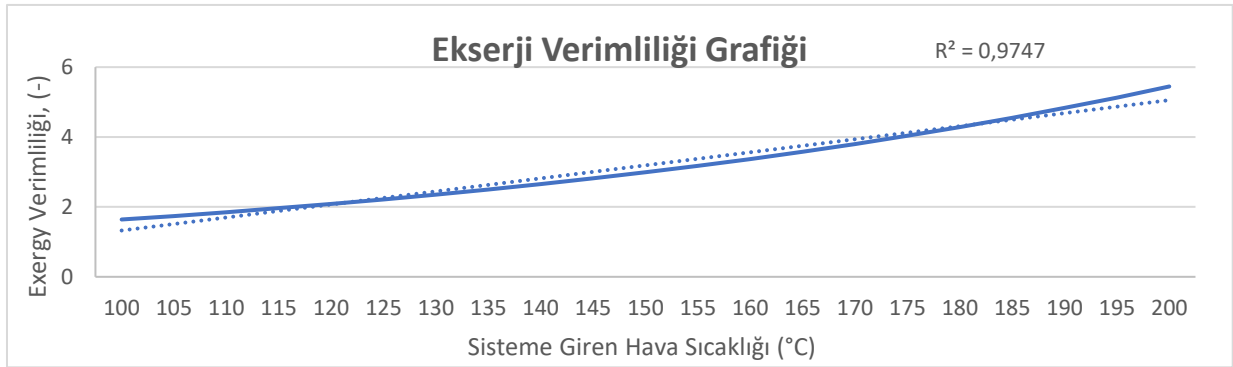


Şekil 7- Tüm Sürecin Enerji Akış Şekli



Şekil 8- Tüm Sürecin Ekserji Akış Şekli

Proses ekserji verimliliği denklem (11a)'ya göre %22,23 olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekil 9'da tavlama fırınının, giren hava sıcaklık değerinin 5°C değişimler ile değişim trendinin grafiği verilmektedir. Bu grafik hesaplamaları denklem (11a) kullanılmıştır.

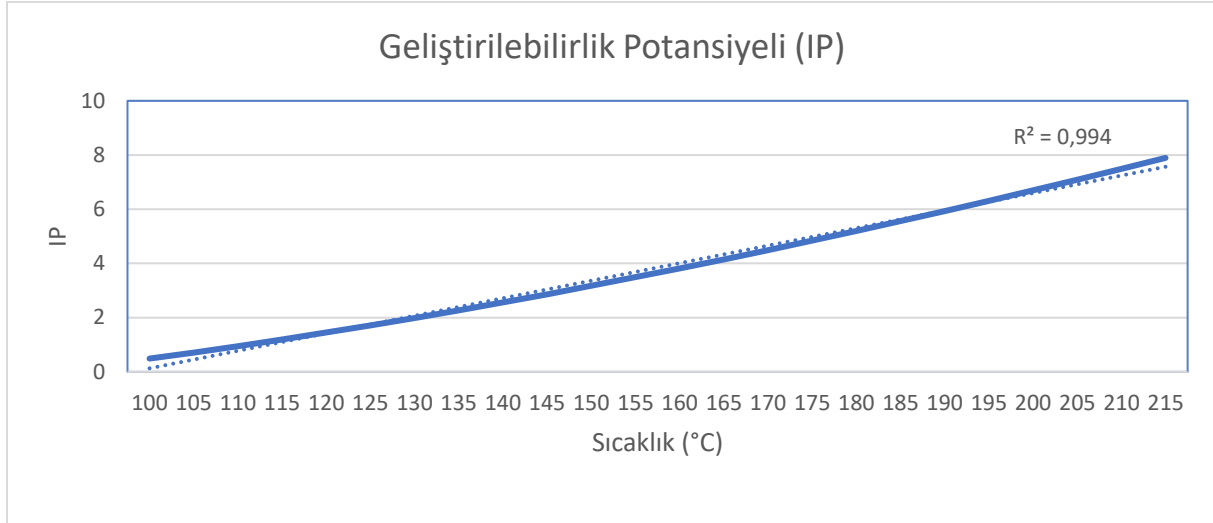


Şekil 9- Ekserji verimliliğinin, sisteme giren hava sıcaklığına göre değişimi

6.1. Geliştirilebilirlik Potansiyeli (IP)

Tavlama fırınının termodinamik analizlerinden bir diğeri de geliştirilebilirlik potansiyeli (IP) denklem (23)'deki eşitlikler ile farklı hava sıcaklık değerlerinde hesaplanmıştır.

$$IP=(1 - \varepsilon) \times (\dot{E}_{x\text{giriş}} - \dot{E}_{x\text{çıkış}}) \quad (23)$$



Şekil 10- Hava Sıcaklığının değişimine göre IP Grafiği

6.2. Eksergoekonomik Analiz

Eksergoekonomi kavramı, endüstriyel süreçlerin enerji ve ekonomi açılarından bir arada değerlendirilmesini sağlayan kapsamlı bir metodolojidir. Bu yaklaşım, ekserji analizi ve ekonomik analizin birleşimi olarak görülebilir. Eksergoekonomik analiz ve ekserji analizi, endüstriyel sistemlerin enerji verimliliği ve ekonomik performansını değerlendirmede kullanılan iki önemli yöntemdir. Ekserji analizi, enerjinin kalitesini ve iş yapma potansiyelini ölçerken, eksergoekonomik analiz enerji kaynaklarının maliyeti ve ekonomik etkinliği arasındaki ilişkiyi ele alır. Bu iki yaklaşım, birlikte kullanıldığında daha kapsamlı ve detaylı bir değerlendirme sağlar. Örneğin, endüstriyel bir kurutma fırını düşünüldüğünde, eksergoekonomik analiz ile fırının kurutma süreçlerindeki enerji kayıpları hesaplanarak bu kayıpların ekonomik maliyetleri belirlenebilir. Bu analiz aynı zamanda enerji kaynaklarının maliyetlerini ve bu kaynakların süreç verimliliğine etkisini de değerlendirir. Böylece, enerji verimliliği ile ekonomik faktörler arasındaki dengeli bir optimizasyon sağlanabilir.

Eksergoekonomik analiz, sadece enerji tasarrufunu değil aynı zamanda işletme maliyetlerinin düşürülmesini de amaçlar. Bu nedenle, endüstriyel tesislerde sürdürülebilirlik ve rekabetçilik açılarından önemli bir araç olarak kullanılır [17, 25].

Birçok araştırmacı, maliyet hesabının ekserjiye dayalı olması durumunda sonuçların dağılımının daha iyi olduğunu ifade etmektedir. Burada anlatılmak istenen, enerjinin değil, ekserjinin genellikle ekonomik değerin tutarlı bir ölçüsü olduğudur. Ek olarak, ekserjiye dayalı ekonomik analiz metodolojileri de mevcuttur (örneğin, eksergoekonomi, termoekonomi, ikinci yasa maliyetleme, maliyet muhasebesi) [5].

Eksergoekonomik analiz, bir termodinamik sistemin başlangıç yatırım ve bakım maliyetlerini içeren toplam sistem maliyetlerinin finansal bir bakış açısıyla değerlendirilmesini ifade eder [42].

Sistemin eksergoekonomik hesaplamaları ve hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo (14)'de verilmiştir [5, 32].

Tablo 14- Sistemin Eksergoekonomik Parametreleri

K	Toplam Proses Bedeli	Yatırım Bedeli + ort. İşletme, Bakım Masrafı	Denklem (24)
L_{en}	Sistemin Toplam Enerji Kaybı	$\sum_{giren} Enerji - \sum_{çıkan} Enerji$	Denklem (25)
L_{ex}	Sistemin Toplam Ekserji Kaybı	$\sum_{giren} Ekserji - \sum_{çıkan} Ekserji$	Denklem (26)
R_{en}	Eksergoekonomik Parametre	$R_{en} = \frac{L_{en}}{K}$	Denklem (27)
R_{ex}	Eksergoekonomik Parametre	$R_{ex} = \frac{L_{ex}}{K}$	Denklem (28)

Şekil 11 ve 12'deki grafiklerde, Denklem (24) ve (25) ile bulunabilecek olan eksergoekonomik parametrelerin hava sıcaklığına göre değişimleri hesaplanmıştır. Bu Grafikler sonucunda tavlama fırını için enerji ve ekserji kayıpları ve yatırım tutarları oranı hava sıcaklık değerinin değişimine göre hesaplanan denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler ile R_{en} ve R_{ex} grafiklerine ulaşılmıştır.

R_{ex} değeri, farklı durumlar için değişkenlik gösterebilir; örneğin, teknoloji, zaman, konum, kaynak maliyetleri ve bilgi gibi faktörler bu değeri etkileyebilir. R_{ex} değerleri farklı teknolojilere göre de değişebilir. Ayrıca, enerji kaynağı maliyetlerinin yükseldiği dönemlerde R_{ex} değerinin muhtemelen azalacağı düşünülebilir; çünkü kayıpları azaltmak için daha fazla sermaye yatırımı gerekebilir. Herhangi bir teknoloji için, bir cihazın tasarımının başarısı, R_{ex} değerinin uygun R_{ex} değerine yaklaşacak şekilde değiştirilmesi ile artırılabilir. Başarılı sistemlerde, ekserji kaybı ile sermaye maliyeti arasında bir denge sağlanmaktadır [25,71].

Termodinamik kayıp oranının sermaye maliyetine oranı, önemli bir ölçüttür. Ekserji ile bağlantılı parametreler olan L_{ex} ve R_{ex} , çeşitli cihaz durumlarının göz önünde bulundurulduğu durumlarda kullanılan termodinamik kayıp tanımındaki değişikliklere karşılık gelen enerji ile ilgili parametreler L_{en} ve R_{en} 'den daha az hassastır [17, 25].

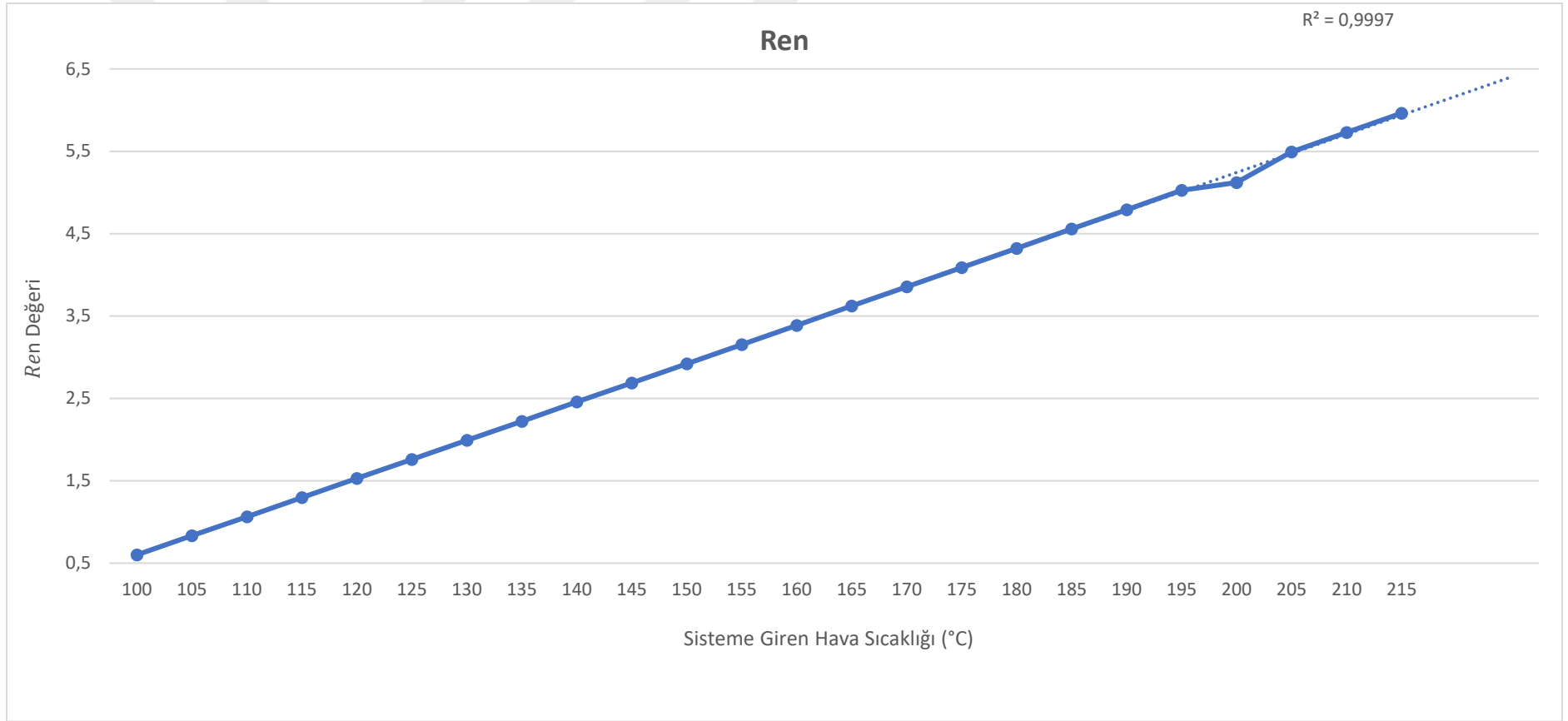
Elde edilen IP, R_{en} ve R_{ex} grafikleri göz önüne alındığında, fırında proses sürecinde ısı kaybının olduğu; buna bağlı olarak da maliyetin arttığı görülmüştür.

Tablo 15- R_{en} Hesaplamaları

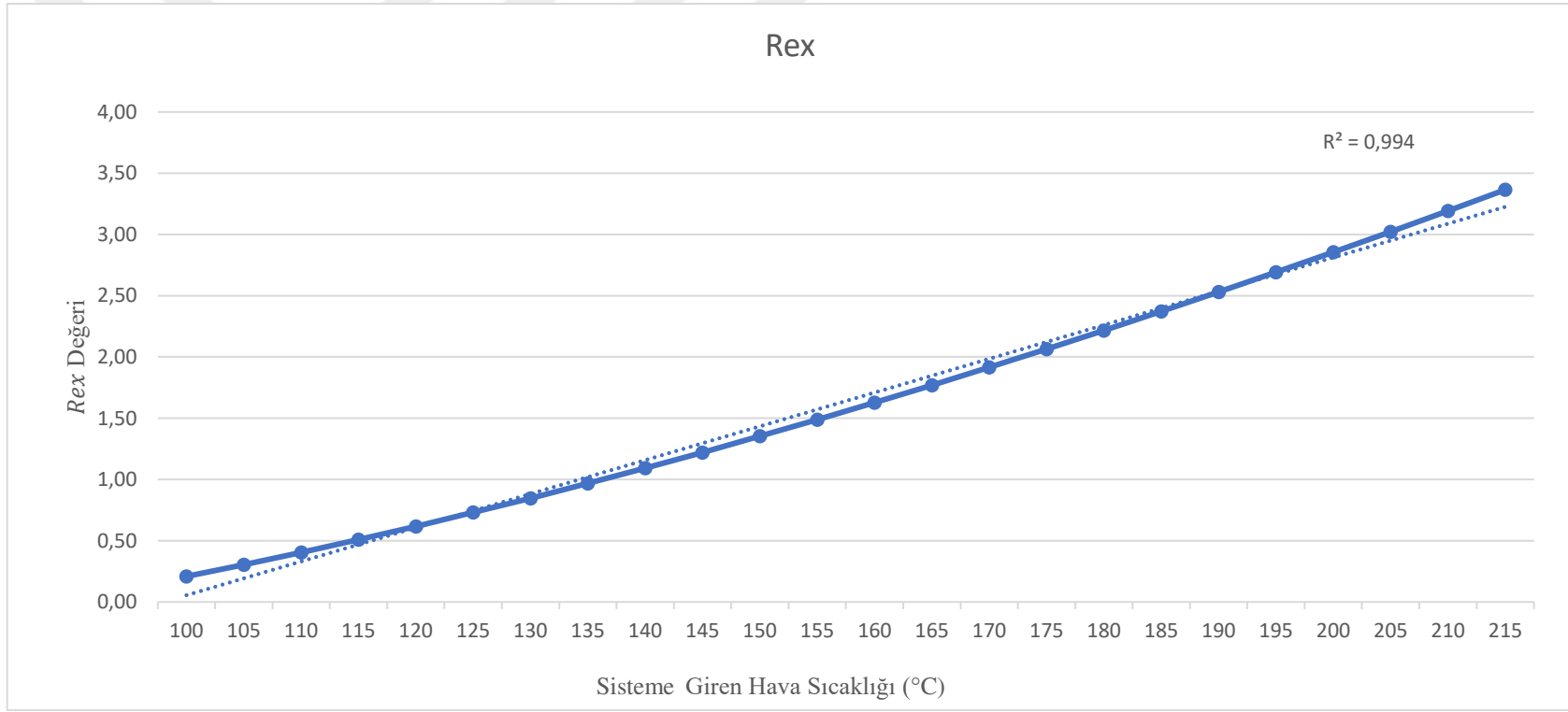
Sıcaklık °C	Özgül Entalpi kj/kg	Enerji (Kw)	Giren Enerji-Çıkan Enerji (W)	R_{en} W/\$
100	373,7	77,4	2755,2	0,6
105	378,8	78,4	3815,7	0,8
110	383,8	79,5	4876,2	1,1
115	388,9	80,5	5936,7	1,3
120	393,9	81,6	6999,9	1,5
125	399,0	82,7	8057,7	1,8
130	404,0	83,7	9120,3	2,0
135	409,1	84,8	10180,8	2,2
140	414,2	85,9	11252,2	2,5
145	419,2	86,9	12316,9	2,7
150	424,3	88,0	13381,6	2,9
155	429,4	89,1	14446,3	3,2
160	434,4	90,1	15511,0	3,4
165	439,6	91,2	16588,7	3,6
170	444,7	92,3	17658,3	3,9
175	449,8	93,3	18727,0	4,1
180	454,9	94,4	19800,1	4,3
185	460,0	95,5	20873,2	4,6
190	465,1	96,6	21946,3	4,8
195	470,2	97,6	23019,4	5,0
200	472,2	98,1	23448,6	5,1
205	480,4	99,8	25165,6	5,5
210	485,5	100,9	26238,7	5,7
215	490,6	101,9	27311,8	6,0

Tablo 16- R_{ex} Hesaplamaları

Sıcaklık °C	Özgül Ekserji Ψ kJ/kg	Ekserji (Kw)	Giren ekserji-Çıkan ekserji (W)	R_{ex} W/\$
100	13,86	2,91	957,64	0,21
105	15,94	3,35	1395,61	0,30
110	18,13	3,81	1854,02	0,40
115	20,40	4,29	2332,34	0,51
120	22,77	4,78	2830,07	0,62
125	25,24	5,30	3346,70	0,73
130	27,78	5,83	3881,77	0,85
135	30,42	6,39	4434,83	0,97
140	33,13	6,96	5005,43	1,09
145	35,93	7,55	5593,16	1,22
150	38,81	8,15	6197,60	1,35
155	41,77	8,77	6818,37	1,49
160	44,80	9,41	7455,08	1,63
165	47,90	10,06	8107,36	1,77
170	51,08	10,73	8774,88	1,92
175	54,33	11,41	9457,27	2,06
180	57,65	12,11	10154,22	2,22
185	61,04	12,82	10865,40	2,37
190	64,49	13,54	11590,50	2,53
195	68,01	14,28	12329,23	2,69
200	71,59	15,03	13081,29	2,86
205	75,23	15,80	13846,41	3,02
210	78,94	16,58	14624,31	3,19
215	82,70	17,37	15414,73	3,36



Şekil 11-Eksergoekonomik (R_{en}) Grafiği



Şekil 12-Eksergoekonomik (R_{ex}) Grafiği

6.3. Enerji Sürdürülebilirliği

Enerji talebi sürekli bir şekilde artarken, fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi iklim değişikliği, kuraklık, sel gibi çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlar ülkeler arasında farklı ölçeklerde etkiler yaratmaktadır. Ülkeler, bu sorunların etkilerini minimize etmek ve sürdürülebilir bir gelecek sağlamak amacıyla çeşitli önlemler almaya başlamıştır. Elektrik ihtiyacını karşılama konusunda ise, dünya genelinde fosil yakıtlardan ziyade yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme eğilimi artmaktadır [75].

Günümüzde, mevcut enerji üretimi ve kullanımı, özellikle sera gazı emisyonları (çoğunlukla karbondioksit, CO₂) ve bu emisyonların neden olduğu iklim değişikliği gibi etkiler nedeniyle küresel çevre için ciddi bir tehdit oluşturduğu artık genel olarak kabul edilmektedir. Bu durum, özellikle sanayileşmiş ülkeleri, enerji politikalarını ve teknolojilerini gözden geçirmeye ve dönüştürmeye yöneltmiştir. Bu ülkeler, enerji geleceklerini "sürdürülebilir" kılmak amacıyla çeşitli yeni politika ve teknoloji alanlarını incelemektedirler. Temel hedef, enerji güvenliğini ve çevre korumasını sağlarken aynı zamanda ekonomik büyümeyi de sürdürebilmektir. Bu nedenle, dünya, enerji tedarikini ve kullanımını yeniden düşünerek büyük değişiklikler yapmaya hazırlanmaktadır [76].

Sürdürülebilir enerji ve ekserji kavramları, enerji alanındaki önemli konuları ele alarak enerji sistemlerinin etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi vurgulamaktadır. Sürdürülebilir enerji, enerji kaynaklarının uzun vadeli kullanımını ve çevresel etkilerini göz önünde bulunduran yaklaşımlarla üretilmesi ve kullanılmasını ifade eder. Her geçen gün daha da önemli hale gelen enerji ve enerji verimliliği konuları üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda da ortaya konmuştur ki, sürdürülebilir ve temiz bir dünya için fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin sınırlamak ve yenilenebilir kaynakların, örneğin güneş, rüzgar, hidroelektrik ve biyoenerji gibi, tercih edilmesi gerekmektedir.

Sürdürülebilir enerji ve ekserji arasındaki ilişki, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliğin aynı zamanda ekonomik verimlilikle dengelenmesinin gerekliliğini vurgular. Sürdürülebilir enerji kaynaklarının doğru kullanımı, enerji sistemlerinin ekserji verimliliğini artırarak, enerji tüketimini en aza indirilmesini sağlarken, çevresel etkileri de azaltacaktır. Bu şekilde, gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını temiz enerji kaynakları ile karşılarken sürdürülebilirlik de sağlanmış olur.

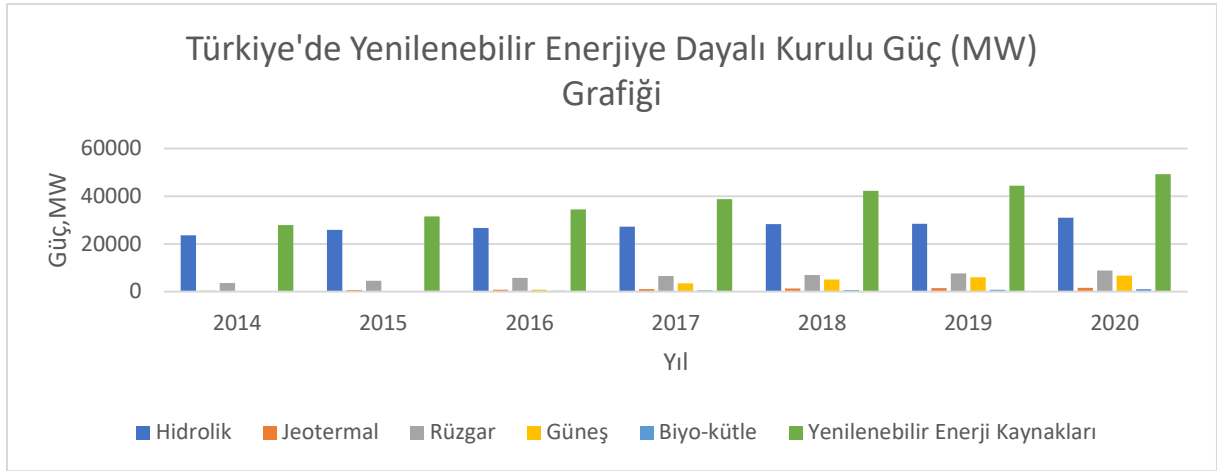
2015'te imzalanan Paris Anlaşması gereği, karbondioksit emisyonlarının 2010'daki seviyelerine göre %45 azaltılması ve 2050'ye kadar sıfıra indirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefi desteklemek amacıyla Avrupa Birliği, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nı oluşturmuştur. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımı, enerji tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan karbondioksit emisyonlarının etkilerinin azaltılması açısından büyük önem taşır [75].

Bu bağlamda, hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynayacaktır. Bu adımlar aynı zamanda enerji bağımsızlığı ve güvenliği konularında da önemli kazanımlar sağlayacaktır. Tüm sektörlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, sürdürülebilirlik, biyo-çeşitlilik, temiz gıda gibi konularda da olumlu etkiler yaratacaktır [75].

Türkiye, sahip olduğu geniş yenilenebilir enerji potansiyeli ile bu çabaların önemli bir paydaşıdır. Ülkenin kendi enerji ihtiyacını karşılamak ve kalkınma hedeflerine ulaşmak adına bu potansiyeli değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin yerel kaynaklarını kullanarak atacağı adımlar, hem ulusal kalkınma hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük katkılar sağlayacaktır [75]. Aşağıdaki Tablo 17 ve Şekil 12'de Türkiye'de yıllara bağlı olarak artan yenilenebilir enerji kurulumları görülmektedir.

Tablo 17-Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç (MW)

	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Biyo-kütle	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından elde edilen güç	Toplam Kurulu Güç
2014	23643	404	3629	40	227	27945	69519
2015	25867	623	4503	248	277	31520	73146
2016	26681	820	5751	832	363	34449	78497
2017	27273	1063	6516	3420	477	38751	85200
2018	28291	1282	7005	5062	621	42264	88550
2019	28503	1514	7591	5995	791	44395	91670
2020	30983	1613	8832	6667	1105	49202	95890



Şekil 13- Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç (MW) Grafiği

Tablo 17 ve Şekil 13'te görüldüğü üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırım her geçen yıl artmış olsa da henüz yeterli seviyede değildir. Mevcutta kurulu olan Hidrolik enerji santrallerinin sayısı diğer kurulu yenilenebilir enerji tesislerine oranla çok daha yüksektir. Son yıllarda kurulumu artan güneş santralleri ve rüzgar santralleri hidrojen santrallerini takip etmekte olup en az kurulu güç biyo-kütle enerjisindedir.

Türkiye'nin elektrik üretiminde termik santraller önemli bir rol oynamaktadır. Ülkede petrol ve doğal gaz rezervleri bulunmadığından enerji tedarikini desteklemek amacıyla Karadeniz'de doğalgaz arama çalışmaları devam etmektedir. Türkiye, zengin yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olmasına rağmen, bu kaynakların yeterince kullanılamaması enerjide dışa bağımlılığı artırmıştır, sonuç olarak enerji maliyetlerini yükseltmiştir. Türkiye'nin gelişmekte olan bir ülke olması ve kişi başına düşen enerji tüketiminin yetersiz olması, bu durumun ciddi bir sorun olarak öne çıkmasına sebep olmaktadır [75].

Bunlara ek olarak, Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi uluslararası taahhütlerin getirebileceği sınırlamalar, karbon vergisi gibi yaptırımlar da Türkiye için olumsuz sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, iklim değişikliğiyle mücadelede en kritik faktörlerden biri, enerji üretiminin fosil yakıtlara dayanmaması gerekliliğidir [75].

6.4. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

ISO 14040:2006'da yaşam döngüsü analizi (LCA) için ilkeler ve çerçeve tanımlanır: yaşam döngüsünün (LCA)'nın amacı, bir ürünün veya hizmetin çevresel etkilerini sistematik bir şekilde analiz etmektir. Yaşam döngüsünün adımları yaşam döngüsü envanter analizi (LCI), yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA), yaşam döngüsünün yorumlanması, yaşam döngüsünün raporlanması ve kritik noktaların incelenmesi ve LCA aşamaları arasındaki ilişkilerin incelenmesinden oluşur [76]. Çevre sorunlarının tasarım aşamasında analiz edilmesi ve çözülmesi, daha sonra üretim aşamasına göre avantajlara sahiptir. Çünkü bir ürünün başlangıç noktası, üretim, kullanım ve imha gibi diğer yaşam evreleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, çevresel etkilerin değerlendirilmesi, analizi ve azaltılması kavramsal aşamada göz önünde bulundurulmalıdır [77].

Yaşam döngüsü analizi genel olarak dört aşamadan oluşur: amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve yorumlama. Envanter analizi için, belirlenmiş sistem kapsamı dâhilinde tüm süreç zincirinin malzeme ve enerji tüketimleri ölçülmelidir. Bu nedenle, sistem kapsamı çok genişse, döküm verilerinin elde edilmesi zor olabilir.

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi için 20'den fazla farklı değerlendirme yöntemi vardır. Örneğin, CO₂ emisyonu, kaynak tüketimi, ozon tükenmesi, su toksisitesi vb. buna örnek gösterilebilir. Bu nedenle, hangi değerlendirme yönteminin seçilmesi gerektiği ve hangi etki kategorilerinin kullanılması gerektiği karmaşık sorular olabilir [77].

Her geçen gün artan enerji tüketimi her alanda tasarruf yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada da yaşam döngüsü analizi (LCA) amaç ve kapsamı, incelemenin yapıldığı fabrikada ısıtma işlem bölümünde yer alan enerji ve ekserji analizleri yapılan tavlama fırının çevreye olan etkilerinin araştırılması ve incelenmesidir.

6.4.1 Sistem Girdi Ve Çıktılarının Analizi

Bölüm 4’de yapılan analizler sonucunda sistemdeki enerji tüketimi, ekserji yıkımı ve enerji-ekserji verimleri hesaplanmış, farklı hava sıcaklık değerlerine göre sistemin eksergoekonomik analizlerine göre toplam yatırım, işletme, bakım giderleri ile enerji-ekserji kaybına göre kurulan oranlarda eksergoekonomik parametre değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler tablo 11 ve 12’de bulunmaktadır.

6.4.2 Sistemdeki CO₂ Emisyon Hesabı

Tier1 hesap yöntemine göre (denklem 27) sistemin CO₂ hesabı sistemde kullanılan yakıt türü ve enerji tüketim miktarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar yapılırken Tier1 seçilmesinin sebebi kimyasal reaksiyonların ihmal edilmesi ve kullanılan parametrelerin uygun olmasıdır. Denklemde CF ile ifade edilen sistemdeki elektrik tüketimi, ulaşım vb. gibi eylemler sonucu ortama salınan CO₂’yi; AD ile ifade edilen sistemde tüketilen ya da üretilen yakıt türünü; EF ile ifade edilen ise kullanılan yakıtın birim yükünü ifade etmektedir [73]. Buradaki EF katsayısını daha önce yapılan literatür araştırmaları sonucu Türkiye için EF=0,551kg CO₂ /kWh olarak alınması kararı alınmıştır [79]. Yapılan araştırmada sistemin güncel hali ve bir proses süresindeki CO₂ emisyon hesabı ;

$$CF= AD \times EF \quad (27)$$

Bu hesaba göre bir proses süresinde bu fabrikanın ortaya çıkardığı CO₂ salınımı 2191,415 (kgCO₂ /kWh)/yıl; bir aydaki CO₂ salınımı ise 197227,386 (kgCO₂ /kWh)/yıl olarak hesaplanmıştır.

6.4.3 Ürün Yaşam Döngüsü Analizi Yorumu

LCA analizi yapılırken ürünün hammadde girişinden başlanıp kullanım ömrü bitene kadarki süreç analiz edilmektedir. Bu bağlamda incelenmiş olan sistemin bulunduğu üretim tesisinde yaşam döngü analizi yapabilmek için yalnızca tek bir prosesin CO₂ emisyonu ve yatırım geri dönüş süresinin hesaplanması yeterli ve gerçekçi olmayacak ve tüm prosesin analize dahil edilmesi gerekecektir. Bu nedenle ilgili işletmeden sürdürülebilirlik politikaları ve proses yatırım kapsamı hakkında bilgi sağlanmıştır. İncelenmiş olan fırının bakım maliyetleri ile toplam ömrünün 20-25 yıl arası beklendiği belirtilmiştir. Fırın hali hazırda 12 yıldır kullanılmakta olup verim kaybı gözlenmeye başlamıştır.

6.5. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCCA) ve ekserji, endüstriyel süreçlerin ve ürünlerin değerlendirilmesinde önemli araçlar olarak karşımıza çıkar. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi yani LCCA, bir ürünün veya sürecin hayat döngüsü boyunca ortaya çıkan tüm maliyetleri kapsamlı bir şekilde değerlendirir. Bu maliyetler, ürünün hammaddelerin çıkarılmasından üretimine, dağıtımından kullanımına ve atılmasına kadar olan aşamalardan kaynaklanan maliyetleri içerir. Ekserji ise enerjinin iş yapma kapasitesini ölçer. Bu noktada LCCA ve ekserji arasındaki ilişki şu şekilde açıklayabiliriz; Yaşam Döngüsü Maliyet Analizinde, enerji tüketimi bir maliyet faktörü olarak dikkate alınırken, ekserji analizi enerji verimliliğini ve kayıplarını inceleyerek maliyetleri etkileyen bir faktörü açığa çıkarır. Örneğin, bir endüstriyel kurutma fırınındaki süreç ele alındığında, LCCA enerji tüketiminin süreç maliyetlerine nasıl yansıdığını değerlendirebilirken, ekserji analizi bu süreçteki enerji dönüşüm verimliliğini inceleyerek enerji kayıplarını ve potansiyel tasarruf fırsatlarını belirleyebilir. Bu şekilde, LCCA ve ekserji analizi bir araya geldiğinde hem ekonomik hem de enerji verimliliği açısından daha sürdürülebilir çözümlerin ortaya çıkması sağlanabilir.

Bu çalışmada aşağıdaki yöntem izlenmiştir:

- (1) Bir debriyaj firmasına kurulan kurutma fırınının modeli geliştirilmiştir.
- (2) Optimizasyon değişkenleri seçilir ve amaç fonksiyonları tanımlanır.
- (3) Optimizasyon algoritmaları seçilir.
- (4) Optimizasyonlar tamamlanır ve sonuçlar analiz edilir.

Fırın sisteminin yaşam döngüsü maliyeti (LCC) üç ayrı bileşenden oluşur: (1) tavlama fırını da dahil olmak üzere tüm bileşenlerin başlangıç maliyeti (2) bu ekipmanın değiştirme maliyetleri ve (3) yıllık fırınlar için kullanılan yardımcı enerjinin yanı sıra sistemler için kullanılan elektriği de içeren işletme maliyetleri. 2. ve 3. Maddeler ile sunulan mali parametrelerle birlikte gelecekteki harcamaların bugünkü değeri olarak hesaplanır [78].

$$LCC = \text{Başlangıç Maliyeti} + \text{Yenileme Maliyeti} + \text{Enerji maliyeti} \quad [78]$$

Bu formülü, bu çalışmada ele alınan fırın için kullanacak olursak 2022 yılı için LCC yani yaşam süresi maliyeti 36361,85 \$ olarak hesaplanmıştır.

6.6. Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Sürdürülebilirlik, günümüzde endüstriyel ve sosyal faaliyetlerin merkezine yerleştirilmiş önemli bir kavramdır. Sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerinin geliştirilmesi, çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin dengelemesini hedefler. Bu bağlamda, ürün yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi, bir ürünün hammadde aşamasından üretimine, kullanımından atılmasına kadar olan tüm aşamalarını değerlendirerek çevresel etkileri ve kaynak kullanımını analiz etmeyi amaçlar [78].

Ürün yaşam döngüsü analizi, ürünün farklı aşamalarındaki çevresel etkileri ve kaynak kullanımını değerlendiren bütüncül bir yaklaşımdır. Bu analiz, genellikle dört ana aşamayı içerir: hammaddelerin çıkarılması, üretim, kullanım ve atılma. Her aşamada ortaya çıkan enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, su kullanımı ve diğer çevresel etkiler hesaplanarak ürünün yaşam döngüsü boyunca hangi aşamalarda en büyük çevresel etkilerin meydana geldiğini belirlenir [76].

Bu çalışmada incelenen sistemin bir yıllık CO_2 salınımı (2191,415 kgCO₂ /kWh/yıl) hesabı ve enerji tüketimi (36391,85 \$) göz önüne alındığında sistemin sürdürülebilirlik açısından ideal olmadığı ve geliştirilmesi gereken noktaları olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

6.7. Sürdürülebilir Ve Yenilenebilir Kaynaklar

Sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklar günümüzde çevresel sürdürülebilirliğin anahtar unsuru olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir kaynaklar, doğanın kendini yenileyebilme kapasitesine dayalı olarak sürekli olarak sağlanabilen kaynaklardır. Daha güvenilir ve temiz bir gelecek için bu kaynaklardan enerji üretmeliyiz. Birçok çevresel sorun, enerjinin üretimi, dönüşümü ve kullanımıyla ilişkilidir veya bunlardan kaynaklanır. Enerji politikası 1970'lerde ve erken 1980'lerde genellikle ekonomik düşüncelerle ilgilenirken, son on yılda temiz yakıtlar, enerji teknolojileri ve enerji verimliliği yoluyla çevresel etki kontrolü giderek artan bir ilgi görmüştür. Çevresel sorunlar karmaşık ve sürekli gelişmektedir, ancak potansiyel olarak zararlı maddelerin kaynaklarını, nedenlerini ve etkilerini bilimsel olarak belirleme ve nicel olarak ölçme yeteneğimiz büyük ölçüde ilerlemiştir. Aslında, endüstriyel süreçler ve sistemlerdeki gelişmeler sıkça yeni çevresel sorunlara yol açmaktadır [38, 76].

Yenilenebilir kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve enerji dönüşüm süreçlerindeki verimliliği arasındaki ilişkiyi ele alacak olursak, ekserji analizi bu bağlamda önemli bir rol oynar. Örneğin, güneş enerjisi panelleri yenilenebilir bir kaynak olan güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürken, bu dönüşüm sürecindeki enerji kayıpları ekserji analizi ile belirlenebilir. Rüzgar türbinleri de benzer şekilde rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirirken ekserji kayıplarının minimize edilmesi için tasarlanabilir [81].

Yenilenebilir enerji kaynakları ile fosil yakıtlar arasındaki önemli bir fark, yenilenebilir enerji kaynaklarının tükenmez olmaları ve kullanışlı bir forma dönüştürülmeden önce düşük veya sıfır ekonomik değere sahip olmaları gerçeğinde yatmaktadır. Yalnızca maliyetleri, enerjinin toplanması için gerekli olan cihazı sınırlar; örneğin, güneş ışınlarının toplanması için gerekli depolama alanı buna en iyi örneklerden birisidir [82].

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İzmir Kemalpaşa'da bulunan Dönmez Debriyaj Fabrikası bünyesindeki tavlama fırınının ısı işlem prosesi için en iyi çalışma koşulları enerji ve ekserji analizi yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca ekserji analizi sırasında kullanılan referans durum sıcaklığının sistemin enerji ve ekserji verimlerine etkisi incelenmiştir. İncelenen fırına enerji ve ekserji girdilerinin büyük yüzdesi fırın içindeki sıcaklığın korunması için harcanmaktadır. Giren toplam enerjinin %11,3'ünü ve toplam ekserjinin %9,3'ünü ürün oluşturmaktadır. Yapılan eksergoekonomik analizler sonucunda enerji kaybı/yatırım oranı mevcut kurutma havası sıcaklık değerinde $Ren: 5,1 \text{ W}/\$$; ekserji kaybı/yatırım oranı ise $Rex: 2,86 \text{ W}/\$$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan gözlemler ve analizler sonucunda verimliliğin artırılabilmesinin en kolay ve en az maliyetli yolun fırının izolasyonunun yenilenmesi önerisi olacaktır. Genel olarak değerlendirmeler ve öneriler aşağıda yer almaktadır:

- Bu çalışmada termodinamiğin 1. ve 2. yasasına göre sistemin analizi yapılarak, enerji ve ekserji değerleri ortaya konularak verimliliği hesaplanmıştır.
- Tavlama Fırınında gerçekleşen işlemde sistemin ekserji kaybının 16,60 kW olduğu hesaplanmıştır.
- Hava kaçakları nedeniyle en yüksek enerji kayıpları ve ekserji tahribatı fırın hücre duvarlarında meydana gelir. Sonuç olarak, fırın izolasyonunun iyileştirilmesi gerekmektedir.
- Yüksek ekserji yıkımı için çözüm: fırın duvarlarındaki kaçakları engellemek için ateş tuğlası vs. gibi ısı yalıtımı yüksek malzeme kullanmak ve diğer ısı kaçaklarını engellemek.
- Her alanda gün geçtikçe daha önemli hale gelen enerji verimliliği ve enerjinin geri kazanımı kapsamında, fırında ısı kaçaklarının en aza indirilmesi ve izolasyonun geliştirilmesiyle tavlama fırınından yüksek verim elde edilebilir.
- Enerji kaçağı etkin bir şekilde önlenebilirse, ısı ekonomideki kazanımlar değerli hale gelecek ve bu tür sistemlerin performansı etkin bir şekilde artırılabilir.

Sonuç olarak, tavlama fırının toplam ekserji kaybı 16,60 kW ve toplam ekserji verimi %22,23, fırının enerji kaçağı 34,49 kW olup toplam enerji verimliliği % 68,56 olarak hesaplanmıştır. Enerji ve Ekserji kayıplarını en aza indirmek için yukarıda bahsedilen izolasyon malzemeleri firmaya önerilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Ayvalı, Z., Ozgener, O., ve Ozgener, L., A parametric study on energy, exergy and exergoeconomic analysis of a paint curing oven, 2022, 47(1), 60-73.
- [2] Çengel, Y. A., Boles, M. A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 5. bs. Güven Bilimsel, İzmir, Türkiye, 2008, 424-470.
- [3] Bejan A., A Second Look at the Second Law, 1988, 110, 58-65
- [4] Dincer, I., Sahin, A. Z., A new model for thermodynamic analysis of a drying process, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(4), 645-652.
- [5] Ozgener, L. Exergoeconomic analysis of small industrial pasta drying systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007, 221(7), 899-906,
- [6] Moraitis, C., Akritidis, C., Energy saving in industrial drying plants by partial recovery of the latent heat of the exhaust air, Drying Technology, 1997, 15(6-8), 1931-1940.
- [7] Ozgener, L., Hepbasli A., Dincer I., Thermodynamic analysis of a geothermal district heating system, Int. J. Exergy, 2005, 2(3), 231-240.
- [8] Camdali, U., Tunc, M., Karakas, A., Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company, Energy Convers Manag, 2003, 44, 1-13.
- [9] Dincer, I., On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems, International Journal of Energy Research, 2002, 26(8), 717-727.
- [10] Dincer, I., The role of exergy in energy policy making, Energy Policy, 2002, 30, ss.137-149.
- [11] Çamdali, U., Tunç, M., Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace, Applied Thermal Engineering, 2003, 2255-2267.
- [12] Özgener, L., Hepbaşlı, A., Hvac Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği Ve Uygulamaları, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 2003, İzmir, Türkiye, 1-14.
- [13] Mujumdar, A., Research and development in drying: Recent trends and future prospects, Drying Technology, 2004, 22(1-2), 1-26
- [14] Dincer, I., Hussain, M., Al-Zaharnah, I., Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia, Energy Policy, 2004, 32(14), 1615-1624.
- [15] Hepbasli, A., Ozgener, L., Development of geothermal energy utilization in Turkey: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004, 8(5), 433-460.
- [16] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Energy and exergy analysis of the Gonen geothermal district heating system, Turkey, Geothermics, 2005, 34(5), 632-645.
- [17] Hepbasli, A., Dincer, I., Rosen, M., Ozgener, L., Exergoeconomic modeling of geothermal district heating systems for building applications, 2005, 908-912.

- [18] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Energy and exergy analysis of Salihli geothermal district heating system in Manisa, Turkey, *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(5), 393-408.
- [19] Ozgener, L., Ozgener, O., Exergy analysis of industrial pasta drying process, *International Journal of Energy Research*, 2006, 30(15), 1323-1335.
- [20] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Effect of reference state on the performance of energy and exergy evaluation of geothermal district heating systems: Balçova example, *Building and Environment*, 2006, 41(6) ss. 699-709, Haz. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.03.007.
- [21] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Performance investigation of two geothermal district heating systems for building applications: Energy analysis, *Energy and Buildings*, 38(4), 286-292.
- [22] Baba, A., Ozgener, L., Hepbasli, A., Environmental and exergetic aspects of geothermal energy, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 28(7), 597-609.
- [23] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Parametric study of the effect of reference state on energy and exergy efficiencies of Geothermal District Heating Systems (GDHSs): An application of the Salihli GDHS in Turkey, *Heat Transfer Engineering*, 2007, 28(4), 357-364.
- [24] Ozgener, O., Ozgener, L., Exergy and reliability analysis of wind turbine systems: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(8), 1811-1826.
- [25] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Rosen, M., Exergoeconomic analysis of geothermal district heating systems: A case study, *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(8-9), 1303-1310.
- [26] Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(8), 1675-1697.
- [27] Ozgener L., Ozgener, O., Exergy analysis of drying process: An experimental study in solar greenhouse, *Drying Technology*, 2009, 27(4), 580-586.
- [28] Ozgener L., Ozgener, O., Monitoring of energy exergy efficiencies and exergoeconomic parameters of geothermal district heating systems (GDHSs), *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(9), 1704-1711.
- [29] Isam, A., Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan, *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(2-3), 324-328.
- [30] Ozgener L., Ozgener, O., Parametric study of the effect of reference state on energy and exergy efficiencies of a small industrial pasta drying process, *Int. J. Exergy*, 2009, 6(4), 477-490.
- [31] Ozgener L., Ozgener, O., Dincer, I., Analysis of some exergoeconomic parameters of a small wind turbine system, *Int J Green Energy*, 2009, 6(1), 42-56.

- [32] Ozgener L., Ozgener, O., Exergoeconomic analysis of an underground air tunnel system for greenhouse cooling system, *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(5), 995-1005.
- [33] Baskut O., Ozgener O., Ozgener, L., Effects of meteorological variables on exergetic efficiency of wind turbine power plants”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9).
- [34] Ozgener, L., Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9).
- [35] Ozgener L., Ozgener, O., An experimental study of the exergetic performance of an underground air tunnel system for greenhouse cooling, *Renew Energy*, 2010, 35(12), 2804-2811.
- [36] Ozgener L., Ozgener, O., Energetic performance test of an underground air tunnel system for greenhouse heating, *Energy*, 2010, 35(10), 4079-4085.
- [37] Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Rahim, N., Energy, exergy and economic analysis of an annealing furnace, *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, 6(6), 1257-1266.
- [38] Dincer, I. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems, *Sustain Cities Soc*, 2011, 1(2), 91-96.
- [39] Baskut, O., Ozgener, O., Ozgener, L., Second law analysis of wind turbine power plants: Cesme, Izmir example, *Energy*, 2011, 36(5), 2535-2542.
- [40] Ozgener, L., A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9), 4483-4490.
- [41] Baskut, O., Ozgener, L., Exergoeconomic assessment of a wind turbine power plant (WTTP): Cesme, Izmir, example, *Energy*, 2012, 47(1), 577-581.
- [42] Yildirim, D., Ozgener, L., Thermodynamics and exergoeconomic analysis of geothermal power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(8), 6438-6454.
- [43] Takla, M., Kamfjord, N., Tveit, H., Kjelstrup, S., Energy and exergy analysis of the silicon production process, *Energy*, 2013, 58, 138-146.
- [44] Ozgener, L., Ozgener, O., Three heating seasons monitoring of thermo-economic parameters of a prototype EAHE system for technological forecasting and evaluating low grade geothermal resources in Turkey, *Energy Build*, 2013, 66, 346-352.
- [45] Ozgener, O., Ozgener, L., Tester, J., A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications, *Int J Heat Mass Transf*, 2013, 62(1), 473-480.
- [46] Ozgener, O., Ozgener, L., Modeling of driveway as a solar collector for improving efficiency of solar assisted geothermal heat pump system: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 46, 210-217.
- [47] Ozgener, L., Ozgener, O., The Use of EAHEs: 2015 Turkey Review, *Proceedings World Geothermal Congress*, 2015, 19-25.

- [48] Ersayın E., Ozgener, L., Performance analysis of combined cycle power plants: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43, 832-842.
- [49] Neseli, M., Ozgener, O., Ozgener, L., Energy and exergy analysis of electricity generation from natural gas pressure reducing stations, *Energy Conversion and Management*, 2015, 93, 109-120.
- [50] Ozgener, O., Ozgener, L., Goswami, D., Seven years energetic and exergetic monitoring for vertical and horizontal EAHE assisted agricultural building heating, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80, 175-179.
- [51] Gürtürk, M., Benli, H., Ertürk, N., Effects of different parameters on energy - Exergy and power conversion efficiency of PV modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92, 426-439.
- [52] Yuksel, Y., Ozturk, M., Dincer, I., Energetic and exergetic assessments of a novel solar power tower based multigeneration system with hydrogen production and liquefaction, *Int J Hydrogen Energy*, 2019, 44(26), 13071-13084.
- [53] Dogru, A., Ozgener, O., Ozgener, L., Evaluation of the efficiency of the dryers in thermoplastic vulcanisate extrusion production lines with the energy and exergy analysis method, *Int. J. Exergy*, 2021, 36, 361-381.
- [54] Dogru, A., Camcioglu, E., Ozgener, O., Ozgener, L., Thermodynamics analysis of biomass fired brick drying process, *Int. J. Exergy*, 2021, 35(4), 421-437.
- [55] Vatandaş, S., Sanayi Fırınlarında Enerji Ve Ekserji Verimliliği; Örnek Çalışma Emaye Pişirme Fırını Verimlilik Projesi Enerji Ve Ekserji Analizlerinin Gerçekleştirilmesi, T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2016, 94,(Yüksek Lisans Tezi).
- [56] Kınıt, U., 30mnb4 Cıvata Malzemesinin Statik Dayanım Değerlerinin Değişik Isıl İşlem Türlerine Göre Deneysel İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013, 97 (Yüksek Lisans Tezi).
- [57] Aksoy, A., Çelik Malzemelerde Hasar Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015, 94, (Yüksek Lisans Tezi).
- [58] Güner, E., 4140 Çeliğinin Mekanik Aşınma Özelliklerine Lazerle Yüzey Sertleştirme İşleminin Etkisinin İncelenmesi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019, 103, (Yüksek Lisans Tezi).
- [59] Genç, S., Çelik Boru İmalatında Kullanılan Isıl İşlem Fırını Modellenmesi Ve Tasarımı, T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010, 65, (Yüksek Lisans Tezi).
- [60] Yangaz, M., Yüksek Sıcaklık Şartlarında Çalışan Vana Çeliğinin Kaynak Sonrası Mikro yapısal Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019, 73, (Yüksek Lisans Tezi).
- [61] Yalçın, B., Isıl İşlem Fırınlarında Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Araştırılması, Tür ve Boyut Optimizasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2001, 76, (Yüksek Lisans Tezi).

- [62] Hajaliakbari, N., Hassanpour, S., Analysis of thermal energy performance in continuous annealing furnace, *Applied Energy*, 2017, 206, 829-842.
- [63] Coşkun, M., Örnek Bir Alüminyum Ekstrüzyon İmalat Tesisinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi, T.C.Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2019,113.
- [64] Ozgener, L., Ozgener, O., Exergy analysis of industrial pasta drying process, *Int J Energy Res*, 2006, 30(15), 1323-1335.
- [65] Dincer, I., The role of exergy in energy policy making, 2002.
- [66] Aljundi, I., Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan, *Appl Therm Eng*, 2009, 29(2-3), 324-328.
- [67] Kırtepe E., Özbalta, N., Kanatlı-borulu ısı değıştiricilerde belirsizlik analizi, 2018, 9, 161-175.
- [68] Saudi Arabian Standards Organization, Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement, 2005.
- [69] Habib, S., Ghattas, O., Graziani, C., Sefcik, J., Uncertainty quantification and error analysis, 2010.
- [70] AIAG, CQI-9 Heat Treatment System Assessment, 2020.
- [71] Ozgener, L., Exergoeconomic analysis of small industrial pasta drying systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, 221(7), 899-906.
- [72] Dominković, D., Baćeković, I., Pedersen, A., Krajačić, G., The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, 1823-1838.
- [73] Cekinir, S., Ozgener, O., Ozgener, L., Türkiye's energy projection for 2050, *Renewable Energy Focus*, 2022, 43, 93-116.
- [74] Dell, R., Rand, D., Energy storage-a key technology for global energy sustainability, *J Power Sources*, 2001, 2-17.
- [75] TEIAS, 2023, <https://www.teias.gov.tr/>, <https://www.teias.gov.tr/>.
- [76] ISO (2006), ISO, ISO 14040 Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment, 2006. Erişim: 11 Haziran 2023.
- [77] Li, Y., An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment, *Addit Manuf*, 2020, 33, 3-5.
- [78] General Guidance and Reporting, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. 2023.
- [79] Dulkadiroğlu, H., Türkiye'de Elektrik Üretiminin Sera Gazı Emisyonları Açısından İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2018, 7(1), 67-74.

- [80] Hin, J., Zmeureanu, R., Optimization of a residential solar combisystem for minimum life cycle cost, energy use and exergy destroyed, Solar Energy, 2014, 100, 102-113.
- [81] Dincer, I., On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems, Int J Energy Res, 2002, 26(8), 717-727.
- [82] Koroneos, C., Spachos, T., Moussiopoulos, N., Exergy analysis of renewable energy sources, Renew Energy, 2003, 28, 295-310.

