



# **SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN MODELENMESİ**

**2024  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Neslin HASAR OCAK**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN**

# **SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN MODELLENMESİ**

**Neslin HASAR OCAK**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Şubat 2024**

Neslin HASAR OCAK tarafından hazırlanan “SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN MODELLENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 29/02/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Adnan SÖZEN (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sevinç ŞENGÖR (ODTÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Neslin HASAR OCAK

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN MODELLENMESİ**

**Neslin HASAR OCAK**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN**

**Şubat 2024, 156 sayfa**

Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan politikaların, teknolojilerin ve uygulamaların bir kombinasyonu olarak uygulanmaktadır. Sanayide enerji verimliliği, enerji güvenliği, maliyet tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik gibi geniş kapsamlı hedeflere ulaşmada kritik rol oynayan, kazanımı yüksek, sürdürülebilir bir faktördür. Bu çalışmanın, sanayinin tüm alt sektörlerinde kullanılabilecek, mühendislik biliminin sanayi tesislerinde uygulanabilir analiz ve ölçümlerini içeren, verimli enerji hedeflerini kapsayan rehber bir kılavuz olacağı düşünülmektedir.

Sanayinin sektörel kolları yapısal farklılık gösterse de enerjinin en çok kullanıldığı birimleri, sistemsel yaklaşım olarak tanımlanan uygulamalar ile gruplandırılarak enerji verimliliği çalışmaları ile büyük kazanımlar gerçekleştirilebilmektedir. Detaylandırılmış sistem parametreleri, yöntemsel iyileştirmeler ile modellenmiştir.

Ayrıca algoritmik sorgulamalarla desteklenen model kurguları çalışmada listelenmiştir. Bilimsel temellere dayanan modellemeler sayesinde enerji kazanımları elde edilmiştir. “Excel” veri tabanlı bir program oluşturulmuş ve enerji geri kazanım miktarı ile emisyon parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Enerji kazanımı ile sera gazı emisyon azaltımları arasında doğrusal bir eğilimin olduğu tespit edilmiştir.

Farklı teknikler ile optimize edilmiş yenilikçi ve teknolojik uygulamalar, mevcut endüstrilerde enerji kazanımını %90’a varan oranlara çıkarabilme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum yakma tesislerinde, yalıtım ve diğer önlemlerle birlikte yakıtın enerji gereksinimine göre tüketimi, kazan tipi seçimi, sıcaklık-basınç optimizasyonu, kontrollü yakma işlemi, ısı geri kazanım sistemlerinin kullanılması ve baca çıkış sıcaklığının ayarlanması gibi işlemlerle enerji kazanımı %5 ile %20 oranında sağlanabilmektedir. Optimize edilmiş bir buhar sisteminde enerji kazanımı ise, kazan verimliliği %25 ile %35 arasında, işletme basıncı ve sıcaklığı %15 ile %25 arasında, buhar hatlarının izolasyonu %10 ile %20 arasında, kondensat geri kazanımı %5 ile %15 arasında ve flaş buharın değerlendirilmesi %5 ile %10 arasında değişkenlik göstermektedir.

Kojenerasyon sistemleri için, ısı kullanımı, katı yakıtların gazlaştırılması ve atık CO<sub>2</sub> gazının tutulması ile enerji kazanım yüzdesi %60’a kadar artırılmıştır. CO<sub>2</sub> yakalamanın sistemsel uygulanması ile, verimlilik kayıplarını ortalama %11,5 oranında azaltmaktadır. Eski ve düşük verimli motorların, doğru boyutlandırılmış ve daha az güç tüketen yenilikçi elektrik motorlar ile değiştirilmesi, %3 ila %35 arasında bir enerji tasarrufu sağlayabilmektedir. Basınçlı hava sistemlerinde ise, hava kaçakların kesilmesi ile %40’e varan bir iyileştirme işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca, Sıvı-hava enerjisi ile %76,6 oranında, adyabatik enerji depolama sistemleri ile %95 oranında enerji verimliliğini arttırmaktadır. Aydınlatma da kullanılan LED lambalar, verimli lambalar olarak kabul edilmektedir, ancak LED’lerin üretim süreçlerinin ve kullanılan malzemelerin çevresel etkileri karbon ayak izini önemli ölçüde yükseltmektedir.

Spesifik değişkenlerin enerji geri kazanımında etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir değişken, sistemin genel enerji verimliliğini arttırmaya katkı

sağlamaktadır; ancak verimlilik yüzdelerinin, sistem tasarımına ve spesifik koşullara göre değişebileceği mutlaka dikkate alınmalıdır.

İmalat, gıda ve enerji sektörü toplam üç sanayi kuruluşu için örnek durum analizleri yapılmış ve enerji verimliliği modelleme tekniği kullanılarak enerji kazanımları hesaplanmıştır. İmalat fabrikasında, elektrik motorunun değişimi ile saatte 15,78 kW'lık bir enerji geri kazanımı, yıllık toplam 69155,81 kWh'lik bir enerji tasarrufu, 3172,82 \$'lık ciddi bir enerji maliyeti ekonomik olarak sağlanmıştır. Gıda fabrikasında, verimli LED tipi armatür kullanılması ile 3,47 kWh'lik bir kazanım elde edilmiş, yıllık toplam tüketilen enerjinin maliyetinde 697,3 \$/kWh'lik tasarruf edilmiştir. Model uygulamasındaki yalıtım ve ısı değiştiricileri üretim tesisinde uygulanmış ve %23,36 geri kazanım sağlanmıştır. Tüm fabrikalarda emisyonların düşük seviyede tutulması ile daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması, proses ve değişkenlerin doğru modellenmesi sayesinde üretimin kalitesi ve veriminde artış sağlanabileceğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. “Daha az enerji ile daha fazla iş üretmek” ilkesine dayanan model uygulamaları ile, sanayide enerji geri kazanımı arttırılabilmektedir. Sanayide sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji yönetimiyle iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkiler azaltılacaktır. Ulusal Kalkınma Planları'ndaki verimli enerji kullanan sanayiye geçiş hedefine katkı sağlanacaktır. Çalışmanın en önemli katkısı ise, çoklu parametre ve sistemsel analiz modeli ile her fabrikaya uygulanabilecek genelden özele verimli enerjinin kullanılabilecek olmasıdır.

**Anahtar Sözcükler :** Sanayide enerji verimliliği, Enerji kazanımı, Modelleme

**Bilim Kodu :** 91408

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

## **MODELLING OF ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY**

**Neslin HASAR OCAK**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:  
Assist. Prof. Dr. Ali CAN  
February 2024, 156 pages**

Energy efficiency which enables the effective and efficient use of energy resources is implemented as a combination of policies, technologies, and practices. In industry, it is a highly profitable and sustainable factor that plays a critical role in achieving comprehensive goals listed as energy security, cost savings and environmental sustainability. It is anticipated that this study will be a guide that can be used in all sub-sectors of the industry. The study includes the analysis and measurements of many factors in industrial facilities and covers efficient energy targets.

Although the sectoral branches of the industry differ structurally, the units, where energy is used, can be categorized under a systemic approach and can lead a significant gain through energy efficiency studies. Possible system parameters are modelled with procedural improvements. Moreover, model constructs supported by algorithmic inquiries are listed in detail in the study. Energy gains have been achieved through modelling based on scientific foundations.



An "Excel" data-based program was developed to examine the relationships between energy recovery and emission parameters. It is concluded that a linear trend exists between energy gains and reductions in greenhouse gas emissions.

Innovative and technological applications optimized with different techniques have revealed the potential to increase energy recovery by up to 90% in industries. Energy gains can be achieved at a rate of 5% to 20% in combustion plants by processes such as consumption of fuel related to energy requirement, boiler type selection, temperature-pressure optimization, controlled combustion process, use of heat recovery systems, and adjustment of the chimney temperature, together with insulation and other measures. In an optimized steam system, energy gains vary between 25% and 35% for boiler efficiency, between 15% and 25% for operating pressure and temperature, between 10% and 20% for insulation of steam lines, between 5% and 15% for condensate recovery, and finally, it is between 5% and 10% for the evaluation of flash steam.

In cogeneration systems, the percentage of energy recovery can be increased up to 60% through the use of heat, gasification of solid fuels, and capture of wasted CO<sub>2</sub> gases. Efficiency losses are reduced by an average of 11,5% with the systematic implementation of CO<sub>2</sub> capture. Replacing old, low-efficiency motors with innovative right-sized electric motors that consume less power can result in energy savings of 3% to 35%. In compressed air systems, up to 40% improvement can be achieved by cutting air leaks. In addition, it increases energy efficiency by 76,6% with liquid-air energy and by 95% with adiabatic energy storage systems. LED lamps used in lighting are considered efficient lamps, but the environmental impacts of the production processes and materials used in LEDs significantly increase the carbon footprint.

It can be concluded that the effect of specific variables on energy recovery is significant. Each variable supports improving the overall energy efficiency of the system; however, it must be considered that efficiency percentages may vary according to system design and specific conditions.

Three case studies were made for industrial organizations in the manufacturing, food, and energy sectors within the scope of the thesis, and energy gains were calculated

using the energy efficiency modelling techniques. In the manufacturing factory, an energy recovery of 15,78 kW per hour, a total annual energy saving of 69155,81 kWh, and a cost of \$ 3172,82 were economically achieved with the replacement of the electric motor. In the food factory, a gain of 3,47 kWh was achieved with the use of efficient LED-type luminaires, saving 697,3 \$/kWh in the total annual cost of energy consumption. The insulation and heat exchangers in the model application were applied in the production facility and 23,36% recovery was achieved. Sustainable and eco-environment production has been realized by keeping emissions at a low level in the factories.

This thesis reveals that an increase in quality and efficient production can be achieved by modelling variables and then improving processes. Energy recovery in the industry can be increased by implementing model applications based on the "producing more work with less energy" principle. Furthermore, the negative impacts of climate change can be reduced with sustainable energy management in the industry. It will also contribute to the goal of transition to energy-efficient industry in the National Development Plans. The most important contribution of the study is that efficient energy can be used from general to specific, which can be applied to every factory with a multi-parameter and systemic analysis model.

**Key Word** : Industrial energy efficiency, Energy gain, Modelling

**Science Code** : 91408

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlık süreci, zamanla şekillenen, uzun ve derin anlamlarla dolu bir yolculuk hikâyesine dönüştü. Bu yolculuğun sonunda tamamladığım çalışmada, pek çok kıymetli kişinin destekleri ve katkıları bulunmaktadır. Bu kişiler, sadece adımlarıma yön vermekle kalmadı, aynı zamanda yüreğime ışık tuttular ve hayalini kurduğum bu başarıya ulaşmamda beni cesaretlendirdiler.

Başta fikirleri, akademik yönlendirmeleri, içten ve samimi rehberliğiyle bana yol göstererek bu tezi nihayete erdirmemi sağlayan, kendisinin ilham veren öğütleri, deneyimleri, sabrı ve anlayışı ile beni bu yolda harmanlayan ve mesleğime olan gönülden bağlılığıma inanarak bu yolda bana örnek olan çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali CAN'a bana olan inancı, güveni ve katkıları için minnettarım. Kendisinin değerli öğretileri ve kılavuzluğu, bu zorlu yolculuğun üstesinden gelmeme yardımcı oldu. Bu tezin nihayete erdirilmesindeki büyük payını asla unutmayacağım.

Ayrıca bu süreçte bilgi ve bilgeliklerini benimle paylaşan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK ve Prof. Dr. Engin GEDİK'e teşekkürlerimi sunarım. Sizlerin desteği ve yönlendirmeleri, bu tezin şekillenmesine katkıda bulunmuştur.

Bu süreçte beni yalnız bırakmayan ve her zaman başaracağıma inanarak beni destekleyen dostlarım Fatma ÇELEBİ KARAÇAM, Dr. Özlem ÇELEBİ ve Dr. Hasan ÖZSOY'a da içten teşekkürlerimi iletmek isterim. Sizin inancınız ve desteğiniz, her zorluğun üstesinden gelmemde büyük bir güç kaynağı oldu.

Beni sevgi ve özveriyle yetiştirip hayata hazırlayan, bana olan güvenlerini ve inançlarını hiçbir zaman kaybetmeyip her zaman arkamda duran, beni yüreklendiren annem Nazire HASAR, babam Naci HASAR ve kardeşim Efe Batın HASAR'a teşekkür ederim. Bugüne kadar başardığım her şey aslında onların eseridir.

Hayatımın en büyük destekçisi, varlığıyla bana güç veren, her adımda, her zorlukta yanımda olan sevgili eşim Atakan Oğuz OCAK'a en derin teşekkürlerimi sunmak isterim.

Son olarak, yaşadığım bu deneyimi renklendiren, olmazsa olmazım canım anneannem Leyla ŞAHİN'i burada anmak ve bu çalışmayı kendisine armağan etmek istiyorum. Onun değerli öğütleri ve sevgisi, bu tezi tamamlamamda büyük bir ilham kaynağı oldu.

Bu çalışma YÖK 100/2000 Doktora Burs Programı “Enerji Verimliliği” tematik alanı kapsamında desteklenmiştir.



## İÇİNDEKİLER

|                                                    | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------|--------------|
| KABUL .....                                        | ii           |
| ÖZET .....                                         | iv           |
| ABSTRACT.....                                      | vii          |
| TEŞEKKÜR.....                                      | x            |
| İÇİNDEKİLER .....                                  | xii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                               | xvi          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                            | xviii        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                | xx           |
| <br>                                               |              |
| BÖLÜM 1 .....                                      | 1            |
| GİRİŞ .....                                        | 1            |
| <br>                                               |              |
| BÖLÜM 2 .....                                      | 5            |
| LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                        | 5            |
| 2.1. ENERJİ.....                                   | 5            |
| 2.2. ENERJİ DENGESİ.....                           | 8            |
| 2.2.1. Enerji Geçişinin Gerçekleşme Yolları .....  | 9            |
| 2.2.1.1. Isı ile Enerji Geçiş.....                 | 10           |
| 2.2.1.2. İş ile Enerji Geçiş.....                  | 12           |
| 2.2.1.3. Kütle Akışı .....                         | 13           |
| 2.2.2. Kapalı Sistemler için Ekserji Analizi ..... | 15           |
| 2.2.3. Enerji Dönüşüm Verimleri .....              | 16           |
| 2.3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ .....                      | 18           |
| 2.3.1. Enerji Yoğunluğu .....                      | 20           |
| 2.3.2. Dünyada Enerji Yoğunluğu .....              | 20           |
| 2.3.3. Türkiye’de Enerji Yoğunluğu.....            | 22           |
| 2.4. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ.....              | 24           |
| 2.5. ENERJİ VERİMLİLİĞİ MODELLEMELERİ .....        | 25           |

|                                                                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| BÖLÜM 3 .....                                                              | 29                  |
| MATERYAL VE METOT .....                                                    | 29                  |
| 3.1. GENEL .....                                                           | 29                  |
| 3.2. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ALGORİTMALARI .....                       | 30                  |
| 3.3. PROSESLER.....                                                        | 34                  |
| 3.3.1. Proseslerde Enerji Kullanımı ve Kazanımı .....                      | 34                  |
| 3.3.1.1. Yakma Tesisleri .....                                             | 34                  |
| 3.3.1.2. Buhar Sistemleri.....                                             | 42                  |
| 3.3.1.3. Kojenerasyon Sistemleri .....                                     | 47                  |
| 3.3.2. Proseslerde Ekipman Kullanımı .....                                 | 50                  |
| 3.3.2.1. Elektrik Motor Sistemleri .....                                   | 51                  |
| 3.3.2.2. Basınçlı Hava Sistemleri.....                                     | 54                  |
| 3.3.3. Diğer Enerji Kazanım Noktaları.....                                 | 58                  |
| 3.3.3.1. Sisteme Hava Ön Isıtıcı Kurulması.....                            | 59                  |
| 3.3.3.2. Sistemde Ekonomizer Kullanımı .....                               | 59                  |
| 3.3.3.3. Reküperatif ve Rejeneratif Isı Değiştiriciler .....               | 62                  |
| 3.4. YAKITLAR VE EMİSYON HESAPLAMALARI .....                               | 63                  |
| 3.4.1. Yakıtlar .....                                                      | 63                  |
| 3.4.2. Emisyon Hesaplamaları .....                                         | 65                  |
| 3.5. DİĞER UYGULAMALAR .....                                               | 67                  |
| 3.5.1. Yalıtım .....                                                       | 67                  |
| 3.5.2. Aydınlatma .....                                                    | 72                  |
| 3.5.2.1. Akkor Lamba .....                                                 | 73                  |
| 3.5.2.2. Floresan Lamba.....                                               | 73                  |
| 3.5.2.3. LED Lamba.....                                                    | 74                  |
| 3.6. ENERJİ KAZANIMININ İKLİM VE EMİSYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİ .               | 76                  |
| BÖLÜM 4 .....                                                              | 78                  |
| BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                 | 78                  |
| 4.1. GENEL .....                                                           | 78                  |
| 4.2. ENERJİ GERİ KAZANIM VERİTABANLARI.....                                | 79                  |
| 4.2.1. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Değerlendirilmesi ..... | 80                  |

## **Sayfa**

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2. Elektrik Motor Sistemleri .....                           | 81  |
| 4.2.3. Basınçlı Hava Sistemlerinin Değerlendirilmesi.....        | 84  |
| 4.2.4. Yakıt Kullanımlarının Değerlendirilmesi .....             | 86  |
| 4.2.5. Yalıtım Uygulamasının Değerlendirilmesi.....              | 87  |
| 4.2.6. Aydınlatma Armatürlerinin Değerlendirilmesi .....         | 89  |
| <br>                                                             |     |
| BÖLÜM 5 .....                                                    | 94  |
| ÖRNEK FABRİKA UYGULAMALARI.....                                  | 94  |
| 5.1. İMALAT SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI.....      | 94  |
| 5.1.1. Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği.....      | 95  |
| 5.1.2. Yakıt Değişimi ile Enerji Verimliliği .....               | 97  |
| 5.2. GIDA SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI .....       | 100 |
| 5.2.1. Aydınlatma Armatürü Değişimi ile Enerji Verimliliği.....  | 100 |
| 5.3. ENERJİ SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI .....     | 104 |
| 5.3.1. Kazana Uygulanan Yöntemler.....                           | 106 |
| 5.3.1.1. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Yakalama.....          | 107 |
| 5.3.1.2. Gazlaştırma .....                                       | 108 |
| 5.3.1.3. Yakıt Nemini Alma.....                                  | 109 |
| 5.3.2. Isı Değiştiricilerine Uygulanan Yöntemler.....            | 110 |
| 5.3.2.1. Isı Kazanımı .....                                      | 111 |
| 5.3.2.2. Rejenerasyon Sistemlerinin Yerleştirilmesi.....         | 112 |
| 5.3.2.3. Isı Değiştiricilerinin Yüzey Alanının Artırılması ..... | 112 |
| 5.3.3. Pompa Sistemleri için Yapılan İyileştirmeler.....         | 114 |
| 5.3.3.1. Isı Pompası Kullanımı.....                              | 114 |
| 5.3.4. Jeneratöre Uygulanan Yöntemler .....                      | 115 |
| 5.3.4.1. Teknolojik Jeneratör Kullanımı .....                    | 115 |
| 5.3.5. Tüm Sistemlere Uygulanan Genel Yöntemler.....             | 116 |
| 5.3.5.1. İyi Yalıtım.....                                        | 116 |
| 5.3.5.2. Boyut İndirgeme .....                                   | 117 |
| 5.3.5.3. Otomasyon İşlemleri.....                                | 118 |
| 5.3.5.4. Proses Parametrelerinin Optimizasyonu .....             | 118 |

|                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------|---------------------|
| BÖLÜM 6 .....              | 122                 |
| SONUÇ VE ÖNERİLER .....    | 122                 |
| KAYNAKLAR .....            | 126                 |
| <br>EK AÇIKLAMALAR A ..... | <br>154             |
| ÖZGEÇMİŞ .....             | 156                 |





## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....                   | 7  |
| Şekil 2.2. Birincil, ikincil ve nihai enerji .....                       | 8  |
| Şekil 2.3. Açık ve kapalı sistem şematik gösterimi. ....                 | 10 |
| Şekil 2.4. Birleşik sistem ve çevre şematik gösterimi.....               | 15 |
| Şekil 2.5. Dünya’da enerji yoğunluğu .....                               | 21 |
| Şekil 2.6. Ülke gruplarına göre enerji yoğunluğu .....                   | 21 |
| Şekil 2.7. Birincil ve Nihai enerji yoğunluğu indeksi değişim .....      | 23 |
| Şekil 2.8. Yıllar itibariyle sektörel enerji yoğunlukları.....           | 24 |
| Şekil 2.9. Sanayi kuruluşunda uygulanabilecek modelleme aşamaları.....   | 27 |
| Şekil 3.1. Çalışmanın metodolojik gruplandırılması. ....                 | 29 |
| Şekil 3.2. Yakıt sistemleri ve proses algoritması. ....                  | 31 |
| Şekil 3.3. Yakıt ve proses algoritması tablo ayrışmaları.....            | 32 |
| Şekil 3.4. Yakma sisteminin genel enerji dengesi.....                    | 35 |
| Şekil 3.5. Bir kazanın ısı dengesi .....                                 | 37 |
| Şekil 3.6. Oksijen konsantrasyonu ile yanma verimliliğinin ilişkisi..... | 38 |
| Şekil 3.7. Buhar sistemleri genel görünüş.....                           | 43 |
| Şekil 3.8. Kondens çıkış hattı.....                                      | 44 |
| Şekil 3.9. Buhar türbini ile ısıнын mekanik işe çevrilmesi. ....         | 45 |
| Şekil 3.10. Buhar sisteminde degazör kullanımı.....                      | 46 |
| Şekil 3.11. Flaş buhar sistemi ve ekipmanları.....                       | 47 |
| Şekil 3.12. Isı ve elektriğin ayrı üretimi.....                          | 48 |
| Şekil 3.13. Kompresör çeşitleri .....                                    | 55 |
| Şekil 3.14. Hava ön ısıtıcısı şematik gösterimi. ....                    | 59 |
| Şekil 3.15. Ekonomizer ısı kazanımı şematik gösterimi. ....              | 60 |
| Şekil 3.16. Reküperatör çalışma prensibi.....                            | 62 |
| Şekil 3.17. Yalıtılmış boru ile ısı iletimi. ....                        | 70 |
| Şekil 3.18. EXCEL tabanlı programda makro oluşturulması .....            | 77 |
| Şekil 4.1. Türbin çıkış buhar basıncına göre güç kazanımı. ....          | 81 |

## **Sayfa**

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.2. Farklı motor güçlerine göre güç kazanımı. ....                               | 83  |
| Şekil 4.3. Motor güçleri ve uygulamalar ile CO <sub>2</sub> emisyon azaltımı. ....      | 83  |
| Şekil 4.4. Motor güçleri ve uygulamalar ile CH <sub>4</sub> emisyon azaltımı. ....      | 83  |
| Şekil 4.5. Motor güçleri ve uygulamalar ile N <sub>2</sub> O emisyon azaltımı. ....     | 84  |
| Şekil 4.6. Kompresör çeşitlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı. ....             | 85  |
| Şekil 4.7. Farklı yakıt türlerine göre sera gazı emisyonları. ....                      | 86  |
| Şekil 4.8. Yakıt türlerine göre güç kazanımı.....                                       | 87  |
| Şekil 4.9. Yakıt türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....                  | 87  |
| Şekil 4.10. Değişen malzeme türlerine göre güç kazanımı.....                            | 88  |
| Şekil 4.11. Yalıtım malzeme türlerinin güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....           | 88  |
| Şekil 4.12. Işık akısı değerleri ile tasarruflu - akkor güç kazanımı.....               | 91  |
| Şekil 4.13. Tasarruflu - akkor kazanımına göre CO <sub>2</sub> emisyon azaltımı.....    | 91  |
| Şekil 4.14. Işık akısı değerleri ve LED - akkor güç kazanımı. ....                      | 92  |
| Şekil 4.15. LED - akkor kazanımına göre CO <sub>2</sub> emisyon azaltımı. ....          | 92  |
| Şekil 4.16. Işık akısı değerlerine göre LED - tasarruflu güç kazanımı. ....             | 93  |
| Şekil 4.17. LED - tasarruflu kazanımına göre CO <sub>2</sub> emisyon azaltımı. ....     | 93  |
| Şekil 5.1. Enerji kazanım ve direk sera gazı emisyon azaltımı.....                      | 97  |
| Şekil 5.2. Değişen yakıt miktarına göre, emisyon azaltımı.....                          | 100 |
| Şekil 5.3. Enerji tüketim verilerinin iyileştirilmiş tüketim ile karşılaştırılması..... | 103 |
| Şekil 5.4. Enerji kazanım miktarının azalttığı emisyon miktarı.....                     | 104 |
| Şekil 5.5. Sistem enerji üretimi ve kayıpları. ....                                     | 105 |
| Şekil 5.6. Fabrika sistem kontrolü ve enerji dağılımı programı.....                     | 106 |
| Şekil 5.7. Kazan sistemlerindeki enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri. ....      | 110 |
| Şekil 5.8. Isı değiştiricilerindeki enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri.....    | 114 |
| Şekil 5.9. Tüm Sistemlere uygulanan yöntemlerdeki kazanım değerleri.....                | 119 |
| Şekil 5.10. Enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri. ....                           | 120 |
| Şekil 6.1. Enerji verimliliği çalışmaları. ....                                         | 123 |
| Şekil Ek A.1. Yakıtların Net Kalorifik Değerleri. ....                                  | 155 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 3.1. Farklı fazlalık hava oranları için yanma verimi .....                     | 39  |
| Çizelge 3.2. 20 ve 30 bar türbin giriş buhar basıncı ile çalışan türbin verileri. .... | 49  |
| Çizelge 3.3. Elektrik motorlarında verimlilik değerleri .....                          | 53  |
| Çizelge 3.4. Kompresör türleri ve performans aralıkları .....                          | 55  |
| Çizelge 3.5. Rotodinamik pompa türleri ve performans aralıkları.....                   | 57  |
| Çizelge 3.6. Bazı yakıtların net kalorifik değerleri ve verimlilik yüzdeleri.....      | 64  |
| Çizelge 3.7. CO <sub>2</sub> Emisyon faktörleri .....                                  | 66  |
| Çizelge 3.8. CO <sub>2</sub> harici direk sera gazları için emisyon faktörleri.....    | 66  |
| Çizelge 3.9. Seçilmiş yalıtım malzemeleri için termal iletkenlik değerleri. ....       | 68  |
| Çizelge 3.10. Seçilmiş akışkanlar için taşınım sabiti değerleri.....                   | 68  |
| Çizelge 4.1. Türbinin güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....                           | 80  |
| Çizelge 4.2. Verimlilik değerlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....        | 82  |
| Çizelge 4.3. Kompresör çeşitlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı. ....          | 84  |
| Çizelge 4.4. Yakıt türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....               | 85  |
| Çizelge 4.5. Yakıt türlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı. ....                | 86  |
| Çizelge 4.6. Değişen malzeme türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı... 88     |     |
| Çizelge 4.7. Aydınlatma armatürleri için güç kazanımı ve emisyon azaltımı. ....        | 90  |
| Çizelge 5.1. Mevcut ve değiştirilen elektrik motorları teknik özellikleri. ....        | 95  |
| Çizelge 5.2. Elektrik motorlarında günlük ve yıllık kazanım değerleri. ....            | 96  |
| Çizelge 5.3. Kazanım değerine göre emisyon değerleri. ....                             | 97  |
| Çizelge 5.4. Farklı yakıtların kazanım değerine göre emisyon değerleri. ....           | 100 |
| Çizelge 5.5. Gıda fabrikası aydınlatma kullanım bilgileri. ....                        | 101 |
| Çizelge 5.6. Akkor aydınlatmanın LED aydınlatma kullanılarak iyileştirilmesi... 102    |     |
| Çizelge 5.7. Tasarruflu yerine LED aydınlatma kullanıldığında enerji kazanımı. 102     |     |
| Çizelge 5.8. Toplam enerji kazanım ve tüketim miktarları.....                          | 103 |
| Çizelge 5.9. Enerji kazanım değerlerine göre emisyon azaltımı.....                     | 104 |
| Çizelge 5.10. Sistemlerde kullanılan yöntemler ve verimlilik yüzdeleri. ....           | 107 |
| Çizelge 5.11. Geri kazanılan toplam enerji miktarına göre emisyon azaltımı. ....       | 120 |

Çizelge 5.12. Sistem birimlerinin enerji geri kazanımına göre emisyon azaltımı. .. 121



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|                            |                                                                    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\Delta S_{\text{üretim}}$ | : sistemin entropi değişimi                                        |
| $\Delta T$                 | : sıcaklık farkı                                                   |
| $\Delta T_t$               | : kanat taban sıcaklığı                                            |
| $\Delta x$                 | : kalınlık                                                         |
| $A$                        | : alan                                                             |
| $A_{tk}$                   | : kanat taban alanı                                                |
| $B$                        | : ölçülen yakıt debisi                                             |
| $C$                        | : karbon                                                           |
| $C\text{-CO}_2$            | : karbon-karbondiyoksit dönüşümü                                   |
| $CF$                       | : çevirme katsayıları                                              |
| $CH_4$                     | : metan                                                            |
| $CO_2$                     | : karbondiyoksit                                                   |
| $\dot{Q}$                  | : çalışma süresi                                                   |
| $E$                        | : verimlilik değeri (katı yakıt için %95 ve gaz yakıtlar için %99) |
| $EF$                       | : emisyon faktörleri                                               |
| $E_k$                      | : kanatçık etkinliği                                               |
| $F$                        | : kuvvet                                                           |
| $h$                        | : taşınım kat sayısı                                               |
| $H_2$                      | : hidrojen                                                         |
| $h_{\infty 1}$             | : iç taşınımdaki akışkan için taşınım sabiti                       |
| $h_{\infty 2}$             | : dış cephe hava için taşınım sabiti                               |
| $HI_n$                     | : ihraç edilen yakıt tüketim miktarı                               |
| $H_u$                      | : yakıtın alt ısı değeri                                           |
| $i$                        | : mevcut kutup değeri                                              |
| $I_b$                      | : buhar entalpisi                                                  |
| $I_n$                      | : ithal edilen yakıt tüketim miktarı                               |

|                    |                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| $i_s$              | : besi suyu entalpisi                             |
| $j$                | : yeni kutup değeri                               |
| $k$                | : termal iletkenlik sabiti                        |
| $k_b$              | : boru için termal iletkenlik değeri              |
| $k_t$              | : iletim kat sayısı                               |
| $k_y$              | : yalıtım malzemesi için termal iletkenlik değeri |
| $L$                | : levha kalınlık                                  |
| $\dot{m}$          | : kütleli debi                                    |
| $m$                | : kütle                                           |
| $m_b$              | : ölçülen buhar debisi                            |
| $m_s$              | : ölçülen su debisi                               |
| $\eta$             | : verim                                           |
| $n$                | : yakıt tipleri                                   |
| $N_2O$             | : nitroz oksit                                    |
| $\eta_{fark1}$     | : iyileştirilmiş kayıp enerji                     |
| $\eta_i$           | : standart verimlilik                             |
| $\eta_j$           | : yükseltilmiş verimlilik değeri                  |
| $\eta_{kayıp}$     | : kayıp enerji                                    |
| $\eta_{kazanılan}$ | : kazanılan enerji                                |
| $\eta_{mekanik}$   | : mekanik verim                                   |
| $P$                | : basınç                                          |
| $P_1$              | : motor gücü                                      |
| $q$                | : ısı akısı                                       |
| $Q_1$              | : diğer ısı kayıpları                             |
| $Q_A$              | : akkor ampül enerji kullanım miktarı             |
| $Q_d$              | : değişen duruma göre üretilen enerji             |
| $Q_{duvar}$        | : duvarlar arasındaki ısı akışı                   |
| $Q_{gaz}$          | : uçucu gazların atık ısı akışı                   |
| $Q_{hava}$         | : önceden ısıtılmış hava olarak ısı               |
| $Q_{iletim}$       | : iletim ısı transferi                            |
| $Q_{ışınım}$       | : ışıınım ısı transferi                           |
| $Q_k$              | : kanatlı halde ısı transferi                     |
| $Q_L$              | : led ampül enerji kullanım miktarı               |

|                              |                                                      |
|------------------------------|------------------------------------------------------|
| $Q_p$                        | : prosese transfer edilen ısı akış                   |
| $Q_T$                        | : tasarruflu ampül enerji kullanım miktarı           |
| $Q_{\text{taşınım}}$         | : taşınım ısı transferi                              |
| $Q_{\dot{u}}$                | : üretilen enerji                                    |
| $Q_{\text{yakıt}}$           | : yakıtta bulunan potansiyel ısı                     |
| $r_1$                        | : iç çap (boru)                                      |
| $r_2$                        | : dış çap (boru); kaplama malzemesi iç çapı          |
| $r_3$                        | : kaplama malzemesi dış çapı                         |
| $r_c$                        | : kritik izolasyon yarıçapı                          |
| $S$                          | : kükürt                                             |
| $SC$                         | : stok değişimleri                                   |
| $SO_2$                       | : kükürt dioksit                                     |
| $S_{\text{üretim}}$          | : entropi üretimi                                    |
| $T_{\text{çevre}}$           | : çevre sıcaklığı                                    |
| $T_f$                        | : akışkanın yüzeyden uzaktaki sıcaklık               |
| $T_s$                        | : yüzey sıcaklığı                                    |
| $U$                          | : iç enerji                                          |
| $U_n$                        | : yakıt tüketim miktarı                              |
| $V$                          | : hacim                                              |
| $V_d$                        | : yeni sisteme göre buhar miktarı                    |
| $V_{\dot{u}}$                | : üretilen buhar miktarı                             |
| $W$                          | : iş                                                 |
| $YO$                         | : yükleme oranı (fiili yükün tam yüke oranı)         |
| $Z$                          | : farklı ısı kayıplar                                |
| $\varepsilon$                | : yayma oranı                                        |
| $\eta_1$                     | : birinci yanma verimliliği                          |
| $\eta_2$                     | : ikinci yanma verimliliği                           |
| $\eta_{\text{fark}}$         | : aynı yakıt için verimlilik farkı                   |
| $\eta_{\text{standart}}$     | : standart tip motor verimi                          |
| $\eta_{\text{yakıt 1}}$      | : doğalgaz, LPG, elektrik için verimlilik            |
| $\eta_{\text{yakıt 2}}$      | : motorin, fuel-oil, linyit ve kömür için verimlilik |
| $\eta_{\text{yük. verimli}}$ | : yüksek verimli motor tipi                          |
| $\sigma$                     | : Stefan-Boltzman sabiti                             |

## KISALTMALAR

|       |                                                                                                  |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AB    | : Avrupa Birliği                                                                                 |
| BEM   | : Birim Enerji Maliyeti                                                                          |
| CHP   | : Combined Heat and Power (Kojenerasyon Sistemi)                                                 |
| CIS   | : Common Wealth of Independent States (Bağımsız Devletler Topluluğu)                             |
| GSYİH | : Gayri Safi Yurt İçi Hasıla                                                                     |
| HV    | : Yakıt Isıl Değer (Heat Value)                                                                  |
| IE1   | : Standard Efficiency (Standart Verimlilik)                                                      |
| IE2   | : High Efficiency (Yüksek Verimlilik)                                                            |
| IE3   | : Premium Efficiency (Premium Verimlilik)                                                        |
| IE4   | : Super Premium Efficiency (Süper Premium Verimlilik)                                            |
| IEC   | : International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)               |
| IPCC  | : Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli)           |
| IS    | : International System of Units (Uluslararası Birimler Sistemi)                                  |
| J     | : Joule                                                                                          |
| kJ    | : Kilojoule                                                                                      |
| LED   | : Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)                                                        |
| LPG   | : Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)                                          |
| MJ    | : Megajoule                                                                                      |
| MTEP  | : Milyon Ton Eşdeğer Petrol                                                                      |
| NCV   | : Net Calorific Value (Net Kalorifik Değer)                                                      |
| OECD  | : Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) |
| TEP   | : Ton Eşdeğer Petrol                                                                             |
| TS    | : Türk Standardı                                                                                 |



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Tüm dünyada hem üretim hem de tüketim miktarları açısından önemli bir konu haline gelen enerji, küresel ekonomik sistemin birincil parametresi olarak yerini uzun yıllar koruyacaktır [1]. Dünya ülkelerinin gelişmişlik seviyelerinin belirlenmesinde kullanılan göstergelerden biri olan enerji, tüketim ve üretim miktar oranları bakımından toplumlar arası kıyaslamalarda, tarafların ekonomik bağımsızlığını ve rekabet gücünün de bir sembolüdür [2].

Dünyamızda nüfus hızla artmaktadır. Çoğunlukla gelişen teknoloji nüfusun daha refah yaşaması için kullanılmaktadır. Bu durum endüstriyel ve toplumsal kalkınma çalışmalarında, enerji sektörünü ön plana çıkarmaktadır [3]. Dünya gelişimin şekillenmesinde, enerji tüketiminin gereğinden çok kullanılması, sera gazı salınımlarını da arttırmaktadır. Direk sera gazlarının, küresel ısınmada etkisi çok fazladır. İklim değişikliği sera gazlarının yüksek ısı tutma kapasitesinin bir sonucudur [4]. Ancak iklim değişikliğinin zararlı çevresel etkileri ve buzulların erimesi birçok canlı türünün yaşamını tehdit etmektedir. Ekolojik denge bozulmuştur ve buna sebep olan fosil yakıtları da hızla tükenmektedir. Kaynakların yüksek tükenme ihtimali, insanoğlunu alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya yöneltmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarını daha etkin kullanmaya zorlamıştır [5].

Enerji ihtiyacını karşılamakta yaygın olarak kullanılan fosil yakıt rezervlerinin azaldığı bir dünyada, insanoğlunun alternatif enerji kaynakları ile çözüm arayışlarına itmiştir [6]. Enerjinin verimli kullanılması sürdürülebilir enerji çalışmalarını ortaya çıkarmış olmakla beraber, ekonomik kazanım noktası olarak da bilinçli enerji kullanım tanımını, enerji stratejilerinin bir parçası olarak görülmesini sağlamıştır [7]. Enerji temininde sürdürülebilirliği arttıracak her tedbir, strateji ve politika, enerji kaynaklarının verimli kullanımını vurgulamaktadır [8]

Enerji verimliliği, enerji tüketimini son ürün kalitesini değiştirmeksizin, uygulanan teknikler ile aynı miktardaki işi, daha az enerji ile yapılabilmesidir [9]. Enerji kayıplarının azaltılması, enerjinin etkin kullanılması, enerji verimin artırılması veya kayıp enerjinin tekrar kullanılması ile üretime çevrilmesini amaçlamaktadır. Kaliteyi düşürmeden daha az enerji ile üretim miktarını arttırabilmek enerji verimliliğinin esas amacıdır [10].

Enerji verimliliğini arttırmanın en önemli yollarından biri, enerji yoğunluğunu düşürmektir. Enerji verimliliği göstergesi olan enerji yoğunluğu, kişi başına tüketilen enerji miktarını gösterdiği gibi, sanayi üretim için birim ürün başına tüketilen enerji olarak tanımlanmaktadır [11,12]. Bu miktarın düşük olması enerji verimliliğini arttırmaktadır. Enerji yoğunluğu, enerji verimliliği verilerinin değerlendirilip kıyaslanmasında bir ölçüt olarak kabul görmekle beraber, toplam tüketilen enerji miktarı da en az enerji yoğunluğu kadar önemli bir göstergedir [13,14].

Enerji verimliliği çalışmalarının temel hedeflerinden biri enerji dışı bağımlılığın azaltılmasıdır. Ülkemizde artan nüfusla birlikte, sanayileşme, tarım, ulaşım ve diğer sektörel gelişim, enerjinin dikkatli kullanılmasını ve verim artışı tanımını getirmiştir [15]. İhtiyaç duyulan enerji sadece günümüzde sanayileşmenin bir göstergesi değildir, aynı zamanda bir refah göstergesidir. Gelişmişlik tanımı, enerji tüketimi kapasitesi, enerjinin etkin ve verimli kullanılması ile ilişkilendirilmiştir [16,17].

Enerji kullanım alanlarında, enerji verimliliğinin artırılması, tüketimde enerji yoğunluğunun azaltılması, enerji iletimindeki kayıp ve kaçakların azaltılması, üretimde yüksek verimlilikte cihaz ve makinelerin kullanılması, teknoloji entegrasyonunun sağlanması, enerji kazanımlarını arttıracaktır [18,19].

Üretimde, düşük maliyetle performans ve kalite arttırımı sağlanabilmesi için donanım, bilişim ve enerjinin verimli kullanması gereklidir. Sanayi alanında yapılacak olan her iyileştirme, ülkelerin ekonomik, çevresel ve sosyal refah düzeyine büyük katkıda bulunacaktır [20].

Ülke ekonomisinin temeli olan imalat sanayi; tarım, ulaştırma, konut ve diğer hizmetler gibi sektörel alanlar için, arz talep dengesini sağlayan en önemli yapı taşıdır [21]. Sanayi sektöründe ihtiyaç duyulan teknik ihtiyacın ve mühendislik çalışmalarının karşılanması kalkınma planlarının bir parçasıdır [22]. Bu bakımdan sanayi alanında yapılacak olan her türlü verimlilik çalışmaları doğrudan ekonomik kalkınma ile ilgilidir. Sanayide enerjinin verimli kullanılarak üretim miktarının artması ise, kalkınma hedeflerinin gerçekleşmesi anlamını taşımaktadır [23].

Enerji verimliliği çalışmalarının en kolay yollarından bir tanesi matematiksel olarak modelleme çalışmalarıdır. Bu yöntem büyük maliyetlerden tasarruf sağlanabilmektedir. Proses ve değişkenlerin doğru tanımlanması ve modellenmesi, üretim kalitesini arttırmaktadır [24]. Özellikle önemli enerji kazanım noktaları olan ısıtma, soğutma ve havalandırma işlemlerinde, modelleme tekniği sayesinde, sanayi kuruluşlarında %60'lara varan kazanımlar gerçekleştirilebilmiştir. [25].

Bu tezin amacı, sanayi sektöründe her türlü enerji kullanımını araştırarak, enerji kullanımına bağlı tüm değişkenlerin ortaya konulmasıdır. Ülkemizde ve dünyada yapılmış çalışmalar incelenerek, enerji verimliliğinin sanayi üretimde artırılması için hangi adımların atılabileceği gözden geçirilmiştir. Tez, genel bir çalışma gibi gözükmeyle beraber, herhangi bir sektörel üretime veya sanayiye uygulandığında, prosesteki her noktada enerji kazanımını tanımlayabilmektedir. Enerjinin verimli kullanılmasının çevresel etkisi de değerlendirilmiştir. Özellikle İklim değişikliği çalışmalarında, enerji kayıplarının azaltılması, bir eylem planı olarak, ülkemizin de taraf olduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Post Kyoto Protokolü ve Paris Antlaşması kapsamında, emisyon azaltım çalışmasının parçasıdır.

Sanayideki verimlilik çalışması, genel anlamda proses, yakıtlar ve diğer tedbirler olarak üç grupta incelenmiştir. Her grup için değişken tanımlanması, çalışmanın ilk adımını oluşturmaktadır. Değişkenlere bağlı matematiksel modellerin kurgulanması işlemi ise değişkenler tanımlandıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Çalışma hedefi, enerji verimliliğinin artırılması için değişkenlerin incelenerek, enerji kazanım noktalarının sayısal olarak ortaya konulması işlemidir. Değişkenler, hazırlanan enerji verimliliği karar ağaçları içerisinde yer alan soruların cevaplanması ile ortaya çıkarılmaktadır.

Sonrasında her bir değişkenin sayısal değerlerinin hesaplanması veya tahmin edilmesi ile değişken tanımlanması detaylandırılmaktadır. Enerji geri kazanım noktalarının belirlenmesi ise bu işlemin en önemli son adımıdır. Her bir geri kazanım noktası ayrı değerlendirilerek, uygulanacak yöntem ve olası kazanım değeri belirlenmektedir. Bu doğrultuda farklı örnek çalışmalar da tezin bir parçası olarak çalışılmıştır.

Enerji modelinin, enerji kaybının minimize edecek şekilde sanayi proseslerine uygulanarak, üretim içindeki enerji kazanım noktalarını bir model kurgusu içinde ortaya koymaktadır. Enerji kazanım ve kayıplar tanımlandıktan sonra, enerjinin verimli kullanılması ile net enerji verimliliği tahmini yapılabilmektedir. Kısmi veya bütüncül uygulamalar ile sayısal değerler hesaplanıp, sanayi kuruluşunun eko-çevresel bir üretimi, minimum enerji kullanımı ile nasıl gerçekleştirebileceği görülebilmektedir. Nihai sonuç, sanayi kuruluşunun gelişmesine çok büyük katkı sağlamaktadır. Ayrıca Ulusal Kalkınma Planları'nda yer alan enerji verimliliği başlığına önemli bir bilimsel destek sağlaması da beklenmektedir. En iyi tekniklerin uygulanarak, enerjinin en verimli şekilde kullanılması her model için öncelikli amaç olarak belirlenmiştir. Verimli enerji kullanım hedeflerini içeren, mühendislik biliminin her sanayi tesisinde, uygulanabilir analiz ve ölçümleri ile yürütülebilecek, bir çalışması olması sebebiyle, farklılığı ortaya çıkan, örnek bir tez çalışmasıdır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 2.1. ENERJİ

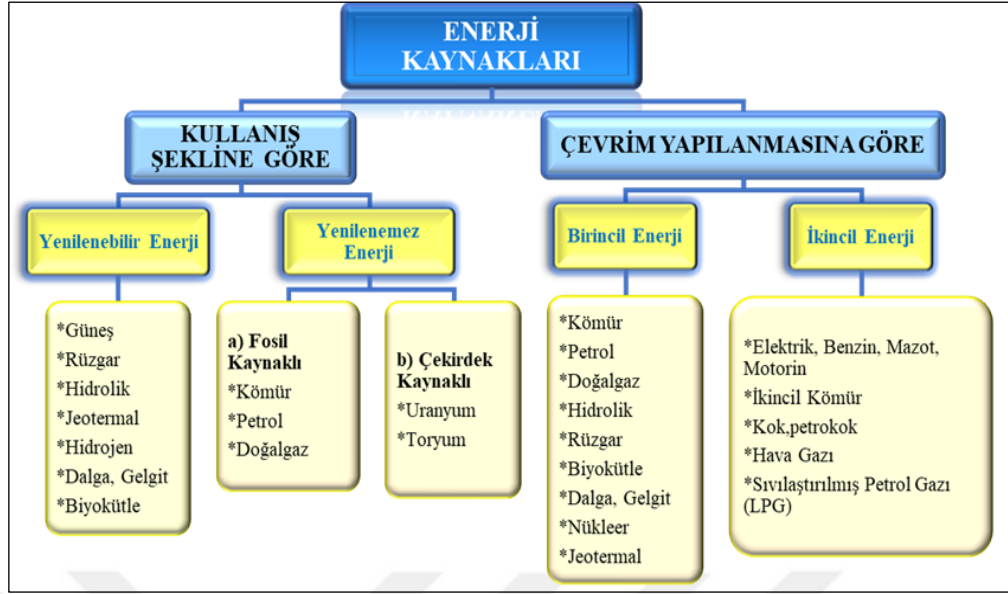
Enerji, bir sistemin iş yapabilme kapasitesinin ölçülmesi olarak tanımlanmaktadır. Enerji farklı bir ifade ile, hareket ettirici güç anlamına geldiğinden sistemdeki iş yapma durumu olarak ta tanımlanabilmektedir. Yapısal olarak enerji, kayıpların yüksek olduğu, elektrik, ısı, buhar v.b. enerji formlarından, çoğunlukla mekanik enerjiye dönüştürülen depolanabilir, ölçülebilir ve tüketilebilir bir değişkendir [26]. Skaler bir büyüklük olup, ölçü birimi uluslararası birim sisteminde (SI) Joule olarak alınmaktadır [27].

Termodinamik yasalarının en önemlisi enerjinin yok edilemeyeceği ve yoktan var edilemeyeceği ilkesidir. Bu yasa ile enerji denge kavramı kullanılarak, enerji formülasyonu ve kayıplar tanımlanabilmiştir [28]. Enerji kayıpları ise enerji verimliliği tanımını ortaya çıkarmıştır [29]. Enerjinin ekonomik boyutu ve farklı formlardaki dönüşümü, enerjinin dengesinin korunması ilkesine göre enerji hallerini değerli bir hale getirmiştir [30]. Kullanılan enerji formları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. **Termal (Isıl) Enerji:** Madde veya cisim sıcaklığının artırılması, yanma ve faz değiştirme işlemleri neticesinde ortaya çıkan enerji olarak tanımlanmaktadır. Her cismin, sıcaklığa bağlı olarak, yüksek veya düşük enerjisi mevcuttur [31].
2. **Mekanik Enerji:** Sistemin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Cismin hareket enerjisi ve konumuna bağlı olarak sistemde depolanan enerji miktarıdır. Mekanik enerji, bir cismin iş yapma kabiliyetini yükseltilmesi ile arttırılabilir [32]

3. **Hareket Enerjisi (Kinetik Enerji):** Cismin kütlesi ve hızına bağlı ortaya çıkan enerji olarak tanımlanır. Hareket halindeki her cisim dinamik yapısından dolayı kinetik enerjiye sahiptir.
4. **Potansiyel Enerji:** Cismin yükseklik etkisi ile kazandığı enerji olarak açıklanır. Kinetik enerjinin belirleyici parametresi hız iken, potansiyel enerjinin belirleyici parametresi ise yükseklik olarak öne çıkar. Potansiyel enerji, cismin ağırlığına, yer çekim ivmesine ve cismin bulunduğu yüksekliğe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.
5. **Elektrik Enerjisi:** Maddelerin proton ve elektronlarının etkileşimleri sonucu ortaya çıkan enerji türü olarak tanımlanır. Bu enerji, mekanik, ısı, nükleer ve kimyasal enerji gibi farklı enerji formlarının çevrimi ile elde edilebilir.
6. **Kimyasal Enerji:** Moleküldeki atomların birbiriyle reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerjidir. Atomdaki elektriksel yüklerin, elektron ve protonların dizilişlerinde yer değiştirme esnasında oluşan elektrik kuvveti tarafından yapılan iş olarak da tanımlanabilir.
7. **Elektromanyetik Enerji:** Birim hacimdeki, elektrik alanı veya manyetik alan oluşturmak için gerekli olan iş olarak tanımlanmaktadır. X ışınları, gama ışınları, radyo dalgaları gibi birçok formda bulunabilmektedir.
8. **Nükleer Enerji:** Maddenin atomlarının fizyon (parçalanma) veya füzyon (kaynaşma) süreçleri sonucunda meydana gelen enerji türüdür. Kütle denkliği ile mutlak bir bağıntısı vardır.

Enerji farklı formlarda olabilmektedir. Bu yüzden bu yapıya uygun farklı metotlar uygulanarak enerji elde etmek mümkündür. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, enerji kaynakları kullanım ve çevrim özelliklerine göre iki ana grupta sınıflandırılmaktadır.



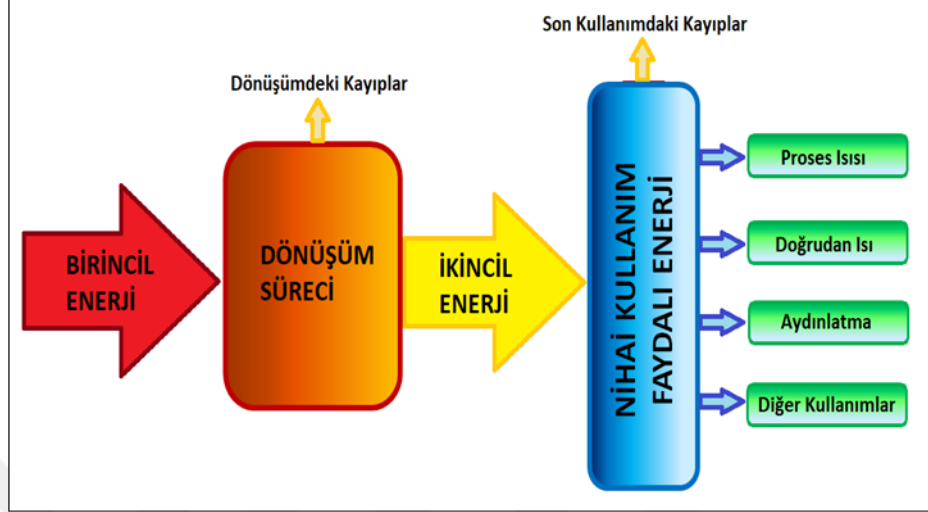
Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması [33].

Kullanış şekline göre, yenilenebilir (tükenmez) enerji kaynakları ve yenilenemez (tükenir) enerji kaynakları olarak ayrılmaktadır. Yenilenebilir enerji, çevresel etmenlerin baskın olduğu, doğal süreçler ile yapısal enerji akışından yararlanılarak elde edilmektedir. Bu kaynaklar genellikle güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal, hidrojen, dalga, gelgit ve ayrıştırılabilir organik biyokütle enerjisi olarak sıralanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, ekonomik, doğal, uzun ömürlü ve çevre dostu gibi özelliklerinden dolayı, artan bir ilgi ile, bilimsel çalışma alanında da geniş bir yer bulmuştur. Diğer yandan, yenilenemez enerji kaynakları, rezerv kısıtlaması, sürekli var oluşları sebebiyle, kullanımları azalmaktadır. Kömür, petrol, doğalgaz, uranyum ve toryum gibi kaynaklar, yenilenemeyen enerji kaynakları olarak sıralanabilir [33].

Birincil enerji, enerji dönüşümünden geçmemiş şekilde tüketilen, yenilebilir ve yenilenemez enerji gruplarını kapsayan, enerji olarak tanımlanmaktadır. Birincil enerji, yanıcı atıklar ve başka enerji formlarının da dahil olduğu, ham tesislerde elde edilen enerji kaynaklarını içermektedir. Ulusal boyuttaki enerji istatistikleri ve enerji dengeleri raporlanmasında kullanılmaktadır.

Birincil enerjiler, enerji dönüşüm süreçlerinde elektrik enerjisi, sıvılaştırılmış petrol gazı ve yakıtlar gibi uygun bir enerji formuna dönüştürülebilmektedir. Çevrilmiş bu enerjiye, ikincil enerji denir. Nihai enerji ise, kullanıcılar tarafından alınan enerjidir.

Birincil enerji veya ikincil enerji olabilmektedir. Şekil 2.2’de, birincil, ikincil ve nihai enerjinin dönüşüm süreçleri şematik olarak gösterilmiştir [34].



Şekil 2.2. Birincil, ikincil ve nihai enerji [34].

Günümüzde enerji, ülkelerin sosyal ve ekonomik büyümesinde en önemli faktörü olarak kabul edilmektedir. Sürdürülebilir kalkınmanın küresel düzeyde gerçekleşmesi için enerji tüketiminin verimli olması mutlak gerekmektedir. Enerji tüketimi hızla artmaktadır ve tüketim dünya nüfusundaki artışla doğru orantılıdır. Yenilenemez enerji kaynaklarındaki azalmanın ve dünya nüfusundaki artışın birincil enerji tüketimini sürekli artıracığı en basit modellerin bile düşük belirsizlik değerleri ile sonucudur [35]. Bu artış, gelişmekte olan sanayi ve kentleşme gibi faktörlerle birlikte küresel enerji talebinin de önemli bir ölçüde yükselişinin sebebidir [36].

## 2.2. ENERJİ DENGESİ

Enerjinin korunumu ilkesi, termodinamik birinci yasası olarak sistem enerjisinin korunması prensibine dayanır. Bu ilkeye göre, kapalı sistemde gerçekleşen bir işlem veya enerji çevrimi sırasında, sistemin toplam enerjisindeki net değişim, sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan enerjinin farkına eşittir [37].

Enerji yoktan yaratılamayacağı gibi, yok edilemeyeceği anlamına da gelmektedir. Sistemdeki enerji farklı formlarda bulunabilir veya bir formdan diğerine



dönüştürülebilir. Ancak, enerji dönüşümü sırasında toplam enerji miktarı her zaman sabit kalmaktadır (Eşitlik 2.1). Ekserji ve enerjinin korunumu ilkesi, enerjinin etkin, sürdürülebilir kullanımı ve enerji verimliliği kavramlarının da temelini oluşturmaktadır [38].

$$E_g - E_ç = \Delta E_{\text{sistem}} \quad (2.1)$$

veya,

$$\left( \begin{array}{c} \text{Sisteme giren} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Sistemden çıkan} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Sistemin toplam} \\ \text{enerjisindeki değişim} \end{array} \right)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Kapalı bir sistemde enerji transferi, çevrimin başlangıç ve çıkış enerji miktarlarının hesaplanmasını sağlamaktadır [39].

Enerji değişimi = başlangıç enerji miktarı – çıkış enerji miktarı

$$\Delta E_{\text{sistem}} = E_s - E_i = E_2 - E_1 \quad (2.2)$$

Enerji form değişimleri sırasında, sistemin toplam enerjisindeki değişim ( $\Delta E_{\text{sistem}}$ ), sistemin iç ( $\Delta U$ ), kinetik ( $\Delta KE$ ) ve potansiyel enerjileri ( $\Delta PE$ ) değişimlerinin toplamıdır [40] (Eşitlik 2.3).

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.3)$$

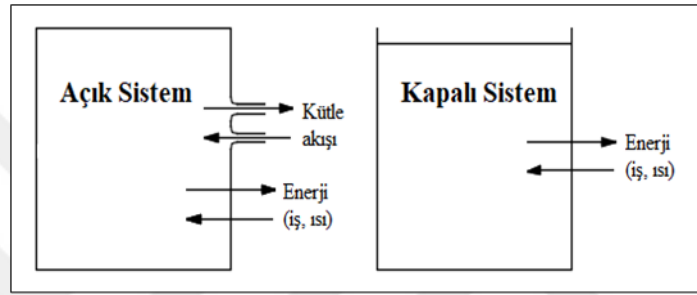
### 2.2.1. Enerji Geçişinin Gerçekleşme Yolları

Çevre ile sistem arasındaki enerji transferi ısı, iş ve kütle akışı olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Açık sistemlerde, enerji çevreye direk olarak transfer edilmektedir (Şekil 2.3). Bu tür sistemlerde sistemin enerji içeriği zaman içinde değişebilmektedir.

Kapalı sistemlerde ise, enerji çevreye kütle akışı olmaksızın, Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi, ısı ve iş transferi ile gerçekleşmektedir. Kapalı sistemlerde genellikle enerji miktarı sabit kalmaktadır.

Bu kavramlar, termodinamik değişkenlerinin, enerji transferi ve etkileşimlerini anlamak için önemli rol oynamaktadır ve farklı enerji dönüşümlerini anlamak için kullanılabilir. Ayrıca, enerjinin korunumu ilkesi, her iki tip sistemde de toplam enerji miktarının değişmeyeceğini gösterir [41].



Şekil 2.3. Açık ve kapalı sistem şematik gösterimi.

#### 2.2.1.1. Isı ile Enerji Geçişi

Isı, sıcaklık farkı nedeniyle iki sistem arasında gerçekleşen enerji transferi olarak tanımlanmaktadır. Isı transferinin olmadığı, sistemsel yaklaşımlar ise, adyabatik durumlar olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda sistemler çok iyi yalıtılmış veya çevresi ile sıcaklık farkının yapısal olarak korunuyor olmasından, ısı transferini etkileyen bir sıcaklık farkı bulunmamaktadır. Birim kütledeki özgül ısı değeri Eşitlik 2.4 ile hesaplanmaktadır [42]:

$$q = \frac{Q}{m} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.4)$$

Isı transfer hızı  $\dot{Q}$  ile gösterilir, birimi kJ/s veya eş değeri olan kW'tır.

Isı transferi, termodinamik sistemlerde önemli bir kavramdır. Enerji dönüşümlerini ve sistemlerin denge durumlarını anlamak için gereklidir bir değişkendir. Isı transferi, enerjinin bir formdan diğerine geçişini ve sistemin termal davranışını anlamak için

kullanılmaktadır. Enerji verimliliği ve ısı transferi konusunda yapılan çalışmalar, çevreye zarar vermeden enerji kullanımını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Isı transferi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir [43]:

1. **İletim (kondüksiyon)**, bir maddenin enerjisini yüksek enerjili parçacıklarından, daha düşük enerjili parçacıklarına fiziksel temas ile aktararak, parçacıklar arasındaki etkileşimleri sonucunda ısı geçişini ifade etmektedir. Isının maddenin parçacıkları arasındaki etkileşimlerle aktarılmasına dayalı bir ısı transfer mekanizmasıdır. Eşitlik 2.5 bağıntısıyla hesaplanmaktadır [44]:

$$\dot{Q}_{\text{iletim}} = k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{W}] \quad (2.5)$$

Burada;

$\dot{Q}_{\text{iletim}}$  = iletimle geçen ısı,  
 $k_t$  = iletim kat sayısı,  
 $A$  = alan,  
 $\Delta T$  = sıcaklık farkı,  
 $\Delta x$  = kalınlık değeridir.

2. **Taşıma (konveksiyon)**, katı bir yüzey ile onun temas ettiği akışkan bir ortam arasında (sıvı veya gaz) ile gerçekleşen ısı transferini ifade etmektedir. Bu, iletim ve akışkan hareketinin ısıyı taşıması ile gerçekleşen bir ısı transfer mekanizmasıdır. Taşıma, akışkan ortamın konvektif hareketi nedeniyle ısı enerjisinin katı yüzeyden alınması veya verilmesiyle gerçekleşmektedir (Eşitlik 2.6).

$$\dot{Q}_{\text{taşıma}} = hA (T_s - T_f) \quad [\text{W}] \quad (2.6)$$

Burada;

$\dot{Q}_{\text{taşıma}}$  = taşıma ısı transferi,  
 $h$  = taşıma kat sayısı,

A = ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı,  
T<sub>s</sub> = yüzey sıcaklığı,  
T<sub>f</sub> = akışkanın yüzeyden uzaktaki sıcaklığı,

Olarak ifade edilmektedir.

3. ***Işınım (radyasyon)***, maddenin atomları veya molekülleri arasındaki elektrik yük değişimleri sonucunda ortama yayılan elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığıyla gerçekleşen enerji aktarımını ifade etmektedir. Bu, ısı transferinin diğer iki mekanizması olan iletim ve taşınım (konveksiyon) ile de farklılık göstermektedir [45].

Işınım sırasında cisimler arasında boşluklar bulunabilmektedir. Bu nedenle ışıınım, diğer iki mekanizmadan farklı olarak maddenin varlığına veya temasına bağlı olmadan enerji transferi yapabilmektedir (Eşitlik 2.7).

$$\dot{Q}_{\text{ışınım}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad [\text{W}] \quad (2.7)$$

Burada;

$\dot{Q}_{\text{ışınım}}$  = ışıınım ile geçen ısı,

$\varepsilon$  = yayma oranı,

$\sigma$  = Stefan-Boltzman sabiti ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

A = alan,

T<sub>s</sub> = mutlak sıcaklık,

T<sub>çevre</sub> = çevre sıcaklığı olmaktadır.

### 2.2.1.2. İş ile Enerji Geçişi

Enerji transferi, elektrik işi, kinetik ve potansiyel enerji işi, mekanik iş ve mil işi gibi farklı biçimlerde gerçekleşebilmektedir [46]. Eğer bir cisim F kuvvetine maruz kalıyorsa ve kuvvetin etkisi ile s uzunluğunda bir yer değiştirme gerçekleşiyorsa, yapılan bir iştir ve Eşitlik 2.8 bağıntısıyla hesaplama yapılabilir.

$$W = F s \quad [\text{kJ}] \quad (2.8)$$

Eğer kuvvet (F), yol boyunca değişiyorsa, toplam iş miktarının hesaplanması için Eşitlik 2.9 bağıntısı kullanılmalıdır.

$$W = \int_1^2 F d_s \quad [\text{kJ}] \quad (2.9)$$

Sistemin enerji yükünü artıran iş, enerjisini dış kaynaktan alırken, sistemin enerjisini kullanarak yapılan iş, sistem enerjisini azaltarak, farklı formlarda gücü dışarıya taşımaktadır. Bu temel bir prensiptir ve termodinamikte kullanılan genel enerji denkleğinin tanımlanmasında önemli bir rol oynamaktadır [47].

Enerji dönüşümleri, birçok endüstriyel ve teknolojik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.2.1.3. Kütle Akışı

Sisteme veya sistemden kütle akışı, kütlenin taşıdığı enerji miktarı kadar, mekanizma tanımlanmasına göre, enerjinin sistemdeki artışı veya azalışının sağlamaktadır. Kütlesel debinin ( $\dot{m}$ ) hesaplamasıyla kütlesel enerji taşınımı hesaplanabilmektedir (Eşitlik 2.10) [48].

$$\dot{E} = \dot{m} (u + ke + pe) \quad [\text{kJ/s veya kW}] \quad (2.10)$$

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesi Eşitlik 2.11 bağıntısıyla gösterilmektedir:

$$\underbrace{E_g - E_c}_{\text{ısı, iş ve kütle ile gerçekleşen net enerji geçişi}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistem}}}_{\text{sistemin iç, kinetik, potansiyel vb. enerjilerindeki değişim}} \quad [\text{kJ}] \quad (2.11)$$

Birim zamanda ise Eşitlik 2.12 bağıntısıyla gösterilir [30]:

$$\underbrace{\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta}_{\text{birim zamanda ısı, iş ve kütle ile gerçekleşen enerji geçişi}} = \underbrace{\frac{dE_{\text{sistem}}}{dt}}_{\text{birim zamanda sistemin iç, kinetik, potansiyel vb. enerjilerindeki değişim}} \quad [\text{kW}] \quad (2.12)$$

Sistemde sürekli akış hal değişimlerini gösteren genel enerji denklemi ise ( $\Delta KE = \Delta PE = 0$ ) olmak üzere,

$$Q - W = \sum_c \dot{m} h - \sum_g \dot{m} h \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.13 ifadesi ile tanımlanmaktadır.

Termodinamiğin ikinci yasası gereğince, entropi bir sistemin düzensizliğinin nicel bir ölçüsüdür ve sistemlerdeki çeşitli hal değişimleri Eşitlik 2.14 bağıntısıyla göstermektedir [30].

$$\underbrace{S_g - S_\zeta}_{\text{ısı ve kütle ile gerçekleşen entropi geçişi}} + \underbrace{S_{\text{üretim}}}_{\text{entropi üretimi}} = \underbrace{\Delta S_{\text{sistem}}}_{\text{sistemin entropi değişimi}} \quad (2.14)$$

Birim zamanda Eşitlik 2.15 ile gösterilir;

$$\underbrace{\dot{S}_g - \dot{S}_\zeta}_{\text{birim zamanda ısı ve kütle ile gerçekleşen entropi geçişi}} + \underbrace{\dot{S}_{\text{üretim}}}_{\text{birim zamanda entropi üretimi}} = \underbrace{\frac{dS_{\text{sistem}}}{dt}}_{\text{birim zamanda entropideki değişim}} \quad (2.15)$$

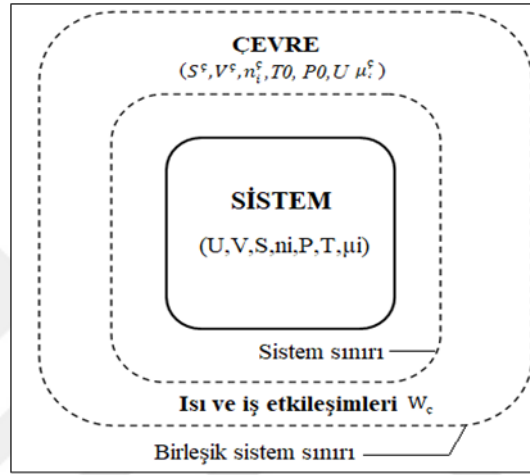
Sistemdeki sürekli akış hal değişimi için genel entropi dengesi ise Eşitlik 2.16 ile;

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_\zeta s_\zeta - \sum \dot{m}_g s_g - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (2.16)$$

Şeklinde formüle edilmektedir.

### 2.2.2. Kapalı Sistemler için Ekserji Analizi

Maksimum işi hesaplamak için, bileşik bir sistem sınırı yalnızca giriş ve çıkış enerjilerinin iş transferine izin vermektedir. Bu tanımlamaya göre, gerçekleştirilen iş, sistem veya bileşik sistemden olan ısı transferleri ile etkilenmemesi sağlanırken sistem ve çevre hacimlerinin, değişebilir olması, bileşik sistem sınırını toplam hacmi sabit tutmak için kullanılmaktadır [49].



Şekil 2.4. Birleşik sistem ve çevre şematik gösterimi.

Şekil 2.4'teki sistemin termostatik durumu,  $U$  iç enerji,  $V$  hacmi,  $S$  entropisi ve mevcut maddelerin ( $n_i, i=1, 2, 3...j$ ) miktarlarından oluşan ekstensif özellikleri ile  $T$  sıcaklığı,  $P$  basıncı ve  $\mu_i$  kimyasal potansiyellerinden oluşan intensif özellikler ile tanımlanmaktadır. Bu büyüklükler aşağıdaki Eşitlikler ile ifade edilir [50]:

$$U = TS - PV + \sum n_i \mu_i \quad (2.17)$$

Çevrenin durumu; ekstensif özellikler olan  $U, S^ç, V^ç, n_i^ç$  ve intensif özellikleri olan  $T_0, P_0$  ve  $\mu_i^ç$  ile tanımlanır. Bu büyüklükler ile Eşitlik 2.18 ifade edilmektedir.

$$U = T_0 S^ç - P_0 V^ç + \sum n_i^ç \mu_i^ç \quad (2.18)$$

Sistem ve çevre etkileşiminde, denge durumu, bileşik sistemin enerjisi Eşitliği 2.19 ile hesaplanmaktadır:

$$U = T_0 S - P_0 V + \sum n_i^c \mu_i^c \quad (2.19)$$

Bileşik bir sistemde enerji, entropi ve kütle dengesi kullanılarak ekserji, Eşitlik 2.20 ile hesaplanmaktadır (enerji denkliği):

$$U - \underbrace{[U^c + (U + KE + PE)]}_{\text{birleşik sistemin başlangıç enerjisi}} = Q_c - \underbrace{W_c}_{\text{birleşik sistemde geliştirilen iş}} \quad (2.20)$$

Entropi dengesi ise Eşitlik 2.21 ile;

$$S = S_c + S + S_{\text{üretim}} \quad (2.21)$$

Yukardaki eşitlikteki  $S_{\text{üretim}}$ , sistem çevre ile dengeye gelirken, tersinmezliklere bağlı olarak bileşik sistem içindeki entropi üretimini ifade etmektedir.

$$W_c = (U + P_0 V - T_0 S - \sum n_i^c \mu_i^c + KE + PE) - T_0 S_{\text{ür}} \quad (2.22)$$

Bileşik sistemde maksimum teorik iş için ise ekserji "E", sıfır olarak kabul edilir. Bu tanıma göre, ekserji ifadesi Eşitlik 2.23 şeklinde ifade edilmektedir [51].

$$E = U + P_0 V - T_0 S - \sum n_i^c \mu_i^c + KE + PE \quad (2.23)$$

### 2.2.3. Enerji Dönüşüm Verimleri

Verim, enerji dönüşümlerinin veya hal değişimlerinin etkin bir şekilde kullanılmasını gösteren bir kavramdır. Elde edilmek istenen değişken değeri ile, harcanması gereken değişken değeri arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Verim, enerji veya iş çıktısının, enerji veya iş girişine oranı olarak ta tanımlanmaktadır. Yüksek verim, daha az enerji harcanarak, daha fazla iş veya enerji elde edilmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, enerji kullanımının etkinliğini ifade eden bir terimdir [52]. Verim, en genel tanımıyla Eşitlik 2.24 ile gösterilir.



$$\text{verim } (\eta) = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} \quad (2.24)$$

Mekanik enerji, geri döndürülemez etkilerin olmadığı (sürtünme gibi) bir durumda bir formdan diğerine dönüşebilme özelliği gösteren bir enerji şeklidir. Bir dönüşüm veya bir cihazın mekanik verimi, Eşitlik 2.25 ile ifade edilmektedir.

$$\eta_{\text{mek}} = \frac{\text{alınan mekanik enerji}}{\text{verilen mekanik enerji}} = \frac{E_{\text{mek},\text{ç}}}{E_{\text{mek},\text{g}}} = 1 - \frac{E_{\text{mek},\text{kayıp}}}{E_{\text{mek},\text{g}}} \quad (2.25)$$

İkinci yasa verimi, bir sistemde gerçekleşen tersinmez etkilerin aynı başlangıç ve bitiş durumları arasında karşılaştırılmasıyla hesaplanan bir değerdir. İş ve ısı üreten düzeneklerde, bu verim Eşitlik 2.26 ile gösterilmektedir [53].

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{Isıl}}}{\eta_{\text{Isıl},\text{tr}}} = \frac{W_y}{W_{\text{tr}}} \quad (2.26)$$

İkinci yasa verimi, ısı pompaları, soğutma makineleri ve diğer iş üreten sistemler için Eşitlik 2.27 ile ifade edilmektedir:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{tr}}} = \frac{W_{\text{tr}}}{W_y} \quad (2.27)$$

Genel olarak ikinci yasa verimi ise Eşitlik 2.28 ile gösterilmektedir.

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{Geri kazanılan enerji}}{\text{Sağlanan enerji}} = 1 - \frac{\text{Ekserji yok oluşu}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (2.28)$$

Sanayide kullanılan her ekipmanın, her aşamanın sistemsel bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiğinden, enerji tanımlamaları için değişkenler ayrıştırılarak belirlenmelidir. Formülasyon enerji, ekserji ve verim kategorilerine göre sınıflandırılarak, enerji değişkenleri en basit ölçekten en büyük ölçeğe göre tespit edilerek, kazanım noktaları ifade edilen bu formülasyonlara göre hesaplanmalıdır [54,55,56]. Hesaplanan bu değerler, öncelikli kazanım noktalarının da bir göstergesi olacaktır [57].

### 2.3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Enerji verimliliği; üretim seviyesini yükseltmek, kaliteyi arttırmak, az enerji kullanmak ve ekonomik bir kazanım sağlamak amacıyla, aynı orandaki işi yapabilme kabiliyetidir. Ayrıca enerji verimliliği; enerji kayıplarının veya atık enerjilerin geri kazandırılması, yeniden değerlendirilmesidir [58]. Özellikle verimlilik çalışmalarında yeni teknoloji kullanarak üretimi düşürmeden, enerji tüketilmesinin azaltılması sanayi verimlilik çalışmalarında en önemli metodolojik uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır [59].

Fosil enerji kaynaklarının sınırlı olması, rezervlerin durmaksızın tüketilmesi, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımını büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu kapsamda sanayideki verimlilik uygulamaları da stratejik bir plan olarak sanayi kuruluşlarında hızla artmaktadır [60].

Ülkelerde ticari ve endüstriyel rekabetin getirdiği ve artık üretimin bir parçası olan yeşil ve eko üretimin, verimlilik uygulamaları ile CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması gibi faydalarda sağladığı görülmektedir [61].

Dünya ülkelerinin sürdürülebilir ekonomik büyümeyi uzun vadede gerçekleştirebilmeleri için enerji verimliliği konusunda sağlanacak artışlar sadece sanayi için değil ulusal boyutta da önem arz etmektedir. Enerji tüketiminde, enerjinin verimli kullanılmaması, maliyeti yükseltmektedir [62].

Enerji verimliliği ülkelerin ekonomik gelişmelerinin ve sosyal refahın oluşturulmasında belirleyici bir niteliktir. Farklı sektörlerde yapılan enerji verimliliği çalışmaları sonucunda, sanayi tesislerinin ve işletmelerin tamamına yakınında, %5-40 arasında enerji tasarrufu yapılmasının mümkün olduğu sonucu çıkarılabilmektedir [63].

Dünyada enerji üretiminde birincil enerji kaynağı olarak kullanılan rezervler, nüfus artışı gibi sebeplerle hızla tükenmektedir. Enerji verimliliği bu sebeple yenilenebilir, enerji kaynakları kadar önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir [64].

Ülkemizde enerji verimliliği, sürdürülebilir bir büyüme için gerekli ve kalkınma planının önemli bir parçasıdır [65]. Türkiye'nin uluslararası ticari arenada, rekabetçi yerli üretiminin ucuz, kaliteli ve en iyi olarak ürünleri ile yer alması ekonomik büyüme açısından büyük önem taşımaktadır. Ülkemizin enerji ihtiyacı için, dışa bağımlılıktan kurtulması, enerji üretim potansiyelini arttırması ile gerçekleşecektir. Enerji üretiminin etkinliği, var olan kaynakların bilinçli ve verimli kullanımı sayesinde arttırılabilecektir.

Türkiye'de enerji verimliliğine yönelik çeşitli mevzuatlar, politikalar ve eylem planları mevcuttur. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, ülkemiz için enerjide yeni bir dönüşüm sürecini başlamıştır. Bu kanunun içeriği, enerjinin etkin kullanılması ve maliyetleri en aza indirerek verimliliğinin arttırılmasını hedeflemektedir [66].

Ülkemizde enerji verimliliği çalışmaları, doğal enerji kaynaklarının azlığı, hammadde fiyatlarının yükselişi ve enerji talebindeki artış nedeni ile arttırılmıştır. 2008 yılında resmi gazetede yayınlanan genelge ile enerjinin sektörel olarak verimli ve etkili kullanılması kararı alınmıştır [67].

2011 yılında yayınlanan “Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Arttırılmasına Dair Yönetmelik”, “Enerji Verimliliği Kanunu”nu desteklemek üzere hazırlanmıştır. İlgili yönetmelik, enerji verimliliğinin arttırılması ve idari yaptırımlara yönelik uygulamalar hakkında da düzenlemeleri de içermektedir [68].

2012 yılında yürürlüğe konulan, Enerji Verimliliği Strateji Belgesi ise çeşitli eylem planlarıyla 2023 yılında Türkiye'nin gayrisafi yurt içi hasıla başına tüketilen enerji miktarının 2011 yılı değerine göre en az %20 azaltılmasını hedeflemektedir [69].

2018 yılında yürürlüğe giren Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ise 2017-2023 döneminde, enerji arz güvenliği, enerji maliyetlerinin ve enerji kullanımından kaynaklı emisyon değerlerinin düşürülmesi, enerjide dışa olan bağımlılığın azaltılmasını öncelikli başlık olarak tanımlamaktadır. Tarım, ulaşım, enerji ve sanayi gibi sektörlerle

ait 55 eylemi içeren plan, 2023 yılına kadar 8,4 milyar dolarlık 23,9 MTEP enerji tasarrufu sağlanmasını hedeflemektedir [70].

### **2.3.1. Enerji Yoğunluğu**

Sektörlerin enerji verimliliğine yönelik konumlarının belirlenmesinde farklı karşılaştırma yöntemleri ve göstergeler kullanılmaktadır. Enerji verimliliği göstergeleri arasında; enerji yoğunluğu, spesifik enerji tüketimi, birim ürün başına enerji kullanımı ve enerji verimliliği endeksi gibi göstergeler yer almaktadır.

Enerji verimliliği göstergeleri, verimlilik artışlarını zamana bağlı ölçerek, performans değerlendirmelerini de göstermektedir. Gösterge değerleri ile enerji tüketim düzeyi, artan verim izlenebilmektedir.

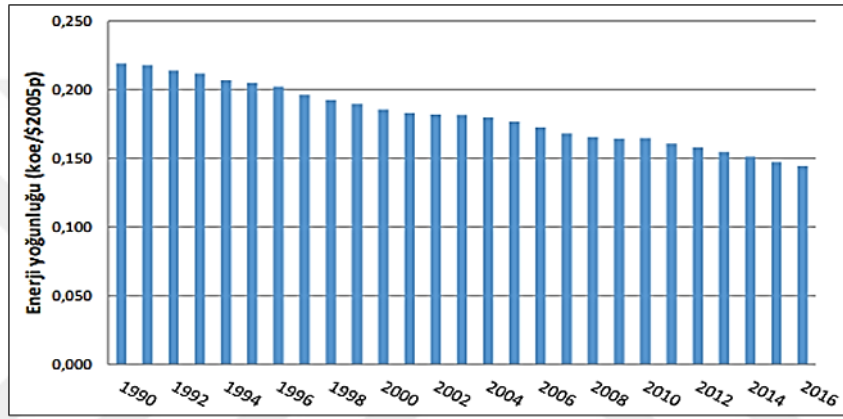
Enerji yoğunluğu, enerji verimliliği göstergeleri arasında en yaygın kullanılan bir değerlendirme olup, enerji tüketiminin (Ton Eşdeğer Petrol - TEP, Joule) finansal bir göstergeye (Gayri Safi Yurt İçi Hasıla - GSYİH, Katma Değer vb.) oranı olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle; 1000 dolar'lık gayri safi hâsıla için tüketilen TEP enerji miktarını ifade etmektedir. Bu bağlamda, enerji yoğunluğu ne kadar düşükse, enerjinin verimlilik ve etkinlik değeri de o kadar yüksektir [71].

Enerji yoğunluğu, enerji tüketim miktarındaki değişimler ve sektörel verimlilik düzeylerini tespit etmektedir. Birim GSYİH başına enerji miktarını ölçen enerji verimliliği göstergesi, bölgelerin ekonomik düzeyini, enerji tüketim oranını, iklim koşullarını ve enerji verimliliğini belirlemek için kullanılmaktadır [72].

### **2.3.2. Dünyada Enerji Yoğunluğu**

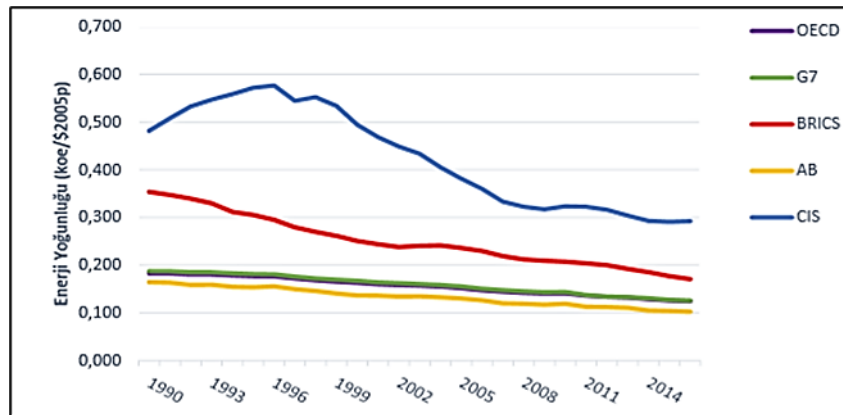
Ülkelerin gelişmişlik seviyelerini belirlemek için, kişi başına tüketilen enerji kullanımı ve enerji yoğunluğu belirleyici bir değerdir. Bu nedenle, aynı miktardaki enerji ile daha fazla katma değer üreten ve düşük enerji yoğunluğuna sahip bir ülke, enerji açısından gelişmiş bir ülke olduğu anlamı taşımaktadır.

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, dünya enerji yoğunluğunun 1990-2016 yılları arasında azalmaktadır. Enerji yoğunluğu, 1990-2000 yılları arasında yıllık ortalama %1,6 azalırken, 2000-2010 yılları arasında ortalama %1,3 düzeyinde azalmıştır. Birleşmiş Milletler Kalkınma Programının Milenyum Kalkınma Hedefleri kapsamında enerji yoğunluğunun azaltılması hedefi, 2010-2016 yılları arasında ortalama enerji yoğunluğunun %1,8 düzeyinde azalmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, Paris Anlaşması'yla 2030 yılına yönelik %27'lik enerji verimliliği hedefine ulaşmak için bu azaltım oranı yeterli değildir [73].



Şekil 2.5. Dünya'da enerji yoğunluğu [73].

Tüm dünyada istatistiksel olarak enerji yoğunluğundaki azalış, enerjinin daha verimli kullanıldığını göstermektedir. Ülkeler arasındaki ekonomik ve yapısal farklılıkların enerji kullanımına ilişkin etkileri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



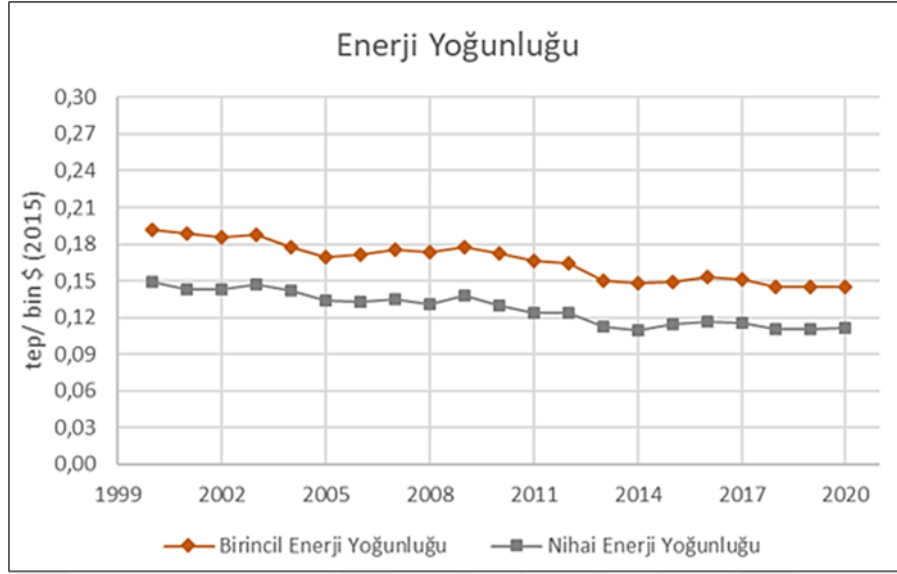
Şekil 2.6. Ülke gruplarına göre enerji yoğunluğu [74].

Enerji yoğunluğu, ülkeler nezdinde değerlendirildiğinde önemli farklılıkların olduğu gözlenmektedir. 1990-2016 yılları arasında dünyadaki en düşük enerji yoğunluğuna sahip ülke grubu Avrupa Birliği (AB) olarak tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle İngiltere ve Fransa gibi ülkelerde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik önemli çalışmaların yürütülmesinden kaynaklanmaktadır. Ülke grupları arasında enerjiyi en yoğun kullanan ülke grubu ise Bağımsız Devletler Topluluğu (CIS) ülkeleridir. Bu grup, Azerbaycan, Beyaz Rusya, Ermenistan, Kazakistan, Kırgızistan, Moldova, Özbekistan, Rusya ve Tacikistan gibi ülkeleri içermektedir [75].

Çoğunluğu Avrupa Birliği üyesi ülkeler olmak üzere, OECD, G7 ülke grupları ile gelişmiş ve çok uluslu şirketlerin bulunduğu ülkeler, enerji yoğunluğunun düşük olduğu ülkelerdir. BRICS ülkeleri ise Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika gibi yükselen ekonomilere sahip ülkeler olup enerji yoğunluğu düşmektedir [76]. Dünya nüfusunun ve küresel gelirin önemini benimseyen listelenmiş bu ülkeler, enerji yoğunluğunun azaltılmasına önem vermişlerdir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin enerji yoğunluğu düzeylerindeki farklılıklar, ülkelerin sanayi yapıları ve kullandıkları teknoloji düzeyleri gibi önemli farklılıklarla orantılıdır [74].

### **2.3.3. Türkiye’de Enerji Yoğunluğu**

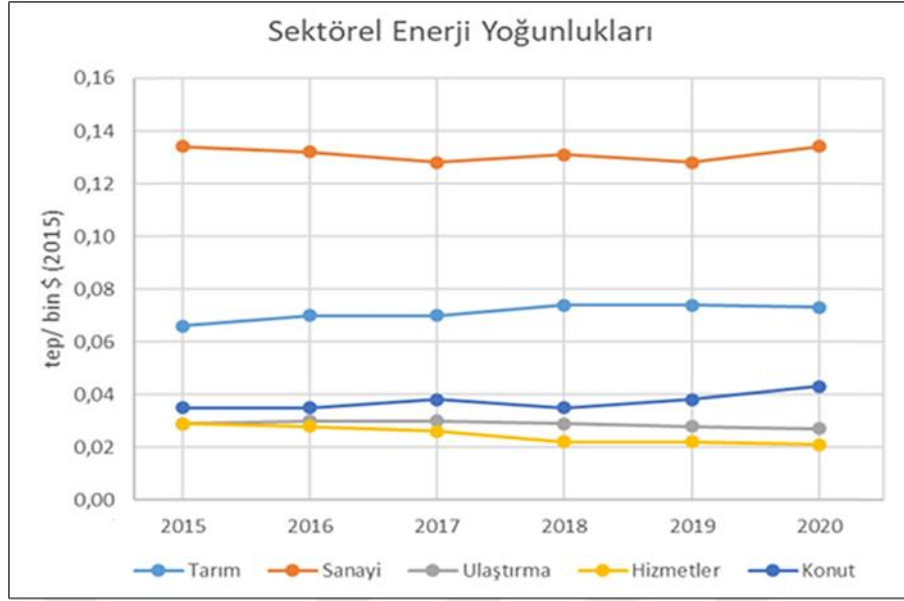
Ülkemizde 2000-2020 yılları arasında birincil ve nihai enerji yoğunluğu indeksindeki artış/azalış değerleri Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Grafikte birincil ve nihai enerji yoğunluğu birimi (TEP/1000 2015 yılı \$ sabit fiyatı) olarak alınmıştır. Birincil enerji yoğunluğu indeksi 2000 yılında 0,192 tep/bin\$ iken 2020 yılında 0,145 tep/bin\$ değerine düşerek yaklaşık %24’lük, nihai enerji yoğunluğunda ise %25’lik iyileşme gözlemlenmiştir. Hesaplamalarda Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı tarafından yayımlanan 2020 yılı bazlı GSYİH verileri dikkate alınmıştır [77].



Şekil 2.7. Birincil ve Nihai enerji yoğunluğu indeksi değişimi [74].

Enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen ülkelerin, sektörel enerji yoğunlukları üzerinde durması büyük önem taşımaktadır. Enerji verimliliği, sanayiden imalat sektörüne, konut, tarım, ulaştırma ve hizmet sektörleri gibi alanlarda çeşitli uygulamalar içermektedir [78]. Ülkelerin enerji verimliliğini geliştirmek için, sektör dağılımlarında mevcut eksiklikleri analiz etmeleri ve çözüm stratejileri geliştirmeleri gerekmektedir [79].

Türkiye'nin sektörel enerji yoğunluğu Şekil 2.8'de verilmiştir. İmalat sanayi enerji yoğunluğunun en yüksek sektör olduğu görülmektedir. Bu aslında sanayinin katma değerini de büyük ölçüde ortaya koymaktadır. Enerji yoğunluğu açısından, sanayi sektörünü, tarım, konut (hane halkı harcamaları bazında), ulaştırma ve hizmet sektörleri takip etmektedir [80].



Şekil 2.8. Yıllar itibariyle sektörel enerji yoğunlukları [81].

## 2.4. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Üretimden, nihai tüketime kadar olan süreçte yeni teknolojilerin kullanılması veya mevcut ekipmanların iyileştirilmesi, Ar-Ge çalışmaları ile desteklenerek büyük kazanımlar elde edilebilmektedir.

2003-2018 yılları arasında imalat sanayinin teknolojik yapısında oluşan değişimler incelendiğinde, ülkemizde üretimin düşük, orta teknolojiye dayandığı görülmektedir. İmalat sanayinde yüksek teknolojlili ürünlerin ihracatı %3,8 iken, bu ürünlerin ithalatındaki payının %15 civarında olduğu görülmektedir. İmalat sanayinde en büyük maliyet kaleminin ithalat olduğu görülmektedir [82].

Sanayide tüketilen enerji çoğunlukla birincil enerji kaynaklarıdır. Sanayi sektörünün yüksek enerji tüketim potansiyeline sahip olduğu bir gerçektir. Ülkemizde yapılan bir çalışmada, birincil enerji tüketiminin %24'ünün ve elektrik kullanımının %47'sinin sanayi sektöründe kullanıldığı ortaya konulmuştur. Bu nedenle nitelikli üretim prosesleri, yüksek teknolojiler ve bu teknolojileri destekleyen sistem ekipmanları, atık ısı geri kazanımı, otomasyon v.b., destekleyici çalışmalarla verimli bir üretim formatına dönüştürülebilmektedir [83].



Uygulamalarda pompa debisinin motor devri değiştirilerek ayarlanan sistemler kullanılması, önemli oranda enerji tasarrufu sağlayabilmektedir [84].

Atık ısının geri kazanılması, enerji verimliliğini arttırmak için iyi bir tekniktir. Birçok sektörel alanda, sıvı ve gaz prosesleri tamamlandıktan sonra, bu proseslerin yüksek oranda enerji içermesine rağmen, enerji genellikle kullanılmamaktadır. Atık enerji olarak atılmaktadır. Uygulanan teknikler ile geri kazanım ve enerjinin tekrar kullanılması büyük oranda bu noktalarda sağlanabilmektedir [85].

Atık ısının verimli bir şekilde kullanılması ve enerji tasarrufunun sağlanması ile ekonomik kazanımın boyutları %20'ye kadar yükseltilebilmektedir [86].

## **2.5. ENERJİ VERİMLİLİĞİ MODELLEMELERİ**

Enerjinin yönetilmesi ve enerji planlamasının yapılabilmesi için, enerji verimliliği modellemesi önemli bir tekniktir. Sanayi kuruluşları, enerji verimliliği modellemesi kullanarak, kısa sürede mevcut enerji tüketimlerini analiz edebilmektedir. Enerjinin verimli kullanılması için potansiyel kayıp alanlarını belirlemek, modelleme çalışmalarının başlangıç noktasıdır. Modelleme süreçleri, işletmelerin enerji tüketimlerini anlamalarına, etkin enerji yönetimi stratejileri geliştirmelerine ve enerji tasarrufu sağlamalarına hızlı ve net bir çözüm olabilmektedir.

Enerji verimliliği modellemesi aynı zamanda gelecekteki enerji taleplerini tahmin etmek ve enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak için de kullanılmaktadır. İleriye yönelik enerji planlamasında, potansiyel enerji tasarrufu sağlayabilecek teknolojilerin ve uygulamaların değerlendirilmesi, enerji tüketimini optimize ederek, enerji maliyetlerini düşürmektedir.

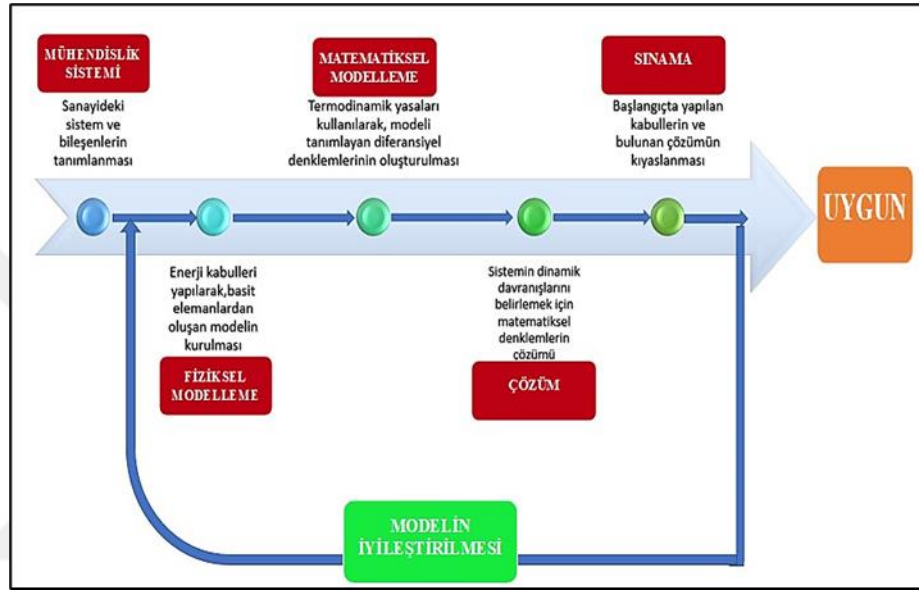
Sanayi kuruluşları, enerji verimliliğini arttırmak, çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi sağlamak için çeşitli stratejiler geliştirmektedir. Stratejiler sanayi işletmelerinin daha çevre dostu ve ekonomik olarak daha sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermelerine yardımcı olmaktadır.

Şekil 2.9’da gösterilen modelleme süreci, enerji verimliliği çalışmalarının etkin bir şekilde yapılabilmesi için aşağıda belirtilen süreçlerin teknik yöntemlerle uygulanması gerekmektedir [87]:

1. **Kayıp Enerji Noktalarının Belirlenmesi:** Sanayi içindeki üretim işlemleri ve süreçleri incelenerek, enerji kayıp noktaları en yüksek enerji kayıp noktasından en düşük kayıp enerji noktasına kadar tespit edilmelidir.
2. **Veri Toplama ve Analizi:** Araştırmalar ve ölçüm sonuçları doğrultusunda enerji tüketim noktaları ile enerjiyi tüketen tüm cihaz ve ekipmanlar için hesaplamalar ve ölçüm değerleri elde edilmelidir. Bu veriler, modelleme için kullanılacak temel veriler ve göstergelerdir [88].
3. **Model Seçimi:** İşletme ihtiyaçlarına göre en uygun model seçilerek, model değişkenleri, göstergeler ve değerler elde edilmeye çalışılmalıdır. Yapay sinir ağları, karar ağaçları, doğrusal veya lojistik regresyon, yapay zeka gibi farklı uygulamalar ile modeller oluşturulabilir [89]. Model sonuçları, enerji kayıplarını tahmin etmek ve kazanımlar için sadece bir araçtır. Sonuçlar tahmini olup, her sonucun belirsizlikleri ayrıca çalışılmalıdır [90].
4. **Model Doğrulanması:** Model çalışmalarında belirsizlikleri şekillendiren en önemli değişkenler varsayılan ve kabul edilmiş olan değişkenlerdir. Bu aşama, modelin gerçek uygulamada hangi ölçüde etkili olduğunun bir göstergesidir.
5. **Model Optimizasyonu:** Elde edilen sonuçların belirsizliklerinin yüksek çıkması durumunda, model optimizasyonu yapılmalıdır. Bu kapsamda, değişken sayısı arttırılabilir, parametreler değiştirilebilir veya farklı bir model seçilebilir [91].
6. **Sonuçların Değerlendirilmesi:** Modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen değerler analiz edilerek, enerji verimliliğinin ve kazanılacak olan enerji miktarlarının miktarları hesaplanır. Bu sonuçlar, sanayinin stratejik karar

verme süreçlerine göre kısa veya uzun vadeli uygulama programlarına entegre edilerek, yatırım programlarına dahil edilir [92].

Tüm bu aşamalar, enerji verimliliği ve maddi kazanımları artırmaya yardımcı olurken, işletmelerin daha verimli enerji kullanımı için etkili stratejiler geliştirmesine olanak sağlar.



Şekil 2.9. Sanayi kuruluşunda uygulanabilecek modelleme aşamaları.

İmalat sanayi enerji tüketimini optimize etmek için geliştirilen matematiksel bir model ile, aydınlatma ve iklimlendirme sistemlerinde alternatifler üretmek amacı ile kullanılmış ve verim %25 olarak gerçekleşmiştir. Modelleme, Lingo 12.0 yazılımı kullanılarak üretilen bir algoritma ile, tüketilen enerjiyi azaltmak için uygun maliyetli ekipman seçimi için kullanılmıştır. Uygulama, imalat sanayiindeki maliyet problemlerini çözmek için matematiksel denklemlerin ve yöntemlerin kullanılabilirliğini göstermiştir. Modelleme çalışması ile tasarruf %101 oranında bir artış sağlanmıştır. Kullanılan modelin, enerji maliyet problemini çözme yeteneği, endüstriyel ortamlarda gerçek değişkenleri ve kısıtlamaları analiz etmek ve imalat sanayi üretim maliyetini düşürerek, rekabetçi bir üretime katkı sağlama potansiyelini vurgulamaktadır [93,94].

Endüstriyel enerji verimliliğini ölçmek için, Çin’de 28 idari bölge için veri zarflama analiz tekniği kullanılarak, bir modelleme uygulanmıştır. Bölgelerin endüstriyel genel verimliliği, teknik verimlilik ve ölçek verimliliği karşılaştırılarak, enerji kaybına neden olan endüstriyel yapının zayıf olduğu ve teknik verimliliğin düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, çalışmalar temel bir veri zarflama analizine uygun yeni parametreler ekleyerek genişletilmiş ve sonuçların enerji verimlilik çalışmaları için önemi, sayısal olarak ortaya konulmuştur [95].

Enerjiyi yapısal bir sistem olarak gören farklı bir modelleme çalışmasında ise, matematiksel tanımlar ve denklıklar oluşturulmuş, üretim planı geliştirilerek, formüle edilmiştir. Yöntemin, bazı kısıtlamalar altında sonuçları incelenerek, doğrulama planlarının belirlenmiştir. En verimli çözüm bu sayede üretilmiştir [96].

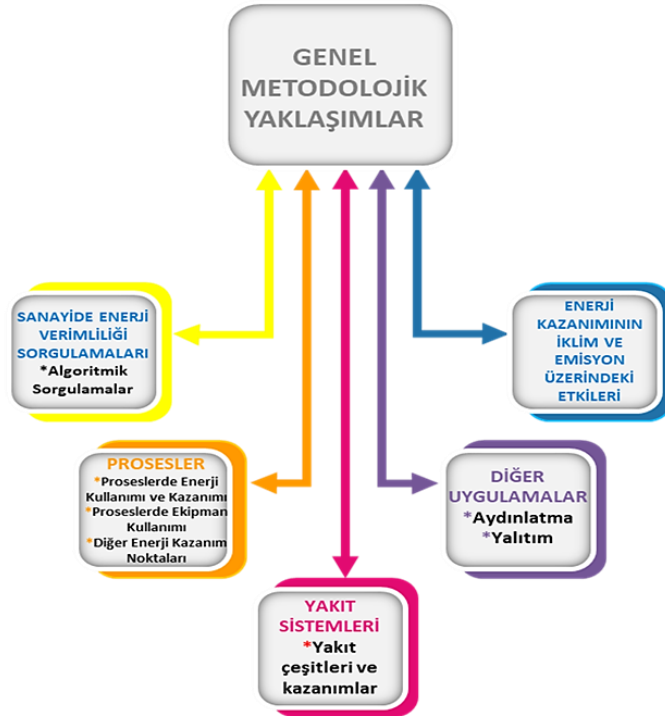
Bir polimer üretim tesisinde, üretim işleme parametreleri, enerji maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlayan dört farklı doğrusal programlama modeli ile bağımsız olarak çalışılmıştır. Model 1, toplam enerji maliyetlerini en aza indirerek müşteri taleplerini karşılamaya odaklanırken, Model 2, 3 ve 4 farklı üretim ve pazarlama koşullarına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Enerji verilerinin kullanıldığı Lingo programı vasıtasıyla, modeller kıyaslanmıştır. 3 ve 4 nolu modeller, maliyet değişikliklerinde tolerans göstermedikleri için uygun bulunmuştur. 1 nolu model ise yalnızca maliyet azalmalarına uygunluk sağlarken, 2 nolu model maliyet değişimine de uyum sağlamıştır. Stratejik olarak mali yapının öncelikli olduğu durumlarda, elde edilen sonuçlara göre enerji verimliliği uygulamaları da değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışma, mali enerji modellemesine iyi bir örnek olarak değerlendirilmiştir [97].

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1. GENEL

Bu çalışma ile, sanayide enerji kullanan sistemler ve prosesler için, enerji verimliliği ve enerji geri kazanım noktaları detaylı olarak araştırılmıştır. Literatür çalışmaları ve bilimsel veriler dikkate alınarak, metodoloji kısmı prosesler, yakıt sistemleri ve diğer uygulamalar olarak 3 temel başlıkta gruplandırılmış, algoritmik sorgulamalar ve iklim değişikliği üzerindeki etkileri ile toplam 5 başlıkta değerlendirilmiştir (Şekil 3.1). Üretim noktaları algoritmalar ile detaylandırılarak, değişken tanımlamaları yapılmıştır. Değişikelerin farklı sistem uygulamaları ile enerji etki oranı bilimsel olarak hesaplanarak, sistem enerji kazanım miktarları tahmin edilmiştir.

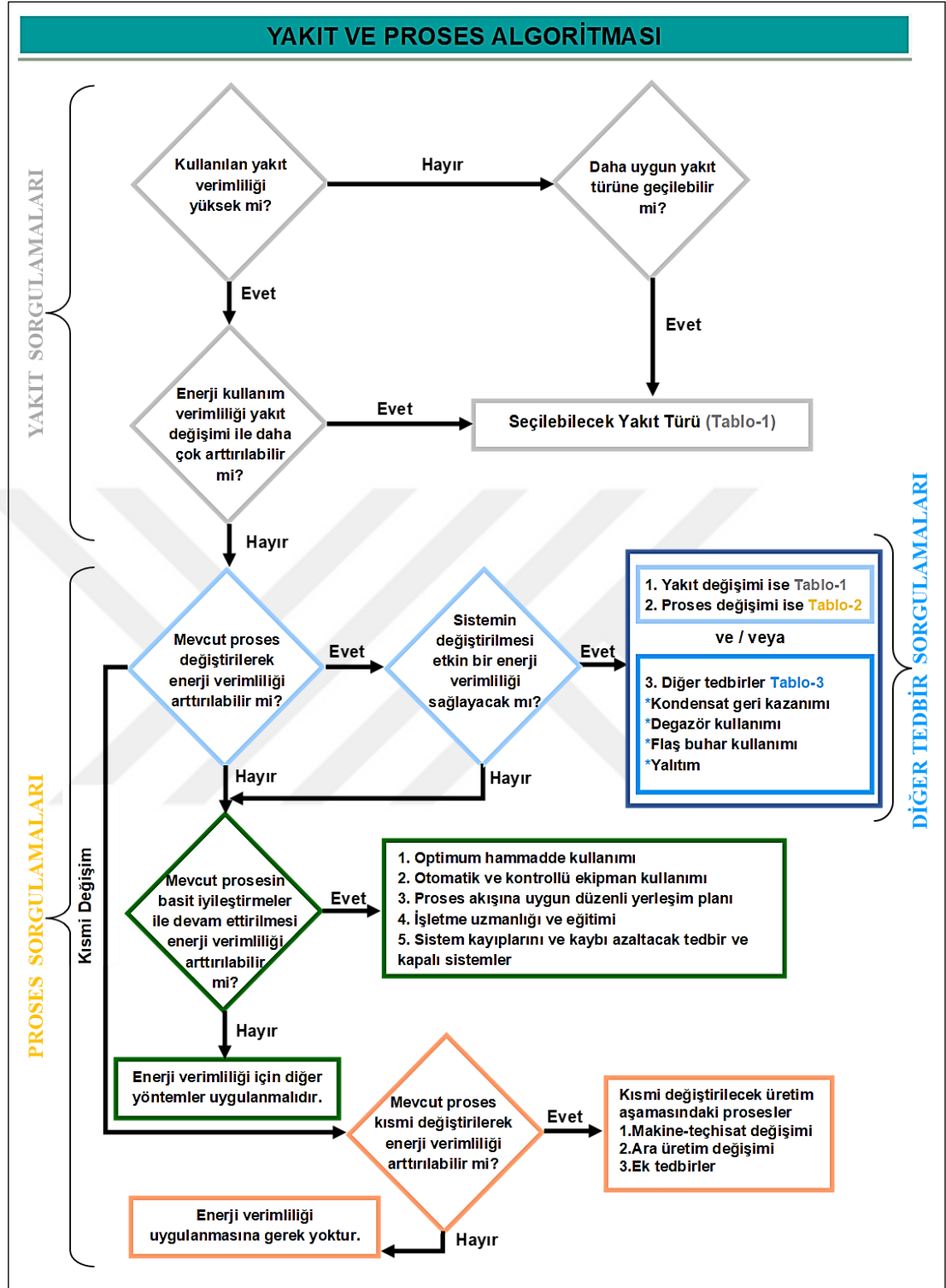


Şekil 3.1. Çalışmanın metodolojik gruplandırılması.

### 3.2. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ALGORİTMALARI

Firmaların rekabet güçleri; sundukları ürünün kalitesi, ürün fiyatı, erişim hızı, teknik üstünlüğü, kullanıcı memnuniyeti, çevre dostu ve enerji verimliliği gibi özellikler ile tespit edilse de üretim ve tüketim zinciri üstündeki en önemli parametreler, ekonomik parametrelerdir. Enerji geri kazanımı ekonomik parametreler arasında değerlendirilen ve kazanımı ekonomik olduğu kadar, çevresel boyutlarda da büyük faydalar sağlayan bir konudur [98]. Değişen ticaret ortamı, rekabet, sınırlı kaynaklar, artan maliyet kalemleri, teknolojik gelişmeler ve teknikler enerji verimliliğinin geliştirilmesini ihtiyaç haline getirmiştir [99]. Bir ürünün kaliteyi düşürmeden en az maliyet ve az enerji tüketimi ile üretilmesi, enerji yönetimi ile mümkün olabilmektedir. Bilimsel veriler doğrultusunda proses ve değişkenlerin algoritmalar ile detaylandırılarak sorgulanıp, enerji yönetimi ve verimlilik arttırımı için bu algoritmaların kullanılması, en iyi tekniklerdendir [100]. Algoritmik sorgulamalar, farklı endüstriyel sektörlere uyarlanılabilen, enerji konusunda çözüm üreten bir metot olmasına rağmen, her sanayi tesisi için farklı sonuçlar verebilmektedir [101,102,103].

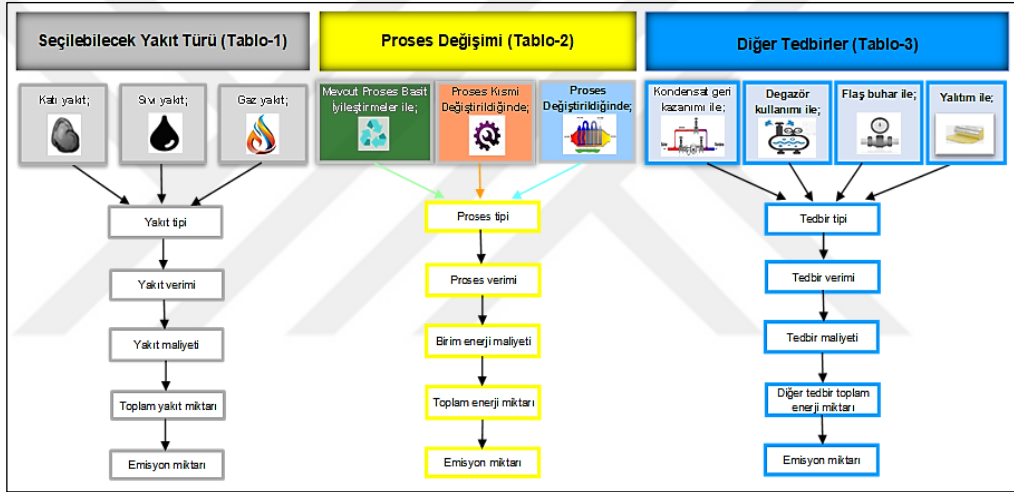
Bu çalışmada enerjinin etkin ve verimli kullanılması amacı ile sanayide modellenerek bir algoritma tasarımı yapılmıştır. Sanayide enerji verimliliği sağlayacak noktalar için yakıt sistemleri, üretim işlemleri ve prosesleri ile uygulanabilecek diğer tedbirler algoritmalar ile sorgulanarak sistemsel değişken etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Algoritmalar, tüm ihtimaller göz önüne alınarak sanayinin tüm alt sektörlerine uyarlanabilecek genel bir yapı ile Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Yakıt sistemleri ve proses algoritması.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, proses ve yakıt sistemleri algoritmalarında kullanılan sorgularda, alınan cevaplara göre Şekil 3.3’te tablolaştırılmış alt gruplara ayrıştırılmaktadır. Bu tablo grupları; seçilebilecek yakıt türü ve sistemleri, kısmi veya

tam proses değişimleri ve uygulanabilecek farklı tedbirler için sistemsel yönlendirmeler yapmaktadır. Sorgulamalar; tip, verim, maliyet, enerji miktarı ve emisyon miktarını belirlemek için olası en iyi tekniği alınan cevaplara göre yönlendirmektedir. Algoritmik yaklaşım, stratejik değişkenlerin belirlenmesinde ve enerji verimliliği çalışmalarında anahtar değişkenlerin ortaya konulması için kolay ve standart bir yaklaşımı, farklı sanayi grupları için uygulanabilir, kıyaslanabilir ve fabrikaya özel sonuçları tanımlayarak, net bir enerji verimlilik çalışması tanımını yapabilmektedir. Bu teknik farklı çalışma alanlarında uygulanmış olmasına rağmen, enerji verimliliği çalışmalarında ilk kez kullanılmaktadır. Yapısal sorgulama algoritmaları geliştirmeye oldukça açık ve detaylı bir çalışmadır.



Şekil 3.3. Yakıt ve proses algoritması tablo ayrışmaları.

Algoritmalarda yakıt sorgulamaları, net bir şekilde yakıt sistemlerinin verimliliği ve çevresel yaklaşımı ile temiz üretimi hedeflemektedir. Kullanılan yakıt yanma verimliliğinin yüksek olması, kalorisi yüksek ve emisyonlarının daha az olması, eko üretimi arttıran bir unsur olarak kabul edilmektedir [104]. Yakıt maliyetlerinin düşmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ve toplam yakıt tüketimi içindeki payını arttırarak, sıfır emisyon hedefine ulaşımı kolaylaştırmaktadır [105].

Sanayi üretim tesisinde eğer verimli bir yakıt kullanılıyorsa, üretim aşamaları “proses değişimi” algoritması ile sorgulanmalıdır. Proses değişimi, mevcut prosesin basit iyileştirmeler ile devam ettirilmesi, prosesin kısmi olarak değiştirilmesi veya prosesin değiştirilmesi sonucunu ortaya çıkarabilir. Bu sorgulama sistemsel ve geniş çaplı bir



değişim ise, sanayinin bu planı uzun vadeli programlama kapsamında değerlendirmesi gerekmektedir. Mevcut proses değiştirilerek enerji verimliliği kabul edilebilir bir seviye arttırılabilecek ise, uygulanabilecek teknikler listelenerek, geri kazanım ve enerji verimliliği miktarları hesaplamaları yapılmalıdır. Algoritmik sorgulamalar, iyileştirme oranları üstüne yoğunlaşmıştır. Her sorgulama değişken tanımlamasını baz alarak, sistemsel değişimlerin tamamı uygulanması durumunda net enerji verimliliği miktarını tahmin etmektedir. Bu yaklaşım metodolojik olarak bir model kurgusuyla yapılmaktadır.

Mevcut prosesin basit iyileştirmeler ile devam ettirilmesi durumunda enerji verimliliği arttırılmasına yönelik gruplandırılmış çözümler aşağıda listelenmiştir [106,107,108,109,110]:

1. Optimum hammadde kullanımı,
2. Otomatik ve kontrollü ekipman kullanımı,
3. Proses akışına uygun düzenli yerleşim planı,
4. İşletme uzmanlığı ve eğitimi,
5. Sistem kayıplarını ve kaybı azaltacak tedbir ve kapalı sistemler verimlilik arttırıcı çözümlerdir.

Proses değişimlerinin mevcut sistem üzerindeki etkisi eğer fazla değilse veya etkisinin olmayacağı düşünülüyorsa, bu durumda değişkenlere bağlı olarak kısmi değişimlerin mevcut sistemler üzerindeki etkisi algoritmalar ile sorgulanabilir. Bu tip değişimlerin maliyeti tam değişimlere göre daha az ve kabul edilebilir bir düzeyde iyileştirme ve geri kazanım sağlayabilmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki listelenmiş olan kısmi değişim işlemleri uygulanabilir [111,112,113]:

1. Makine-teçhizat değişimi,
2. Ara üretim değişimi,
3. Ek tedbirler (ilave ekipman, hammadde, oto kontrol sistemleri vs.)

### 3.3. PROSESLER

Sanayide prosesler, bir malzemeden veya ham maddeden son ürün veya ürünler elde etmek için yapılan işlemlerdir [114]. Bu işlemler, ham maddenin fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir [115]. Sanayideki üretim aşamaları, ürünün kalitesi, maliyeti ve verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [116]. Üretim aşamaları, son ürün cinsine, ham maddeye ve uygulanan imalat yöntemine göre değişebilmektedir. Aynı ürün tipi için farklı prosesler ve üretim aşamaları da görülebilmektedir [117]. Prosesler; “*Proses enerji kullanımı ve kazanımı*”, “*Proseslerde ekipman kullanımı*” ve “*Diğer enerji kazanım noktaları*” olmak üzere üç kısımda incelenmiştir.

#### 3.3.1. Proseslerde Enerji Kullanımı ve Kazanımı

Enerji kullanımı, mekanik enerji, elektrik enerjisi, termal enerji veya kimyasal enerji şeklinde olabilmektedir. Enerji kaynakları, prosesin türüne ve özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Enerji kullanımı, proses maliyetini ve elde edilen kar miktarını etkilemektedir. Enerji kazanımı ise prosesin enerji verimliliğini arttırmakta ve çevresel etkilerini azaltmaktadır [118].

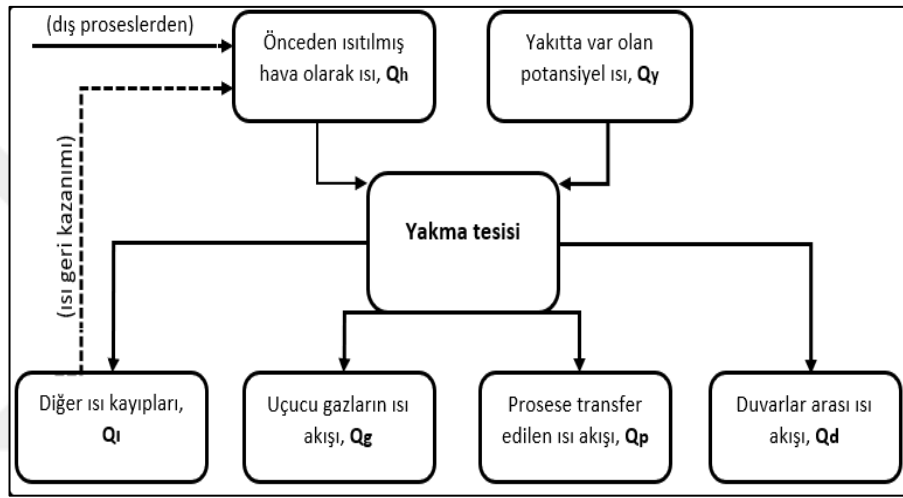
Proseslerin en önemli enerji kazanım noktaları, üretim aşamalarına enerji sağlayan birimlerdir. Enerji sağlayan birimler ise yakma tesisleri, buhar sistemleri ve kojenerasyon sistemleri olarak gruplandırılmıştır [119]. Üretim aşamalarında bu birimler bilimsel olarak yoğun çalışılmış ve kazanım miktarlarını arttırabilecek birçok teknik ortaya konulmuştur [120,121,122].

##### 3.3.1.1. Yakma Tesisleri

Yakma tesisleri; üretim amacıyla en genel şekilde ısı üretmektedir. Isı bazen kazan sistemleriyle, ocak veya taşınım vasıtasıyla üretim aşamalarına ısı veya iş olarak uygulanmaktadır. Isının kaybedilmemesi için yakma tesislerinde çoğunlukla adyabatik bir ortam yaratılmaya çalışılmaktadır. Sıcaklık ve basınç önemli iki değişken olarak ve termodinamik kurallara göre birbirini etkileyen bir yapıda olması sebebiyle, genel

enerji dengesini sağlamak amacıyla, optimum basınç ve sıcaklık temini ve bu amaçlı teknolojik uygulamalar yakma sistemlerinde çok önemli kazanımlar sağlayabilmektedir [123,124].

Bir yakma sisteminin enerji dengesinin genel yapı taşlarını; yakıt girişi, yakıt yakma, ısı transferi ve atık gaz çıkışı oluşturmaktadır. Bu faktörlerin doğru yönetilmesi yakma prosesindeki enerji verimliliğini doğrudan etkilemektedir [125]. Proses ısısının düşük olduğu yakma tesisinin genel enerji dengesi Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.4. Yakma sisteminin genel enerji dengesi [126].

Yakıtta yanmasıyla ortaya çıkan ısı miktarı ( $Q_{yakıt}$ ), kütle akış oranına ve yakıtın kalorifik değerine bağlıdır. Dolayısıyla, yakıtın içerisinde depolanan ve yanma sırasında açığa çıkan enerji ısı enerjisidir. Yakıtın yanması sırasında, açığa çıkan enerji, potansiyel enerji miktarıdır. Proses transfer edilen ısı akışı ( $Q_p$ ), yakma sisteminde yakma prosesinden çıkan enerji olarak tanımlanmaktadır. Havadan (sıcaklık artışı), buharlaştırmadaki gizli ısıdan (ısıtılan ısı kısmen ya da tam olarak buharlaştıysa) ve kimyasal ısıdan (endotermik kimyasal reaksiyon oluşursa) oluşmaktadır [127]. Uçucu gazların atık ısı akışı ( $Q_{gaz}$ ), uçucu gazların akış oranına, ısı kapasitesine, yakma ile oluşan suyun gizli ısısına, uçucu gazlardaki gizli ısıya ve sıcaklığına bağlı bir ısı miktarıdır [128]. Duvarlar arasındaki ısı akışı ( $Q_{duvar}$ ), kazan dış yüzeyinden ortam havasına transfer edilen hava sonucunda, çevredeki havada ortaya çıkan enerji kaybı miktarıdır. Diğer ısı kayıpları ( $Q_i$ ) bir arada gösterilmiştir.

Bu, karbon ve CO gibi oksidize olmayan ya da kısmen oksidize edilmiş kalıntıları ve katı kalıntıların (küller gibi) ısı içeriğini kapsamaktadır [126].

Genel enerji dengesi ve kayıplar aşağıdaki Eşitlikler 3.1-3.5 ile gösterilmektedir:

$$Q_{yakıt} + Q_{hava} = Q_{duvar} + Q_{gaz} + Q_p + \sum Q_1 \quad (3.1)$$

Burada;

$Q_{yakıt}$  = Yakıtta bulunan potansiyel ısı,

$Q_{hava}$  = Önceden ısıtılmış hava olarak ısı,

$Q_{duvar}$  = Duvarlar arasındaki ısı akışı,

$Q_{gaz}$  = Uçucu gazların atık ısı akışı,

$Q_p$  = Prosese transfer edilen ısı akışı,

$Q_1$  = Diğer ısı kayıpları.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (3.2)$$

$$\dot{W} = 0, \dot{Q} = -\dot{Q}_{kayıp} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_c h_c \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = [(Q_{duvar} + Q_{gaz} + Q_p + \sum Q_1) - (Q_{yakıt} + Q_{hava})] \quad (3.5)$$

Kazan ısı verimi, kazanın yanma sürecindeki enerji kayıplarını dikkate alarak, yakıtın verimli bir şekilde kullanım oranını gösteren bir ölçüttür. Verimlilik; kazanın tasarımı, yanma verimi, yakıt kalitesi, ısı transferi verimi, atık gazların sıcaklığı ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Eğer sistemdeki yakıt, besleme suyu, buhar basınç ve sıcaklıkları biliniyor ise Eşitlik 3.6 ile verim hesaplanabilmektedir [129]:

$$\eta = \frac{m_b i_b + m_s i_s}{B \times H_u} \quad (3.6)$$

Burada;

$i_b$  = Buhar entalpisi (kcal/kg),  
 $i_s$  = Besi suyu entalpisi (kcal/kg),  
 $m_b$  = Ölçülen buhar debisi (kg/h),  
 $m_s$  = Ölçülen su debisi (kg/h),  
 $B$  = Ölçülen yakıt debisi (kg/h),  
 $H_u$  = Yakıtın alt ısı değeri (kcal /kg).

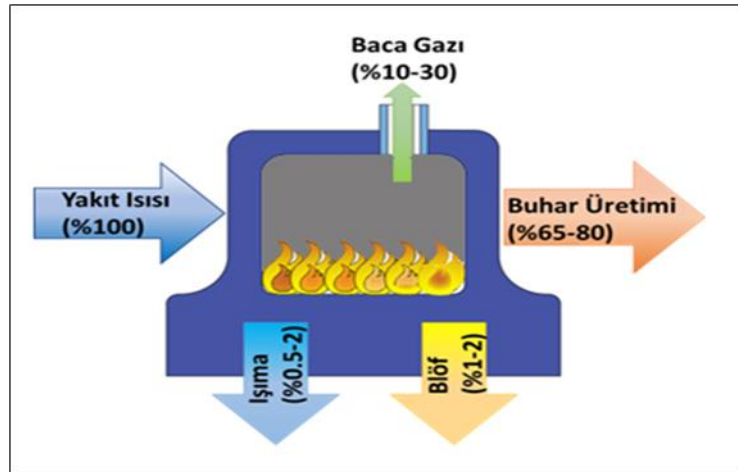
Eşitlik 3.6'da değerleri bilinen parametreler dışında kayıplar var ise bu kayıplar ayrı ayrı hesaplanarak verimlilik değeri Eşitlik 3.7 ile hesaplanabilmektedir.

$$\eta = 1 - \sum Z \quad (3.7)$$

Burada;

$Z$  = Farklı ısı kayıpları (%).

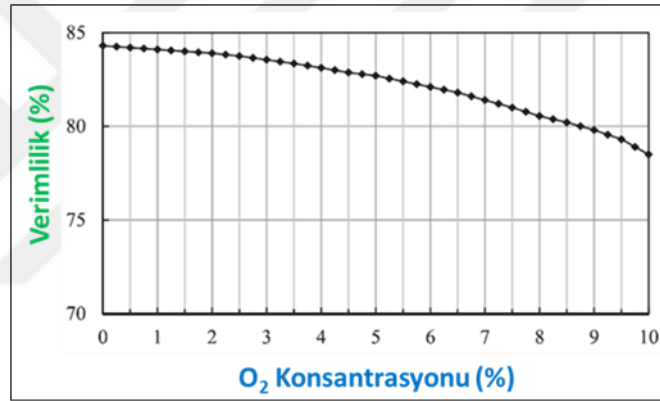
Şekil 3.5'te bir kazan sistemindeki ısı kayıpları gösterilmiştir. Isı kayıpları; baca gazları tarafından taşınan ısı (su buharı hariç), sıcak su buharı tarafından taşınan ısı, (hissedilir ve gizli ısı), yakıtta yanmamış karbon nedeniyle ısı kaybı (eksik yanma, iletim, radyasyon ve konveksiyon kayıpları) ve blöf kaybıdır [130].



Şekil 3.5. Bir kazanın ısı dengesi.

Yanma verimliliği doğrudan yakıt saflığıyla ilişkili olmakla birlikte ısının ne kadar faydalı işe dönüşebileceği ile de direk ilgilidir. Düşük yanma verimliliği maliyetlerin

artmasına sebep olmasından dolayı salınan CO değerlerini ve baca kurumu oluşumunu artırmaktadır. Yanma işlemi sonrası oluşan yakıt artıklarının en az seviyeye indirilebilmesi için yakıt-hava karışımına fazlalık hava takviyesi yapılmaktadır [131]. Yanma ortamında, fazlalık hava miktarının yetersiz olması durumunda CO salınımı, biriken karbon artıkları ve kül oluşumunu artmasına, sonucunda verimliliğin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun yanında, fazlalık havanın artmasıyla baca gazı miktarı artarak, baca ısı kayıplarının yükselmesine neden olacaktır. Fazlalık havanın oranı baca çıkışındaki oksijen miktarının ölçülmesiyle tespit edilmektedir. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere, baca gazındaki oksijen miktarının artması kazan verimliliğini düşürmektedir. Yapılan bilimsel çalışmalarda fazlalık havadaki oksijen değerini %4’ten %3’e düşürüldüğünde, kazan verimliliği %0,6 oranında artmaktadır [132,133].



Şekil 3.6. Oksijen konsantrasyonu ile yanma verimliliğinin ilişkisi [133].

Farklı yakıt türleri için optimum fazlalık hava oranları farklılık göstermektedir. En iyi yanma verimliliğinin elde edilmesi için ilave edilen fazlalık hava oranları doğal gaz için %5-10, fuel-oil için %5-20 ve kömür için %15-60 arasında olmalıdır [134]. Çizelge 3.1’e göre, doğalgazın yanması esnasında ilave edilen fazlalık hava miktarı %9,5 olduğunda baca gazındaki oksijen miktarı %2 olmakta ve 93 °C baca sıcaklığında %85,4 yanma verimi elde edilmektedir. Fazlalık hava oranı %81,6 seviyesine ulaştığında çıkan oksijen miktarı %10’a ulaşmakta ve verim %82,8’e kadar düşmektedir. Bununla birlikte baca sıcaklığı 93 °C’den 316 °C’ye çıktığında yanma verimi %82,8’den %68,2’ye düşmektedir. Baca gazı sıcaklığının yüksek olması yanma ısının faydalı işe dönüşme oranının düşük olduğunun göstergesidir ve bu da yanma verimliliğinin düşük olması demektir. Sonuç olarak baca gazı sıcaklığının 316 °C’den

93 °C'ye düşürülmesi ve fazlalık hava miktarının %81,6'dan %9,5'e indirgenmesi ile birlikte %17 civarı bir yanma verimi kazanımı sağlanabilmektedir [134].

Çizelge 3.1. Farklı fazlalık hava oranları için yanma verimi [134].

| Yanma Verimliliği (%) |         |                         |      |      |      |      |
|-----------------------|---------|-------------------------|------|------|------|------|
| Fazlalık Oranı (%)    |         | Net Baca Sıcaklığı (°C) |      |      |      |      |
| Hava                  | Oksijen | 93                      | 149  | 204  | 260  | 316  |
| 9,5                   | 2       | 85,4                    | 83,1 | 80,8 | 78,4 | 76   |
| 15                    | 3       | 85,2                    | 82,8 | 80,4 | 77,9 | 75,4 |
| 28,1                  | 5       | 84,7                    | 82,1 | 79,5 | 76,7 | 74   |
| 44,9                  | 7       | 84,1                    | 81,2 | 78,2 | 75,2 | 72,1 |
| 81,6                  | 10      | 82,8                    | 79,3 | 75,6 | 71,9 | 68,2 |

Çizelge 3.1'e göre,  $Q_{\text{kazanım}}$  değeri aynı yakıt kullanıldığı için verimlilik artış oranına göre sırasıyla Eşitlik 3.8, Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10 bulunmaktadır.

$$\eta_{\text{fark}} = \eta_1 - \eta_2 \quad (\%) \quad (3.8)$$

Burada;

$\eta_{\text{fark}}$  = aynı yakıt için verimlilik farkı (%).

$\eta_1$  = birinci yanma verimliliği (%).

$\eta_2$  = ikinci yanma verimliliği (%).

$$\text{Kazanılan yakıt miktarı} = \text{Toplam kullanılan miktar} * \eta_{\text{fark}} \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{kaz.}} (\text{kJ}) = \text{Kaz. yakıt mik. (kg)} * \text{Isıl değ.} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) * \eta_{\text{verimlilik}} (\%) * \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \quad (3.10)$$

Örneğin; Çizelge 3.1'de baca sıcaklığı 93°C ise, hava oranını %81,6'dan %9,5'e indirgendiğinde oksijen de %10'dan %2'ye indirgenmektedir. Verimlilik %82,8'den %85,4'e çıkartılmaktadır, kısaca kazanım %2,6'dır. Bu, kullanılan yakıt miktarının %2,6 oranında azalması anlamını taşımaktadır. Bu durumda ısı değeri 9584,13 kcal/kg ve yakıt yanma verimliliği %65 olan 10 ton kömür yakıldığında, Eşitlik 3.10'a göre yaklaşık 6776,9 MJ enerji tasarruf edilebilmektedir [134].

Isı kayıplarının azaltılmasında izlenebilecek yollardan bir tanesi de bacadan çıkan uçucu gazların sıcaklığının azaltılmasıdır. Uçucu gaz sıcaklığının azaltılması verimlilik değerlerini arttırmaktadır. Bacada oluşan sıcaklık değeri ise, kabul görmüş sıcaklık değerinin üzerinde olduğunda, fazla sıcaklık atık enerji olarak atmosfere atılacaktır [135]. Kayıp enerji, sadece kazan verimlilik değerini azaltmış olmayacak, kullanılan yakıt miktarını arttırarak, ekonomik ve çevresel negatif etki oranını arttıracaktır. Verimsiz enerji kullanımı, sistem değişkenlerinin gerçek anlamda tanımlanmasını ve modellenmesini zorlaştıracaktır [136]. Uçucu gazların sıcaklığını azaltmak, ısı transfer alanlarının genişletilmesi ile mümkün olabilmektedir. Geri kazanılan ısı çoğunlukla ilk ısıtma işlemleri için kullanılmaktadır. Atık enerji miktarının büyüklüğü, geri kazanım miktarını önemsiz hale getirebilmektedir [137].

Uçucu gazlardaki atık ısının geri kazanılması için ek prosesler eklenmesi gerekebilir. Bacaya hava ön ısıtıcı yerleştirilmesi ve bu enerjinin geri kazanılan enerji ile sağlanması iyi teknik olarak görülmektedir. Hava ön ısıtıcıların yanında ekonomizer kullanımı da sanayide kayıp ısıyı, geri kazanma tekniği olarak kullanılmaktadır [138]. Ekonomizerler sadece kazanlarda kullanılırken, hava ön ısıtıcıları hem kazanlar hem de ocaklar da kullanılmaktadır [139]. Endüstriyel kazanlarda besleme suyu sıcaklığı ve kazan yakma sıcaklığı, baca gazı sıcaklık değerinden düşüktür. Bu nedenle, ekonomizer veya hava ön ısıtıcısı kurulu bir sistemden geçen kayıp ısı emilerek, sisteme geri kazandırılmaktadır. Yanan bir ünitedeki verim artışı teknik düzenlemeler ve uygulamalar ile sağlanmaktadır [140].

Kazanlar kurulum aşamalarında tanımlı bir yanma (set-up) verimine sahipken, belirli bir zaman sonrasında bu değerin set-up verimlerinden düşük olduğu görülmektedir. Farkın temel sebebi, kazan yüzeyinde oluşan ısı kayıpları ve baca gazı kayıplarıdır [141]. Verimi etkileyen diğer bir faktör ise, kazan yüküne bağlı ısı kayıplardır. Kazan yüzeylerindeki ısı kayıpları, eksik yanma, sıcak hatların yalıtılmamış olması sonucunda gerçekleşen kayıplardır. Yanma veriminin düşük olması kayıp miktarını arttırmaktadır [142].

Kazan çalışırken, kapasite dikkate alınmalıdır. Düşük ve aşırı yükte çalıştırılmadıkları zaman yüksek verim elde edildiği bir gerçektir. Özellikle sistemsal yük oranı %50'nin



altına düştüğünde, verim de hızla düşmektedir. Buna bağlı olarak, yüzeyden gerçekteşen ısı kayıp oranı da artmaktadır [143]. Düşük yüklerde, kayıpların önemli bir sebebi ise durma kayıplarıdır. Kazan durduğunda hem dış yüzeyden hem de baca çekiş etkisi ile iç yüzeylerden soğumaktadır [144]. Aşırı yük durumunda ise, yanma verimi düşerek, baca gazı sıcaklıklarını arttıracaktır. Bu yüzden kazan yakma işlemi kapasitesine bağlı olarak %70 kapasite üzerinde, ihtiyaç oranı dikkate alınarak çalıştırılmalıdır. Kazanların tam yüke yakın çalıştırılmaları, verimli çalışmaları anlamı taşımaktadır [145]. Kazan yükünün değişmesi, yakılan yakıt miktarını da değiştirmektedir [146].

Kazan verimini etkileyen diğer bir husus, ısıtıcı yüzeyde oluşan kireç taşı ve kurum birikintileridir. Isı geçişinin olduğu yüzeylerin her iki tarafında (su ve duman etkisiyle) zamanla biriken kirletici tabakalar, ısı geçişini önemli ölçüde engellemektedir. Bu durum, sistemdeki sıcak gazın ısınısını suya geçirmeden kazanı terk etmesine ve artan baca gazı sıcaklığı ile kazan verimi düşmesine sebep olmaktadır [147]. Isı transferinin olduğu yerlerde oluşan kül, karbon ve bazı kimyasal içerikli partiküller madde ile kaplanan yüzeyler, verimi büyük ölçüde etkilemektedir. Periyodik yarı otomatik kurum üfleyici mekanizmalar konveksiyon bölgelerindeki kirletici parametreleri, filtreleme sistemlerine yönlendirerek hem ortamın hem de atmosferin temiz kalmasını sağlamaktadır [148, 149].

Kazanın yanması esnasında sıcaklık sürekli artarak yüksek bir sıcaklığa ulaşmaktadır. Sıcaklık artışı kazan suyundaki safsızlık oranının artmasına sebep olmaktadır. Bu kirleticiler, çözünmüş gazlar, sert su mineralleri, organik maddeler ve çamur bileşenleridir. Buhar oluşumundan sonra kazanda oluşan tortu veya birikintiler, buhar kalitesini bozmaması için belirli aralıklarla temizlenmelidir. Kazan içerisindeki suyun bir miktarının belli aralıklarla boşaltılması işlemi yani blöf alımı yapılabilir. Blöf miktarının optimize edilmesi ve alım periyotlarının periyodik yapılması, kazan yüzeyinde ısı transferini olumsuz etkileyen kirliliklerin oluşumunu da etkileyecektir. Sistemin temiz tutulması verimi arttırdığı gibi, yakıt tasarrufu da sağlayacaktır. Örneğin; 3,5 bar basınçta ve %5 blöf durumunda %1 yakıt kaybı meydana gelirken, 14 bar ve %10 blöf durumunda kayıp %3'e kadar yükselmektedir [150].

Verimsiz yanma nedeniyle gerçekleşen ısı kaybı, katı ve sıvı yakıt içerisinde bulunan yanabilir haldeki maddelerin yanmadan, kül içerisinde kalması veya baca gazında yanmamış olarak çevreye hidrokarbon, karbon monoksit (CO) ve methane (CH<sub>4</sub>) olarak atılmasına sebep olmaktadır. Kazanda yakıt tamamen yandığında, içerisindeki karbon (C), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>) su buharına (H<sub>2</sub>O), kükürt (S) kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) dönüşmektedir. Tam yanma işleminde, yakıt kimyasal bileşeninde olmasa bile, atmosfer azotunun reaksiyonu sonucunda NO<sub>x</sub> olarak emisyon çıkışları görülmektedir [151,152,153]. Brülörde ise, yakıt basıncının ve sıcaklığının istenen değerde olmaması yakıtın yeterince atomize olmaması sebebiyle, eksik yanmaya neden olup verimi azaltacak yönde etki etmektedir [154].

### **3.3.1.2. Buhar Sistemleri**

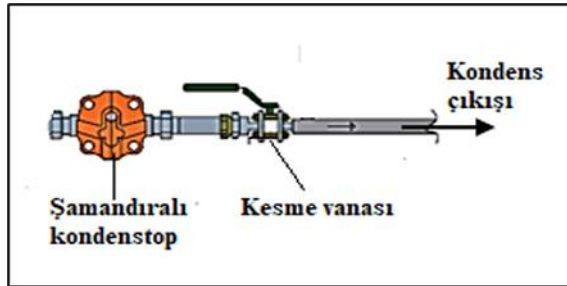
Endüstriyel işletmelerde buhar, kazanda yakıtın yakılması ile elde edilen enerjinin kullanılarak suyun ısıtılmasıyla üretilmektedir. Üretilen buhar, enerjiyi taşıyarak, mekanik enerjiye veya işletmenin amacına göre prosesler de kullanılmaktadır [155]. Şekil 3.7’de gösterilen buhar dağıtım sistemleri, dağıtım hatları sayesinde, istenilen kalite, basınç ve miktarda enerjinin tüketileceği birimlere aktarmaktadır [156].

Buhar, son kullanıcının ihtiyacını sağlayabilecek mümkün olan en düşük basınçta üretilmelidir. Dağıtım sisteminde üretilen düşük basınçtaki buhar, hatlarda taşıma esnasında, daha az sızıntıyla, az enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Yüksek basınçtaki buhar, yüksek sıcaklığa sahiptir. Dağıtım hatlarındaki boruların küçük çapta ve iyi yalıtılmış olması ile taşıma sistemi adyabatik olarak enerjiyi daha verimli bir şekilde taşıyacaktır [157]. Borularda daha az yoğunlaşma meydana gelirken, yüksek hızda buhar taşınarak minimum enerji kayıpları ile maksimum fayda sağlanabilecektir. Yüksek basınçta buharın üretilmesi gereksiz yere daha fazla yakıtın tüketilmesine sebep olmaktadır [158].



Dağıtım sistemleri, kazandan veya buhar jeneratöründen alınan buharı son kullanım birime kadar iletmektedir. Şebeke boyunca boru izolasyon yapısına bağlı olarak yüzey kayıpları oluşabilmektedir. Dağıtım hatlarında bulunan vana, çek vana, basınç düşürücüleri v.b., ekipmanların bağlantı noktalarından veya iç mekanizmalarından kaynaklanan ısı enerjisi kayıpları, verimli dağıtım performansını etkilemektedir [162,163]. Tesis içerisindeki hatlarda buhar basınç dengesi uygun ölçme cihazları ile kontrol altında tutulmalıdır. Kayıpların yüksek olduğu bir ortamda yakıt tüketimi ve bunlara bağlı nihai ürün üretimi yüksek oranda etkilenmektedir [164].

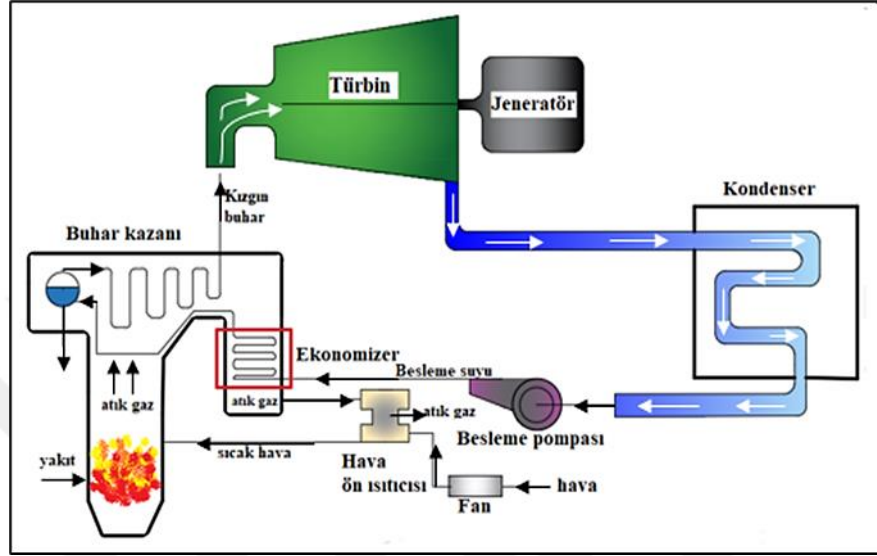
Dağıtım sistemlerinde buhar, serin bir yüzey ile karşılaştığında ısının bir kısmını kaybederek, kondens adı verilen yoğunlaşma işlemi sonucunda, küçük su damlacıklarının oluşturacaktır. Dağıtım hatları iyi yalıtılmış olsa da hat boyunca ısı kaybı oluşabilmektedir [165]. Hatlarda biriken kondensin ısını muhafaza etmek ve sistemdeki buharı mümkün olduğunca kuru tutmak için, hatlara **kondenstop** adı verilen cihazlar yerleştirilmelidir (Şekil 3.8). Kondenstoplar, sistemde oluşan su damlacıklarını tutarak sadece suyun boşaltılmasını sağlamaktadırlar. Eğer sistemde kondens birikmesi gerçekleşirse, buhar ısıtılacak yüzeye ulaşamayacak ve proses yavaşlaması ile verim düşecektir [166].



Şekil 3.8. Kondens çıkış hattı.

Dağıtım hatlarından geçen buhar, kullanım amacına göre birçok son kullanım birimine aktarılmaktadır. Kademeli sıcaklık düşüşleri ile evsel ısıtma amacı ile de kullanılabilir. Buhar sisteminin, nihai kullanım ekipmanı; ısı değiştiriciler, brülör, türbinler, ısı ve kimyasal reaksiyon hazneleri v.b., birimlerdir. Birimlerde buhar enerjisinin oransal miktarı ısıya dönüştüğü gibi, enerjisinin kullanım amacına ve enerji miktarına göre, mekanik işe çevrilmesi de mümkündür. Şekil 3.9’da, buhar

türbini, sistemden gelen basınçlı buharı kullanarak termal enerji üretmektedir. Türbin veya pompa grupları, döner veya pistonlu makineleri çalıştırmak için bu ısıyı mekanik işe çevirmektedir. Türbin çıkış miline bağlı bir jeneratörle de elektrik üretmek ve üretilen bu enerjiyi depolamak mümkündür.

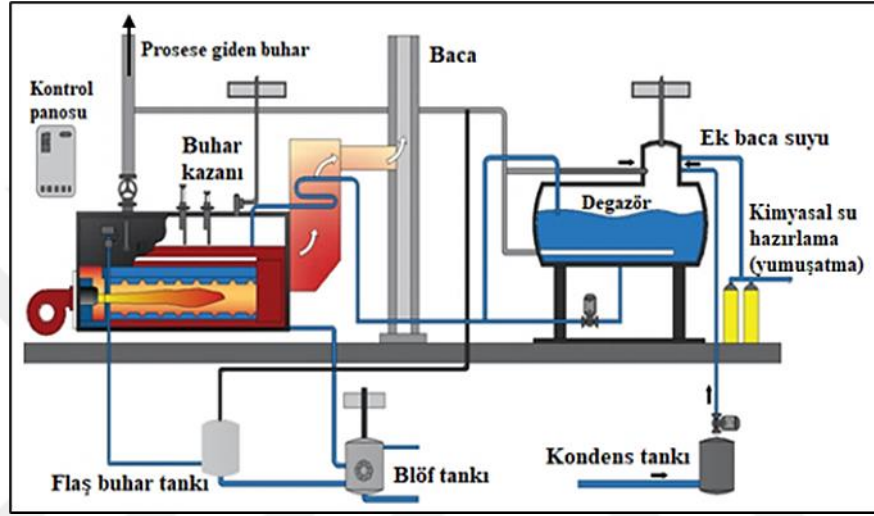


Şekil 3.9. Buhar türbini ile ısı'nın mekanik işe çevrilmesi.

**Kondensat** geri kazanımı, süreçte oluşan buharın yoğunlaşarak sıvı hale dönüşmesi ve bu sıvının daha sonra sisteme geri kazandırılması anlamına gelmektedir. Kondensat geri kazanımı ile verimlilik, birçok endüstriyel süreçte önemli bir ayrıntı olarak görülmektedir. Yapısal olarak hem suyun hem de **enerjinin oransal** geri kazanılması ile sistem içerisinde, pozitif ekonomik bir girdi sağlanmaktadır [167]. Proses ısıtmada buhar; ısı değiştiricide ısı, transfer ederek kazanım sağlamaktadır. Isı değiştiricide, buhar tutucu tarafından yoğunlaşana kadar tutulması ile enerji kazanımı maksimum değere ulaştırılabilmektedir. Buhar tutucuda gerçekleşen kondens (su) fazına geçerek kondensat geri dönüş sistemleri ile kazana tekrar geri gönderilmektedir [168,169].

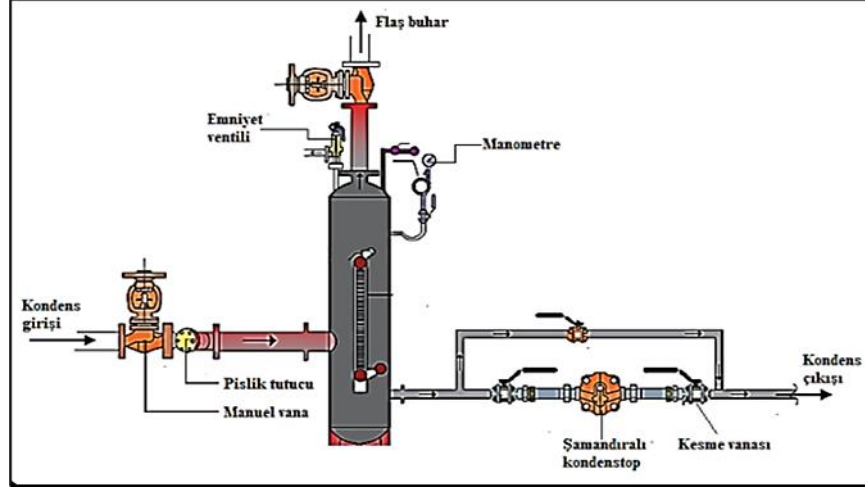
Geri kazanım işlemlerinde kullanılan sistemler, işlem prosesine uygun şekilde yapılmalıdır. Sisteme kazandırılacak ham suyun, bir yumuşatma sistemi sayesinde sudaki kireç ve sertlik yapacak bileşenler, oksijen ve karbondioksit gibi aşındırıcı gazlardan ayrıştırılması gerekmektedir [170]. Özellikle suyun içindeki çözünmüş gazlar, buhar kazanında, kondens dağıtım ve dönüş hatlarında korozyona sebep olmaktadır. Eğer kazan besleme suyu içerisinde çözünmüş olan bu gazlar sistemden

arındırılmaz ise, sistemin tüm cihaz ve ekipmanları aşınmaya bağlı olarak, delinme, çatlama, kırılma sonucunda, kaçak sorunlarına sebep olacaktır. Sorunların giderilmesi için yumuşatma besisi tankından gelen suyu, bir gaz alma sisteminden dönen kondensle beraber ısı olarak işlenmesi gazlardan arınma için iyi bir çözüm yöntemidir. Bu gaz alma sistemine **degazör** adı verilmektedir. Şekil 3.10’da şematik olarak gösterilmektedir [171,172].



Şekil 3.10. Buhar sisteminde degazör kullanımı.

Buhar sistemlerinde verimlilik açısından önemli bir nokta da yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta kondensin, basıncın ani değişimi sonucunda, yeniden buharlaşmasıyla oluşan, “**flaş buharın**” değerlendirilmesidir (Şekil 3.11). Birçok endüstriyel tesislerde proses ve hat mesafelerinin uzaklığın ile flaş buhar kazana geri döndürülmez ve havaya atılmaktadır. Flaş buharın sıcaklığı, buhar kazanı tarafından üretilen buharın sıcaklığından daha düşüktür; ancak taşıdığı ısı düşük değildir. Bu nedenle buhar sisteminde flaş buhar enerjisinin geri kazanımı, önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır [173,174,175,176,177].

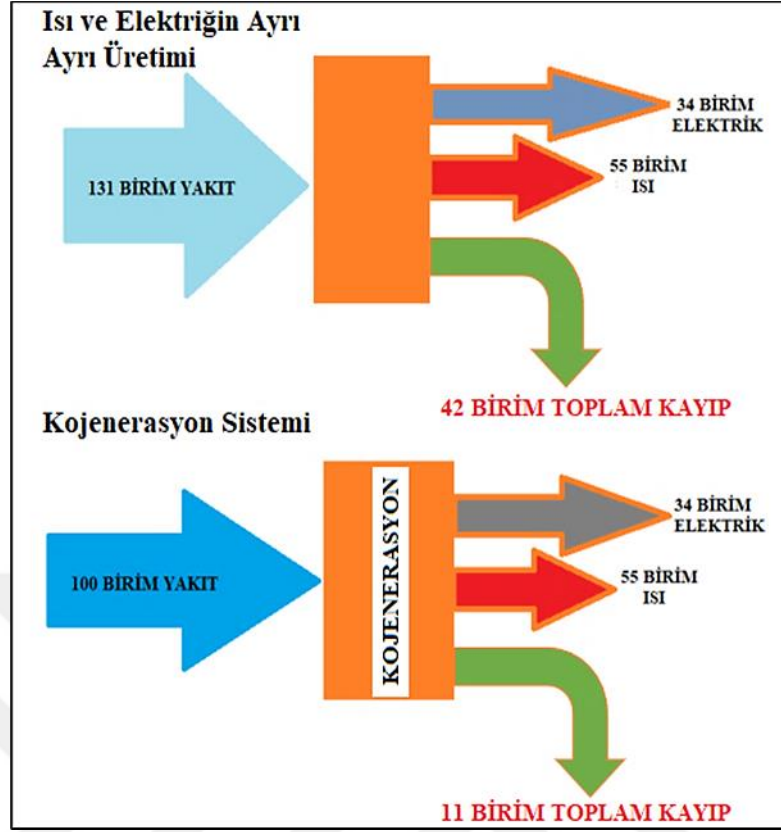


Şekil 3.11. Flaş buhar sistemi ve ekipmanları.

### 3.3.1.3. Kojenerasyon Sistemleri

Kojenerasyon sistemi, bir proseste ısı enerjisinin, elektrik enerjisinin ve mekanik enerjinin eş zamanlı olarak üretilmesini ifade etmektedir. Birleşik ısı ve güç sistemleri (Combined heat and power, CHP) olarak bilinen, bu sistemlerde üretilen gücün, önemli bir oranı elektrik enerjisine çevrilmektedir. Sistemde üretilen ısı enerjisi, endüstriyel tesislerin ilgili birimlerinde yüksek sıcaklıktaki buhar ihtiyacını karşılamaktadır. Kullanılan buharın ısıısının düşmesi ile, düşük sıcaklıktaki su-buhar konut ısıtılması gibi amaçlar için kullanılabilir [178, 179].

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi, kojenerasyon sistemi ile ısı ve elektrik enerjisinin üretilmesi, geleneksel üretim yöntemi ile enerji ve ısı üretilmesine göre daha az yakıt tüketmektedir. Az yakıt kullanımı, birincil enerji kaynağının etkin kullanımını sağlamakla beraber, sistemdeki enerji verimliliğini arttırmaktadır [180].



Şekil 3.12. Isı ve elektriğin ayrı üretimi.

Trijenerasyon sistemi, elektrik enerjisi kullanarak buhar ve sıcak su üretilmesine ilaveten soğutma işlemi yapabilen bir sistemdir. Atık ısının absorpsiyonlu soğutucu bir sistemden geçirilerek, suyun soğutulması işlemi ile proseslerde gerek duyulan soğutma işlemleri yapılabilmektedir. Genel olarak ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisinin üretilmesinden dolayı üçlü anlamına gelen bu jenerasyon sistemine “Tri” ifadesi eklenmiştir [181,182].

Endüstride kullanılan 20 bar ve 30 bar türbin giriş buhar basıncı ile çalışan “***buhar türbini***” verileri Çizelge 3.2’de verilmiştir [183].



Çizelge 3.2. 20 ve 30 bar türbin giriş buhar basıncı ile çalışan türbin verileri.

| Türbin giriş buhar basıncı- 20 bar |                              |                                  | Türbin giriş buhar basıncı- 30 bar |                              |                                  |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Üretilen buhar<br>(ton/h)          | Çıkış buhar<br>basıncı (bar) | Üretilen saatlik<br>enerji (kWh) | Üretilen buhar<br>(ton/h)          | Çıkış buhar<br>basıncı (bar) | Üretilen saatlik<br>enerji (kWh) |
| 5                                  | 1,25                         | 207,75                           | 5                                  | 1,25                         | 257                              |
|                                    | 2                            | 192                              |                                    | 2                            | 236                              |
|                                    | 3                            | 171                              |                                    | 3                            | 208                              |
|                                    | 4                            | 150                              |                                    | 4                            | 180                              |
|                                    | 6                            | 117                              |                                    | 6                            | 156                              |
|                                    | 8                            | 92                               |                                    | 8                            | 132                              |
|                                    | 10                           | 70                               |                                    | 10                           | 111                              |
| 8                                  | 1,25                         | 336,25                           | 8                                  | 1,25                         | 391,75                           |
|                                    | 2                            | 310                              |                                    | 2                            | 367                              |
|                                    | 3                            | 275                              |                                    | 3                            | 334                              |
|                                    | 4                            | 240                              |                                    | 4                            | 301                              |
|                                    | 6                            | 187                              |                                    | 6                            | 251                              |
|                                    | 8                            | 147                              |                                    | 8                            | 211                              |
|                                    | 10                           | 113                              |                                    | 10                           | 179                              |
| 10                                 | 1,25                         | 416,5                            | 10                                 | 1,25                         | 489,75                           |
|                                    | 2                            | 385                              |                                    | 2                            | 459                              |
|                                    | 3                            | 343                              |                                    | 3                            | 418                              |
|                                    | 4                            | 301                              |                                    | 4                            | 377                              |
|                                    | 6                            | 235                              |                                    | 6                            | 313                              |
|                                    | 8                            | 184                              |                                    | 8                            | 263                              |
|                                    | 10                           | 141                              |                                    | 10                           | 223                              |
| 12                                 | 1,25                         | 498,5                            | 12                                 | 1,25                         | 589,5                            |
|                                    | 2                            | 461                              |                                    | 2                            | 552                              |
|                                    | 3                            | 411                              |                                    | 3                            | 502                              |
|                                    | 4                            | 361                              |                                    | 4                            | 452                              |
|                                    | 6                            | 282                              |                                    | 6                            | 376                              |
|                                    | 8                            | 221                              |                                    | 8                            | 316                              |
|                                    | 10                           | 170                              |                                    | 10                           | 268                              |
| 15                                 | 1,25                         | 627                              | 15                                 | 1,25                         | 736,5                            |
|                                    | 2                            | 579                              |                                    | 2                            | 690                              |
|                                    | 3                            | 515                              |                                    | 3                            | 628                              |
|                                    | 4                            | 451                              |                                    | 4                            | 566                              |
|                                    | 6                            | 352                              |                                    | 6                            | 469                              |
|                                    | 8                            | 275                              |                                    | 8                            | 396                              |
|                                    | 10                           | 212                              |                                    | 10                           | 335                              |
| 18                                 | 1,25                         | 750                              | 18                                 | 1,25                         | 882,5                            |
|                                    | 2                            | 693                              |                                    | 2                            | 827                              |
|                                    | 3                            | 617                              |                                    | 3                            | 753                              |
|                                    | 4                            | 541                              |                                    | 4                            | 679                              |
|                                    | 6                            | 422                              |                                    | 6                            | 564                              |
|                                    | 8                            | 330                              |                                    | 8                            | 475                              |
|                                    | 10                           | 255                              |                                    | 10                           | 402                              |
| 22                                 | 1,25                         | 916,75                           | 22                                 | 1,25                         | 1077,5                           |
|                                    | 2                            | 847                              |                                    | 2                            | 1010                             |
|                                    | 3                            | 754                              |                                    | 3                            | 920                              |
|                                    | 4                            | 661                              |                                    | 4                            | 830                              |
|                                    | 6                            | 516                              |                                    | 6                            | 689                              |
|                                    | 8                            | 403                              |                                    | 8                            | 581                              |
|                                    | 10                           | 311                              |                                    | 10                           | 492                              |
| 25                                 | 1,25                         | 1043,5                           | 25                                 | 1,25                         | 1226,25                          |
|                                    | 2                            | 964                              |                                    | 2                            | 1149                             |
|                                    | 3                            | 858                              |                                    | 3                            | 1046                             |
|                                    | 4                            | 752                              |                                    | 4                            | 943                              |
|                                    | 6                            | 586                              |                                    | 6                            | 783                              |
|                                    | 8                            | 458                              |                                    | 8                            | 660                              |
|                                    | 10                           | 354                              |                                    | 10                           | 558                              |
| 30                                 | 1,25                         | 1251,25                          | 30                                 | 1,25                         | 1470,25                          |
|                                    | 2                            | 1156                             |                                    | 2                            | 1378                             |
|                                    | 3                            | 1029                             |                                    | 3                            | 1255                             |
|                                    | 4                            | 902                              |                                    | 4                            | 1132                             |
|                                    | 6                            | 703                              |                                    | 6                            | 940                              |
|                                    | 8                            | 550                              |                                    | 8                            | 792                              |
|                                    | 10                           | 425                              |                                    | 10                           | 671                              |

Çizelge 3.2’de verilen buhar türbinlerinde kazanım değerlerini bulmak istersek;

$$E_{\dot{u}} = \frac{\dot{Q}_{\dot{u}}}{\dot{V}_{\dot{u}}} \quad (3.11)$$

Burada;

$\dot{Q}_{\dot{u}}$  = Üretilen enerji (kWh),

$\dot{V}_{\dot{u}}$  = Üretilen buhar miktarı (ton/h).

$$E_d = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{V}_d} \quad (3.12)$$

Öyleki;

$\dot{Q}_d$  = Değişen duruma göre üretilen enerji (kWh),

$\dot{V}_d$  = Yeni sisteme göre buhar miktarı (ton/h).

$$E_d - E_{\dot{u}} = \frac{Q_k}{\dot{V}_d} \quad (3.13)$$

ve;

$$Q_{\text{kazanım}} = (E_d - E_{\dot{u}}) * \dot{V}_d \quad (3.14)$$

### 3.3.2. Proseslerde Ekipman Kullanımı

Endüstriyel uygulamalarda, elektrik motor sistemleri ve basınçlı hava sistemleri en yaygın kullanılan ekipmanlardır. Elektrik motorları, mekanik hareketi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır, çok farklı amaçlar için kullanılabilir [184, 185]. Basınçlı hava, enerjiyi saklayan ve enerjiyi mekanik güce dönüştüren bir kaynaktır. Üretim işlemlerinde, otomasyon sistemlerinde, şebeke taşıma ve enerji dağıtım v.b., birçok amaç için yaygın olarak kullanılmaktadır [186]. Son üretim noktalarında özellikle talaşlı işleme ekipmanlarının (***machining***) en önemli parçasını basınçlı hava sistemleri oluşturmaktadır.

### 3.3.2.1. Elektrik Motor Sistemleri

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motorları, sabit (stator) ve kendi etrafında dönen (rotor) olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelmektedir. Ana parçalar, elektrik akımını ileten sargılar, konstrüksiyon elemanları ve manyetik akıyı ileten parçalardan oluşmaktadır [187]. Yapısal olarak karışık gözükmese de, kutup enerji dağılımı mantığıyla çalışan, eksi ve artı kuvvetlerin yarattığı manyetik alanın itme gücüyle açısal tur işlemini gerçekleştiren üretimin vazgeçilmez ekipmanlarıdır [188].

Üretim sektöründe kullanılan endüstriyel ekipmanların çoğu, ihtiyaç duyulan gücü elektrik motorları sayesinde üretmektedir. Ülkemizde motor kullanımından kaynaklanan elektrik tüketimi toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %36'sını oluşturmaktadır [189].

Motor mekanik güç çıkışının, çekilen elektrik gücüne oranı motor verimi olarak adlandırılmaktadır. Verim, motor tipi ve büyüklüğüne göre %70 ile %96 arasında değişen ve ekipmanın mekanik güç tanımını veren önemli bir parametredir [190]. Üretimde verimi arttırmak için genellikle yüksek verimli motorlar tercih edilmektedir. Verimi yüksek motorların maliyetleri standart motorlara göre %15-25 arasında değişen bir oranda daha pahalıdır; ancak işletme maliyetlerinin düşük olması sebebi ile ödenen fazla miktar kısa bir sürede geri kazanılmaktadır [191]. Enerji verimliliği arttırmak için motor seçimi, güç kalitesi, motor kontrol sistemleri (değişken hız sürücüsü, otomasyon), güç aktarım elemanları (fan, pompa vb.) gibi senkronize çalışan ve motor gücünü verimli tüketen ekipmanların yanında, sistem bakımında zamanlı yapılması gerekmektedir.

Enerji kayıpları, motor sargılarında kullanılan bakır iletken kesitinin arttırılması, demir göbek akı yoğunluğunun azaltılması, stator göbeğinin boynunun arttırılması, levha kalınlığının azaltılması ve dayanımı yüksek alaşım malzeme kullanılarak düşürülebilmektedir. Standart bir elektrik motorunun daha yüksek verimli motor ile değiştirilerek elde edilebilecek enerji tasarrufu Eşitlik 3.15 ile hesaplanmaktadır [192]:

$$\text{Enerji tasarrufu} = \text{Toplam Nominal Güç} \times \text{ÇS} \times \text{YO} \times \left( \frac{1}{\eta_{\text{standart}}} - \frac{1}{\eta_{\text{yüksek verimli}}} \right) \quad (3.15)$$

Denklikte kullanılan değişkenler;

ÇS = Çalışma Süresi,

YO = Yükleme Oranı (fili yükün tam yüke oranı),

$\eta_{\text{standart}}$  = Standart Tip Motor Verimi,

$\eta_{\text{yüksek verimli}}$  = Yüksek Verimli Motor Tipi.

$$\text{Para Tasarrufu} = \text{Enerji Tasarrufu} \times \text{Enerjinin Birim Fiyatı} \quad (3.16)$$

Günümüzde elektrik motorları çok farklı standartlarda ve yüksek verimlilikte üretilmektedir. Elektrik motoru, belli standartlarda üretilerek ve çok farklı büyüklüklerde üretimi yapılmaktadır. IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından elektrik motorlarının standardize edilmesine yönelik önerilen, IEC 60034 serisi standartları, başta AB üyesi ülkeleri olmak üzere, dünyada kullanılan bir verimlilik standardıdır. Yoğun olarak kabul gören IEC 60034-30-1 elektrik motoru standartlarına göre 0,12-1000 kW mil gücü aralığındaki elektrik motorları verimliliklerine göre; **IE1**-Standart Verimlilik, **IE2**-Yüksek Verimlilik, **IE3**-Premium Verimlilik ve **IE4**-Süper Premium Verimlilik şeklinde gruplandırılmıştır [193].

IEC tarafından 2008 yılında yürürlüğe giren TS EN 60034-30 standardı ile tanımlanan verimlilik sınıfları ve karşılaştırılabilir verimlilik seviyeleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Elektrik motorlarında verimlilik değerleri [194].

| Motor gücü (W) | IE1- Standart verimlilik |         |         | IE2- Yüksek verimlilik |         |         | IE3- Üstün verimlilik |         |         |
|----------------|--------------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|
|                | 2 kutup                  | 4 kutup | 6 kutup | 2 kutup                | 4 kutup | 6 kutup | 2 kutup               | 4 kutup | 6 kutup |
| 750            | 77,0                     | 78,0    | 73,0    | 75,5                   | 82,5    | 80,0    | 77,0                  | 85,5    | 82,5    |
| 1100           | 78,5                     | 79,0    | 75,0    | 82,5                   | 84,0    | 85,5    | 84,0                  | 86,5    | 87,5    |
| 2200           | 81,0                     | 81,5    | 77,0    | 84,0                   | 84,0    | 86,5    | 85,5                  | 86,5    | 88,5    |
| 3700           | 81,5                     | 83,0    | 78,5    | 85,5                   | 87,5    | 87,5    | 86,5                  | 89,5    | 89,5    |
| 5500           | 84,5                     | 85,0    | 83,5    | 87,5                   | 87,5    | 87,5    | 88,5                  | 89,5    | 91,0    |
| 7500           | 86,0                     | 87,0    | 85,0    | 88,5                   | 89,5    | 89,5    | 89,5                  | 91,7    | 91,0    |
| 11000          | 87,5                     | 87,5    | 86,0    | 89,5                   | 89,5    | 89,5    | 90,2                  | 91,7    | 91,7    |
| 15000          | 87,5                     | 88,5    | 89,0    | 90,2                   | 91,0    | 90,2    | 91,0                  | 92,4    | 91,7    |
| 18500          | 88,5                     | 89,5    | 89,5    | 91,0                   | 91,0    | 90,2    | 91,0                  | 93,0    | 93,0    |
| 22000          | 89,5                     | 90,5    | 90,2    | 91,0                   | 92,4    | 91,7    | 91,7                  | 93,6    | 93,0    |
| 30000          | 89,5                     | 91,0    | 91,0    | 91,7                   | 92,4    | 91,7    | 91,7                  | 93,6    | 94,1    |
| 37000          | 90,2                     | 91,7    | 91,7    | 92,4                   | 93,0    | 93,0    | 92,4                  | 94,1    | 94,1    |
| 45000          | 91,5                     | 92,4    | 91,7    | 93,0                   | 93,0    | 93,0    | 93,0                  | 94,5    | 94,5    |
| 55000          | 91,7                     | 93,0    | 91,7    | 93,0                   | 93,6    | 93,6    | 93,6                  | 95,0    | 95,0    |
| 75000          | 92,4                     | 93,0    | 92,1    | 93,6                   | 94,1    | 93,6    | 93,6                  | 95,4    | 95,0    |
| 90000          | 93,0                     | 93,2    | 93,0    | 94,5                   | 94,5    | 94,1    | 94,1                  | 95,4    | 95,8    |
| 110000         | 93,0                     | 93,2    | 93,0    | 94,5                   | 94,5    | 94,1    | 95,0                  | 95,4    | 95,8    |
| 150000         | 93,0                     | 93,5    | 94,1    | 95,0                   | 95,0    | 95,0    | 95,0                  | 95,8    | 95,8    |
| 185000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,0    | 95,0    | 95,4                  | 96,2    | 95,8    |
| 220000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,4    | 95,0    | 95,8                  | 96,2    | 95,8    |
| 250000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,4    | 95,0    | 95,8                  | 96,2    | 95,8    |
| 300000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,4    | 95,0    | 95,8                  | 96,2    | 95,8    |
| 330000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,4    | 95,0    | 95,8                  | 96,2    | 95,8    |
| 375000         | 94,1                     | 94,5    | 94,1    | 95,4                   | 95,4    | 95,0    | 95,8                  | 96,2    | 95,8    |

Özellikle yüksek verimlilik sınıfına giren “IE3” sınıfındaki sistemler tercih edildiğinde verimlilik farklılıklarına göre en üst seviyede enerji kazanımı sağlanabilmektedir. Motor gücü arttıkça verimlilik değerleri de artmaktadır. Tablo değerlerine göre aynı sınıfta bir elektrik motor tercih edilecek ise kutuplama sayısının yüksek olmasına dikkat edilmelidir [195]. Buna göre;

$$Q_{\text{kazanım}} = (\eta_j - \eta_i) * P \quad (W) \quad (3.17)$$

Burada;

$P_1$  = motor gücü (0,75-375kW),

$\eta_i$  = standart verimlilik (1.IE1, 2.IE2, 3.IE3),

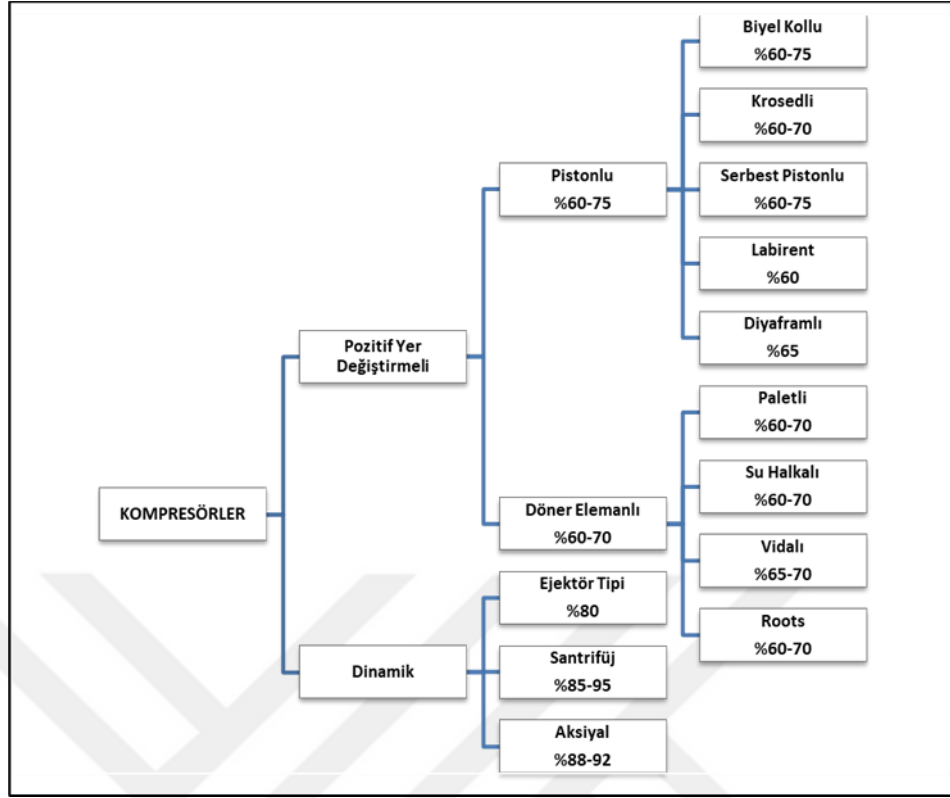
$\eta_j$  = yükseltilmiş verimlilik değeri (IE2 ya da IE3),  
 $i$  = mevcut kutup değeri (2kutup, 4kutup, 6kutup),  
 $j$  = yeni kutup değeri ( $j$  için verimlilik değeri  $>$   $i$  için verimlilik değeri).

### 3.3.2.2. Basınçlı Hava Sistemleri

Basınçlı hava sistemlerinin en önemli kısmını hava kompresörleri oluşturmaktadır. Sanayide kullanılan hava kompresörleri, yüksek verimlilik, dayanıklılık ve büyük hava hacmi üretme kapasitesine göre üretim aşamalarında tercih edilmektedir. Kompresörler, endüstriyel işletmelerde çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Kompresörler ve diğer yardımcı ekipmanların yıllık çalışma maliyeti sanayide toplam tüketilen elektrik tutarının yaklaşık %65'ini oluşturmaktadır [196]. Kompresöre alınan hava ortam basıncında hacimsel olarak küçültülerek uygun basınca getirilmektedir. Genellikle basınç/akış kontrolörleri, basınçlı hava tankları, kondensat tahliyeleri ve basınçlı hava dağıtım tesisatı, filtre, ayrıştırıcı, kurutucu gibi yardımcı ekipmanlar ile kullanılmaktadır [197].

Enerji kayıplarının en önemli sebebi kaçaklardır. Üretilen basınçlı havanın yaklaşık %20'si kaçaklar ve sızıntılar nedeniyle kaybolmaktadır. Bu miktar, bir üretim için büyük sayılabilecek bir kayıptır. Şebeke kaçaklarının azaltılması ve basıncın optimize edilmesi ile verim değeri %35'e kadar yükselmektedir [198].

Kompresör, amaca göre kullanılan gaz üzerindeki enerjiyi yükselterek, taşınımı kolaylaştırmaktadır. Son kullanım noktası, gazın etkin kullanılması için kayıp miktarına göre değerlendirilmelidir [199]. Kullanılan gazın basınç etkisine göre, kompresörler pozitif yer değiştirmeli ve dinamik olarak iki gruba ayrıştırılmaktadır. Kompresör tipleri Şekil 3.13'teki gibi sınıflandırılmıştır [200]



Şekil 3.13. Kompresör çeşitleri [200].

Kompresörler seçilirken, hacimsel debi ve basınç parametreleri dikkate alınmalıdır. Basıncın etkili olduğu her ekipman için sıcaklık etkisi de karşılaştırılmalıdır. Normal şartlarda çalışan bir kompresör için sıcaklık çok önemli olmayabilir; ancak sıcaklığın aşırı yüksek veya düşük olması durumunda gazın kimyasal ve fiziksel özellikleri farklılıklar gösterebilir. Bu durum kompresör verimini etkilemektedir. Çizelge 3.4’te kompresör çeşitleri incelendiğinde, farklı hacimsel debilerde ve basınç değerlerinde kompresör çalışma gücünün değiştiği görülmüştür. Uygun basınç, kapasite ve motor gücü verimlilik değerini %90’a kadar yükseltmektedir [201,202].

Çizelge 3.4. Kompresör türleri ve performans aralıkları [202].

| Kompresör tipi           | Basınç (Pa)                             | Kapasite (m <sup>3</sup> /s) | Motor gücü (kW) | Verimlilik (%) |
|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|
| Vidalı kompresör         | 7.5x10 <sup>5</sup> -13x10 <sup>5</sup> | 0,0063-0,633                 | 5,5-315         | 80-85          |
| Tek kademeli pistonlu    | 8x10 <sup>5</sup>                       | 0,0034-0,0276                | 1,1-7,5         | 80-85          |
| Çift kademeli pistonlu   | 12x10 <sup>5</sup>                      | 0,0034-0,0138                | 1,5-7,5         | 70-75          |
| Yüksek basınçlı pistonlu | 15x10 <sup>5</sup> -40x10 <sup>5</sup>  | 0,035-0,195                  | 7,5-30          | 70-75          |
| Turbo                    | 2x10 <sup>5</sup> -10x10 <sup>5</sup>   | 0,387-5,83                   | 125-1850        | 85-90          |

Farklı parametrelere göre kompresörlerin enerji kazanımları aşağıdaki Eşitliklerle hesaplanmaktadır [203]:

$$\dot{Q}_{\text{kompresör}} = P * \dot{V} \quad (W) \quad (3.18)$$

$$Q_{\text{kullanım1}} = \dot{Q}_{\text{kompresör}} * \text{Verimlilik} (\eta_1) \quad (3.19)$$

Verimli bir kompresör kullanıldığında,

$$Q_{\text{kullanım2}} = \dot{Q}_{\text{kompresör}} * \text{Verimlilik} (\eta_2) \quad (3.20)$$

$$Q_{\text{kazanım}} = Q_{\text{kullanım2}} - Q_{\text{kullanım1}} \quad (W) \quad (3.21)$$

yaklaşımı ile enerji kazanımı hesaplanmaktadır.

Basınçlı hava sistemlerinde kullanımı yaygın olan ekipmanlardan biri de endüstriyel pompalardır. Genel olarak pompa, akışkanı bir noktadan başka bir noktaya basınç farkı yaratarak, hareket ettiren mekanik bir cihazdır. Bir güç kaynağı tarafından çalıştırılarak, yaratılan yüksek basınç, bir rotor veya pistonun döndürülmesi ile hareket ettirilmektedir [204,205].

Pompalar, çalışma prensiplerine göre iki ana grupta toplanmıştır.

1. **Hacimsel Pompalar:** Hacimsel pompaların çalışma prensibi, pistonlar, dişliler, rotorlar veya pervaneler gibi hareketli parçaların birbirine göre, bir konumda dönmesi veya hareket etmesiyle gerçekleşmektedir. Pistonlu, dişli, paletli, vidalı, loplu, pervaneli pompalar bu gruba girmektedir.
2. **Rotodinamik Pompalar:** Rotodinamik pompalar, kinetik enerjiyi kullanarak akışkanı hareket ettiren pompalardır. Bu pompalar, akışkanın hareketine bağlı olarak, basınç enerjisini arttırmaktadır. Rotodinamik pompalar, santrifüj pompalar, karışık akımlı pompalar ve eksenel pompalar olmak üzere üç alt başlıkta incelenmektedir. Bu gruplandırmayı etkileyen en önemli unsur özgül



hız ve çark yapısıdır. Ekonomik olarak, en ucuz pompa tipi santrifüj pompalardır [206]. Çizelge 3.5'te rotodinamik pompa türleri ve performans aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.5. Rotodinamik pompa türleri ve performans aralıkları [206].

| Pompa Tipi                 | Debi aralığı (Q) m <sup>3</sup> /h | Basma yüksekliği (H) m | Güç aralığı kW |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|
| ANSI proses pompaları      | 2-1200                             | 15-225                 | 0.75-200       |
| API proses pompaları       | 2-2400                             | 15-2250                | 0.75-4000      |
| Eksenel akışlı pompalar    | 1000-50000                         | 3-15                   | 7.5-1500       |
| Hidrofor pompaları         | 1-2500                             | 20-2250                | 0.75-4000      |
| Salmastrasız pompalar      | 1-350                              | 5-150                  | 0.37-250       |
| Sirkülasyon pompaları      | 1-200                              | 5-60                   | 0.37-55        |
| Cryogenic likid pompalar   | 1-250                              | 5-350                  | 0.37-400       |
| Uçtan emişli pompalar      | 1-2000                             | 5-250                  | 0.37-250       |
| Yangın pompaları           | 1-1500                             | 30-400                 | 10-600         |
| Yatay split pompalar       | 20-2500                            | 15-500                 | 2-4000         |
| Manyetik tahrikli pompalar | 1-1000                             | 5-300                  | 0.37-300       |
| Kademeli pompalar          | 1-2500                             | 30-2500                | 0.75-4000      |
| Çamur pompaları            | 1-7000                             | 10-100                 | 0.75-1500      |
| Kendinden emişli pompalar  | 1-1500                             | 3-120                  | 0.75-150       |
| Dalgıç pompalar            | 1-1750                             | 3-80                   | 0.75-200       |
| Düşey milli pompalar       | 1-1750                             | 3-80                   | 0.75-200       |
| Dik türbin pompalar        | 10-35000                           | 5-600                  | 1-4000         |

Verim ve enerji kaybı karşılaştırıldığında, düşük enerji kullanarak, aynı işi yapabilecek verimli pompalar seçilmelidir. Çizelge 3.5'te görüldüğü gibi farklı uygulamalar ile farklı güç kazanımları mümkündür. Debi aralığı ve yük basma yüksekliği pompa için en önemli iki parametredir. Minimum ve maksimum yüksekliklere göre debi aralığı ya da basma yüksekliği birim değeri alınarak güç değerleri hesaplanmaktadır. İnterpolasyon yapılarak mevcut pompa tipine ve istenilen güce göre, farklı işlemler için istenilen yapıda pompa seçimleri yapılabilmektedir [207]. Enerji verimliliği çalışmalarında en kolay yapısal işlemlerden bir tanesi pompa değişimi ve seçimidir [208].

Yük basma yüksekliğine (H) göre en verimli pompa ile sağlanabilecek kazanım miktarı, kullanılan enerji miktarı ile doğru orantılıdır. H değerine göre en yüksek verimli olan pompa seçilmeli ve diğer pompa çeşitlerine göre kıyaslaması

yapılmalıdır. Eşitlik 3.22'yi kullanarak tüm karşılaştırmalar yapılabilir ve hesaplamalar ile kazanım miktarları tahmin edilebilir.

$$Q_{\text{kazanım}} = Q_{\text{diğer pompa}} - Q_{\text{düşük verimli pompa}} (W) \quad (3.22)$$

Hesaplamalar için, Çizelge 3.4 verilen bilgiler ile, kazanım değerleri karşılaştırılarak, genel enerji verimliliği denklilikleri ile gerekli olan pompa yük miktarı hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.23).

Genel enerji denkliliğine göre;

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pompa}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{türbin}} + h_l \quad (3.23)$$

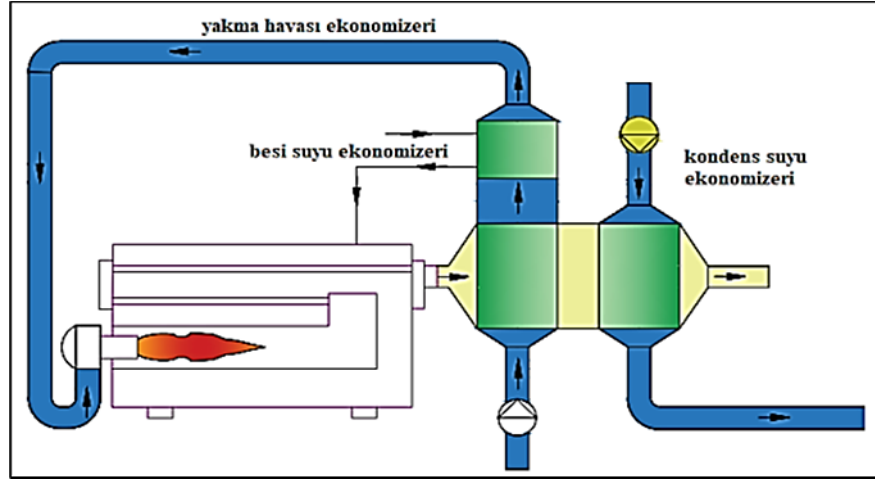
### 3.3.3. Diğer Enerji Kazanım Noktaları

Prosesler ve kullanılan ekipmanlar dışında, önemli bir enerji kazanım noktası da, sistemlerdeki kayıp enerjileri, ısı değiştirici sistemler ile enerjinin geri kazanılmasıdır. Kazanılan enerji çok farklı noktalarda kullanılabilir. Ön ısıtıcıların enerjisi genellikle ısı değiştiriciler ile sağlanmaktadır. Ekonomizer kullanımı, reküperatif ve rejeneratif ısı değiştiricisi olarak iki gruba ayrılmaktadır [209,210].

Isı değiştiriciler, endüstriyel fabrikalarda atık ısının geri kazanılması için en iyi tekniklerden bir tanesidir. Isı değiştiriciler sistemdeki verimi arttırarak, maliyet değerlerini yaklaşık %30'a kadar yükseltebilmektedir. Atık ısı kullanarak yapılacak endüstriyel ısı değiştiricisi tasarımlarının, temel parametreleri şu şekilde sıralanabilir [211]:

1. Isı transfer kapasitesi,
2. Atık ısı akışkan sıcaklığı,
3. Atık ısı akışkanı için tolere edilen en düşük sıcaklık,
4. Atık ısı akışkanın hacimsel debisi,
5. Isıtılan akışkanın son sıcaklığı,





Şekil 3.15. Ekonomizer ısı kazanımı şematik gösterimi.

Optimal yük kapasitesinin üzerinde veya kazan yapısı gibi sebeplerle düşük verimi olan kazanlar, sisteme ekonomizer eklenmesi ile kazan kapasitesi ve verimini arttırmaktadır. Genel olarak ekonomizerler dört çeşit olarak sınıflandırılmaktadır [215]:

1. **Düz veya Firkete Borulu Ekonomizerler:** Kömür, linyit, vb. yakıtların yakılması ile oluşan, kirli duman gazlarından ısı geri kazanılması işlemi için, yapısal olarak adlandırılan bir yöntemdir. Düşük basınçlarda düz borulu, yüksek basınçlarda ise firkete (u) borulu ve dayanıklı yapı seçilmektedir.
2. **Kanatlı Borulu Ekonomizerler:** Doğal gaz, LPG, vb. yakıtların yakılması sonucunda oluşan dumanlardan enerji geri kazanılması için kullanılan cihazlardır. Bu sistemin en önemli özelliği yapısal boruların kanatlı şekilde olmasıdır. Kanat veya kanatçıklar, boru yüzeyinin artırılması ve daha fazla ısı transfer edilmesine yardımcı olmaktadır. Kanatlar genellikle boru yüzeyine kaynak veya rulo şeklinde monte edilmektedir [216]. Bu tip sistemler, yüksek enerji geri kazanımı anlamına gelmektedir. Mekanik olarak dayanıklı bir ekipmandır. Kanat seçimi yapılırken, kanatlı ve kanatsız halde elde edilen ısı transfer oranının test edilmesi gerekli bir adımdır. Kanatçıkların sağladığı fayda oransal olarak kanat etkenliği değeri ile ifade edilmektedir. Bu değer ikiden büyük olmalıdır [150]. Kanat etkenliği Eşitlik 3.24 ile hesaplanmaktadır:

$$E_k = \frac{Q_k}{KA_{tk}\Delta T_t} \quad (3.24)$$

Burada;

$E_k$ = Kanat etkenliği,

$Q_k$ = Kanatlı halde ısı transferi,

$K$  = Isı iletim katsayısı,

$A_{tk}$ = Kanat taban alanı,

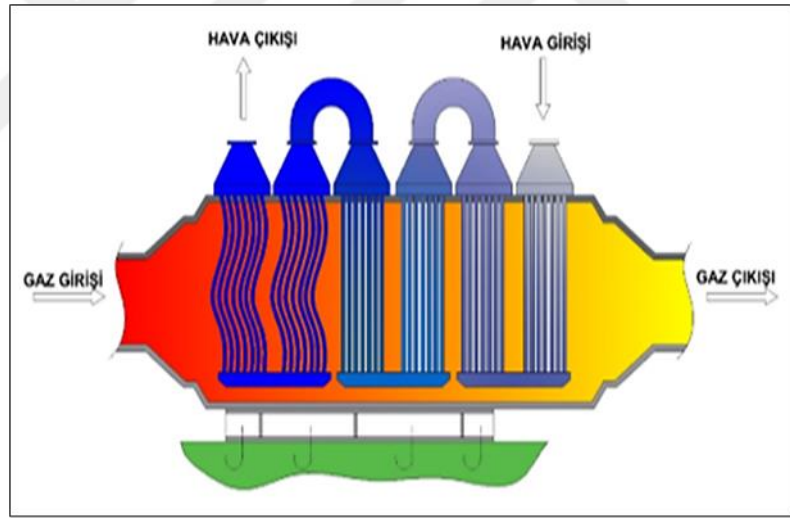
$\Delta T_t$ = Kanat taban sıcaklığıdır.

**3. Helezon ve Spiral Borulu Ekonomizerler:** Helezon ve spiral borulu ekonomizerlerin özelliği, yapıda kullanılan boruların, helezonik veya spiral şekilde olmasıdır. Bu tasarım, borular arasındaki mesafenin daralmasına ve boru yüzeyinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede, daha fazla ısı transfer edilmektedir. Spiral borulu ekonomizerler, diğer ekonomizlere göre daha yüksek sıcaklık farklarında uyumlu çalışabilmektedir. Ayrıca, spiral borular daha sıkı sarılması sebebiyle, yüksek mekanik dayanıklılığına sahiptirler [217]. Helezonik ve spiral borulu ekonomizerler, yüksek enerji geri kazanımı sağlamak için tasarlanmıştır. En büyük avantajları ısının transfer edildiği boru yüzeylerinin diğer ekonomizlere göre daha büyük olmasıdır. İyi bir ısı transferi, yüksek enerji verimliliği ve düşük enerji maliyeti anlamı taşımaktadır. İşlemede kanal, baca arası veya baca içlerine yerleştirilmektedir [218].

**4. Duman Borulu Ekonomizerler:** Duman borulu ekonomizerler, bir dizi boru içeren ısı değiştiricilerdir. Borular, kazanın yanma odasında oluşan egzoz gazlarından geçerken, boru duvarlarını ısıtır. Bu şekilde borulardaki dış yüzey sıcaklığı artarken, boruların içinde taşınan akışkan suyun sıcaklığı artar ve kaynamış akışkandaki kazanılmış enerji, üretim işlemlerinin farklı noktalarında kullanılmaktadır. Bu sistem enerji tasarrufu sağlayarak egzoz gazının atmosfere salınmasını azaltmada etkili bir yöntemdir.

### 3.3.3.3. Reküperatif ve Rejeneratif Isı Değiştiriciler

Reküperatif ısı değiştiricileri, proses akışkanından çıkan sıcak gaz enerjisinin, proses akışkanının soğuk tarafına kazandırılması için kullanılmaktadır. Fırından çıkan sıcak havanın, fırına girmeden önce soğuk havayı ısıtmak için kullanılabileceği bir sistemdir [219]. Reküperatörler, dış havayı (soğuk), iç hava (sıcak) ile temas ettirerek, ısı geri kazanımı yapmaktadırlar. Dış havayı iç kısma taşıyan ve iç havayı eksoz (hava çıkışı) ile dışa atan, iki ayrı kanal içermektedir (Şekil 3.16). Kanalların içine yerleştirilen ısı değiştiriciler, iç sıcak havanın enerjisini dış soğuk havaya aktarmaktadır. Havanın ısıtılması veya soğutulması için az enerjiyi bu yöntemle kullanmaktadır [220]. Bir çalışmada kazan ön yakma havasının ısıtılması ve sıcak su temini için reküperatör kullanılarak enerji verimi %92'den %99'a yükseltilmiştir, sonucunda 5 Nm<sup>3</sup>/h yakıt tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır [221].



Şekil 3.16. Reküperatör çalışma prensibi.

Rejeneratif ısı değiştiricileri, proses akışkanının, önce sıcak ve sonrasında soğuk tarafına temas ederek, ısıyı transfer eden bir dizi ısı değiştirici elemanından oluşmaktadır. Sistem, sıcak proses akışkanının enerjisini, soğuk proses akışkana kazandıran bir yöntemdir [222].

Rejeneratörlerin en büyük avantajı üretim süreçlerindeki, yüksek sıcaklıkta çalışan proseslerde kullanılabilmesidir. Endüstriyel fırınlar, ocaklar ve kazanlar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [223].

### **3.4. YAKITLAR VE EMİSYON HESAPLAMALARI**

#### **3.4.1. Yakıtlar**

Yakma işlemi, yakıtın türüne bağlı olarak, her bir ayrı yakıt için, elde edilen ısı enerjisi miktar ile tanımlanmaktadır [224]. Yakma işlemi için ihtiyaç duyulan hava oranı, kullanılan yakıt türünün kimyasal yapısına bağlıdır. Katı yakıtlar için bu miktar her zaman daha fazladır. Yanma verimini, minimum hava-yakıt oranı ile doğru orantılıdır. Sabit bir kazanın, ısı çıkış oranı ile, yanma veriminde %1'lik bir artış, aynı oranda %1'lik bir yakıt tasarrufu anlamı taşımaktadır [192].

Yanma işleminde, hava fazlalık miktarı yüksek olursa, baca gazı miktarı artmaktadır. Hava, baca gazı sıcaklığı kadar ısınarak, enerjiyi absorbe edip, bacadan atılmasına sebep olacaktır [225]. Yakma işleminde, bu yüzden yakıt seçimi, fazla havaya ihtiyacın azaltılması ve sonucunda enerji verimliliğinin artırılması için iyi bir seçenek olarak görülse de enerji verimliliği çalışmalarında yakıt başlığı çoğu zaman göz ardı edilmektedir [226]. En genel yaklaşımla, yakıtın ısı değeri yüksek olması, yakma işleminin daha verimli olmasını sağlayacaktır [227].

Yakıt karakteristiklerinin farklı olması, kimyasal olarak farklı karbon ve hidrojen oranları bulundurmaları, yakıtın verimli veya verimsiz yanma işlemi sonucuna göre, kalori değerine bağlı olarak, emisyondaki nem miktarı, kül ve kurum miktarını da değiştirmektedir [228]. Üretimde elektrik, doğalgaz, LPG, linyit, fuel-oil, motorin, tüpgaz başta olmak üzere, kabuk, lastik, hayvansal atıklar, plastik gibi farklı maddelerinde kullanıldığı görülebilmektedir [229]. Kullanılan yakıtın türü, yakıtın ısı değeri (HV), karbon miktarı ve yanma verimi, enerji tasarruf miktarını belirlemektedir [230,231].

Yakıtların ısııl değeri, yakıtın birim miktara göre enerji miktarını ifade etmektedir. Enerji, yakıtın yanması ile kilojoule (kJ) veya megajoule (MJ) birimlerin bir enerjiyi serbest bırakır. Yüksek ısııl değere sahip yakıtlar, fazla enerji açığa çıkarır ve az miktarda kullanımı ile istenilen enerji miktarı temin edilebilmektedir [232,233].

Yakıtların karşılaştırılması, TEP (ton eşdeğer petrol) değerine göre yapılmaktadır. Yakıtlar üst veya alt ısııl değerlerine göre sınıflandırılırlar. Ek A'da verilen çizelge ile tüm yakıtlar için ısııl değerler ayrıntılı bir şekilde listelenmiştir [234]. Kullanılan farklı yakıtlar için, enerji maliyeti Eşitlik 3.25 ile bulunabilmektedir. Yakıt türlerindeki birim fiyatlar bölgesel farklılık göstermesine rağmen fayda-maliyet analizleri için kullanılan bu denklik ile en uygun yakıt tipine, üretim sürecinde karar verilebilmektedir. Çevre unsurları karşılaştırıldığında en temiz yakıt doğal gaz ve LPG'dir. Ancak bölge şartları ve ucuz yakıt temini, üretim süreçlerinde çok farklı yakıt tiplerinin sanayide kullanmasına zemin hazırlamaktadır [235].

$$\text{Birim Enerji Maliyeti (BEM)} = \frac{\text{Birim Fiyat}}{\text{HV} \times \eta_{\text{kazan}}} \quad (3.25)$$

Çizelge 3.6. Bazı yakıtların net kalorifik değerleri ve verimlilik yüzdeleri [234].

| Yakıt Tipi                           | Net kalorifik değer<br>(Kcal/kg) | Alt ısııl değer | Üst ısııl değer | Ortalama verim (%) |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Kömür                                | 10109,94                         | 9584,13         | 10707,45        | 65                 |
| Linyit                               | 2844,16                          | 1314,53         | 5162,52         | 60                 |
| Fuel-Oil                             | 9655,83                          | 9512,42         | 9966,53         | 82                 |
| Motorin                              | 10587,95                         | 10157,74        | 10707,45        | 86                 |
| Doğalgaz                             | 11472,27                         | 11113,76        | 12045,88        | 92                 |
| Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) | 11304,97                         | 10707,45        | 12476,09        | 92                 |
| Elektrik                             | 860 kWh                          |                 |                 | 99                 |

$Q_{\text{kazanım}}$  yakıt verimliliklerine bağlıdır.

$$\eta_{\text{fark}} = \eta_{\text{yakıt 1}} - \eta_{\text{yakıt 2}} \quad (\%) \quad (3.26)$$

Burada;

$\eta_{\text{yakıt 1}}$  = doğalgaz, LPG, elektrik için verimlilik



$\eta_{\text{yakıt } 2}$  = motorin, fuel-oil, linyit ve kömür için verimlilik

Calori hesabı;

$$Q_{\text{fark}} = Q_{\text{cal,yakıt1}} - Q_{\text{cal,yakıt2}} \quad (3.27)$$

$$Q_{\text{kazanım}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{gün}} \right) = Q_{\text{fark}} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) * \eta_{\text{fark}}(\%) * \text{Kullanılan yakıt miktarı} \left( \frac{\text{kg}}{\text{gün}} \right) * \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \quad (3.28)$$

### 3.4.2. Emisyon Hesaplamaları

Enerji verimliliğinin en önemli kazanımlarından biri de atmosfere salınan emisyonların azaltımıdır. IPCC - T1 yöntemi en basit emisyon hesaplama yöntemi olarak, enerji verimliliğinden sağlanan tasarruf miktarına göre, direk CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonlarının azaltım miktarını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Yöntem ile, yakıt tüketiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> harici direk emisyon rakamları hesaplanmaktadır. Farklı yakıt tiplerine göre emisyon miktarları, çevresel açıdan yakıt kullanım tercihlerini, bilinçli ve eko-üretim yapan sanayi için değiştirebilmektedir. CO<sub>2</sub> emisyonu için yakıt kullanımından kaynaklı genel formül Eşitlik 3.29'da olarak verilmiştir [236].

$$\text{CO}_2 \text{ emisyonu} = \sum (U_n + I_n + H I_n \pm SC) \times EF \times CF \times E \times C - \text{CO}_2 \quad (3.29)$$

Burada;

$U_n$  =Yakıt tüketim miktarı,

$I_n$  =İthal edilen yakıt tüketim miktarı,

$H I_n$  =İhraç edilen yakıt tüketim miktarı,

$SC$  =Stok değişimleri,

$CF$  =Çevirme katsayıları,

$n$  =Yakıt tipleri,

$EF$  =Emisyon faktörleri,

$E$  =Verimlilik değeri (katı yakıt için %95 ve gaz yakıtlar için %99),

$C\text{-CO}_2$ =Karbon-karbondioksit dönüşümü.

Benzer şekilde CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ve diğer inderek gazlar içinde emisyon hesaplamaları Eşitlik 3.30 kullanılmıştır [236,237].

$$\text{CO}_2 \text{ dışı emisyonlar} = \sum (U_n + I_n - H_{I_n} - IB \pm SC) \times EF \times CF \quad (3.30)$$

IPCC Yöntemine göre, enerji birimleri, Net Kalorifik Değerler (NCV)'dir. Çizelge 3.7 ve 3.8'de seçilen bazı yakıtlar için direk sera gazı emisyon faktörleri, verimlilik değerleri, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O için verilmiştir [237].

Çizelge 3.7. CO<sub>2</sub> Emisyon faktörleri [236,237].

| Yakıt Tipleri          | CO <sub>2</sub><br>Emisyon faktörleri<br>(tC/TJ) | Verimlilik<br>değerleri | C-CO <sub>2</sub> |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Kömür                  | 25,8                                             | 0,980                   | 3,6667            |
| Linyit                 | 27,6                                             | 0,980                   | 3,6667            |
| Asfaltit               | 25,8                                             | 0,980                   | 3,6667            |
| İkincil Kömür ürünleri | 25,8                                             | 0,980                   | 3,6667            |
| Fuel-Oil               | 21,1                                             | 0,990                   | 3,6667            |
| Motorin                | 20,2                                             | 0,990                   | 3,6667            |
| Doğalgaz               | 15,3                                             | 0,995                   | 3,6667            |

Çizelge 3.8. CO<sub>2</sub> harici direk sera gazları için emisyon faktörleri [236,237].

#### CH<sub>4</sub> Faktörleri

| Yakıt Tipleri          | Elektrik Üretimi<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Sanayi Kullanımı<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Diğer<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Ulaştırma<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) |
|------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Kömür                  | 1                                                 | 10                                                | 300                                    | 10                                         |
| Linyit                 | 1                                                 | 10                                                | 300                                    | 10                                         |
| Asfaltit               | 1                                                 | 10                                                | 300                                    | 10                                         |
| İkincil Kömür ürünleri | 1                                                 | 10                                                | 300                                    | 10                                         |
| Doğalgaz               | 1                                                 | 5                                                 | 5                                      | 50                                         |

#### N<sub>2</sub>O Faktörleri

| Yakıt Tipleri          | Elektrik Üretimi<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Sanayi Kullanımı<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Diğer<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) | Ulaştırma<br>Emisyon faktörleri<br>(Kg/TJ) |
|------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Kömür                  | 1,4                                               | 1,4                                               | 1,4                                    | 1,4                                        |
| Linyit                 | 1,4                                               | 1,4                                               | 1,4                                    | 1,4                                        |
| Asfaltit               | 1,4                                               | 1,4                                               | 1,4                                    | 1,4                                        |
| İkincil Kömür ürünleri | 1,4                                               | 1,4                                               | 1,4                                    | 1,4                                        |
| Doğalgaz               | 0,1                                               | 0,1                                               | 0,1                                    | 0,1                                        |

### 3.5. DİĞER UYGULAMALAR

Sanayide enerji verimliliği için yapılabilecek diğer çalışmalar, yalıtım ve aydınlatma işlemleridir. Doğru yalıtım malzemelerinin kullanımı ile ısı kayıpları azaltılmaktadır ve verimli aydınlatma sistemleri ile enerji tüketimi optimize edilmektedir.

#### 3.5.1. Yalıtım

Isı, farklı sıcaklıklara sahip ortamlar arasında yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru transfer olan bir enerji türüdür. Geçiş sırasında, ortamdaki malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları, iletim kalınlık değeri, taşınım katsayıları ve diğer dış etmenler nedeniyle farklı ısı transferleri gerçekleşebilir. Bu yüzden, yalıtım, ısı transferini azaltan bir direnç sağlamaktadır [238]. Isı transferi enerji verimliliği açısından büyük öneme sahiptir [239].

Isı yalıtımı, dağıtım hatları ve şebekelerde ısı kaybını azaltmak ve enerji tasarrufu sağlamak için kullanılmaktadır. Yüksek performans ve verimlilik elde etmek için uygun malzeme kalınlığındaki yalıtım malzemesi kullanmak gerekmektedir [240]. Farklı kriterler akışkan özelliklerine göre, farklı sıcaklıktaki akışkan taşınım hatlarında, dış parametrelere, çevre ve yüzey sıcaklıklarını da bağlı olarak çok farklı sonuçlar verebilmektedir. Tesisatın akışkan sıcaklık durumuna göre kullanılan yalıtım malzemeleri aşağıdaki gibidir [150]:

1. **Yüksek sıcaklıktaki hatlar:** Akışkan sıcaklığı +100 °C' den daha yüksek olan hatlardır. Yüksek sıcaklığa dayanımından dolayı, camyünü ve taş yünü kullanılmaktadır.
2. **Ilık sıcaklıktaki hatlar:** Akışkan sıcaklığı +10 °C ile +100 °C arasındaki hatlardır. Tüm yalıtım malzemeleri kullanılabilirken genellikle polietilen köpük veya kauçuk köpüğü diğerlerine göre tercih edilmektedir.
3. **Soğuk sıcaklıktaki hatlar:** Akışkan sıcaklığı +10 °C' den daha düşük olup, akışkan sıcaklığı çoğunlukla eksi derecede taşınan hatlardır. Difüzyonuna

gösterdiği yüksek direnç sebebiyle elastomerik kauçuk köpüğü bu tip taşınım için en iyi malzemedir.

Yakma sistemlerinde yüzey ısısı, istenilen yüzey sıcaklığına kanatçık kullanarak ve yalıtım malzemesi ile düşürülebilmektedir. Yalıtım enerjiden büyük tasarruf sağlarken, kanatçık dışarıya çok yoğun ısıyı iletebilmektedir [241]. Enerji tasarrufu sağlamak için, optimum yalıtım kalınlığı, kullanılacak her farklı bölüm için ayrı değerlendirilmelidir. Yüzeylerdeki ısı kaybının minimum düzeyde tutulması için, verimli yalıtım oranları, ısı üretim ve tüketim değerleri incelenerek tespit edilmelidir [242]. Yalıtım malzemesi zamanla deforme olabilmektedir., Bu tip zarar görmüş kısımlar infrared görüntü cihazları kullanarak, “**tahrip noktaları**” tespit edilmelidir. Gerekli kontroller ve testler sonucunda, bakım ve onarım çalışmaları verimin arttırılması için gerekli bir çözüm tekniğidir.

Çizelge 3.9. Seçilmiş yalıtım malzemeleri için termal iletkenlik değerleri.

| Malzeme Çeşidi                          | Termal İletkenlik (W/mK) |
|-----------------------------------------|--------------------------|
| Taş Yünü                                | 0,036                    |
| Cam Yünü                                | 0,04                     |
| Poliüretan                              | 0,02                     |
| Extrüde Polistren Isı Yalıtım Levhaları | 0,038                    |
| Ekspande Polistiren (EPS)               | 0,03                     |
| Extrude Polistiren (XPS)                | 0,029                    |
| Sprey Polistiren Köpüğü (SPF)           | 0,022                    |
| Grafit EPS                              | 0,031                    |
| Mineral Yün Levha                       | 0,035                    |
| Gaz Beton Duvar                         | 0,16                     |
| Yatay Delikli Tuğla Duvar               | 0,33                     |
| Donatili Beton                          | 2,2                      |
| Ahşap                                   | 0,2                      |
| Tuğla                                   | 0,45                     |
| Alçı (iç)                               | 0,25                     |
| Alçı (dış)                              | 0,3                      |
| Mika                                    | 0,83                     |

Çizelge 3.10. Seçilmiş akışkanlar için taşınım sabiti değerleri.

| Ortam             | Isı taşınım sabiti (W/m <sup>2</sup> K) |
|-------------------|-----------------------------------------|
| Açık hava         | 5-30                                    |
| Su                | 30-300                                  |
| Yağ               | 30-100                                  |
| Kaynayan su       | 2000-20000                              |
| Yoğuşan su buharı | 3000-30000                              |

$$R_{iletim} = \frac{k \cdot L}{A} \quad (3.31)$$

burada;

A= Yüzey alanı (m<sup>2</sup>),

L = Kalınlık (m),

k = Termal iletkenlik sabiti (W/m<sup>2</sup>K).

$$R_{taşınım} = \frac{h}{A} \quad (3.32)$$

Öyleki;

A= Yüzey alanı (m<sup>2</sup>),

h = Konveksiyon (taşınım) sabiti (W/m<sup>2</sup>K).

Direnç değerlerine göre ve malzeme çeşitlerine göre genel enerji kazanım miktarı aşağıda kullanılan Eşitlikler (3.33, 3.34, 3.35) ile hesaplanmaktadır [243]:

Bina için;

$$R_{iletim,yapı} + R_{iletim,kaplama} + R_{taşınım} = R_{toplam,yalıtım} \quad (3.33)$$

$$R_{iletim,yapı} + R_{taşınım} = R_{toplam,yalıtımsız} \quad (3.34)$$

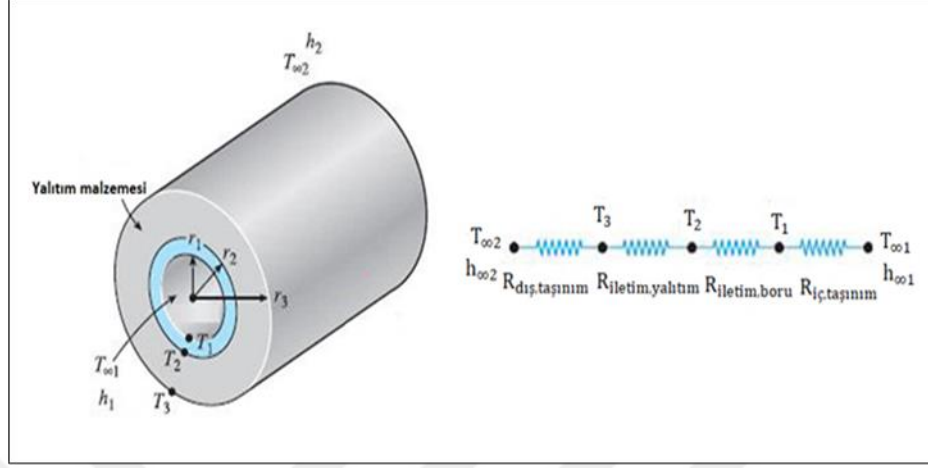
T<sub>1</sub>= İç mekan sıcaklığı (°C)

T<sub>2</sub>= Dış mekan sıcaklığı (°C)

$$Q_{kazanım} = \frac{\Delta T}{R_{toplam,yalıtımsız}} - \frac{\Delta T}{R_{toplam,yalıtımlı}} \quad (3.35)$$

Borular için yalıtım amacı ile izolasyon eklenmesi, ısı transfer hızını etkilemektedir. Kaplama malzemesi, kalınlığı ve termal iletkenlik değerleri borular için önemli parametrelerdir. Şekil 3.17’de gösterildiği gibi örnek bir yalıtılmış boru için, kesit

şeması verilmiş olup, ısı iletimi için aşağıda verilen Eşitlikler (3.36 ile 3.46 arası) ile hesaplanmaktadır [244].



Şekil 3.17. Yalıtılmış boru ile ısı iletimi.

$T_1, T_2, T_3$  = Eksenlerdeki sıcaklık değerleri,

$r_1$  = İç çap (boru),

$r_2$  = Dış çap (boru),

$r_2$  = Aynı zamanda kaplama malzemesi iç çapı,

$r_3$  = Kaplama malzemesi dış çapı,

$h$  = Isı transfer katsayısı (boru içinde taşınan akışkana göre değişebilir),

$h_{\infty 1}$  = İç taşıyımındaki akışkan için taşıyım sabiti ( $W/m^2 K$ ),

$h_{\infty 2}$  = Dış cephe hava için taşıyım sabiti ( $W/m^2 K$ ).

$$Q_{\text{taşıyım,boru iç}} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{\text{taşıyım,silindir}}} \quad (W) \quad \Rightarrow \quad R_{\text{taşıyım,silindir}} = \frac{1}{h_{\infty 1} - A_{iç}} \quad (3.36)$$

$$A_{iç} = 2\pi r_1 L \quad (m^2),$$

$$L = \text{Boru uzunluğu (m)}.$$

$$Q_{\text{iletim,boru}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{iletim,silindir}}} \quad (W) \quad \Rightarrow \quad R_{\text{iletim,silindir}} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k_b} \quad (3.37)$$

$k_b$  = Boru için termal iletkenlik değeridir. ( $W/mK$ )

(Boru malzemesi; beton, demir, çelik, alüminyum, plastik, PVC vb.)

$$Q_{\text{iletim,yalıtım}} = \frac{T_2 - T_1}{R_{\text{iletim,yalıtım silindir}}} \quad (W) \Rightarrow R_{\text{iletim,silindir}} = \frac{r_3 - r_2}{4\pi r_2 r_3 k_y} \quad (3.38)$$

$k_y$  = Yalıtım malzemesi için termal iletkenlik değeridir. Birimi (W/mK) şeklindedir.

(Yalıtım malzemesi olarak yün, cam elyaf, alüminyum, fiberglas vb. kullanılabilir.)

$$r_c = \frac{k_y}{h_{\infty 2}} \Rightarrow r_3 \text{ maksimum } r_c \text{ kadar olabilir, daha fazla olamaz.} \quad (3.39)$$

$r_c$  = Kritik izolasyon yarıçapı.

$$Q_{\text{taşınım,dış çeper}} = \frac{T_3 - T_{\infty 2}}{R_{\text{taşınım,dış}}} \quad (W) \Rightarrow R_{\text{taşınım,dış}} = \frac{1}{h_{\infty 2} A_{dış}} \quad (3.40)$$

$$A_{dış} = 2\pi r_3 L \quad (3.41)$$

Öyle ki;

$$Q \text{ (W)} = Q_{\text{taşınım,boru iç}} + Q_{\text{iletim,boru}} + Q_{\text{iletim,yalıtım}} + Q_{\text{taşınım,dış çeper}} \quad (3.42)$$

Buradan toplam direnç;

$$R_{\text{toplam}} = \frac{1}{h_{\infty 1} A_{iç}} + \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k_b} + \frac{r_3 - r_2}{4\pi r_2 r_3 k_y} + \frac{1}{h_{\infty 2} A_{dış}} \quad (3.43)$$

$$Q \text{ (ısı transferi)} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{toplam}}} \quad (W) \quad (3.44)$$

$Q$  yalıtım malzemesi kullanarak ve  $Q$  yalıtım malzemesi kullanmaksızın hesaplanmaktadır:

$$Q_{\text{kazanım}} = Q_{\text{yalıtımsız}} - Q_{\text{yalıtlı}} \quad (3.45)$$

### 3.5.2. Aydınlatma

Enerji tüketen tüm sektörlerde, üretim, kalite ve işletme performansını düşürmeden enerji tasarruf ve verimlilik sağlamak, kurum ve kuruluşların temel hedefidir. Aydınlatma, sanayi sektöründe, enerji verimliliği sağlayacak önemli bir noktadır. Yapılan birçok çalışma, aydınlatma için kullanılan elektrik enerjisinin, sanayi ülkelerinde %5-15, gelişmekte olan ülkelerde %86 ve dünya genelinde ise %19 tasarruf sağlayabileceği hesaplanmıştır [245]. Bu durum 2020 yılı için ülkemizde, tüketilen toplam elektrik enerjisi içinde, aydınlatmanın payının %20 oranında olduğunu göstermiştir [246]. Sektörlere göre enerji dağılımı incelendiğinde ise bu değer %47 oranında enerji tüketiminin sanayi sektöründe olduğu göstermiştir. Bu nedenle, sanayi enerji tüketim oranları karşılaştırıldığında, aydınlatma amacıyla kullanılan tasarruflu ve az enerji tüketimi olan lambaların tercih edildiği söylenebilmektedir [247]. Enerji verimli lambalar kullanarak verimli bir aydınlatma sağlarken, aydınlatma için harcanan tüketim maliyetleri de azalmaktadır [248].

Kullanılacak kaynakların, etkinlik değeri yüksek ve uzun ömürlü olmalıdır. Endüstriyel tesislerde kirlenmenin, fazla olduğu düşünülerek, tavan ve duvardan yansıyan ışığın düşük olması sebebiyle kullanılacak armatürlerin, ışık dağılımlı olanları tercih edilmelidir [249]. Bu tip armatürler, ortamda olası kir, toz, nem ve patlayıcı gazlar gibi kirleticilere karşı korunmalı, elle temas edilebilecek mesafelerde olan armatürler ise izole edilmelidir [250].

Kullanılan armatür çeşitleri, elektrik enerjisini verimli kullanmalıdır. Armatürlerdeki lümen miktarının, harcanan elektrik gücüne oranına “*armatür verimi*” olarak adlandırılmaktadır. Lamba ömrü veya kullanım süresi içinde, nem, ortam sıcaklığı, toz, açma kapama sıklığı, kullanım süresi gibi parametreler lambanın ekonomik olarak birim fiyatını değiştirmektedir [251,252].

Teknolojik gelişim, alanda yapılan inovatif çalışmalar ile hem daha uzun ömürlü hem de daha verimli lambalar üretilebilmiştir [253]. Bir armatürün verimliliği, ışığın çıkış gücünün, giriş gücüne oranı ile tanımlanır. Watt başına lümen olarak ölçülür (lm/W). Verimlilik miktarı ne kadar yüksek olursa, ışık vermek için harcanan enerjide aynı



oranda düşük olacaktır. Lümen değeri yüksek ise, ışık daha parlak görünecektir. 1 lümen = 0,00146 Watt'tır [254].

Çok farklı alanlarda kullanılan aydınlatma sistemleri, akkor, floresan ve led aydınlatma olarak üç farklı başlık altında gruplandırılmıştır.

#### **3.5.2.1. Akkor Lamba**

Akkor telli ampuller görünür ışık enerjisinden daha çok ısı enerjisi yayan, düşük verimli ampullerdir. Akkor flamanlı ampullerin aydınlatma gücünün düşüklüğü nedeniyle aydınlatılacak alan ancak küçükse ve yapay olarak doğala yakın bir aydınlatmaya ihtiyaç varsa ise akkor ampuller kullanılmalıdır [255].

Akkor lambalarda tungsten telden geçen elektrik akımı, telin hızlı ve yüksek sıcaklıkta ısınmasını sağlayarak, akkor hale dönüştürmektedir. Telin ısınması, ışımayı başlatmaktadır [256]. Bulunduğu ortamı ısıtan bu tip lambalar, özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu günlerde, kullanılan ortamları soğutmak için fazla enerji harcanmasına neden olmaktadır. Filament sıcaklığı arttıkça etkinlik değeri artmaktadır; bu durum lamba ömrünü azaltmakta ve lambanın ömrünü düşürmektedir [257]. Akkor filamentli lambalar, kısa süreli ve genel amaçlı yerlerde kullanılabilir; ancak verimsiz bir lamba olduğu unutulmamalıdır [258].

#### **3.5.2.2. Floresan Lamba**

Floresan lambalar daha ekonomik ve daha uzun ömürlü lambalardır. Floresan lambaların ışık akısının yoğunluğuna rağmen, fazla ısınmaması, ışık dağılımının düzenli olması ve az enerji tüketmesi nedeniyle, akkor filamentli lambalara göre tercih edilmektedir. Floresan lambalar, geleneksel aydınlatmalara göre daha çok ışık üretirken, daha verimlidir [259]. Tüp floresan lambalar, sürekli veya kesintili aydınlatma için kullanıldığı gibi, genel amaçlar içinde tercih edilmektedir [260].

### 3.5.2.3. LED Lamba

Innovatif aydınlatma teknolojisinin ürettiği önemli bir aydınlatma tipi LED aydınlatmadır. Düşük güç tüketimi, uzun süre sorunsuz çalışması, daha dayanıklı ve çevre dostu olması sebebiyle LED (Light Emitting Diode) aydınlatma sistemleri en iyi aydınlatma yöntemidir.

Hızla gelişmekte olan LED'ler yüksek verimlilikleri, kolay kontrol edilebilmeleri, her türlü sisteme basitçe entegre yapılmaları aydınlatma gereksinimlerinin en iyi çözüm olmalarını sağlamıştır [261]. LED'ler, enerji verimliliği, uzun ömürleri, düşük güç tüketimi ve çeşitli renk seçenekleri gibi birçok avantajları sebebiyle geniş bir alanda kullanılmaktadır [262]. Floresan lambalar gibi ultraviyole ve infrared ışını yaymazlar ve yaydıkları ışık kararlı bir ışıktır [263].

Yeni nesil LED'lerin optik özellikleri, LED'leri diğer aydınlatmalara göre daha avantajlı hale getirmektedir [264]. LED lambalar 8,7 W güç tüketimiyle, 75 W değerinde akkor filamanlı bir lambadan daha fazla ışık üretebilmektedir. LED'lere gelen enerjinin %95'i ışığa dönüştürülür; geriye kalan %5'lik kısım ise ısı enerjisi olarak kaybedilmektedir. LED lambalar, floresanlara oranla %50 daha fazla enerji tasarrufu sağlamaktadır. 58 W gücünde Floresan lamba ile yılda 381 kWh enerji harcanırken, aynı ortam için 42 W gücünde LED kullanılması durumunda, enerji tüketimi %27 oranında azalmaktadır ve 276 kWh'a kadar tüketilen enerji azaltılmaktadır [265,266,267].

Sanayide kullanılabilecek aydınlatma armatürleri sırasıyla akkor, floresan ve LED lambalar olarak gruplandırılmıştır. Lümen değerine göre farklı tip aydınlatma ampulü kullanımı ile kazanım sağlamak mümkündür. Farklı aydınlatma tiplerine göre, enerji kullanım değerleri Çizelge 3.11'de verilmiştir [268,269].

Çizelge 3.11. Aydınlatma armatürlerine göre enerji kullanım miktarları.

| No | Lümen (lm) | Akkor Ampül (W) | Tasarruflu Ampül (W) | Led Ampül (W) |
|----|------------|-----------------|----------------------|---------------|
| 1  | 450        | 40              | 8                    | 4             |
| 2  | 450        | 40              | 12                   | 5             |
| 3  | 750        | 60              | 13                   | 6             |
| 4  | 900        | 60              | 18                   | 8             |
| 5  | 1100       | 75              | 19                   | 9             |
| 6  | 1300       | 100             | 22                   | 13            |
| 7  | 1600       | 100             | 23                   | 14            |
| 8  | 1800       | 100             | 30                   | 20            |
| 9  | 2600       | 150             | 32                   | 21            |
| 10 | 2800       | 150             | 55                   | 28            |

Verimli aydınlatma led ampül ile sağlanabilmektedir. Led ampül, tasarruflu ampül ve akkor ampül yerine kullanıldığında Çizelge 3.11’de verilen değerlere göre watt (W) cinsinden kazanım değeri aşağıda verilen Eşitlikler (3.46 ile 3.49 arası) ile hesaplanmaktadır:

$Q_L$  = Led ampül enerji kullanım miktarı (W)

$Q_T$  = Tasarruflu ampül enerji kullanım miktarı (W)

$Q_A$  = Akkor ampül enerji kullanım miktarı (W)

Akkor ampül yerine tasarruflu ampül de kullanılabilir. Eğer böyle bir durum söz konusu ise Eşitlik 3.46 kullanılacaktır:

$$Q_{\text{kazanım1}} = Q_T - Q_A \quad (W) \quad (3.46)$$

Akkor ampül yerine led ampül kullanılmış ise Eşitlik 3.47:

$$Q_{\text{kazanım2}} = Q_L - Q_A \quad (W) \quad (3.47)$$

Tasarruflu ampül yerine led ampül kullanılmış ise Eşitlik 3.48:

$$Q_{\text{kazanım3}} = Q_L - Q_T \quad (W) \quad (3.48)$$

Bir günlük enerji kazanımı bu durumda ise Eşitlik 3.49:

$$Q_{\text{günlük}} = Q_{\text{kazanım}} * \left( \frac{24 \text{ saat}}{1 \text{ gün}} * \frac{60 \text{ dakika}}{1 \text{ saat}} * \frac{60 \text{ saniye}}{1 \text{ dakika}} \right) \quad (\text{J/gün}) \quad (3.49)$$

kullanılmaktadır.

### 3.6. ENERJİ KAZANIMININ İKLİM VE EMİSYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sanayide yakma proseslerinde büyük ölçüde kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır [270]. Direk sera gazları olarak bilinen karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) ve diazotmonooksit (N<sub>2</sub>O) kirleticileri yakıtların yanması sonucunda atmosfere salınmaktadır [271]. Sera gazlarının, atmosferdeki konsantrasyonları antropogenic salınımlardan dolayı sürekli artmaktadır. Güneş ışınlarının yeryüzünden yansımaları, bu gazların atmosferdeki oranlarının artması ile beraber azalmaktadır; çünkü bu gazların ısıyı tutma kapasitelerinin yüksek olması atmosfere ulaşan ve yansıyan enerjiyi absorbe etmektedir. Bu etki sera etkisi olarak adlandırılmaktadır. İklim değişikliği etkisi bu gazların atmosfere salınımlarının artması ile beraber daha yoğun hissedilmektedir [272]. İklim değişikliğinin sayılmayacak kadar çok etkisi vardır; deniz seviyesinin yükselmesi, flora ve faunanın azalması, buzulların erimesi, artan kıtlık ve hastalıklar, sel ve felaketlerin oluşması, atmosfer sıcaklığının aşırı derecelere yükselmesi bunlardan bazılarıdır. Ülkeler için çok önemli sorunları beraberinde getirmektedir [273,274,275]. Bu sebeple fosil yakıtlardan, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş veya enerji tasarrufu ile enerji tüketiminin azaltılması, sera gazı emisyonlarını düşürebilmektedir [276]. İklim değişikliği azaltım çalışmaları bu yüzden oldukça önemlidir [277]. İklim değişikliğinin en iyi göstergesi ise emisyon kaynaklarından atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının tahmin edilmesidir [278].

Aydınlatma, pompa sistemleri, kompresör, elektrik motor sistemleri, türbin sistemleri, kazan ve yalıtım için farklı yakıt tiplerine göre emisyon değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.18’te gösterildiği gibi, EXCEL tabanlı bir program vasıtasıyla, bir makro oluşturulmuş ve emisyon hesaplamaları yapılmıştır [279]. Emisyonların sıklık parametreleri saatlik, günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak istenilen süre için hesaplanabilmektedir. Kazanım değerlerine göre, emisyonu hesaplanacak shaft cihazlarının kilowatt (kW) veya watt (W) cinsinden birimi seçilebilmektedir.

Kullanılan yakıt tipine göre, emisyon hesaplamaları direk sera gazları için hesaplanabilmektedir. Kömür, linyit, asfaltit, ikincil kömür yakıtı, doğal gaz, motorin, dizel yakıt, rafineri gaz, sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG), odun, hayvan ve bitki atıkları ve elektrik olmak üzere 12 farklı yakıt tipi için emisyon miktarı CO<sub>2</sub> eşdeğeri cinsinden hesaplanabilmektedir. Yakıt tipi olarak elektrik seçildiğinde, elektrik üretiminde kullanılan, yenilenebilir enerji miktarı (hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi miktarı) girilmelidir. Yenilenebilir enerjinin payı, bilinmiyorsa “0” değeri girilerek, ulusal düzeydeki default değer kabul edilmektedir. Ülkemizde elektrik üretiminin %20’si yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir. Yakıt tipine göre CO<sub>2</sub> (karbondioksit), CH<sub>4</sub> (metan), N<sub>2</sub>O (diazot monoksit) veya CO<sub>2</sub> Eşdeğeri hesaplanabilmektedir. Bu sonuçlar aslında tesisin karbon ayak izini vermektedir [279].

Kazanım yapılan miktara göre "Q<sub>kazanım</sub>" değeri ile emisyon faktörleri çarpılacaktır.

**SIKLIK DEĞERİNİ GİRİNİZ** :

1 Saatlik  
2 Günlük  
3 Haftalık  
4 Aylık  
5 Yıllık

Q<sub>kazanım</sub> Değerini GİRİNİZ? : 10  
Birim nedir? (1 veya 2) : 1

Yakıt Tipini GİRİNİZ? : 9  
Elektrik ise Yenilenebilir Enerji Miktarı Payı : 0  
(bilinmiyorsa "0" giriniz)

Ülkemizde Elektrik Üretiminin %20'si yenilenebilir Enerji Kaynaklarından üretilmektedir. Elektrik Kaynağı Bilinmiyorsa, bu oran kullanılmaktadır.

Alanları doldurunuz

| YAKIT TİPİ         |                    |                     |                   | YENİLENEBİLİR ENERJİ |                    |                   |                   |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| CO <sub>2</sub> EF | CH <sub>4</sub> EF | N <sub>2</sub> O EF | CO <sub>2</sub> E | CH <sub>4</sub> E    | N <sub>2</sub> O E | CO <sub>2</sub> E | CH <sub>4</sub> E |
| 17.2               | 0.99               | 1.8867              | 0                 | 0                    | 0                  | 0                 | 0                 |

Eğer Elektrik Kullanıyorsa (Yenilenebilir Yüzdesi) : 20

| Unit: ton      | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> Eşdeğeri |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| EMİSYON HESABI | 0.0002471543600 | 0.00000000000   | 0.00000000000    | 0.0002471543             |

← DİĞER YAKITLAR İÇİN

| Unit: ton             | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> Eşdeğeri |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| EMİSYON HESABI        | -               | -               | -                | -                        |
| Yenilenebilir Kazanım | -               | -               | -                | -                        |
| TOPLAM                | 0.0002471543600 | 0.00000000000   | 0.00000000000    | 0.0002471543             |

← ELEKTRİK İÇİN

Şekil 3.18. EXCEL tabanlı programda makro oluşturulması [279].

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. GENEL

Enerji verimliliği modelleme çalışmaları, genel olarak fabrika bileşenlerinin tamamına uygulanabilecek, pratik, hızlı, ekonomik ve kesin sonuçlara yakın değerlerin elde edilebileceği bir yaklaşımdır. Çalışma ile detaylandırma yapılarak, her bir bileşen ayrıntılı şekilde tanımlanıp, hangi oranda iyileştirilebileceği tahmin edilebilmektedir. Enerji verimliliğinin uygulanacağı alan parametrelerine yönelik detaylı bilgilerin toplanması, model çalışmalarının ve hesaplamalarının en doğru şekilde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Tahmin çalışmaları hatalı olabilir; ancak çalışmaların yeniden yapılmasını veya farklı metotların uygulamasını kısıtlayan hiçbir etmen yoktur. Modelleme çalışmaları bu yüzden tercih edilmektedir. Sanayi kuruluşu için en doğru enerji verimliliği uygulaması, modelleme çalışmaları ile sistem kurulmadan önce belirlenebilmektedir [280,281,282]. Bu çalışmada çok yönlü ve detaylı sorgulamalar ile bunu hedeflemektedir.

Çalışmada, sistem ve bileşen enerji kazanımlarını belirlemek için analitik ve sayısal modelleme yöntemlerini kullanılmıştır. Bu analizler en fazla enerjinin tüketildiği ve büyük verimlilik potansiyeli olan noktalara yoğunlaşarak tahmini kazanım değerini hesaplamaktadır. Enerji kullanımında eksikliklerin, zayıflıkların ve iyileştirmelerin tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Enerji kaybına yol açan sistem hataları, verimsiz ekipmanlar, kötü izolasyon v.b., sorunlar fabrikaya uygulanacak sorgulamalar ile kolaylıkla belirlenmektedir. Elde edilen her türlü bilgi ve veri doğrultusunda, uygulama kaynaklarının stratejik şekilde planlaması, yönlendirilmesi ve iyileştirmesi yapılarak, en doğru şekilde sonuçlar ortaya çıkarılmaktadır.

Enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması günümüzde, sadece ekonomik değil, pozitif bir ayrım noktası olarak ta değerlendirilmektedir [283]. Dünyada eko-üretim, yeşil üretim, çevre dostu ürünlerin kullanılması özendirilmekte ve stratejiler çok yönlü kazanımı olan enerji verimliliği uygulamalarına hedeflenmektedir. Bu hedef enerji verimlilik uygulamalarını, stratejilerini ve iyileştirme yöntemlerini, geliştirilebilir hale getirmektedir. Bu sayede sistemlerin verimlilik potansiyellerinin belirlenmesi, enerji tüketiminin azaltılması, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkinin azaltılmasına yönelik adımların atılmasına geniş çaplı bir olanak sağlamaktadır.

#### **4.2. ENERJİ GERİ KAZANIM VERİTABANLARI**

Çalışma kapsamında, enerji kullanımının etkin ve verimli olabilmesi için sorgulama ve uygulama yöntemleri geliştirilmiştir. Enerji kullanan her bir sistem ve bileşen gruplandırılarak, enerji geri kazanım miktarı, oluşturulan veri tabanlarına göre hesaplanmıştır. Elde edilen enerji kazanım miktarları kullanılarak emisyon parametreleri arasındaki ilişkileri incelemek için, Can A. (2023) tarafından hazırlanan “**Excel**” tabanlı bir program kullanılmıştır. Program, IPCC yöntemi kullanarak, geri kazanılan enerji miktarlarına göre, atmosfere salınan direk sera gazı azaltım miktarlarını hesaplamaktadır.

Genel olarak çalışma, kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, elektrik motoru basınçlı hava kullanımı, yakıt tüketim sistemleri, yalıtım ve aydınlatma armatürleri başlıkları altında gruplandırılmıştır. Sanayide enerji verimliliğini artırmak için sistemsel farklılıklara göre değerlendirilmelerin yapılması çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Sektörel alanların her birinin, enerji tasarrufu sağlamak için farklı potansiyellere sahip olduğu görülmüştür. Tespit edilen eksiklikler ve iyileştirme potansiyelleri, sadece fabrikaya veya uygulama noktasına özel değil, ulusal emisyon azaltım çalışmaları içinde bir eylem planıdır. Değerlendirmeler ve toplanan sistemsel veriler, enerji kullanımının etkin ve en verimli şekilde gerçekleştirilebilmesi için yöntem tabanlı teknik uygulamalar ile, nasıl uygulanabileceğini detaylı ortaya çıkarmaktadır. Çalışmanın temeli, yapılan sorgulamalar ile derlenen detaylı veriler ve verilerin oluşturduğu veri tabanlarıdır.

#### 4.2.1. Kojenerasyon ve Trijenerasyon Sistemlerinin Değerlendirilmesi

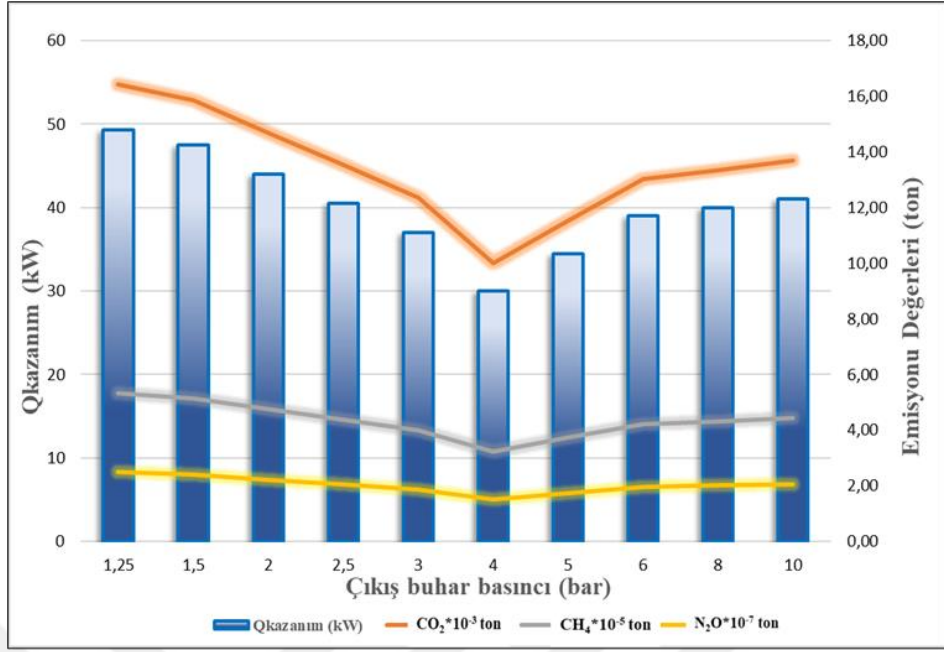
Kojenerasyon veya trijenerasyon sistemlerindeki, enerji geri kazanım miktarı, Çizelge 3.2’de örneği verilen 20 ve 30 bar türbin giriş basıncında çalışan bir buhar türbini için, Eşitlik 3.14 kullanılarak hesaplanmıştır. Üretilen buhar miktarı, örnek için, 5 ton/saat değeri ile durağan koşul için, çıkış buhar basıncı (bar) dikkate alınmıştır. Çıkış buhar basıncı 1,25-10 bar arasında değişen 10 parametrenin kazanım değerleri için, EXCEL tabanlı programda yakıt tipi kömür olarak seçilmiştir. Sıklık zaman değeri “saat” ve kazanım değerine göre, sera gazı emisyonları (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) hesaplanmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Türbinin güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton)  | CH <sub>4</sub> (ton) | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt Tipi |
|---------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| 49,25         | 16,43*10 <sup>-3</sup> | 5,31*10 <sup>-5</sup> | 2,48*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 44            | 14,68*10 <sup>-3</sup> | 4,75*10 <sup>-5</sup> | 2,21*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 37            | 12,34*10 <sup>-3</sup> | 3,99*10 <sup>-5</sup> | 1,86*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 30            | 10,01*10 <sup>-3</sup> | 3,24*10 <sup>-5</sup> | 1,51*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 39            | 13,01*10 <sup>-3</sup> | 4,21*10 <sup>-5</sup> | 1,96*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 40            | 13,35*10 <sup>-3</sup> | 4,32*10 <sup>-5</sup> | 2,01*10 <sup>-7</sup>  | 1          |
| 41            | 13,68*10 <sup>-3</sup> | 4,42*10 <sup>-5</sup> | 2,06*10 <sup>-7</sup>  | 1          |

Türbin çıkış buhar basıncına (bar) göre kazanılan güç (kW) ve Emisyon (ton) parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.1’de detaylı olarak gösterilmiştir. Güç kazanımları ile emisyon azaltımları (ton) arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır.





Şekil 4.1. Türbin çıkış buhar basıncına göre güç kazanımı.

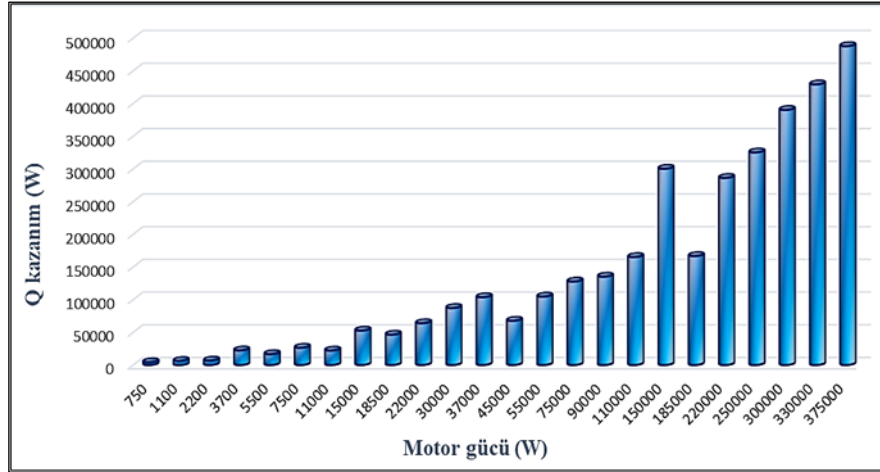
#### 4.2.2. Elektrik Motor Sistemleri

Elektrik motor sistemlerinde yüksek bir enerji kazanım potansiyeli bulunmaktadır. Sanayide kullanılan motor sistemlerinin çoğu eski teknoloji ürünlerdir. İnnovatif ürünlerin tercih edilmesi enerji kazanımını arttırmaktadır. Çizelge 3.3'te gösterilen IE1 (2kutup) ve IE2 (4kutup) elektrik motor tipleri örnek için seçilmiştir. Kazanım değerleri Eşitlik 3.17 kullanılarak hesaplanmıştır. Motor gücü 750-375000 W aralıklarında olan 24 değer için, EXCEL tabanlı program aracılığı ile, yakıt tipine bağlı elektrik üretim potansiyeli belirlenmiştir. Sıklık değeri birimi “saat” olarak seçilmiştir. Enerji kazanım miktarına göre sera gazı azaltım miktarı direk sera gazları için (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), Çizelge 4.2'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Tüketilen enerji miktarına bağlı olarak enerji kazanım ve emisyon azaltım değeri de değişmektedir. Tüketilen enerji miktarı arttıkça, enerji kazanım miktarı da artmaktadır.

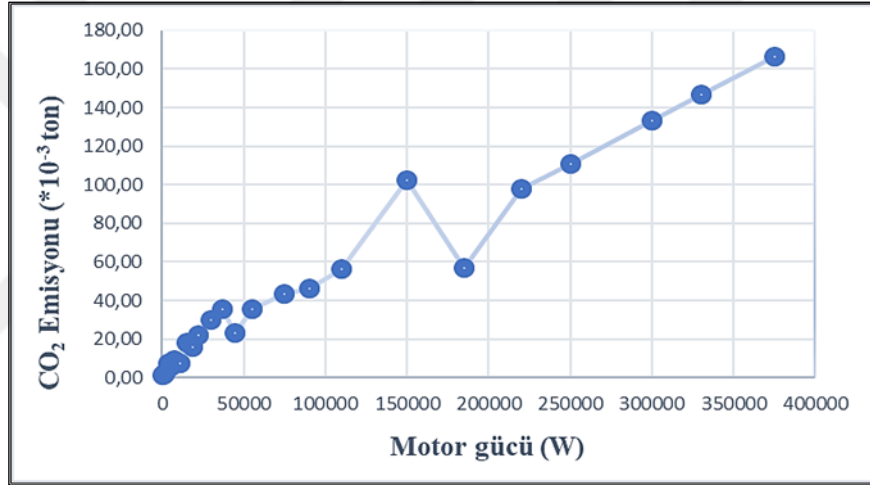
Çizelge 4.2. Verimlilik değerlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

| Qkazanım (W) | CO <sub>2</sub> (ton)   | CH (ton)               | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt Tipi |
|--------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| 4125         | 1,40*10 <sup>-3</sup>   | 0,44*10 <sup>-5</sup>  | 0,2*10 <sup>-7</sup>   | 12         |
| 6050         | 2,06*10 <sup>-3</sup>   | 0,65*10 <sup>-5</sup>  | 0,3*10 <sup>-7</sup>   | 12         |
| 6600         | 2,25*10 <sup>-3</sup>   | 0,71*10 <sup>-5</sup>  | 0,33*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 22200        | 7,58*10 <sup>-3</sup>   | 2,39*10 <sup>-5</sup>  | 1,11*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 16500        | 5,63*10 <sup>-3</sup>   | 1,78*10 <sup>-5</sup>  | 0,83*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 26250        | 8,96*10 <sup>-3</sup>   | 2,83*10 <sup>-5</sup>  | 1,32*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 22000        | 7,51*10 <sup>-3</sup>   | 2,37*10 <sup>-5</sup>  | 1,1*10 <sup>-7</sup>   | 12         |
| 52500        | 17,93*10 <sup>-3</sup>  | 5,67*10 <sup>-5</sup>  | 2,64*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 46250        | 15,79*10 <sup>-3</sup>  | 4,99*10 <sup>-5</sup>  | 2,33*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 63800        | 21,79*10 <sup>-3</sup>  | 6,89*10 <sup>-5</sup>  | 3,21*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 87000        | 29,71*10 <sup>-3</sup>  | 9,39*10 <sup>-5</sup>  | 4,38*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 103600       | 35,38*10 <sup>-3</sup>  | 11,18*10 <sup>-5</sup> | 5,22*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 67500        | 23,05*10 <sup>-3</sup>  | 7,29*10 <sup>-5</sup>  | 3,4*10 <sup>-7</sup>   | 12         |
| 104500       | 35,69*10 <sup>-3</sup>  | 11,28*10 <sup>-5</sup> | 5,26*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 127500       | 43,54*10 <sup>-3</sup>  | 13,76*10 <sup>-5</sup> | 6,42*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 135000       | 46,1*10 <sup>-3</sup>   | 14,58*10 <sup>-5</sup> | 6,8*10 <sup>-7</sup>   | 12         |
| 165000       | 56,35*10 <sup>-3</sup>  | 17,82*10 <sup>-5</sup> | 8,31*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 300000       | 102,46*10 <sup>-3</sup> | 32,4*10 <sup>-5</sup>  | 15,12*10 <sup>-7</sup> | 12         |
| 166500       | 56,86*10 <sup>-3</sup>  | 17,98*10 <sup>-5</sup> | 8,39*10 <sup>-7</sup>  | 12         |
| 286000       | 97,68*10 <sup>-3</sup>  | 30,88*10 <sup>-5</sup> | 14,41*10 <sup>-7</sup> | 12         |
| 325000       | 111,01*10 <sup>-3</sup> | 35,1*10 <sup>-5</sup>  | 16,38*10 <sup>-7</sup> | 12         |
| 390000       | 133,2*10 <sup>-3</sup>  | 42,12*10 <sup>-5</sup> | 19,65*10 <sup>-7</sup> | 12         |
| 429000       | 146,52*10 <sup>-3</sup> | 46,33*10 <sup>-5</sup> | 21,62*10 <sup>-7</sup> | 12         |
| 487500       | 166,5*10 <sup>-3</sup>  | 52,65*10 <sup>-5</sup> | 24,57*10 <sup>-7</sup> | 12         |

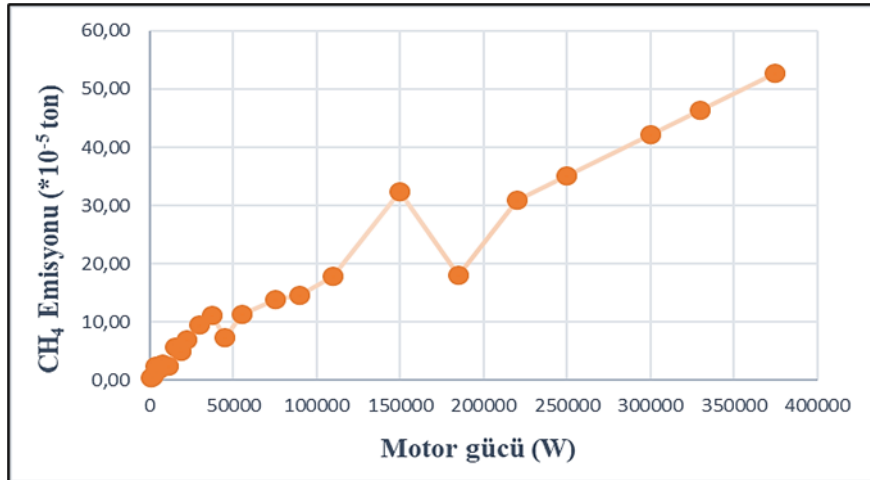
Farklı güç değerlerine göre kazanılan güç (W) ve sera gazı emisyon miktarı (ton) arasındaki ilişkiler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’te görüldüğü gibi, güç kazanımları ile emisyon azaltımları (ton) arasında doğru orantılı bir ilişki söz konusudur. Örneğin 45 kW’lık bir enerji kazanımının, yaklaşık olarak 16\*10<sup>-3</sup> ton CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaktadır.



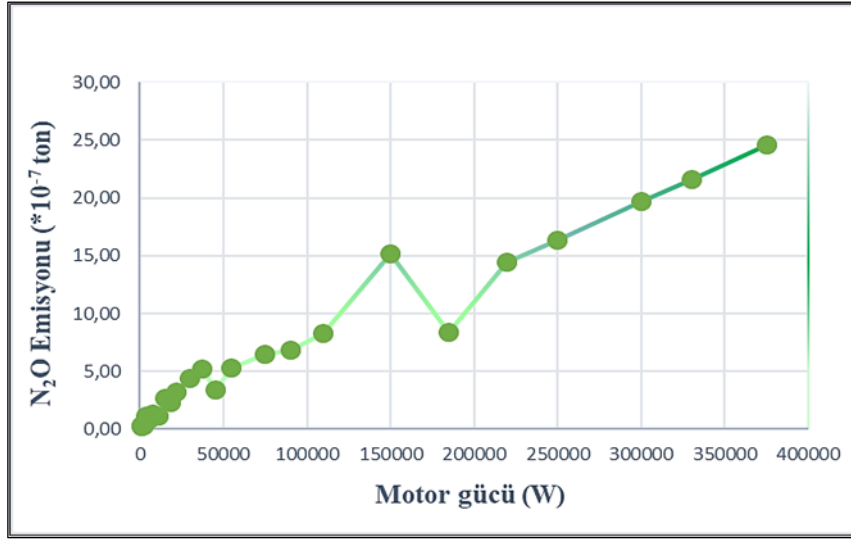
Şekil 4.2. Farklı motor güçlerine göre güç kazanımı.



Şekil 4.3. Motor güçleri ve uygulamalar ile CO<sub>2</sub> emisyonu azaltımı.



Şekil 4.4. Motor güçleri ve uygulamalar ile CH<sub>4</sub> emisyonu azaltımı.



Şekil 4.5. Motor güçleri ve uygulamalar ile N<sub>2</sub>O emisyon azaltımı.

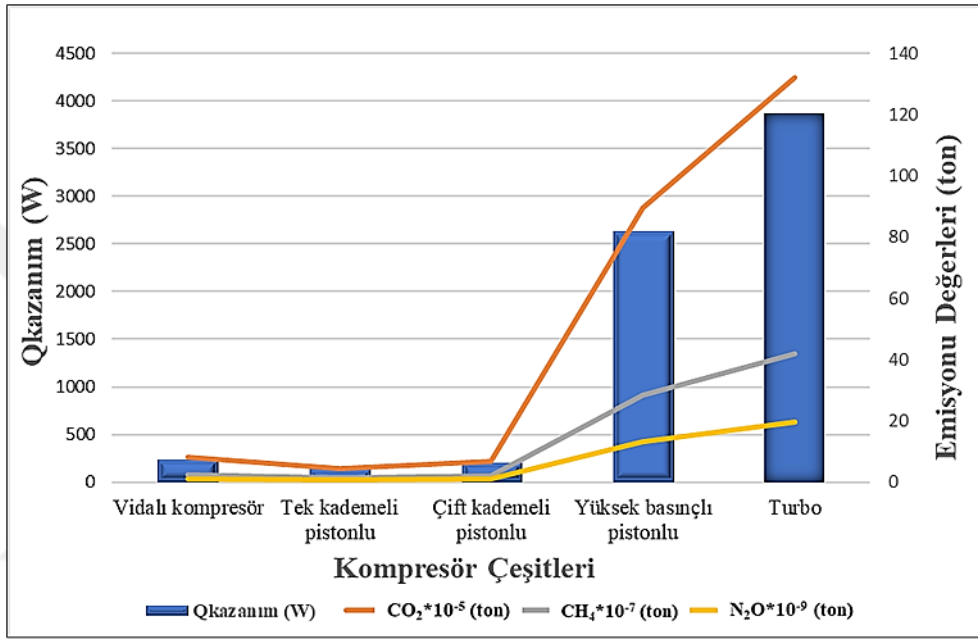
#### 4.2.3. Basınçlı Hava Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Basınçlı hava sistemleri, yapısal olarak, enerji kazanımının yüksek olduğu proses noktasıdır. Özellikle kaçak noktalarının tespiti ve bakım onarım çalışmalarının zamanlı yapılması, üretimin bu noktasında çok önemli kazanımlar sağlamaktadır [284]. Bölüm 3, Çizelge 3.4’te tanımlanan kompresör tiplerine göre, basınç ve debi parametreleri minimum alınarak, kazanım değerleri, Eşitlik 3.21 kullanılarak hesaplanmıştır. Vidalı kompresör, tek kademeli pistonlu, çift kademeli pistonlu, yüksek basınçlı pistonlu ve turbo kompresörlerde elde edilen kazanım değerleri sırasıyla 236 W, 136 W, 204 W, 2625 W ve 3870 W şeklindedir. Sıklık değeri birimi “saat” olarak seçilmiştir. Enerji kazanım miktarına göre sera gazı azaltım miktarı direk sera gazları için (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), Çizelge 4.3’te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Kompresör çeşitlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı.

| Qkazanım (W) | CO <sub>2</sub> (ton)   | CH <sub>4</sub> (ton)  | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt Tipi |
|--------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| 236,25       | 8,06*10 <sup>-5</sup>   | 2,55*10 <sup>-7</sup>  | 1,19*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
| 136          | 4,64*10 <sup>-5</sup>   | 1,46*10 <sup>-7</sup>  | 0,68*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
| 204          | 6,96*10 <sup>-5</sup>   | 2,2*10 <sup>-7</sup>   | 1,02*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
| 2625         | 89,65*10 <sup>-5</sup>  | 28,35*10 <sup>-7</sup> | 13,23*10 <sup>-9</sup> | 12         |
| 3870         | 132,17*10 <sup>-5</sup> | 41,79*10 <sup>-7</sup> | 19,5*10 <sup>-9</sup>  | 12         |

Kompresör çeşitlerine göre kazanılan güç ve Emisyon (ton) parametreleri arasındaki bağıntı, Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Güç kazanımları sırasıyla Turbo, yüksek basınçlı pistonlu, vidalı kompresör, çift kademeli pistonlu ve tek kademeli pistonlu kompresörler olarak sıralandığında, turbo motorlar için kazanım değerinin,  $115 \cdot 10^{-5}$  ton CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltabileceği görülmektedir. Güç kazanımı ile sera gazı emisyon azaltımları arasında doğrusal bir eğilimin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. Kompresör çeşitlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı.

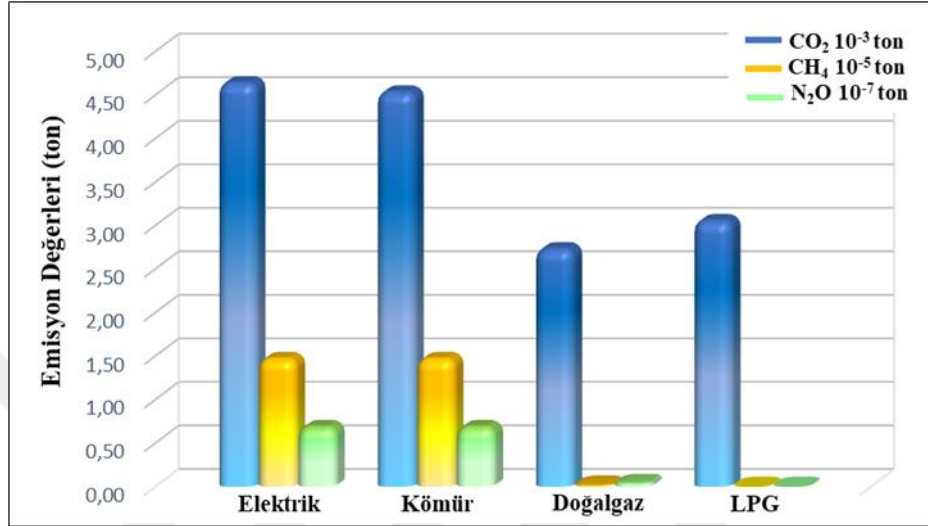
Ayrıca kompresör sistemleri için seçilen pompa tipleri ile kazanım değeri 13,57 kW daha arttırılabilmektedir. Bu kazanım değeri ile, elektrik gücünün kullanılması durumunda,  $4,63 \cdot 10^{-3}$  ton CO<sub>2</sub>,  $1,46 \cdot 10^{-5}$  ton CH<sub>4</sub> ve  $0,68 \cdot 10^{-7}$  ton N<sub>2</sub>O emisyonu, azaltılabilmektedir.

Çizelge 4.4. Yakıt türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton) | CH <sub>4</sub> (ton) | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt tipi |
|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| 13,57         | $4,63 \cdot 10^{-3}$  | $1,46 \cdot 10^{-5}$  | $0,68 \cdot 10^{-7}$   | Elektrik   |
| 13,57         | $4,52 \cdot 10^{-3}$  | $1,46 \cdot 10^{-5}$  | $0,68 \cdot 10^{-7}$   | Kömür      |
| 13,57         | $2,72 \cdot 10^{-3}$  | $0,02 \cdot 10^{-5}$  | $0,04 \cdot 10^{-7}$   | Doğal gaz  |
| 13,57         | $3,05 \cdot 10^{-3}$  | 0                     | 0                      | LPG        |

\*Bu çizelge “sirkülasyon pompa” yerine “cryogenic likid pompa” kullanıldığında elde edilen Q<sub>kazanım</sub> değerine göre yakıt değişimindeki emisyon miktarlarını göstermektedir (Bakınız Tablo 3.7).

Kompresör için “sirkülasyon pompa” yerine “cryogenic likid pompa” kullanıldığında, elde edilen güç kazanımı ile, emisyon azaltım miktarı Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Güç kazanımı sırasıyla en çok elektrik tüketiminde görülmektedir. Bunu kömür, LPG ve doğalgaz yakıtlar tüketimleri takip etmektedir.



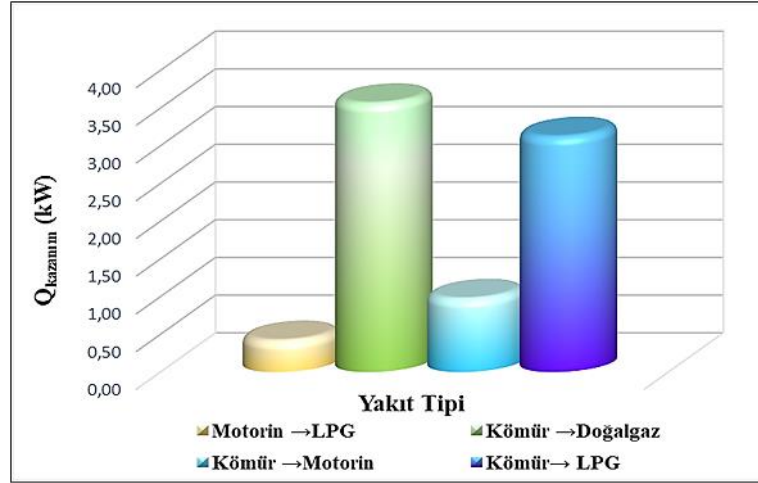
Şekil 4.7. Farklı yakıt türlerine göre sera gazı emisyonları.

#### 4.2.4. Yakıt Kullanımlarının Değerlendirilmesi

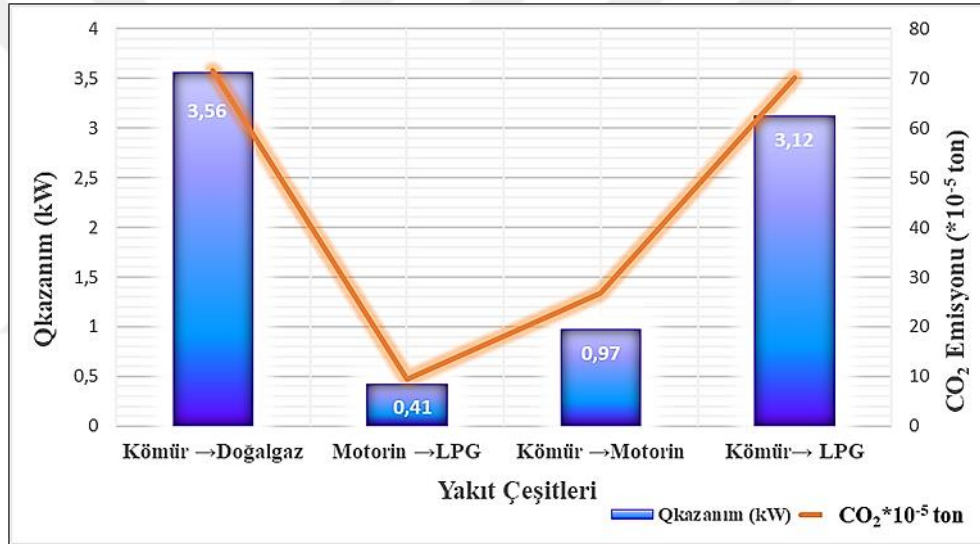
Çizelge 4.5’te gösterildiği gibi kömür yerine doğalgaz ve motorin yerine LPG yakıt tipi kullanıldığında tahmini güç kazanım miktarı sırasıyla 3,56 kW ve 0,41 kW olarak hesaplanmıştır. Sıklık değeri birimi “saat” olarak seçilmiştir. Enerji kazanım miktarına göre sera gazı azaltım miktarı direk sera gazları için (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), Şekil 4.9’ta gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. Yakıt türlerine göre güç kazanım ve emisyon azaltımı.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton)  | CH <sub>4</sub> (ton) | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt Tipi     |
|---------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 3,56          | 71,58*10 <sup>-5</sup> | 0,64*10 <sup>-7</sup> | 0,01*10 <sup>-7</sup>  | Kömür→Doğalgaz |
| 0,41          | 9,36*10 <sup>-5</sup>  | 0                     | 0                      | Motorin→LPG    |
| 0,97          | 26,74*10 <sup>-5</sup> | 0,34*10 <sup>-7</sup> | 0,02*10 <sup>-7</sup>  | Kömür→Motorin  |
| 3,12          | 70,12*10 <sup>-5</sup> | 0                     | 0                      | Kömür→LPG      |



Şekil 4.8. Yakıt türlerine göre güç kazanımı.



Şekil 4.9. Yakıt türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

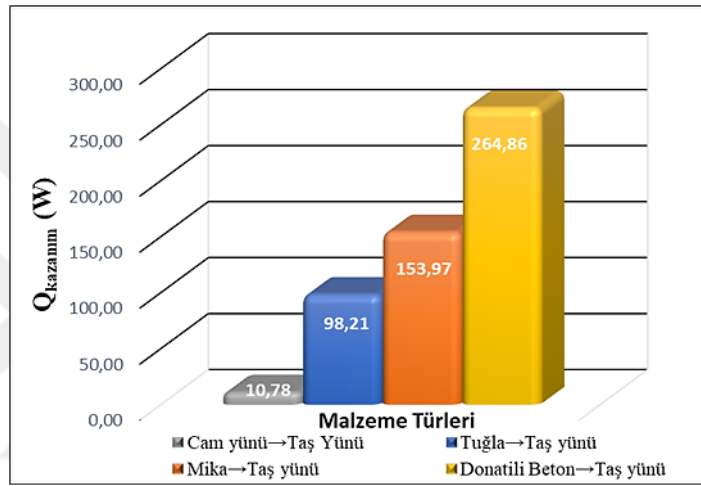
#### 4.2.5. Yalıtım Uygulamasının Değerlendirilmesi

Tuğla, taş yünü, mika, cam yünü ve donatili beton yalıtım amacı ile tercih edilmektedir. Konveksiyonun yoğun olduğu açık hava ortamı için, en iyi yalıtım malzemelerinden bir olan taş yünü diğer malzemelere göre tercih edildiğinde, yüksek enerji kazanımı görülebilmektedir. Yalıtım malzemeleri konveksiyonun yüksek olduğu noktalarda özellikle şebeke sıcak taşınımları için önemli bir uygulamadır. Aşağıda Çizelge 4.6'da gösterildiği gibi tuğla yerine taş yünü kaplama malzemesi kullanıldığında 98,21 kW enerji kazanımı sağlanmaktadır. Eğer donatili beton yerine, taş yünü tercih edilirse bu kazanım değeri 264,86 kW'a kadar yükselmektedir. Yalıtım

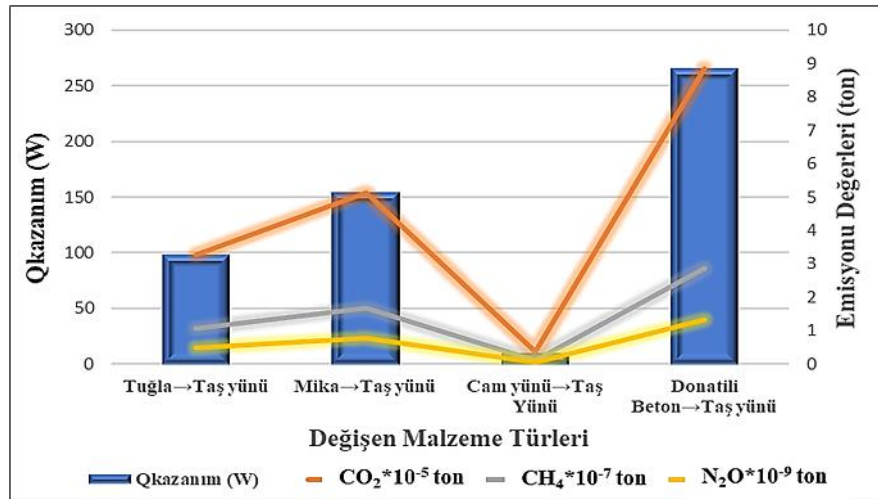
uygulamaları ile donatili beton yerine taş yünü kullanılırsa,  $8,83 \cdot 10^{-5}$  ton  $\text{CO}_2$ ,  $2,86 \cdot 10^{-7}$  ton  $\text{CH}_4$  ve  $1,33 \cdot 10^{-9}$  ton  $\text{N}_2\text{O}$  emisyonu, azaltılabilmektedir.

Çizelge 4.6. Değişen malzeme türlerine göre güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

| Değişen Malzeme         | Qkazanım (W) | $\text{CO}_2$ (ton)  | $\text{CH}_4$ (ton)  | $\text{N}_2\text{O}$ (ton) | Yakıt Tipi |
|-------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------|
| Tuğla→Taş yünü          | 98,21        | $3,27 \cdot 10^{-5}$ | $1,06 \cdot 10^{-7}$ | $0,49 \cdot 10^{-9}$       | 1          |
| Mika→Taş yünü           | 153,97       | $5,13 \cdot 10^{-5}$ | $1,66 \cdot 10^{-7}$ | $0,77 \cdot 10^{-9}$       | 1          |
| Cam yünü→Taş Yünü       | 10,78        | $0,35 \cdot 10^{-5}$ | $0,11 \cdot 10^{-7}$ | $0,05 \cdot 10^{-9}$       | 1          |
| Donatili Beton→Taş yünü | 264,86       | $8,83 \cdot 10^{-5}$ | $2,86 \cdot 10^{-7}$ | $1,33 \cdot 10^{-9}$       | 1          |



Şekil 4.10. Değişen malzeme türlerine göre güç kazanımı.



Şekil 4.11. Yalıtım malzeme türlerinin güç kazanımı ve emisyon azaltımı.



#### 4.2.6. Aydınlatma Armatürlerinin Değerlendirilmesi

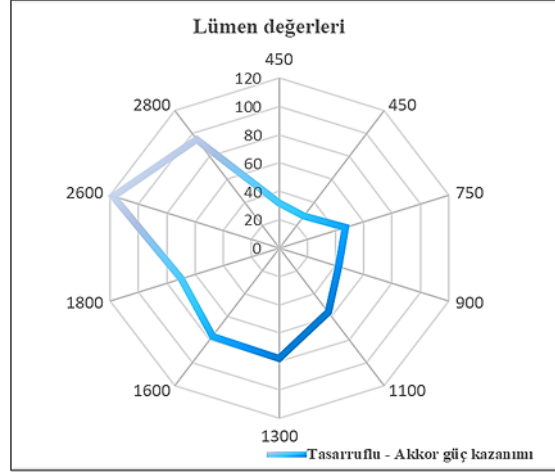
Doğru aydınlatma armatürleri sadece sanayi üretim noktaları için değil, ayrıca ofis, bahçe ve farklı noktalar içinde uygulanabilecek, iyi bir enerji kazanım noktasıdır. Bölüm 3'te gösterildiği gibi, Tasarruflu - Akkor kazanımı “Kazanım<sub>1</sub>”, LED - Akkor kazanımı “Kazanım<sub>2</sub>”, ve LED - Tasarruflu kazanımı ise “Kazanım<sub>3</sub>” ile gösterilmiştir. Sıklık değeri birimi “saat” olarak seçilmiştir. Enerji kazanım miktarına göre sera gazı azaltım miktarı direk sera gazları için (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), hesaplanmıştır. Kazanım miktarı 129 W değerine kadar yükselmektedir. Bu kazanım değeri,  $4,4 \cdot 10^{-5}$  ton CO<sub>2</sub>,  $1,39 \cdot 10^{-7}$  ton CH<sub>4</sub> ve  $0,65 \cdot 10^{-9}$  ton N<sub>2</sub>O emisyonunu, azaltılabilmektedir.

Tasarruflu - Akkor 28-118 W aralığında, LED - Akkor 35-129 W aralığında ve LED - Tasarruflu ise, 4-27 W aralığında enerji kullanımını düşürmektedir. Bu miktar armatür sayıları düşünüldüğünde çok önemli bir ekonomik tasarrufu sanayi için sağlamaktadır.

Çizelge 4.7. Aydınlatma armatürleri için güç kazanımı ve emisyon azaltımı.

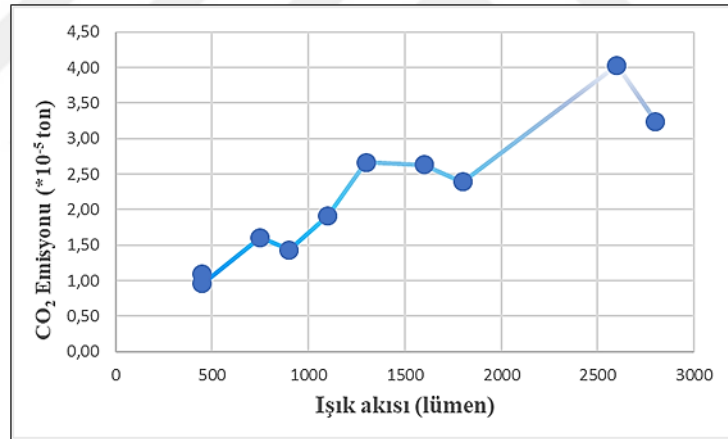
|                    | Q <sub>kazanım</sub> (W) | CO <sub>2</sub> (ton) | CH <sub>4</sub> (ton) | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt Tipi |
|--------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| Tasarruflu - Akkor | 32                       | 1,09*10 <sup>-5</sup> | 0,34*10 <sup>-7</sup> | 0,16*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 28                       | 0,95*10 <sup>-5</sup> | 0,3*10 <sup>-7</sup>  | 0,14*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 47                       | 1,6*10 <sup>-5</sup>  | 0,5*10 <sup>-7</sup>  | 0,23*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 42                       | 1,43*10 <sup>-5</sup> | 0,45*10 <sup>-7</sup> | 0,21*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 56                       | 1,91*10 <sup>-5</sup> | 0,6*10 <sup>-7</sup>  | 0,28*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 78                       | 2,66*10 <sup>-5</sup> | 0,84*10 <sup>-7</sup> | 0,39*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 77                       | 2,62*10 <sup>-5</sup> | 0,83*10 <sup>-7</sup> | 0,38*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 70                       | 2,39*10 <sup>-5</sup> | 0,75*10 <sup>-7</sup> | 0,35*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 118                      | 4,03*10 <sup>-5</sup> | 1,27*10 <sup>-7</sup> | 0,59*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 95                       | 3,24*10 <sup>-5</sup> | 1,02*10 <sup>-7</sup> | 0,47*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
| LED-Akkor          | 36                       | 1,22*10 <sup>-5</sup> | 0,38*10 <sup>-7</sup> | 0,18*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 35                       | 1,19*10 <sup>-5</sup> | 0,37*10 <sup>-7</sup> | 0,17*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 54                       | 1,84*10 <sup>-5</sup> | 0,58*10 <sup>-7</sup> | 0,27*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 52                       | 1,77*10 <sup>-5</sup> | 0,56*10 <sup>-7</sup> | 0,26*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 66                       | 2,25*10 <sup>-5</sup> | 0,71*10 <sup>-7</sup> | 0,33*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 87                       | 2,97*10 <sup>-5</sup> | 0,93*10 <sup>-7</sup> | 0,43*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 86                       | 2,93*10 <sup>-5</sup> | 0,92*10 <sup>-7</sup> | 0,43*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 80                       | 2,73*10 <sup>-5</sup> | 0,86*10 <sup>-7</sup> | 0,4*10 <sup>-9</sup>   | 12         |
|                    | 129                      | 4,4*10 <sup>-5</sup>  | 1,39*10 <sup>-7</sup> | 0,65*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 122                      | 4,16*10 <sup>-5</sup> | 1,31*10 <sup>-7</sup> | 0,61*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
| LED-Tasarruflu     | 4                        | 0,13*10 <sup>-5</sup> | 0,04*10 <sup>-7</sup> | 0,02*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 7                        | 0,23*10 <sup>-5</sup> | 0,07*10 <sup>-7</sup> | 0,03*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 7                        | 0,23*10 <sup>-5</sup> | 0,07*10 <sup>-7</sup> | 0,03*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 10                       | 0,34*10 <sup>-5</sup> | 0,1*10 <sup>-7</sup>  | 0,05*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 10                       | 0,34*10 <sup>-5</sup> | 0,1*10 <sup>-7</sup>  | 0,05*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 9                        | 0,3*10 <sup>-5</sup>  | 0,09*10 <sup>-7</sup> | 0,04*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 9                        | 0,3*10 <sup>-5</sup>  | 0,09*10 <sup>-7</sup> | 0,04*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 10                       | 0,34*10 <sup>-5</sup> | 0,1*10 <sup>-7</sup>  | 0,05*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 11                       | 0,37*10 <sup>-5</sup> | 0,11*10 <sup>-7</sup> | 0,05*10 <sup>-9</sup>  | 12         |
|                    | 27                       | 0,92*10 <sup>-5</sup> | 0,29*10 <sup>-7</sup> | 0,13*10 <sup>-9</sup>  | 12         |

Işık akısı (lümen) değerlerine göre hesaplaması yapılan tasarruflu - akkor kazanımı Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Lümen değerleri 450-2800 aralığında kazanım değerlerine göre değişmektedir. Örneğin, tasarruflu ampullerin akkor ampül yerine tercih edilmeleri durumunda, 450 lümen değerinde 32 Wattlık bir güç kazanımı sağlanırken, 1600 lümen değerinde 77 Wattlık bir kazanım elde edilmektedir.



Şekil 4.12. Işık akısı değerleri ile tasarruflu - akkor güç kazanımı.

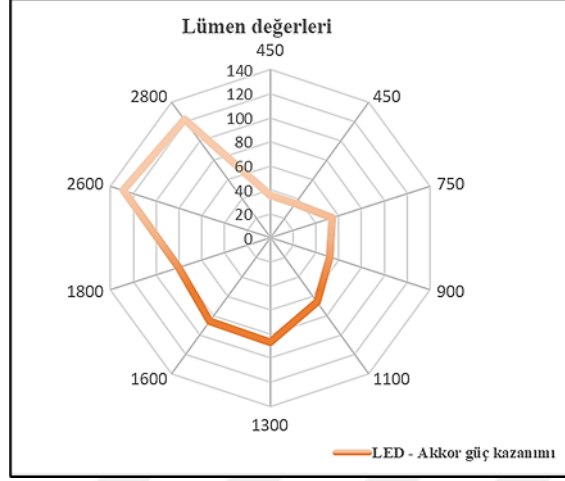
Akkor ampül yerine tasarruflu ampül kullanıldığında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> azaltım miktarı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Özellikle 2500-3000 lümen aralığında ampül enerji tasarrufu incelendiğinde,  $3,50 \cdot 10^{-5}$  ton emisyon salınımı engellemiş olmaktadır.



Şekil 4.13. Tasarruflu - akkor kazanımına göre CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı.

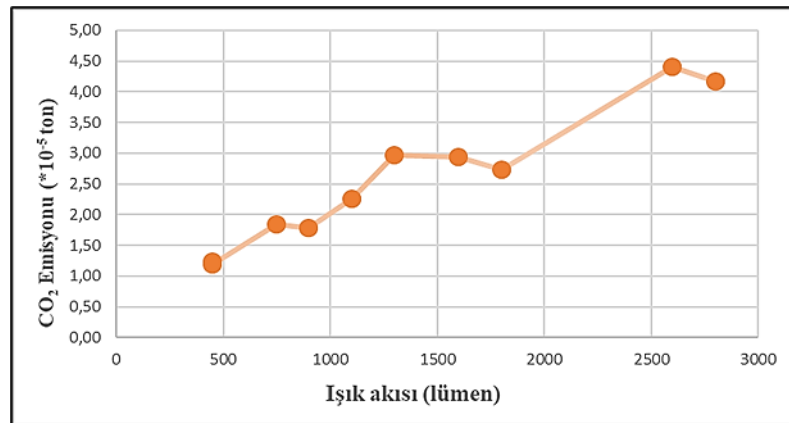
Işık akısı (lümen) değerlerine göre hesaplaması yapılan LED - akkor kazanımı Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Lümen değerleri 450-2800 arasında, kazanım değerleri ise 35-129 Watt aralığında değişmektedir. Örneğin, tasarruflu ampullerin akkor ampül yerine tercih edilmeleri durumunda, 450 lümen değerinde 32 Wattlık bir güç kazanımı sağlanırken, 1600 lümen değerinde 77 Wattlık bir kazanım elde edilmektedir. Akkor ampül yerine LED ampül kullanılarak elde edilen güç kazanımları lümen değerlerine göre farklılık göstermektedir. Özellikle LED ampül teknolojisinin gelişmesiyle beraber daha az enerji ile daha yoğun bir Lümen değeri elde edilebilmektedir. Standart

koşullardaki LED kullanımında, 450 lümen değerinde 36 Wattlık bir güç kazanımı sağlanırken, 1600 lümen değerinde 86 Wattlık bir kazanım elde edilmektedir.



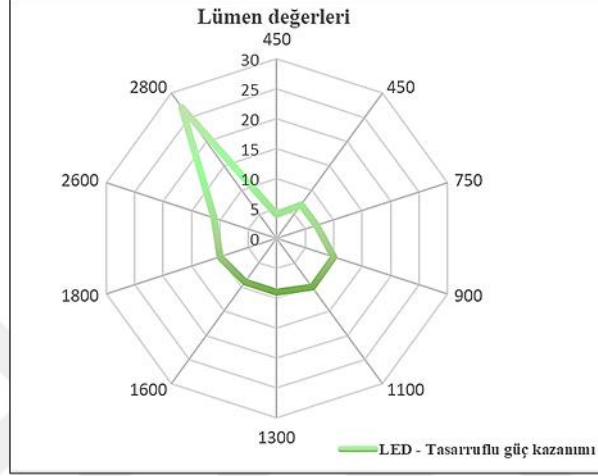
Şekil 4.14. Işık akısı değerleri ve LED - akkor güç kazanımı.

Akkor ampül yerine LED ampül kullanıldığında enerji kazanım miktarı diğer armatürlere göre daha fazla olmaktadır. Sera gazı emisyon kazanımı da aynı oranda , Şekil 4.15'te gösterildiği gibi artmaktadır. Özellikle 2500-3000 lümen aralığında ampullerin güç kazanımına bakıldığında yoğun bir emisyon salınımı engellenmektedir. Akkor ampullerin yerine LED ampullerin tercih edilmesi sanayide uygulanabilecek iyi bir tekniktir.



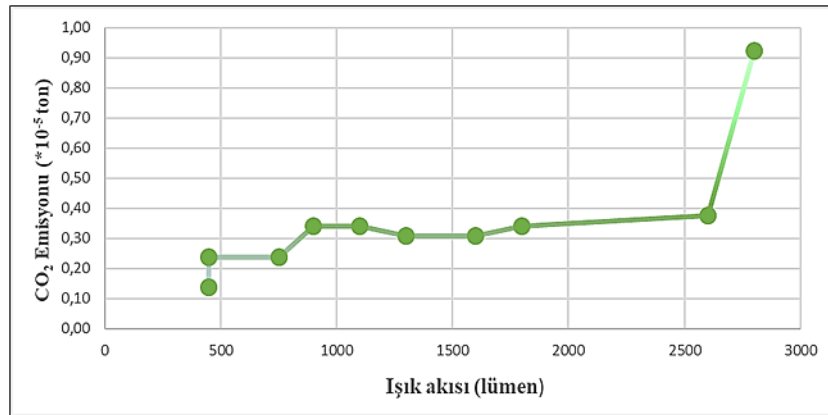
Şekil 4.15. LED - akkor kazanımına göre CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı.

Işık akısı (lümen) değerlerine göre hesaplaması yapılan LED - tasarruflu kazanımı Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Lümen değerleri 450-2800 arasında, kazanım değerleri ise 4-27 Watt aralığında değişmektedir. Örneğin, tasarruflu ampullerin akkor ampül yerine tercih edilmeleri durumunda, 450 lümen değerinde 4 Wattlık bir güç kazanımı sağlanırken, 1600 lümen değerinde 9 Wattlık bir kazanım elde edilmektedir.



Şekil 4.16. Işık akısı değerlerine göre LED - tasarruflu güç kazanımı.

Tasarruflu ampül yerine LED ampül kullanıldığında enerji kazanım miktarı diğer armatür türlerine göre daha az olmaktadır. Sera gazı emisyon kazanımı da aynı oranda, Şekil 4.17'te gösterildiği gibi azalmaktadır. Özellikle 2500-3000 lümen aralığında ampullerin güç kazanımına bakıldığında  $0,9 \cdot 10^{-5}$  ton emisyon salınımı engellenmektedir.



Şekil 4.17. LED - tasarruflu kazanımına göre CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı.

## BÖLÜM 5

### ÖRNEK FABRİKA UYGULAMALARI

Bu tez çalışmasında yapılan metodolojik çalışmalar doğrultusunda, enerjinin etkin ve verimli kullanılması amacıyla imalat sektörü, gıda sektörü ve enerji sektörü sanayi kuruluşları için örnek durum analizleri sayısal olarak incelenmiş ve enerji tasarruf verileri ortaya konulmuştur.

Enerji tüketiminin en fazla olan noktalarda mevcut verimlilik düzeyinin ölçülmesi ve tüketim oranları belirlenmesi, fabrikalardaki enerji verimliliği çalışmasının ilk adımı olmuştur.

Sanayi kuruluşlarında enerjinin etkin ve verimli kullanımını sağlamak amacıyla, Şekil 3.2’de oluşturulan algoritma uygulamasıyla enerji verimliliği modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Enerji verimliliği sağlayacak noktalar için yakıt, proses ve diğer uygulamalardaki sorgulamalar yapılarak, özel değişkenler ve prosesler kullanılmıştır. Enerji kayıp noktaları üzerine yapılan ölçüm ve mevcut sayaçlardaki değerler ışığında, kütle ve enerji denklikleri kurularak hesaplamalar yapılmıştır.

En genel tanımıyla, bu çalışmada; kayıp enerji noktalarındaki enerji verimliliği modellemesi tekniği ile enerji kazanımları elde edilmiştir. Fabrikalarda, maddi kazanımların yanı sıra enerji tasarrufu sağlanarak, CO<sub>2</sub> emisyonlarının düşük seviyede tutulmasıyla birlikte, enerji üretimi sürecinin çevresel etkileri azaltılmaya ve sürdürülebilir bir enerji kullanımının sağlanmasına çalışılmıştır.

#### 5.1. İMALAT SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI

İmalat sektöründe çivi üretimi yapan bir fabrikada yapılan enerji verimliliği çalışmasında, enerji kullanan birimlerdeki mevcut durum incelenmiştir.

Yapılan sorgulamalar ile enerjinin en çok atıldığı birimler tespit edilmeye çalışılmıştır. Elektrik motor sistemleri ve proses ısıtmasında kullanılan yakıt tüketimi noktasında yoğun bir enerji tüketiminin olduğu gözlemlenmiştir. Enerji kayıp noktalarında gerçekleştirilen ölçümler ve mevcut sayaçlardaki değerler dikkate alındığında, kütle ve enerji denklilikleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Enerji kazancı sağlayabilecek her bir ünite detaylı incelenmiştir. Çalışma elektrik motor sistemleri ve yakıt sistemlerinde yapılan güncellemeler ile, önemli bir enerji miktarının kazanılabileceği tespit edilerek modellenmiştir.

### 5.1.1. Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Çivi üretim fabrikasında IE1, IE2 ve IE3 sınıfı motorlardan toplamda 25 adet çivi üretiminde kullanılan elektrik motoru bulunmaktadır. Mevcut elektrik motorlarının teknik verileri incelenerek, yenilenmesi durumunda enerji tasarrufunun yapılacağı üniteler belirlenmiştir. Verimlilik sınıfı IE3 (6 kutup) olan verimli elektrik motorları Çizelge 5.1’de detaylı gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Mevcut ve değiştirilen elektrik motorları teknik özellikleri.

| Motor No | Motor gücü (W) | Verimlilik Sınıfı | Kutup Sayısı | Verimlilik Değeri (%) | Yeni Verimlilik Sınıfı | Yeni Kutup Sayısı | Yeni Verimlilik Değeri (%) |
|----------|----------------|-------------------|--------------|-----------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1        | 22000          | IE1               | 2            | 89,5                  | IE3                    | 6                 | 93                         |
| 2        | 22000          | IE1               | 2            | 89,5                  | IE3                    | 6                 | 93                         |
| 3        | 22000          | IE1               | 4            | 90,5                  | IE3                    | 6                 | 93                         |
| 4        | 22000          | IE1               | 4            | 90,5                  | IE3                    | 6                 | 93                         |
| 5        | 22000          | IE1               | 4            | 90,5                  | IE3                    | 6                 | 93                         |
| 6        | 30000          | IE1               | 6            | 91                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 7        | 30000          | IE1               | 6            | 91                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 8        | 30000          | IE1               | 6            | 91                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 9        | 37000          | IE2               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 10       | 37000          | IE2               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 11       | 37000          | IE2               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 12       | 37000          | IE2               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 13       | 37000          | IE2               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 14       | 37000          | IE2               | 4            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 15       | 37000          | IE2               | 4            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 16       | 37000          | IE2               | 4            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 17       | 45000          | IE2               | 6            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,5                       |
| 18       | 45000          | IE2               | 6            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,5                       |
| 19       | 45000          | IE2               | 6            | 93                    | IE3                    | 6                 | 94,5                       |
| 20       | 30000          | IE3               | 2            | 91,7                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 21       | 30000          | IE3               | 2            | 91,7                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 22       | 37000          | IE3               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 23       | 37000          | IE3               | 2            | 92,4                  | IE3                    | 6                 | 94,1                       |
| 24       | 90000          | IE3               | 4            | 95,4                  | IE3                    | 6                 | 95,8                       |
| 25       | 90000          | IE3               | 4            | 95,4                  | IE3                    | 6                 | 95,8                       |

Denklem 3.17 kullanılarak, farklı verimlilik sınıflarındaki elektrik motorları (toplam 25 adet) için kazanım değerleri hesaplanarak tahmin edilmiştir. Kazanım değerleri, tesis sorumluları ile görüşükten sonra, üretim tesisinin “ortalama günlük 12 saat ve yıllık 365 gün” çalıştığı varsayılarak, toplam enerji kazanım miktarları, enerji kazanım yenilemelerine göre, hesaplanmıştır. Yıllık enerji tüketim bedeli, güncel elektrik birim fiyatı (0,045 \$/kWh) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hesaplanması yapılan tüm veriler Çizelge 5.2’te sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Elektrik motorlarında günlük ve yıllık kazanım değerleri.

| Motor No               | Kazanım Miktarı | Q <sub>KAZANIM</sub> (kW) | Günlük Enerji Kazanımı (kWh) | Yıllık Enerji Kazanımı (kWh) | Yıllık Enerji Kazanım Bedeli (\$) |
|------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Q <sub>KAZANIM 1</sub> | 1               | 0,77                      |                              |                              |                                   |
|                        | 2               | 0,77                      |                              |                              |                                   |
|                        | 3               | 0,55                      |                              |                              |                                   |
|                        | 4               | 0,55                      |                              |                              |                                   |
|                        | 5               | 0,55                      | 5,97                         | 71,75                        | 26192,4                           |
|                        | 6               | 0,92                      |                              |                              | 1201,71                           |
|                        | 7               | 0,92                      |                              |                              |                                   |
|                        | 8               | 0,92                      |                              |                              |                                   |
| Q <sub>KAZANIM 2</sub> | 9               | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 10              | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 11              | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 12              | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 13              | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 14              | 0,4                       | 6,39                         | 76,69                        | 27992,57                          |
|                        | 15              | 0,4                       |                              |                              | 1284,3                            |
|                        | 16              | 0,4                       |                              |                              |                                   |
|                        | 17              | 0,67                      |                              |                              |                                   |
|                        | 18              | 0,67                      |                              |                              |                                   |
|                        | 19              | 0,67                      |                              |                              |                                   |
| Q <sub>KAZANIM 3</sub> | 20              | 0,71                      |                              |                              |                                   |
|                        | 21              | 0,71                      |                              |                              |                                   |
|                        | 22              | 0,62                      |                              |                              |                                   |
|                        | 23              | 0,62                      | 3,41                         | 41,01                        | 14970,83                          |
|                        | 24              | 0,35                      |                              |                              | 686,86                            |
|                        | 25              | 0,35                      |                              |                              |                                   |
| GENEL TOPLAM           |                 | 15,78                     | 189,46                       | 69155,81                     | 3172,87                           |

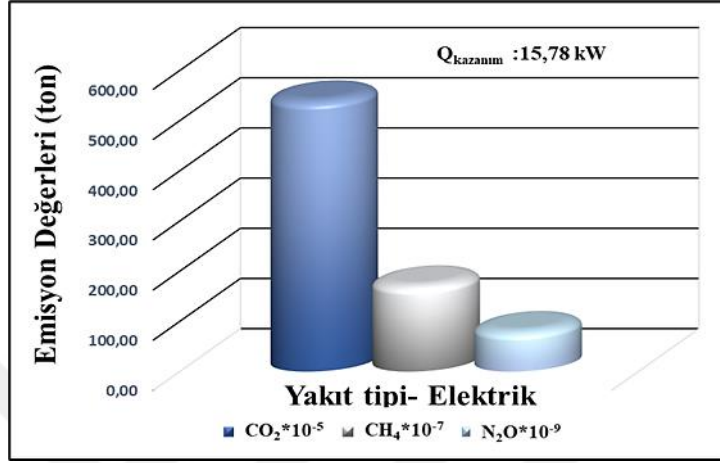
\* Çizelgede 2024 yılı güncel dolar kuru üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Toplam kazanım değeri 15,78 kW olarak öngörülmüştür. Bu kazanım miktarı için EXCEL tabanlı bir program kullanılarak, sıklık değeri “saat” zaman dilimi ve kullanılan enerji tipi elektrik seçilerek, direk sera gazı CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O emisyonları IPCC T1 metodu kullanılarak tahmin edilmiştir (Çizelge 5.3). Ayrıca toplam enerji kazanım miktarı ile emisyon azaltımları arasındaki ilişki Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Çizelge 5.3. Kazanım değerine göre emisyon değerleri.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton.)  | CH <sub>4</sub> (ton)   | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt tipi |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------|
| 15,78         | 539,25*10 <sup>-5</sup> | 170,52*10 <sup>-7</sup> | 79,57*10 <sup>-9</sup> | Elektrik   |



Şekil 5.1. Enerji kazanım ve direk sera gazı emisyon azaltımı.

Elektrik motorları üretim tesislerinde farklı noktalarda kullanılarak, üretime ve kaliteye doğrudan etki etmektedir. Motor sistemlerinde gerçekleştirilen enerji verimliliği çalışmaları, tesisteki enerji verimliliğini etkilediği gibi, enerji tüketiminin belirlenmesinde de önemli bir etmendir. Elektrik motorunun değişimi ile önemli bir enerji kazanımı gerçekleştirilebilmektedir. Saatte 15,78 kW'lık bir enerji geri kazanımı, yıllık toplam 69155,81 kWh'lik bir enerji tasarrufu anlamına gelmektedir. Aynı zamanda 2024 yılı için, elektrik birim fiyatına göre 3172,82 \$'lık ciddi bir enerji maliyeti ekonomik olarak sağlanmaktadır. Sadece bir motor sisteminin veriminin artırılması ile aynı motor için bakım-onarım sorununun ortadan ilave bir ekonomik kazanım sağlamaktadır. Bunun yanında, verimli ve güvenilir bir üretim sağlanırken üretim maliyetinin düşürülmesine önemli bir katkı sağlayacaktır.

### 5.1.2. Yakıt Değişimi ile Enerji Verimliliği

Çivi üretim tesisinin, diğer bir enerji geri kazanım noktası, ısıtmada tüketilen linyit kömürüdür. Mevcut durumda ofis içinde 4 ton linyit yakılarak ısıtma sağlanmaktadır. Linyit yakıt yerine doğalgaz yakıtı kullanılarak enerji tasarrufu Eşitlik 5.1, 5.2, 5.3 ve

5.4 kullanılarak hesaplanmıştır.  $Q_{\text{kazanım}}$  ısı değerler kadar, yakıt verimliliklerine de dayanmaktadır.

$$\eta_{\text{fark}} = \eta_{\text{doğalgaz}} - \eta_{\text{linyit}} \quad (\%) \quad (5.1)$$

( $\eta_{\text{doğalgaz}}$ =Doğalgaz için verimlilik değeri)

( $\eta_{\text{linyit}}$ =Linyit için verimlilik değeri)

### **Kazanım hesabı;**

$$Q_{\text{fark}} = Q_{\text{doğalgaz}} - Q_{\text{linyit}} \quad (5.2)$$

$$Q_{\text{fark}} = 11472,27 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 2844,16 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 8628,11 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (5.2-a)$$

Mevcut durumda 4 ton linyit yakıldığında;

$$Q_{\text{linyit,cal}} = Q_{\text{linyit}} * \text{Kullanılan yakıt miktarı} \left( \frac{\text{kg}}{\text{gün}} \right) \quad (5.3)$$

$$Q_{\text{linyit,cal}} = 2844,16 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 4000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{gün}} \right) = 11376672 \text{ kcal} \quad (5.3-a)$$

enerji sağlamaktadır. 11376672 kcal'lık enerji elde etmek için gerekli doğalgaz miktarı;

$$Q_{\text{linyit,cal}} = Q_{\text{doğalgaz,cal}} = m_{\text{doğalgaz}}(\text{kg}) * Q_{\text{doğalgaz}} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \quad (5.4)$$

$$m_{\text{doğalgaz}}(\text{kg}) = \frac{11376672 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)}{11472,27 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)} = 991,67 \text{ kg} = \frac{991,67 \text{ kg}}{0,7 \text{ kg/m}^3} = 1428,1 \text{ m}^3 \quad (5.4-a)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Sonuçlara göre, enerji için çok daha az miktarda doğalgaz kullanımı ile tüketilen enerjiye denk enerji sağlanabilmektedir. Ayrıca doğalgazın çevreye olan etkisi linyit kömürüne göre oldukça azdır.

Aynı oranda enerji sağlamak için, linyit ve doğalgaz tüketim karşılaştırıldığında, enerji birim fiyatları dikkate alınarak maliyet karşılaştırılması yapıldığında;

$$\text{Linyit birim fiyatı: } 2,177 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \rightarrow 4000 \text{ (kg)} * 2,177 \left( \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \right) = 8708 \text{ TL} \quad (5.5)$$

$$\text{Doğalgaz birim fiyatı: } 7,148 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \rightarrow 991,67 \text{ (kg)} * 7,148 \left( \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \right) = 7088 \text{ TL} \quad (5.6)$$

Isıtma işleminde, linyit kullanımı, doğalgaz kullanımına göre daha ekonomik değildir. Eşit miktarda yakıt yakılması durumunda, doğalgazdan alınan enerji kazanımı daha fazladır (Eşitlik 5.7).

Emisyon hesaplaması için linyit 4 ton yakılmıştır, aynı oranda enerji miktarı üretebilmek için 991,67 kg doğalgazın tüketilmesi gerekmektedir. Aynı oranda enerji tüketildiği varsayıldığında (550,9 kJ/s), linyit ve doğalgaz tüketimi ile aynı ısı transfer oranı elde edilecektir (Eşitlik 5.7-a ve 5.7-b).

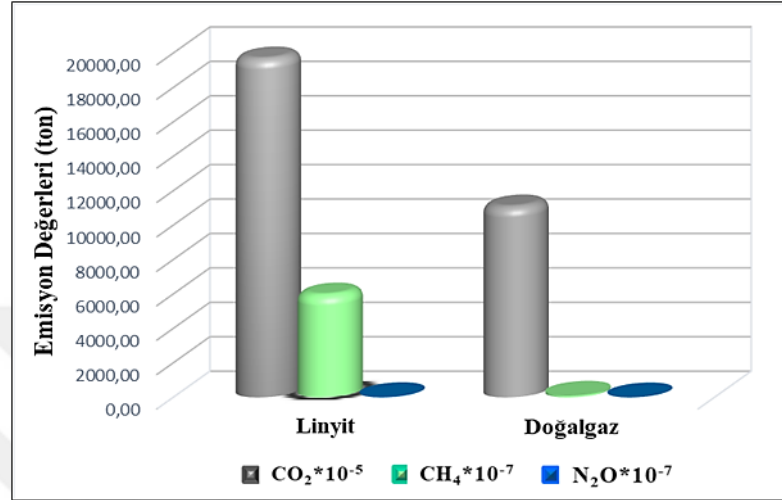
$$\begin{aligned} Q_{\text{liniyit}} &= 2844,16 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 4000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{gün}} \right) * \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \\ &= 47599995,65 \text{ kJ} = \frac{47599995,65}{24*60*60} = 550,9 \text{ kJ/s} \end{aligned} \quad (5.7-a)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{doğalgaz}} &= 11472,27 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 991,67 \text{ kg} \left( \frac{\text{kg}}{\text{gün}} \right) * \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \\ &= 47600137,87 \text{ kJ} = \frac{47600137,87}{24*60*60} = 550,9 \text{ kJ/s} \end{aligned} \quad (5.7-b)$$

EXCEL tabanlı program kullanılarak yapılan hesaplamalarda, kazanım değeri için emisyon değerleri incelendiğinde, doğalgazın çevre dostu bir yakıt olduğu görülmektedir. Atmosfere salınan kirletici emisyonlar incelendiğinde, doğalgaz yakıtının, linyit tüketimi ile karşılaştırıldığında, linyit tüketiminden kaynaklanan emisyonun yarısı kadar bir emisyon yaratıldığı görülmektedir. Çizelge 5.4'te olası yakıt değişimi ve aynı miktar enerji tüketimi için, kazanım değerlerine göre, farklı emisyon azaltım miktarları görülmektedir. Şekil 5.2'de kazanım değerlerinin, emisyon azaltımı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı yakıtların kazanım değerine göre emisyon değerleri.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton)     | CH <sub>4</sub> (ton)    | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt tipi |
|---------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------|
| 550,9         | 19669,15*10 <sup>-5</sup> | 5949,72*10 <sup>-7</sup> | 27,76*10 <sup>-7</sup> | Linyit     |
| 550,9         | 11070,44*10 <sup>-5</sup> | 99,16*10 <sup>-7</sup>   | 1,98*10 <sup>-7</sup>  | Doğalgaz   |



Şekil 5.2. Değişen yakıt miktarına göre, emisyon azaltımı.

## 5.2. GIDA SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI

Gıda sektöründe üretim yapan üretim tesisinde gerçekleştirilen, enerji verimliliği çalışmasında, enerjiyi tüketen her bir birimin, mevcut durumu detaylı incelenerek, algoritmik sorgulamalar ile, enerjinin tüketimi sistem detayında çalışılmıştır. Fabrika üretim alanında verimsiz çok sayıda aydınlatma armatürlerinden geri kazanımın çok yüksek olabileceği çalışmalar ile tespit edilmiştir.

Enerji kaybı noktaları üzerinde yapılan ölçümler ve elektrik tüketim sayaç değerleri dikkate alınarak, verimsiz armatürlerin verimli armatürler ile değiştirilmesi ile enerji kazanımı hedeflenmiştir.

### 5.2.1. Aydınlatma Armatürü Değişimi ile Enerji Verimliliği

Gıda fabrikasında aydınlatma alanında verimlilik uygulaması yapılması için yapılan değerlendirmelerde, mevcut armatürlerin akkor ve tasarruflu ampullerle donatıldığı tespit edilmiş ancak yeni tip teknolojik LED armatürlerinin kullanılmadığı

belirlenmiştir. Çizelge 5.5'te Gıda üretim tesisinde aydınlatma kullanım bilgileri verilmiştir.

Çizelge 5.5. Gıda fabrikası aydınlatma kullanım bilgileri.

| Armatür Çeşidi   | Armatür Adedi | Armatür Gücü (Watt) | Gün/Yıl | Saat/Gün | Elektrik Birim Fiyatı (\$) * |
|------------------|---------------|---------------------|---------|----------|------------------------------|
| Akkor Ampül      | 60            | 60                  | 365     | 12       | 0,045                        |
| Tasarruflu Ampül | 35            | 18                  |         |          |                              |

\* Çizelgede 2024 yılı güncel dolar kuru üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Bütün armatürlerin teknolojik LED ile değiştirilmesi durumunda, yapılan fizibilite analizi ile fabrika için hazırlanan raporda enerji kazanım miktarı ile 2 yıldan daha az bir sürede LED aydınlatmaların, kendini amorti edeceği öngörülmektedir. Tesiste, enerjinin en verimli şekilde kullanılabilmesi için, aydınlatma armatürleri LED ampül ile hazırlanan rapor sonrasında değiştirilmiştir. Kullanılan LED ampulün ortalama gücü 8 Watt olarak alınmıştır. LED ampül, tasarruflu ampül ve akkor ampül yerine kullanıldığında watt cinsinden kazanım değeri aşağıda formüle edildiği gibi hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.8):

$$Q_{\text{kazanım1}} = (Q_A - Q_L) * \text{Armatür adedi} \quad (W) \quad (5.8)$$

Burada;

$Q_L$  =Led ampül enerji kullanım miktarı (W)

$Q_T$  =Tasarruflu ampül enerji kullanım miktarı (W)

$Q_A$  =Akkor ampül enerji kullanım miktarı (W)

Akkor ampül yerine LED ampül kullanılması durumunda, enerji kazanımı, Eşitlik 5.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Günlük enerji tüketimi 12 saat, yıllık enerji tüketimi 365 gün kabul edilmiştir. Değişkenlerin belirlenmesinde, fabrikada çalışan uzman görüşlerine yer verilmiştir. Yıllık enerji tüketim bedeli, güncel elektrik birim fiyatı dikkate alınarak kur miktarına göre, dolar cinsinde hesaplanmıştır. Hesaplanma için yapılan tüm veriler Çizelge 5.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 5.6. Akkor aydınlatmanın LED aydınlatma kullanılarak iyileştirilmesi.

| HESAPLANAN VERİLER                           | Kazanım Miktarı-1 | Mevcut Enerji Tüketimi (Akkor) | İyileştirilmiş Enerji Tüketimi (LED) |
|----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| $Q_{KAZANIM1}$                               | 3,12              | 3,6                            | 0,48                                 |
| $Q_{KAZANIM1}$ -Günlük Enerji Tüketimi (kWh) | 37,44             | 43,2                           | 5,76                                 |
| $Q_{KAZANIM1}$ -Yıllık Enerji Tüketimi (kWy) | 13665,6           | 15768                          | 2102,4                               |
| Yıllık Enerji Tüketim Bedeli (\$)            | 626,97            | 723,43                         | 96,45                                |

\* Çizelgede 2024 yılı güncel dolar kuru üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Tasarruflu ampül yerine LED ampül kullanılarak, enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Enerji kazanımı Eşitlik 5.9 ile hesaplanmıştır. Günlük ortalama 12 saat ampullerin kullanıldığı ve fabrikanın her gün çalışması sebebiyle, yıllık enerji tüketimi 365 gün için hesaplanmıştır. Yıllık enerji tüketim bedeli, güncel elektrik birim fiyatı dikkate alınarak dolar cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplanması yapılan tüm veriler Çizelge 5.7’de sunulmuştur.

$$Q_{kazanım2} = (Q_T - Q_L) * \text{Armatür adedi} \quad (W) \quad (5.9)$$

Çizelge 5.7. Tasarruflu yerine LED aydınlatma kullanıldığında enerji kazanımı.

| HESAPLANAN VERİLER                           | Kazanım Miktarı-2 | Mevcut Enerji Tüketimi (Tasarruflu) | İyileştirilmiş Enerji Tüketimi (LED) |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $Q_{KAZANIM2}$                               | 0,35              | 0,63                                | 0,28                                 |
| $Q_{KAZANIM2}$ -Günlük Enerji Tüketimi (kWh) | 4,2               | 7,56                                | 3,36                                 |
| $Q_{KAZANIM2}$ -Yıllık Enerji Tüketimi (kWy) | 1533              | 2759,4                              | 1226,4                               |
| Yıllık Enerji Tüketim Bedeli (\$)            | 70,33             | 126,6                               | 56,26                                |

\* Çizelgede 2024 yılı güncel dolar kuru üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 5.6 ve 5.7’de hesaplanan veriler doğrultusunda günlük ve yıllık periyotlar için enerji kazanım değerleri Eşitlik 5.10 esas alınarak hesaplanmıştır. Verimsiz aydınlatma armatürleri yerine LED aydınlatma kullanılarak toplam iyileştirilmiş enerji tüketim değerleri (kW – kilowatt) ve tüketim bedelleri dolar cinsinden bulunmuştur.

Bir günlük enerji kazanımı (Eşitlik 5.10);

$$Q_{günlük} = (Q_{kazanım1} + Q_{kazanım2}) * \left( \frac{12 \text{ saat}}{1 \text{ gün}} * \frac{60 \text{ dakika}}{1 \text{ saat}} * \frac{60 \text{ saniye}}{1 \text{ dakika}} \right) (J/gün) \quad (5.10)$$

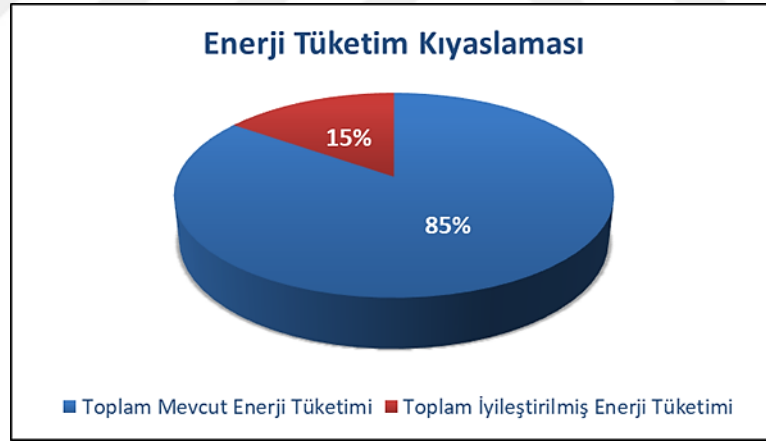
şeklinde hesaplanmaktadır.

Çizelge 5.8. Toplam enerji kazanım ve tüketim miktarları.

| HESAPLANAN VERİLER                                                        | Toplam Kazanım | Toplam Mevcut Enerji Tüketimi | Toplam İyileştirilmiş Enerji Tüketimi |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| $Q_{\text{TOPLAM-KAZANIM}}$                                               | 3,47           | 4,23                          | 0,76                                  |
| Günlük Enerji Tüketimi( $Q_{\text{KAZANIMI}}+Q_{\text{KAZANIM2}}$ ) (kWh) | 41,64          | 50,76                         | 9,12                                  |
| Yıllık Enerji Tüketimi( $Q_{\text{KAZANIMI}}+Q_{\text{KAZANIM2}}$ ) (kWy) | 15198,6        | 18527,4                       | 3328,8                                |
| Yıllık Enerji Toplam Tüketim Bedeli (\$)                                  | 697,3          | 850,03                        | 152,71                                |

\* Çizelgede 2024 yılı güncel dolar kuru üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 5.8’de gösterildiği gibi enerji tüketim verileri kullanılarak, yıllık toplam tüketilen enerji için ödenen bedel 152,71 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Armatürlerde yapılan iyileştirmeler sonucunda, LED tipi aydınlatmanın diğer aydınlatma çeşitlerine göre daha verimli olduğu görülmektedir. Şekil 5.3’te özetlenmeye çalışıldığı gibi, “**LED armatürler**” 1 birim enerji kullanırken, “Tasarruflu armatür” 5 birim enerji tüketmektedir. Doğru aydınlatma seçimi ve enerjinin etkin kullanılması ile üretim tesisleri için önemli sayılabilecek bir enerji tasarrufu sağlanarak, ekonomik girdi oluşturulabilmektedir.

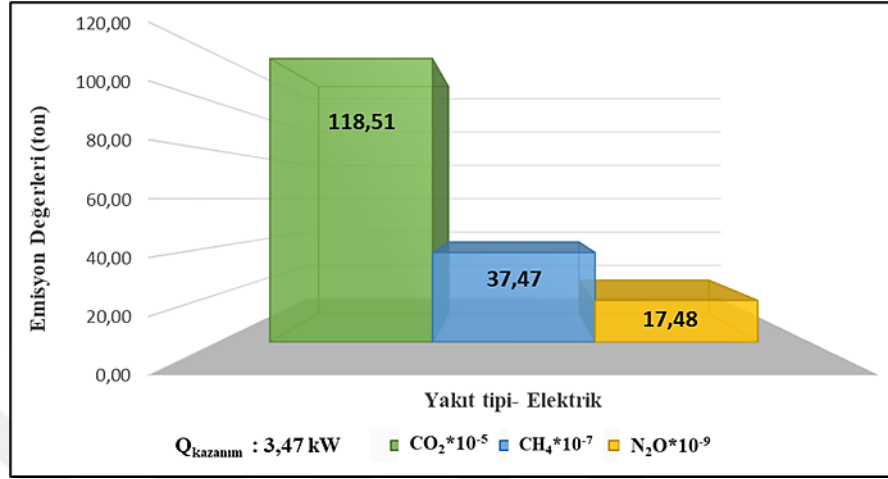


Şekil 5.3. Enerji tüketim verilerinin iyileştirilmiş tüketim ile karşılaştırılması.

Aydınlatma armatürlerinin verimli aydınlatma olan LED tipi armatür ile değiştirilmesi sonucunda 3,47 kWh’lik bir kazanım sağlanmaktadır. Bu kazanım değerine göre atmosfere salınan kirletici emisyon değerleri, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O gazları için elde edilmiştir (Çizelge 5.9). Ayrıca Şekil 5.4’te, enerji kazanım değerleri ile emisyon azaltım miktarları bağıntısı gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Enerji kazanım değerlerine göre emisyon azaltımı.

| Qkazanım (kW) | CO <sub>2</sub> (ton)   | CH <sub>4</sub> (ton)  | N <sub>2</sub> O (ton) | Yakıt tipi |
|---------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| 3,47          | 118,51*10 <sup>-5</sup> | 37,47*10 <sup>-7</sup> | 17,48*10 <sup>-9</sup> | Elektrik   |



Şekil 5.4. Enerji kazanım miktarının azalttığı emisyon miktarı.

### 5.3. ENERJİ SEKTÖRÜ İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMASI

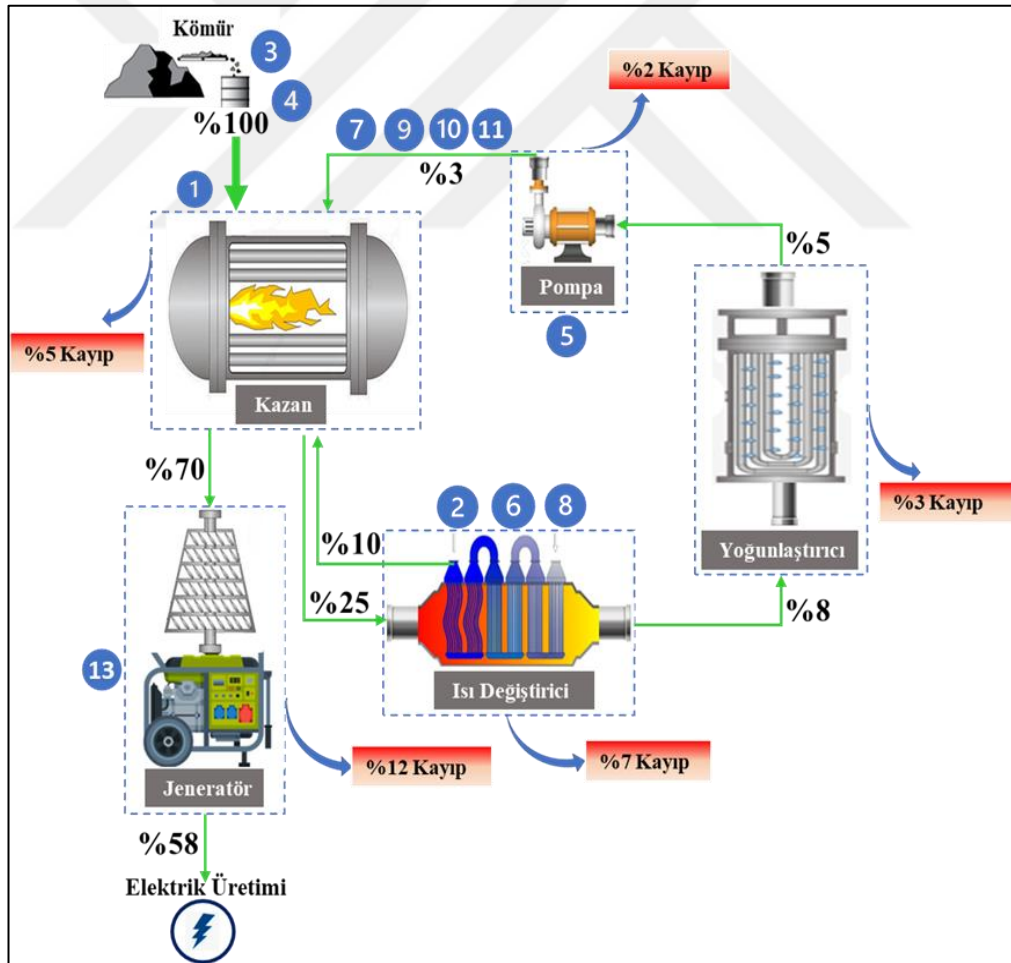
Enerjisini kendi tesislerden karşılayan ve faaliyet alanı madencilik ve kimya sektörü olan firmanın, enerji verimliliği analizi sayısal olarak araştırılmıştır. Elektrik enerjisi, Trijenerasyon sistemi ile üretilmektedir. Isıtma ve soğutma sistemleri de olan ünite, fabrikanın ihtiyaç duyduğu farklı enerji taleplerini karşılamaktadır. Tesis enerji üretim sistemlerinde, olası enerji kaybının olduğu birimler için planlanan uygulamalar; verimlilik modeline göre aşağıda maddeler şeklinde sıralanmıştır:

1. Kayıpları minimize etmek, enerjinin etkin ve verimli olarak kullanılmasını sağlamak amacı ile mevcut durum analizinin yapılması,
2. Enerji tesisindeki sistem ve bileşenlerin gruplandırılması,
3. Mevcut verimlilik düzeyinin ölçülmesi ve tüketim oranları hesaplanması,
4. Enerji kaybının olduğu üniteler için uygulanabilecek en etkin ve iyi tekniklerin araştırılması,
5. Yöntemlerin verimliliği artırılması,
6. Giriş-çıkış verilerinin kullanılarak matematiksel denklemler oluşturulması,



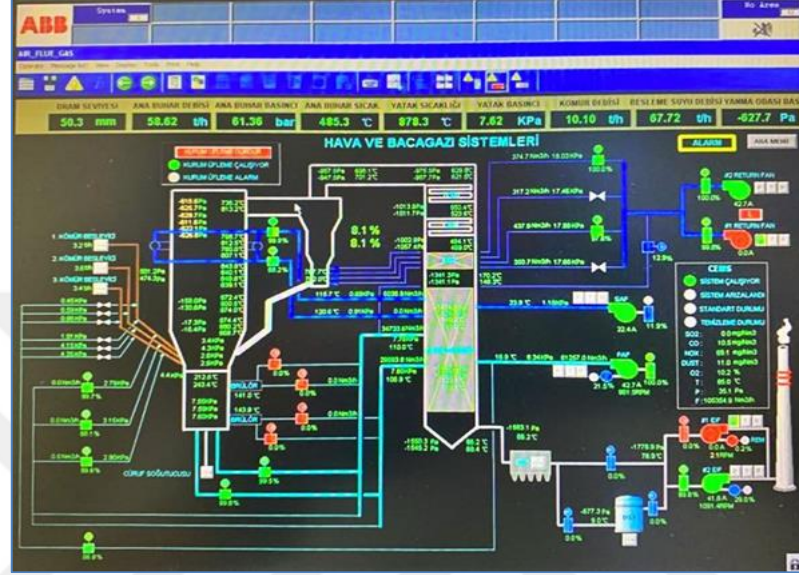
7. Enerji kayıp noktaları için yöntemler ve modeller kullanılarak hesaplamaların yapılması ve enerji kazanım değerlerinin bulunmasıdır.

Çalışmalar doğrultusunda sistemdeki enerji dağılımı, kayıp yüzdeler ve yöntem sıralaması Şekil 5.5'te şematik olarak gösterilmektedir. Sisteme 100 birim olarak giren endekslenmiş enerji miktarı, sistemden toplamda 71 birim olarak çıkmaktadır. Sistemdeki 29 birim enerji atık enerji olarak sistemden atılmaktadır. Yapılan uygulamalar ve iyi teknikler ile enerji geri kazanımı ve verimlilik değeri önemli ölçüde arttırılmıştır. Model uygulamasındaki yalıtım ve ısı değıştircileri üretim tesisinde uygulanmış ve %100 başarı elde edilmiştir. Uzun vadeli yatırım programlarında, model enerji verimliliği iyileştirmelerin tamamının üretim tesisinde uygulanması planlanmaktadır.



Şekil 5.5. Sistem enerji üretimi ve kayıpları.

Fabrikada kullanılan enerji yazılım programı ile enerji üretimi ve emisyonları takip edilmektedir. Değişkenlerin (enerji dağıtım hatları, sistem ve bileşenler, sıcaklık, basınç, emisyon vb.) girdi ve çıktı verileri saatlik ve anlık olarak kontrol edilmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Fabrika sistem kontrolü ve enerji dağılımı programı.

Çizelge 5.10’da sistemlerde kullanılan yöntemler ve verimlilik yüzdeleri verilmiştir. Toplam 12 adet iyileştirme yöntemin kullanılabileceği öngörülmüştür. Bu yöntemler tespit edilen uygulama noktaları için çalışılmıştır. Uygulama noktaları; kazan sistemleri, ısı değiştirici, pompa, jeneratör ve genel sistem şeklinde sınıflandırılmıştır [285].

### 5.3.1. Kazana Uygulanan Yöntemler

Kazan sisteminde kömür kullanılarak yakma işlemi yapılmaktadır. Sistemde 5 birim enerji kaybı bulunmaktadır. Kayıp minimize edilmek için, Karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) Yakalama, Gazlaştırma ve Yakıt Nemini Alma yöntemleri uygulanmıştır [286,287,288].

Çizelge 5.10. Sistemlerde kullanılan yöntemler ve verimlilik yüzdeleri.

| Yöntem | Yöntem Adı                                    | Verimlilik Değeri (%) | Uygulama Noktası    | Referans |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------|
| 1      | CO <sub>2</sub> Yakalama                      | 40                    | Kazan Sistemleri    | [290]    |
| 2      | Isı Kazanımı                                  | 35                    | Isı Değiştirici     | [307]    |
| 3      | Katı Yakıt                                    | 48-54                 | Kazan Sistemleri    | [297]    |
|        | Bio Yakıt                                     | 13                    |                     | [298]    |
| 4      | Yakıt Nemini Alma                             | 43                    | Kazan Sistemleri    | [303]    |
| 5      | Isı Pompası Kullanma                          | 35                    | Pompa               | [319]    |
| 6      | Rejenerasyon Sisteminin Yerleştirilmesi       | 10-30                 | Isı Değiştirici     | [311]    |
| 7      | Yalıtılmış ise                                | 2-3                   | Genel Tüm Sistemler | [325]    |
|        | Yalıtılmamış ise                              | 98                    |                     | [326]    |
| 8      | Isı Değiştiricilerinin Yüzeyinin Arttırılması | 10                    | Isı Değiştirici     | [315]    |
| 9      | Boyut İndirgeme                               | 18                    | Genel Tüm Sistemler | [331]    |
| 10     | Otomasyon İşlemleri                           | 50                    | Genel Tüm Sistemler | [333]    |
| 11     | Proses Parametrelerinin Optimizasyonu         | 13,65                 | Genel Tüm Sistemler | [337]    |
| 12     | Yeni Jeneratör ile Değişim                    | 30                    | Jeneratör           | [34]     |

#### 5.3.1.1. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Yakalama

Karbondioksit yakalama ile verimlilik artırılmıştır. Enerji kullanımının daha verimli olmasını sağlamak ve enerji santrallerinin çevresel etkilerini azaltmak çalışmanın temel amacıdır. CO<sub>2</sub> yakalama, enerji santralinin atık gazlarında bulunan CO<sub>2</sub> gazını ayırmak için ek bir iyileştirme sağlamaktadır. Enerji üretimi sürecinde bu yöntem ile daha fazla verimlilik sağlanmaktadır [289].

Karbondioksit yakalama yöntemini kullanıldığında, enerji verimliliği %40 arttırılabilmektedir [290]. Enerji kaybını minimize etmek için bu yöntemin kullanılması sistem iyileştirmeleri için iyi bir teknik olarak kabul edilmektedir. Kayıp olan enerji, %40 oranında geri kazanılabilmektedir. Ancak sistemin uygulama noktası basınç, sıcaklık, verimli yakma ve diğer parametreleri, bu yöntemi etkileyebilmektedir [291]. İyileştirilmiş kayıp enerji Eşitlik 5.11 kullanılarak hesaplanmış ve  $H_{fark1}$  olarak ifade edilmiştir [292]. Tesis için yapılan çalışmada 3 birim enerji kazanılması öngörülmektedir.

$$H_{fark1} = \eta_{kayıp} - \eta_{kazanılan} = 5 - \left(5 * \frac{40}{100}\right) = 3 \quad (\%) \quad (5.11)$$

Burada;

$H_{fark1}$ : İyileştirilmiş kayıp enerji (%),

$\eta_{kayıp}$ : Kayıp enerji (%),

$\eta_{kazanılan}$ : Kazanılan enerji (%).

### 5.3.1.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma işlemi, yakıtın yüksek sıcaklıklardaki kontrollü bir ortamda buhar veya oksijenle reaksiyona girmesini sağlamaktadır. İşlem sırasında, yakıtın içerdiği su, buhar haline dönüşür ve gazlaştırma ünitesinden çıkan gazın nem içeriği düşürmektedir [293].

Yakıtın verimli yanması, atık gaz emisyonlarının kontrolü ve uygun filtreleme sistemlerinin kullanılması, verimliliği maksimum seviyede tutmak için önemli faktörlerdir [294]. Katı yakıtlar, yanma işlemi süresince ısı içeriğine yüksek seviyede tutabilmektedir. Bu nedenle kojenerasyon sistemlerinde yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Yakıtın yanma sıcaklığının kontrol edilmesi ve optimize edilmesiyle, yakıttan elde edilen ısı enerjisi maksimum seviyede kullanılabilir. Bu, elektrik ve ısı üretiminde daha verimli bir şekilde enerji elde edilmesini sağlamaktadır [295]. Atık gaz emisyonlarının kontrol altına alınması ve partikül madde emisyonlarının azaltılması için uygun teknikler kullanılmalıdır. Modern filtreleme ve arıtma teknolojileri, katı yakıtla çalışan kojenerasyon sistemlerinde çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olurken, daha temiz bir enerji üretimi sağlanması ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir [296].

Elektrik üretimi yapan entegre bir sistem için yüksek termal verimliliğe ve yakıt tüketimini azaltması amacı ile kullanılan katı yakıt gazlaştırma işlemi uygulanması sistem enerji kullanımını ve enerji verimliliğini arttırmaktadır. Yakıt hazırlama ünitesi ve linyit kurutma sistemi ile gazlaştırmanın birleşik analizini yapıldığında, sistemdeki kayıp enerjinin büyük bölümünün kazanıldığı ve verimliliğin, bu yöntem ile %48-54 oranında arttırılmıştır [297]. Kojenerasyon sisteminde ekserji ve enerji analizi yapılarak, bio yakıt kullanıldığında, gazlaştırma işlemi ile yaklaşık %13 enerji verimliliği sağlanmıştır [298].

Yapılan çalışmalar dikkate alındığında, kömür tüketimi için gazlaştırma yöntemi uygulandığında, kayıp olan enerji miktarı, %54 oranında geri kazanılmıştır. İşlem sonucunda iyileştirilmiş kayıp enerji Eşitlik 5.12'ye göre hesaplanmış ve  $H_{fark2}$  olarak 1,38 birimlik iyileştirme ile geri kazanım miktarı hesaplanmıştır.

$$H_{fark2} = H_{fark1} - \eta_{kazanilan} = 3 - \left(3 * \frac{54}{100}\right) = 1,38 \quad (\%) \quad (5.12)$$

### 5.3.1.3. Yakıt Nemini Alma

Yakıt nemini alma işlemi, yakıtın daha verimli bir şekilde yanmasını sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Nemli yakıt, yanma sürecini olumsuz etkilemektedir. Özellikle katı yakıtlarda nemli yakıtların yanması, yakıtın daha düşük sıcaklıklarda yanmasına ve yanma verimliliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Bu durum, daha fazla enerji kaybına ve ısı transfer verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Hangi yöntemin kullanılacağı, kullanılan yakıt türüne, sistem gereksinimlerine ve koşullara bağlı olarak değişebilmektedir. Yakıt nemini alma yöntemleri aşağıdaki gibi olmaktadır [299,300,301]:

1. **Kurutma:** Yakıtın nemini almanın en yaygın yöntemlerinden biri, yakıtı kurutmaktır. Bu işlem genellikle, yakıtı yüksek sıcaklıkta veya düşük nemli bir ortamda tutarak gerçekleştirilmektedir. Örneğin, odunun güneşte veya özel kurutma sistemlerinde kurutulması gibi yöntemler kullanılabilmektedir. Bu sayede yakıtın içerdiği su miktarı azalır ve yakıtın yanma verimliliği artar.
2. **Önceden Hazırlanmış Yakıt:** Bazı durumlarda, yakıtın nemini alma işlemi yakıtı önceden hazırlayarak gerçekleştirilir. Örneğin, biyokütleden elde edilen yakıtların önceden kurutulması veya işlenmesi, yakıtın nem içeriğini azaltır. Bu şekilde, kojenerasyon sistemlerinde daha verimli bir yanma sağlanabilmektedir.
3. **Yakıt Depolama:** Yakıtın nemli ortamlarda depolanması, nemin yakıtı nüfuz etmesine ve nem içeriğinin artmasına neden olabilmektedir. Yakıtın nemli bir şekilde kullanılmasına ve yanma verimliliğinin düşürmektedir. Nemli

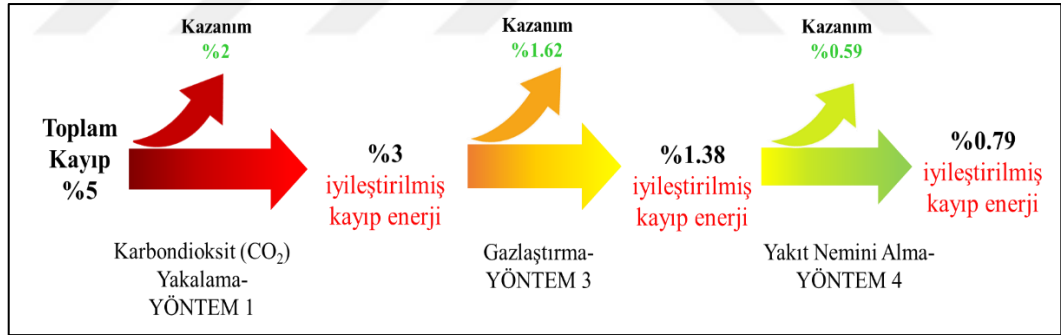
depolama ortamlarından kaçınmak ve yakıtın kuru bir ortamda depolanması sağlamak etkili bir yöntemdir [302].

Kojenerasyon sistemlerinde, linyit ön kurutma ünitesi ile yakıtı önceden kurutma işlemine tabi tutularak, yakıt nemi azaltmış ve enerji verimliliği %43'e varan bir oranda arttırılmıştır [303]. Yakıt nemi alma yöntemi uygulandığında, kayıp enerji %43 oranında geri kazanılmıştır. İşlem sonucunda iyileştirilmiş kayıp enerji Eşitlik 5.13'e göre hesaplanmış ve  $H_{fark3}$  olarak 0,79 birim enerji iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

$$H_{fark3} = H_{fark2} - \eta_{kazanilan} = 1,38 - \left(1,38 * \frac{43}{100}\right) = 0,79 \quad (\%) \quad (5.13)$$

Toplam enerji kazanımı, Eşitlik 5.14 ile hesaplanmıştır (Şekil 5.7).

$$\eta_{Kazanım1} = \eta_{kayıp} - H_{fark3} = 5 - 0,79 = 4,21 \quad (\%) \quad (5.14)$$



Şekil 5.7. Kazan sistemlerindeki enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri.

### 5.3.2. Isı Değiştiricilerine Uygulanan Yöntemler

Isı değiştiriciler, endüstriyel fabrikalarda sistemdeki atık ısının geri kazanılmasının en temel yöntemlerinden birisidir. Farklı ticari cihazlar, ısı transferi sağlayarak enerji kazancını arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan bir akışkanın ısını daha düşük sıcaklıktaki bir akışkana aktarmak için bu cihazlar kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıkta çalışan bir proses, daha yüksek sıcaklıktaki bir proses tarafından kullanılmayan enerji ile beslenirken, sistem enerji tüketimini de azaltılabilmektedir [304].

Sistemde kullanılan ısı değıştiricisinde 7 birim enerji kaybı söz konusudur. Kayıp, minimize edilmek için, ısı kazanımı, rejenerasyon sistemlerinin yerleştirilmesi ve ısı değıştiricilerinin yüzey alanının artırılması yöntemleri, toplam kayıp oranlarını azaltılmak için uygulanmıştır.

#### 5.3.2.1. Isı Kazanımı

Kojenerasyon sistemlerinde ısı kazanımının sağlanması ısı değıştiriciler kullanılmaktadır. Isı değıştiriciler, enerji santralinden çıkan atık ısıyı tutarak, ısıyı farklı bir akışkan vasıtasıyla, üretim sürecinde kullanılabilir. Böylece ısı geri kazanımı ile enerji tasarrufu elde edilmektedir. Isı değıştirici için kullanılan akışkanın ısı, su buharı üretimi için kullanılmaktadır. Buhar, endüstriyel işlemlerde temel bir enerji taşıyıcısıdır. Isı değıştiriciler buhar üretiminde enerji verimliliğini büyük oranda artırmaktadır [305].

Verimli bir ısı değıştirici tasarımı, malzeme seçimi, akışkanların akış düzeni, ısı transfer yüzey alanı gibi temel parametrelerin yanında, basınç ve sıcaklık faktörleri gibi temel parametrelere bağlıdır [306].

Enerji tüketimine bağlı, enerji ve ekserji kaybından tasarruf etmek için, ısı kazanımı ile %35'e varan enerji verimliliği elde edilebilmektedir [307]. Yapılan çalışmalarda enerji kaybının azaltılması için, bu yöntem etkin bir teknik olarak kabul edilmektedir. Kayıp enerji Eşitlik 5.15 kullanılarak hesaplanmış ve  $H_{fark1}$  olarak ifade edilmiştir.

$$H_{fark1} = \eta_{kayıp} - \eta_{kazanılan} = 7 - \left(7 * \frac{35}{100}\right) = 4,55 \quad (\%) \quad (5.15)$$

Burada;

$H_{fark1}$ : İyileştirilmiş kayıp enerji (%),

$\eta_{kayıp}$ : Kayıp enerji (%),

$\eta_{kazanılan}$ : Kazanılan enerji (%).

### 5.3.2.2. Rejenerasyon Sistemlerinin Yerleştirilmesi

Rejenerasyon, kullanılan enerjinin bir kısmının geri kazanılması ve tekrar kullanılması anlamına gelmektedir. Sistem, atık ısıyı yakalayarak, yeniden kullanılabilir enerji elde etmeye yardımcı olmaktadır [308].

Rejenerasyon sistemler, kojenerasyon sistemlerinin tasarım aşamasında dikkate alınarak, yerleştirilmelidir. Isı geri kazanımı potansiyeli yüksek olan üretim noktaları dikkatle değerlendirildikten sonra rejenerasyon sistemleri tesise entegre edilmektedir. Örneğin, ısı geri kazanımı için ısı değiştiriciler, ısı pompaları veya termal depolama sistemleri gibi farklı teknolojiler kullanılabilir. Bu teknolojilerin sistem entegrasyonu, fiziksel altyapı ile direk uyumludur [309]. Isı geri kazanımı için uygun ekipmanların ve tesisatın tasarlanması ve optimizasyonu sistemin verimli çalışması için gerekmektedir [310].

Kömür kullanılarak yakma işlemi yapılan kazan sistemlerinin modernizasyonu ile ısı kazanımına etkisi detaylı araştırılmış ve yapılan bir çalışmada verimlilik değeri %30 seviyelerine kadar çıkarılmıştır [311]. Çalışma baz alınarak tesisin kayıp enerjisi üstüne, yapılabilecek olası iyileştirmeler ile %30 oranındaki geri kazanım miktarı öngörülmektedir. Eşitlik 5.16 kullanılarak yapılmış hesaplama ile, fabrikadaki  $H_{fark2}$  değeri yaklaşık olarak %3,19 olarak elde edilmiştir.

$$H_{fark2} = H_{fark1} - \eta_{kazanilan} = 4,55 - \left(4,55 * \frac{30}{100}\right) = 3,19 \quad (\%) \quad (5.16)$$

### 5.3.2.3. Isı Değiştiricilerinin Yüzey Alanının Artırılması

Daha geniş bir yüzey alanı, ısı transferinin daha etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Sistemlerde kullanılan ısı değiştiricilerinin performansının iyileştirilebilmesi için kullanılan yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır [312,313,314]:

1. **Kanatlı Yüzeyler:** Isı değiştiricilerin yüzeylerine kanatlar eklenerek, yüzey alanını artırılmaktadır. Kanatlar, yüzeyin genişlemesini sağlayarak daha fazla



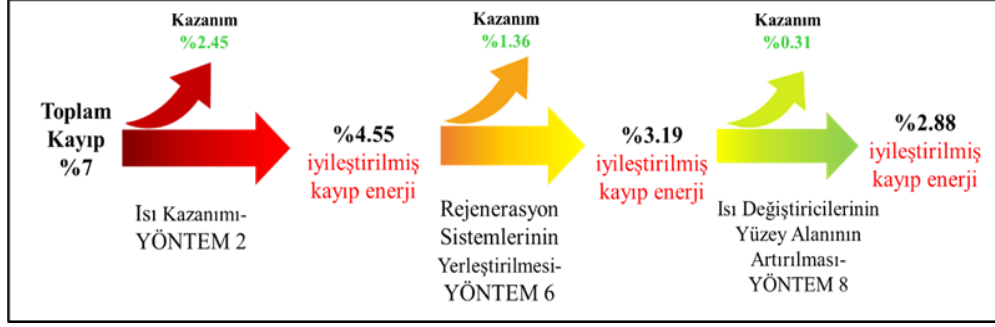
ısı transfer gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kanatlı yüzeyler, daha fazla sıcaklık farkını alarak veya kullanım durumuna göre yayarak amaca hizmet edebilmektedir.

2. **Tüplerin Düz veya Dalgalı Yapıda Olması:** İki akışkan arasında ısı transferini gerçekleştiren tüplerin düz veya dalgalı bir yapıya sahip olması, yüzey alanını artırmaktadır. Dalgalı tüpler, daha fazla yüzey alanı ile ısı transferinin etkinliğini artırırken, yüksek verimliliği de sağlamaktadır.
3. **Plakalı Yüzeyler:** Plakalı ısı değiştiriciler, çok sayıda ince plakanın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Plakalar arasındaki kanallar, akışkanların geçtiği yolları oluşturmaktadır. Bu durum daha büyük bir yüzey alanı sağlarken, ısı transferini artırmaktadır. Plakaların düzeni ve akışkanların yönlendirilmesi, verimliliği etkileyebilmektedir.
4. **Finler:** Isı değiştiricilerin yüzeylerine fin eklemek, yüzey alanını ve ısı transferini arttırmaktadır. Finler, genellikle tüp yüzeylerine veya plakaların üzerine eklenmektedir. Finlerin şekli, boyutu, yüzey alanı ve fin yapı malzemesi, farklı optimizasyon için kullanılabilir. Finler, hava soğutmalı sistemlerde, radyatörlerde ve buhar kazanlarında sıkça kullanılmaktadır.

Yapılan bir çalışmada, ısı transfer hızı kontrolünün deneysel modellemesi ile, geniş bir yüzey alanına sahip ısı değiştiricilerin yaklaşık %10 enerji verimliliğini arttırdığı görülmüştür [315]. Yapılan %10 oranında geri kazanım işlemi sonucunda uygulama noktasına göre, iyileştirilmiş kayıp enerji Eşitlik 5.17'ye göre hesaplanmış ve tesiste  $H_{fark3}$  olarak %2,88'lik bir oranda bir enerjinin geri kazanılmasını sağlamıştır (Şekil 5.8).

$$H_{fark3} = H_{fark2} - \eta_{kazanilan} = 3,19 - \left(3,19 * \frac{10}{100}\right) = 2,88 \quad (\%) \quad (5.17)$$

$$\eta_{Kazanım2} = \eta_{kayıp} - H_{fark3} = 7 - 2,88 = 4,12 \quad (\%) \quad (5.18)$$



Şekil 5.8. Isı değiştiricilerindeki enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri.

### 5.3.3. Pompa Sistemleri için Yapılan İyileştirmeler

Bu ekipmanın çok farklı sektörlerde, farklı tip, güç ve amaç için kullanıldığı görülmektedir. Özellikle son işleme noktasında, enerji desteğini en iyi sağlayabilecek ekipman olarak, yenilikçi tasarımlar ile ticari gereksinimi hiç bitmeyen bir amaç aracıdır [316]. Üretim tesisinde kullanılan pompalarda oransal olarak 2 birim enerji kaybı bulunmaktadır.

#### 5.3.3.1. Isı Pompası Kullanımı

Isı pompası kullanımı, kojenerasyon sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için etkili bir yöntemdir. Isı pompaları, çevreden veya atık ısı kaynaklarından düşük sıcaklıkta bulunan ısıyı toplayarak, daha yüksek sıcaklığa yükseltip, kullanılabilir bir hale getirmektedir. Atık ısıyı geri kazanmak, yakıt tüketimini azaltmak ve çevresel etkileri azaltmak için ısı pompalarının doğru tasarlanması ve entegrasyonu gerekmektedir [317]. Kojenerasyon sistemleri ile daha verimli ve sürdürülebilir bir enerji üretimi sağlamaktadır [318].

Isı geri kazanımı (gizli ısı geri kazanımı), ısı pompaları kullanılarak farklı soğutucu seçenekleri ile modellenmiş ve enerji verimliliği %35 oranında arttırılmıştır [319]. Eşitlik 5.19 kullanılarak tesiste yapılan iyileştirme ile  $H_{fark1}$  %1,3 oranında arttırılmıştır.

$$H_{fark1} = \eta_{kayıp} - \eta_{kazanılan} = 2 - \left(2 * \frac{35}{100}\right) = 1,3 \quad (\%) \quad (5.19)$$

$$\eta_{\text{Kazanım3}} = \eta_{\text{kayıp}} - H_{\text{fark1}} = 2 - 1,3 = 0,7 \quad (\%) \quad (5.20)$$

#### 5.3.4. Jeneratöre Uygulanan Yöntemler

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan jeneratörler, elektrik enerjisi ve ısı enerjisi üretimini aynı anda gerçekleştirmektedir. Yakıt kullanarak, elektrik enerjisi üretmektedir. Üretilen elektrik, tesislerdeki aydınlatma, elektrikli cihazlar ve üretim süreçlerinin güç ihtiyacını karşılamaktadır [320]. Yerel olarak enerji üretimini sağlaması tesislerde ekonomik bir avantaj olarak görülmektedir [321].

Sistemde kullanılan jeneratörlerde, oransal olarak 12 birim enerji kaybı hesaplanmıştır. Teknolojik bir jeneratör kullanımı ile, yaklaşık %8'lik bir enerji kazanımı sağlanmıştır.

##### 5.3.4.1. Teknolojik Jeneratör Kullanımı

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan jeneratörler, geleneksel jeneratörler ile karşılaştırıldığında , daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, bakım ve onarım süreçleri daha fazla dikkat ve uzmanlık gerektirmektedir [322]. Gaz türbinleri veya buhar türbinleri gibi karmaşık bileşenlerin bakım-onarımı zaman alıcı ve maliyeti yüksek olabilmektedir. Eski ve verimi düşen jeneratörlerin, daha verimli, gelişmiş versiyonları ile değiştirilmesi, %30 yüksek enerji verimliliği sağlayabilmektedir. Ayrıca düşük işletme maliyeti elde etmek de mümkündür [323].

İşletmelerdeki, enerji talepleri zamanla değişebilmektedir. Eski jeneratörlerin kapasitesi, enerji ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Teknolojik jeneratörler ile, enerji ihtiyacı daha az yakıt kullanarak sağlanabilmektedir [34].

Kayıp enerji miktarı Eşitlik 5.21'e göre hesaplanmış ve  $H_{\text{fark1}}$  oransal olarak %8,4 olarak bulunmuştur.

$$H_{\text{fark1}} = \eta_{\text{kayıp}} - \eta_{\text{kazanılan}} = 12 - \left(12 * \frac{30}{100}\right) = 8,4 \quad (\%) \quad (5.21)$$

Enerji kazanım<sub>4</sub> değeri ise Eşitlik 5.22 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{\text{Kazanım4}} = \eta_{\text{kayıp}} - H_{\text{fark1}} = 12 - 8,4 = 3,6 \quad (\%) \quad (5.22)$$

### 5.3.5. Tüm Sistemlere Uygulanan Genel Yöntemler

Tüm sistemlere uygulanan yöntemler ile sistemlerdeki iyileştirilmiş enerji kayıpları hesaplanmıştır. Kazan geri kazanım miktarı 0,79, ısı değıştiricilerden 2,88, pompa ekipmanlarının yenilenmesinden 1,3, jeneratörlerden 8,4 birim ve yoğunlaştırıcıdan gelen 3 birim enerji kazanımı ile toplam, 16,37 birim enerji kazanımının mümkün olduğu görülmüştür. Kayıp enerji iyi yalıtım, boyut indirgeme, otomasyon işlemleri ve proses parametrelerinin optimizasyonu ile, kayıp oranları daha da azaltılmıştır.

#### 5.3.5.1. İyi Yalıtım

Yalıtım, fiziksel bir yapı yenileme işlemidir. Yalıtım, ısı transferini azaltarak, iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkını korumaktadır. Kojenerasyon sistemlerde, enerji üretimi esnasında oluşan ısıyı muhafaza etmek oldukça önemlidir. Yüksek kaliteli yalıtım malzemeleri kullanılarak sistemlerin ve boru hatlarının yalıtılması, ısı kaybının minimize edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca iyi yalıtılmış ekipmanlar ve boru hatları, atık ısıyı kaybetmeden geri kazanılması ile enerji verimliliğini arttırırken, ek enerji üretimine de önemli bir katkı vermektedir [324].

Sistemlerde iyi bir yalıtım sayesinde; enerji daha etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Verimliliğin artması, enerji maliyetlerinin düşürmekte, ekonomik ve sürdürülebilir bir seçenek olarak yalıtım uygulaması genellenebilmektedir. İyi yalıtım ile verimlilik %2 ile %3 arasında artabilmektedir [325]. Farklı bir çalışmada, yalıtım işlemi uygulanmayan sistem için, optimum malzeme kalınlıkları belirlenerek, matematiksel modeller oluşturulmuş ve %98'e varan verimlilik sonuçları elde edilmiştir [326].

Kayıp olan enerji için yapılan %3 oranında geri kazanım Eşitlik 5.23'e kullanılarak hesaplanmış ve  $H_{\text{fark1}}$  %15,88 olarak sonuçlandırılmıştır.

$$H_{fark1} = \eta_{kayıp} - \eta_{kazanılan} = (16,37) - \left(16,37 * \frac{3}{100}\right) = 15,88 \quad (\%) \quad (5.23)$$

Burada;

$H_{fark1}$ : İyileştirilmiş kayıp enerji (%),

$\eta_{kayıp}$ : Kayıp enerji (%),

$\eta_{kazanılan}$ : Kazanılan enerji (%).

Sistemsal kayıp enerjiden, 0,49 birim enerji kazanımı sağlanabilmektedir.

### 5.3.5.2. Boyut İndirgeme

Bir sistemin veya bileşenin boyutlarını küçültmek veya optimize etmek, verimliliği artırmak, tasarruf etmek veya uygun bir entegrasyon için kullanılabilir [327].

Yüksek verimli malzemeler kullanarak ince ve hafif bileşenler elde edilebilmektedir. Akışkan kanallarının optimize edilmesi veya boru hatlarının düzenlenmesi gibi tasarım değişiklikleri yapılması da verimliliğin artmasını sağlayan seçeneklerdir [328].

Boyut indirgeme uygulamaları, enerji sistemlerinin daha etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu durum, enerji tasarrufu sağladığı gibi, yerden kazanım ve sürdürülebilir bir yaklaşım seçeneğini ortaya koymaktadır [329]. Boyut indirgeme stratejileri uygulanırken, performans, dayanıklılık ve güvenlik gibi yapısal faktörlere de dikkat edilmesi gerekmektedir [330].

Isı transfer hızı kontrolünün deneysel modellemesi üzerine yapılan bir çalışmada mikro mekanik sistem uygulamalarının, %18 oranında enerji verimliliği sağladığı tespit edilmiştir [331]. Eşitlik 5.24'e kullanılarak yapılan uygulama çalışması ile  $H_{fark2}$  değeri yaklaşık %13 civarında arttırılabilmektedir.

$$H_{fark2} = H_{fark1} - \eta_{kazanılan} = 15,88 - \left(15,88 * \frac{18}{100}\right) = 13,03 \quad (\%) \quad (5.24)$$

Kayıp enerji kazanım hesaplamalarına göre, 2,85 birim enerji kazanımı elde edilebilmektedir.

#### 5.3.5.3. Otomasyon İşlemleri

Otomasyon işlemleri; tekrarlanabilir ve öngörülebilir görevlerin otomatikleştirilmesi, iş süreçlerini optimize edilmesi, üretim hızının artması, kalite kontrolün iyileştirilmesi, maliyetlerin azaltılması, iş süreçlerinin hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, hata oranını düşürülmesi ve zaman tasarrufu sağlanması için önemli bir işlemdir. Doğru sistemlerin seçilmesi, uygun entegrasyonun yapılması ve iş süreçlerinin doğru şekilde analiz edilmesi otomasyonun en optimum şekilde yapılması için gerekli adımlardır [332].

Isı geri kazanımı incelendiğinde, otomasyon sistemlerinin kullanımı ile yaklaşık %50 daha yüksek bir verimlilik sağlandığı tespit edilmiştir [333]. Kayıp enerji, %50 oranında, otomasyon uygulaması ile geri kazanılmaktadır. Eşitlik 5.25'e kullanılarak  $H_{fark3}$  değeri yaklaşık %6,5 olarak hesaplanmıştır.

$$H_{fark3} = H_{fark2} - \eta_{kazanilan} = 13,03 - \left(13,03 * \frac{50}{100}\right) = 6,51 \quad (\%) \quad (5.25)$$

Kayıp enerji kazanımı 6,51 birim enerji olarak tespit edilmiştir.

#### 5.3.5.4. Proses Parametrelerinin Optimizasyonu

Proses parametrelerinin optimizasyonu, bir sürecin veya sistemimizin performansını en üst düzeye çıkarmak için, üretim parametrelerinin en uygun değerlerini bulmayı amaçlamaktadır. Verimlilik, üretkenlik, kalite, enerji tüketimi, maliyet ve diğer performans kriterleri açısından çoklu iyileştirme imkanı sağlayabilmektedir [334]. Matematiksel modeller, süreç izleme ve kontrol uygulamaları, yenilikçi tasarım ve teknik analizler, proses parametrelerinin optimizasyonu için genel bazı yöntemlerdir [335,336].

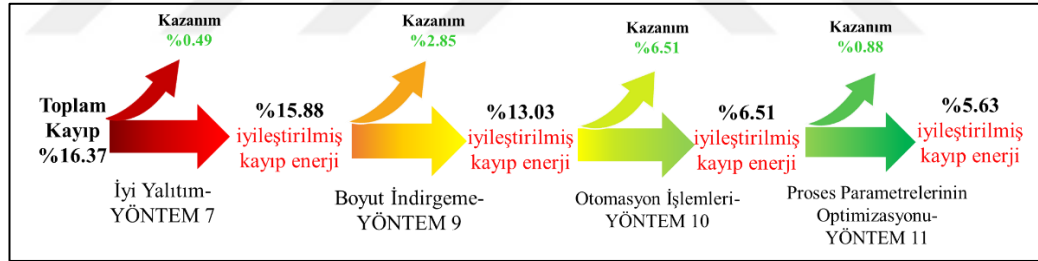
Sistemsel enerji ve ekserji analizi gerçekleştirerek, proses parametrelerinin optimize edilmesiyle verimliliği %13,65 oranında arttırmaktadır [337]. Proses parametrelerinin optimizasyonu yöntemi kullanıldığında, %13,65 oranında enerji geri kazanımı mümkün olabilmektedir. Eşitlik 5.26'ya kullanılarak,  $H_{fark4}$  değeri %5,6 olarak hesaplanmıştır.

$$H_{fark4} = H_{fark3} - \eta_{çıkan} = 6,51 - \left(6,51 * \frac{13,65}{100}\right) = 5,63 \quad (\%) \quad (5.26)$$

Kayıp enerji kazanımı 0,88 birimdir.

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi, toplam iyileştirilmiş enerji kaybı 5,63 ( $H_{fark4}$ ) olarak bulunmuş ve toplam enerji kazanımı<sub>5</sub> değeri Eşitlik 5.27 ile %10,74 olarak hesaplanmıştır.

$$\eta_{Kazanım5} = \eta_{kayıp} - H_{fark4} = 16,37 - 5,63 = 10,74 \quad (\%) \quad (5.27)$$



Şekil 5.9. Tüm Sistemlere uygulanan yöntemlerdeki kazanım değerleri.

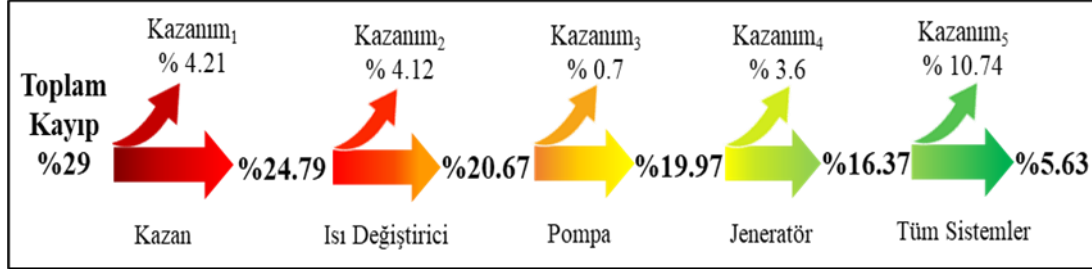
Madencilik ve kimya konusunda çalışan ilgili firmanın, enerji tesislerindeki enerji kayıp noktalarından, uygulanan 12 farklı yöntem ile toplam enerji kazanımı Eşitlik 5.28 ile %23,4 olarak hesaplanmıştır.

$$\eta_{TOPLAM,KAZANIM} = \eta_{Kazanım1} + \eta_{Kazanım2} + \eta_{Kazanım3} + \eta_{Kazanım4} + \eta_{Kazanım5} \quad (\%) \quad (5.28)$$

Buna göre;

$$\eta_{TOPLAM,KAZANIM} = 4,21 + 4,12 + 0,7 + 3,6 + 10,74 = 23,36 \quad (\%)$$

Şekil 5.10’da enerji kullanan birimlerdeki kayıp yüzdeleri ve kazanım miktarları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Enerji kayıp yüzdeleri ve kazanım değerleri.

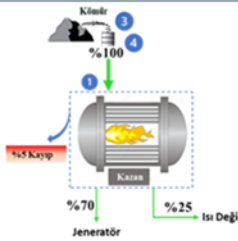
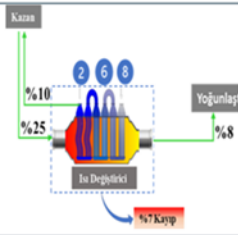
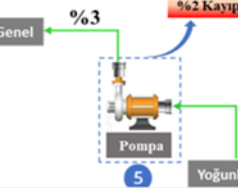
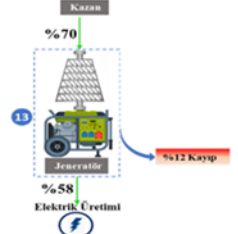
İlgili fabrikada yıllık linyit kömürü tüketim miktarı 131400 tondur. Fabrikada enerji sistemlerinden iki adet bulunmaktadır. Her bir birimin kullandığı kömür miktarı toplam değer yarısına eşit olduğu varsayılmıştır. Bu değer üstünde yapılan modelleme çalışmaları ve enerji verimliliği iyileştirmesi ile, toplam geri kazanım miktarı 15347,52 ton linyit kömürüne eşdeğerdir. Eşitlik 5.28 kullanılarak yapılan hesaplamalarda bu değer toplam enerji tüketimi üstünden %23,36’ya eşittir. Çizelge 5.11 ve 5.12’de toplam ve her bir birimdeki detaylı emisyon azaltım miktarları verilmiştir. Buna göre yaklaşık 0.064 milyon CO<sub>2</sub> eşdeğer emisyon atmosfere salınmamıştır. Bu azaltım değeri Ulusal Emisyon değerine göre önemli sayılabilecek bir miktardır.

Çizelge 5.11.Geri kazanılan toplam enerji miktarına göre emisyon azaltımı.

| Yakıt kazanım miktarı (ton) | CO <sub>2</sub> (Gg) | CH <sub>4</sub> (Gg) | N <sub>2</sub> O (Gg) | CO <sub>2</sub> eşdeğer (Gg) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 15347,52                    | 59,57                | 0,19                 | 0,008                 | 63,90                        |



Çizelge 5.12.Sistem birimlerindeki enerji geri kazanımına göre emisyon azaltımı.

| Kazana Uygulanan Yöntemler                                                          | Kayıp miktarı %      | Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Yakalama- YÖNTEM 1                                 | Gazlaştırma- YÖNTEM 3                                                               | Yakıt Nemini Alma- YÖNTEM 4                                                        | ηKazanım1                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 5 birim              | <p>%3 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%2 birim enerji kazanımı</p>        | <p>%1.38 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%1.62 birim enerji kazanımı</p>  | <p>%0.79 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%0.59 birim enerji kazanımı</p> | <p><b>%4.21</b></p> <p><u>E.A.M</u></p> <p>CO<sub>2</sub>(Gg): 10,74</p> <p>CH<sub>4</sub>(Gg): 3,42x10<sup>-2</sup></p> <p>N<sub>2</sub>O(Gg): 1,44x10<sup>-3</sup></p> <p>CO<sub>2</sub>Eşdeğer(Gg):11,52</p>  |                                                                                                                                                                                                                  |
| Isı Değiştiricisine Uygulanan Yöntemler                                             | Kayıp miktarı %      | Isı Kazanımı- YÖNTEM 2                                                              | Rejenerasyon Sistemlerinin Yerleştirilmesi- YÖNTEM 6                                | Isı Değiştiricilerinin Yüzey Alanının Artırılması- YÖNTEM 8                        | ηKazanım2                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                  |
|    | 7 birim              | <p>%4.55 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%2.45 birim enerji kazanımı</p>  | <p>%3.19 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%1.36 birim enerji kazanımı</p>  | <p>%2.88 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%0.31 birim enerji kazanımı</p> | <p><b>%4.12</b></p> <p><u>E.A.M</u></p> <p>CO<sub>2</sub>(Gg): 10,51</p> <p>CH<sub>4</sub>(Gg): 3,35x10<sup>-2</sup></p> <p>N<sub>2</sub>O(Gg): 1,41x10<sup>-3</sup></p> <p>CO<sub>2</sub> Eşdeğer(Gg):11,27</p> |                                                                                                                                                                                                                  |
| Pompaya Uygulanan Yöntemler                                                         | Kayıp miktarı %      | Isı Pompası Kullanımı- YÖNTEM 5                                                     |                                                                                     |                                                                                    | ηKazanım3                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                  |
|   | 2 birim              | <p>%1.3 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%0.7 birim enerji kazanımı</p>    |                                                                                     |                                                                                    | <p><b>%0.7</b></p> <p><u>E.A.M</u></p> <p>CO<sub>2</sub>(Gg): 1,79</p> <p>CH<sub>4</sub>(Gg): 0,57x10<sup>-2</sup></p> <p>N<sub>2</sub>O(Gg): 0,24x10<sup>-3</sup></p> <p>CO<sub>2</sub> Eşdeğer(Gg):1,91</p>    |                                                                                                                                                                                                                  |
| Jeneratöre Uygulanan Yöntemler                                                      | Kayıp miktarı %      | Yeni bir jeneratör ile değişimi- YÖNTEM 13                                          |                                                                                     |                                                                                    | ηKazanım4                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                  |
|  | 12 birim             | <p>%8.4 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%3.6 birim enerji kazanımı</p>    |                                                                                     |                                                                                    | <p><b>%3.6</b></p> <p><u>E.A.M</u></p> <p>CO<sub>2</sub>(Gg): 9,18</p> <p>CH<sub>4</sub>(Gg): 2,93x10<sup>-2</sup></p> <p>N<sub>2</sub>O(Gg): 1,23x10<sup>-3</sup></p> <p>CO<sub>2</sub> Eşdeğer(Gg):9,85</p>    |                                                                                                                                                                                                                  |
| Genel Tüm Sistemlere Uygulanan Yöntemler                                            | Kayıp miktarı %      | İyi Yalıtım- YÖNTEM 7                                                               | Boyut İndirgeme- YÖNTEM 9                                                           | Otomasyon İşlemleri- YÖNTEM 10                                                     | Proses Parametrelerinin Optimizasyonu- YÖNTEM 11                                                                                                                                                                 | ηKazanım5                                                                                                                                                                                                        |
|  | 16.37 birim          | <p>%15.88 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%0.49 birim enerji kazanımı</p> | <p>%13.03 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%2.85 birim enerji kazanımı</p> | <p>%6.51 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%6.51 birim enerji kazanımı</p> | <p>%5.63 birim iyileştirilmiş kayıp enerji,</p> <p>%0.88 birim enerji kazanımı</p>                                                                                                                               | <p><b>%10.74</b></p> <p><u>E.A.M</u></p> <p>CO<sub>2</sub>(Gg): 26,7</p> <p>CH<sub>4</sub>(Gg): 8,52x10<sup>-2</sup></p> <p>N<sub>2</sub>O(Gg): 3,59x10<sup>-3</sup></p> <p>CO<sub>2</sub> Eşdeğer(Gg):28,64</p> |
| TÜM UYGULAMA NOKTALARI                                                              | Toplam kayıp miktarı | <b>% 29 birim</b>                                                                   |                                                                                     | Toplam kazanım miktarı                                                             | <b>% 23.36 birim</b>                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                  |

\*E.A.M: Emisyon azaltım miktarı

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

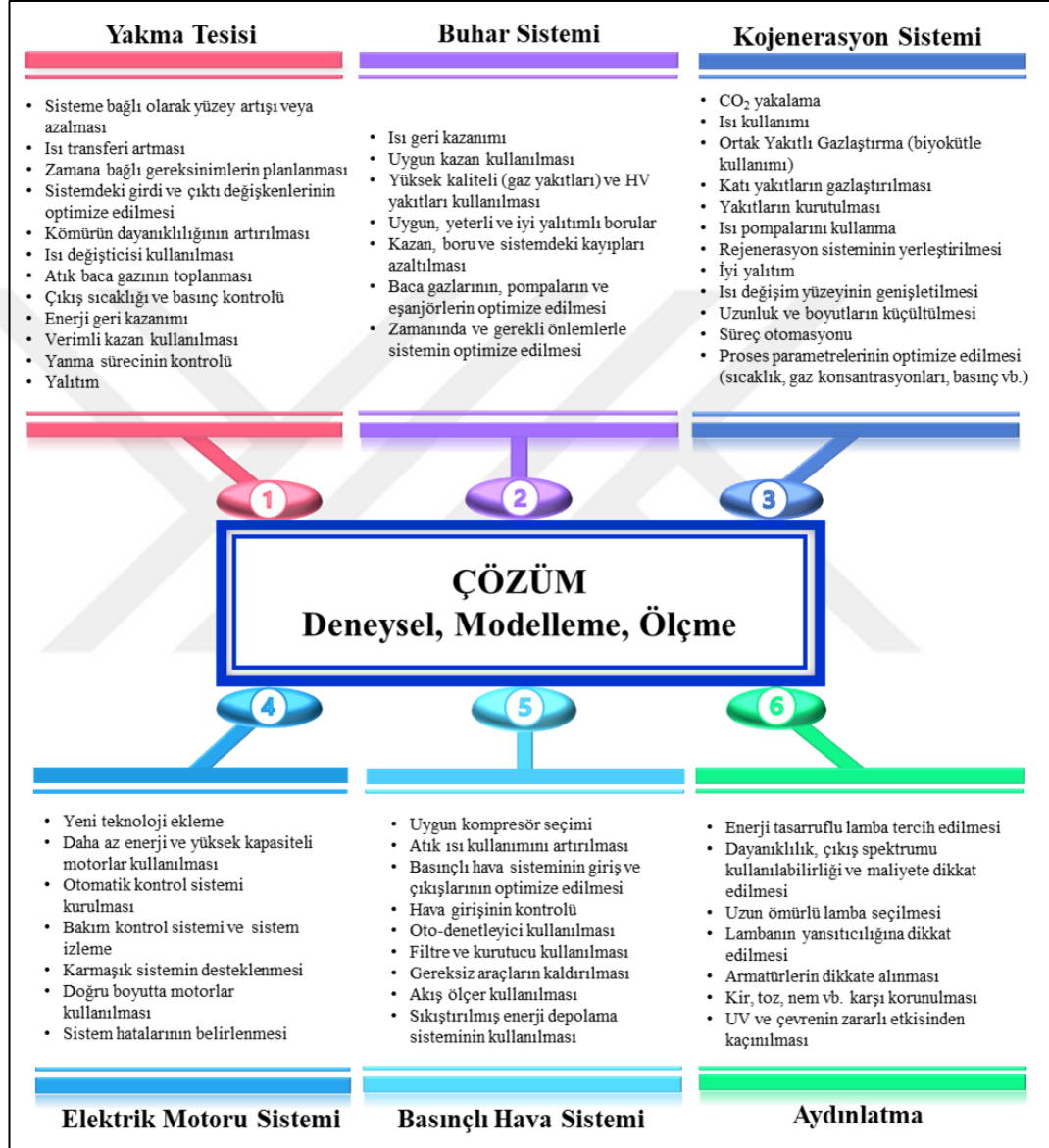
Enerji tasarrufu fabrikalarda farklı yöntemler ile, farklı üretim noktalarında uygulandığında, çok farklı kazanım değerleri ile karşılaşılabilir. Üretim sistemi içinde kullanılan enerjinin büyüklüğü aslında kazanılacak veya yeniden kullanılacak enerji miktarını da belirlemektedir. Ancak uygulanacak olan yöntemlerden önce fiziksel ve detaylı kimyasal analizler ile sistem parametrelerinin tek tek çalışılması ve detaylandırılması, iyileştirme yöntemlerin kabul edilebilirliğini ve başarısını da etkileyecektir.

Bu tez çalışmasında da görüldüğü gibi, sistemsel yaklaşım olarak tanımlanan uygulamalar gruplandırılmış ve gruplandırmalara göre yöntemsel iyileştirmeler modellenmiştir. Uygulanacak her yaklaşımın bilimsel bir tabanı bulunmaktadır. Model teknikleri, bilimsel referanslara göre çalışılmış ve kazanım değerleri elde edilmiştir.

Isı geri kazanımı, yalıtım, oto kontrol ve yakıt gazlaştırma gibi yöntemler, enerji tasarrufu alanında iyi teknikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak her sistem için iyi teknik, en iyi teknik olmayabilir. Yapısal optimizasyon ve sistemsel entegrasyon, farklı üretim tesisleri için iyi teknik tanımlamalarını da değiştirmektedir.

Teknoloji ve yenilikçi uygulamalar, enerji verimliliğini, önemli ölçüde artırmaktadır. Farklı teknikler ile optimize edilmiş, entegre enerji geri kazanım iyileştirmeleri, mevcut endüstrilerde %90'a varan enerji kazanımını mümkün kılmaktadır. Özellikle eski tekniklerin kullanıldığı fabrikalarda, uygulanan kütle, enerji ve ekserji analizleri ile, geri kazanım oranları maksimum seviyelere yükseltilebilmektedir. Yöntemler çoğunlukla endüstrilerin alt üretim bölümlerine uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, uygulanabilecek yöntemler en genel şekli ile Şekil 6.1'de görüldüğü gibi altı alt başlıkta gruplandırılmıştır. Herhangi bir fabrika için, her grubun kendi içinde

alt başlıklara göre değerlendirilmesi ve modellemenin yapılması için, uygulanabilecek her yöntemin, enerji geri kazanım noktasına göre Bölüm 3'te anlatıldığı gibi algoritmalar ile sorgulanması gerekmektedir. İşlemler deneysel, ölçme ve modelleme sonuçlarına göre çalışılmalıdır.



Şekil 6.1. Enerji verimliliği çalışmaları.

En yüksek enerji kayıplarının yakıtların, yakıt sistemleri içinde tüketilmesi esnasında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Isı transfer oranı yüksek oldukça, boşa harcanan ısı, entegre sistemlerle önlenerek verimli bir yakıt tüketimini sağlamaktadır. Ancak hava karışımı, sıcaklığa ve kazan tipine bağlı olarak değişebilmektedir. Uygun kazan seçimi

ve kaliteli yakıtların kullanımı, buhar verimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Optimize edilmiş bir buhar sistemi, enerji kazanımında önemli bir rol oynayabilmektedir.

Yakma tesislerinde, yalıtım başta olmak üzere, yakıtın enerji gereksinimine göre tüketimi, ısı değıştiricilerin kullanılması, sıcaklık-basınç optimizasyonu, kontrollü yakma işlemi, baca çıkış sıcaklığının ayarlanması işlemleri ile enerji kazanımı sağlanabilmektedir.

Buhar sistemlerinde, uygun kazanın kullanılması, iyi yalıtım ve optimizasyonun parametrelere bağlı olarak en iyi şekilde yapılması gerekmektedir. Bu sayede kazan sistemlerinden önemli bir ölçüde enerji geri kazanımı gerçekleştirilmektedir.

Kojenerasyon sistemi için girdi olarak kullanılan oksijen ve karbon oranları da enerji tasarrufu açısından büyük öneme sahiptir. Kojenerasyonda CO<sub>2</sub> yakalamasının uygulanması, verimlilik kayıplarını %11,5 civarında azaltmaktadır. Katı yakıtların gazlaştırılması, atık CO<sub>2</sub> gazının tutulması, enerji verimliliğini önemli ölçüde arttırabilmektedir.

Enerji tasarrufunu sağlamak için doğru boyutlarda ve daha az güç tüketen yenilikçi elektrik motorlarının kullanımı, sadece enerji faktörlerini değil, enerji dışı faktörleri de etkileyebilmektedir.

Basınçlı hava sistemlerinde, hava kaçakları yüksek enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Sadece bu kaçakların kesilmesi ile %40'e varan bir iyileştirme işlemi yapılabilir. Sıvı hava enerjisi ve adyabatik enerji depolama sistemleri, basınçlı hava sistemlerinin bir parçası olarak enerji verimliliğini sırasıyla %76,6 ve %95 oranında arttırmaktadır.

LED lambalar, verimli lambalar olarak kabul edilmektedir, ancak LED'lerin üretim aşamaları ve karbon ayak izi de dikkate alındığında LED lambalarının çok masum olmadığı görülmektedir. LED üretim aşamaları, LED ampullerin karbon ayak izini önemli ölçüde yükseltmektedir.

Bir tesiste yapılan enerji verimliliği çalışmaları, enerji iyileştirme işlemleri ve geri kazanımın, çevresel etkileri de oldukça önemlidir. Özellikle iklim değişikliği çalışmalarında, enerji verimliliği uygulamaları anahtar uygulamalar arasında yer almaktadır. Kalkınma temelinde enerjinin optimum tüketilmesi sürdürülebilir bir teknik olarak stratejik planlamaların bir parçasıdır. Emisyon azaltımı, çevre dostu üretim, geleceğe yönelik planlamaların temeli olarak görülmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde bu çalışma oldukça önemli bir çalışmadır.

Uygulanabilecek her türlü enerji kazanımı ve enerji verimliliği yöntemleri, bilimsel dayanaklara göre araştırılmış; iyi ve etkin teknikler olarak çalışmada listelenmiştir. Algoritmik sorgulamalar, teknikler ile birleştirilerek model kurguları geliştirilmiştir. Bu açıdan bakıldığında bu çalışma literatüre büyük oranda bir özgünlük sunmaktadır. Çalışmanın bir sonraki adımı, enerji verimliliği için bir aplikasyonun geliştirilmesidir. Çalışmada üretilen modelin en büyük kolaylığı ise yeni uygulama ve tekniklerin modele entegre edilmesidir.

## KAYNAKLAR

1. Wang, W., Zhangn, M. and Li, P., “Exploring temporal and spatial evolution of global energy production and consumption”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 30: 943-949 (2014).
2. Yuquan Meng, Y., Yang, Y., Chung, H., Lee, P.H. and Shao, C., “Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review”, ***Sustainability***, 10 (12): 1-28 (2018).
3. Chen, P.Y., Chen, S.T., Hsu, C.S. and Chen, C.C., “Modeling the global relationships among economic growth, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 65: 420-431 (2016).
4. Zheng, X., Streimikiene, D., Balezentis, T., Mardani, A., Cavallaro, F. and Liao, H., “A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the keyclimate change players”, ***Journal of Cleaner Production***, 234: 1113-1133 (2019).
5. Petek, J., Glavič, P. and Kostevsek, A., “Comprehensive approach to increase energy efficiency based on versatile industrial practices”, ***Journal of Cleaner Production***, 112 (4): 2813-2821 (2016).
6. Chen, H., He, L., Chen, J., Yuan, B., Huang, T. and Cui, Q., “Impacts of clean energy substitution for polluting fossil-fuels in terminal energy consumption on the economy and environment in China”, ***Sustainability***, 11 (22): 6419-6438 (2019).
7. Raza, M.A., Aman, M.M., Abro, A.G., Shahid, M., Ara, D., Waseer, T.A., Tunio, M.A., Soomro, S.A., Tunio, N.A. and Haider, R., “Modelling and development of sustainable energy systems”, ***AIMS Energy***, 11 (2): 256-270 (2023).
8. Gvozdenac, D.D., Urosević, B.D.G. and Morvaj, Z.K., “Energy efficiency limitations”, ***Thermal Science***, 23 (5): 1669-1682 (2019).
9. Mushafiq, M., Arisar, M.M.K., Tariq, H. and Czapp, S., “Energy efficiency and economic policy: comprehensive theoretical, empirical, and policy review”, ***Energies***, 16 (5): 2381-2403 (2023).
10. Islam, S., Ponnambalam, S.G. and Lam, H.L., “Energy management strategy for industries integrating small scale waste to energy and energy storage system under variable electricity pricing”, ***Journal of Cleaner Production***, 127: 352-362 (2016).

11. Mobarakeh, M.R. and Kienberger, T., “Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study”, ***Cleaner Engineering and Technology***, 10: 100545 (2022).
12. Chan, D.Y.L., Huang, C.F., Lin, W.C. and Hong, G.B., “Energy efficiency benchmarking of energy-intensive industries in Taiwan”, ***Energy Conversion and Management***, 77: 216-220 (2014).
13. Vorayos, N., Vorayos, N. and Jaitiang, T., “Energy-environmental performance of Thai’s Cement Industry”, ***Energy Reports***, 6 (2): 460-466 (2020).
14. Si, S., Lyu, M., Lawell, C.L. and Chen, S., “The effects of energy-related policies on energy consumption in China”, ***Energy Economics***, 76: 202-227 (2018).
15. Duzgun, B. and Komurgoz, G., “Turkey's energy efficiency assessment: White Certificates Systems and their applicability in Turkey”, ***Energy Policy***, 65: 465-474 (2014).
16. Olayinka, O.S. and Oladele, A.T., “Energy audit of manufacturing and processing industries in Nigeria: a case study of food processing industry and distillation & bottling company”, ***American Journal of Energy Research***, 1 (3): 36-44 (2013).
17. Kaygusuz, K., “Energy situation, future developments, energy saving, and energy efficiency in Turkey”, ***Energy Sources***, 21: 405-416 (1999).
18. Narciso, D.A.C. and Martins, F.G., “Application of machine learning tools for energy efficiency in industry: A review”, ***Energy Reports***, 6: 1181-1199 (2020).
19. Branca, T.A., Fornai, B., Colla, V., Pistelli, M.I., Faraci, E.L., Cirilli, F. and Schroder, A.J., “Industrial symbiosis and energy efficiency in european process industries: A review”, ***Sustainability***, 13 (16): 9159 (2021).
20. Phylipsen, G.J.M., Blok, K. and Worrell, E., “International comparisons of energy efficiency-methodologies for the manufacturing industry”, ***Energy Policy***, 25 (7): 715-725 (1997).
21. Hirematha, R.B., Shikhab, S. and Ravindranath, N.H., “Decentralized energy planning; modeling and application-A review”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 11: 729-752 (2007).
22. Hepbasli, A. and Ozalp, N., “Development of energy efficiency and management implementation in the Turkish industrial sector”, ***Energy Conversion and Management***, 44 (2): 231-249 (2003).
23. İnternet: Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, “On Birinci Kalkınma Planı, (2019-2023)”, <http://www.sbb.gov.tr/2019/07/On-Birinci-Kalkinma-Planı.pdf> (2020).

24. Inayat, A., “Current progress of process integration for waste heat recovery in steel and iron industries”, *Fuel*, 338: 127237 (2023).
25. Chen, S., Arabkoohsar, A., Zhu, T., Nielsen, M.P., “Development of a micro-compressed air energy storage system model based on experiments”, *Energy*, 197: 1-13, (2020).
26. Hsieh, J., “Study of energy strategy by evaluating energy-environmental efficiency”, *Energy Reports*, 8: 1397-1409 (2022).
27. Nagovnak, P., Kienberger, T., Baumann, M., Binderbauer, P. and Vouka, T., “Improving the methodology of national energy balances to adapt to the energy transition”, *Energy Strategy Reviews*, 44: 100994 (2022).
28. Tzafestas, S.G., “Energy, information, feedback, adaptation, and self-organization”, *National Technical University of Athens*, Greece, 83-107 (2018).
29. Engelbrektsson, N., Franzén, K. and Starikov, E., “The basic features of thermodynamics”, *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 152: 1437-1490 (2021).
30. Çengel, Y.A. and Boles, M. A., “Termodinamik mühendislik yaklaşımıyla”, Çeviri Editörü/Editörleri, Pınarbaşı, A., *Mc Graw Hill - Palme Yayıncılık*, Ankara, 51-483 (2013).
31. Sangi, R. and Müller, D., “Application of the second law of thermodynamics to control: A review”, *Energy*, 174: 938-953 (2019).
32. Panthaloorkaran, V., Heidemann, W. and Mueller-Steinhagen, H., “A new method of characterization for stratified thermal energy stores”, *Solar Energy*, 81: 1043-1054 (2007).
33. Koç, E. ve Kaya, K., “Enerji kaynakları- Yenilenebilir enerji durumu,” *Mühendis ve Makina*, 36-47 (2015).
34. İnternet: JRC, “2009 Reference document on best available techniques for energy efficiency, European commission- Joint research center”, [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/2019-11/ENE\\_Adopted\\_02-2009.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf) (2020).
35. Koziol, J. and Mendecka, B., “Evaluation of economic, energy-environmental and sociological effects of substituting non-renewable energy with renewable energy sources”, *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems-Jsdewes*, 3 (4): 333-343 (2015).
36. Güney, T., “Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development”, *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26 (5): 389-397 (2019).



37. Dincer I. and Çengel Y.A., “Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering”, **Entropy**, 3 (3): 116-149 (2001).
38. Costa, V.A.F., “Energy-exergy diagrams for states and energy and exergy balance equations representation”, **Energy**, 218: 119506 (2021).
39. Jin, H., Zhao, H., Liu, Z. and Cai, R., “A novel EFHAT system and exergy analysis with energy utilization diagram”, **Energy**, 29: 1983-1991 (2004).
40. Mert, S.O., Demir, M.H., Demir, H.G. and Kok, C., “Energy, exergy, and exergoeconomic analysis of a general UAV”, **International Journal of Exergy**, 41 (3): 376-390 (2023).
41. Kotas, T.J., “The exergy method of thermal plant analysis”, **Krieger Publishing Company**, Florida, 50-75 (1995).
42. Yin, J.M., Zheng, Q.Y. and Zhang, X.R., “Heat transfer model of a particle energy storage-based moving packed bed heat exchanger”, **Energy Storage**, 2 (1): 1-14 (2020).
43. Kotas, T.J., “The exergy method of thermal plant analysis” **Butter-Worths**, London, 120-210 (1985).
44. Kurnia, J.C. and Sasmito, A.P., “Numerical investigation of heat transfer Performance of a rotating latent heat thermal energy storage”, **Applied Energy**, 227: 542-554 (2018).
45. Agyenim, F., Eames, P. and Smyth, M., “Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array”, **Renewable Energy**, 35: 198-207 (2010).
46. Avgousti, A., Hesselmann, K. and Roth, M., “Thermodynamic analysis and improvement of energy systems”, **Pergamon Press**, Oxford, 243-249 (1989).
47. Eyre, N., “From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition”, **Energy Efficiency**, 14 (7): 77 (2021).
48. Moran, M.J. and Shapiro, H.N., “Fundamentals of engineering thermodynamics”, **2nd. Edt**, Wiley, New York, 130-145 (1992).
49. Ertesvag, I.S., “Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000”, **Energy**, 30 (5): 649-675 (2005).
50. Büyüktür, A.R., “Termodinamik uygulamaları esasları”, **Birsen Yayınları**, İstanbul, 113-150 (1995).
51. Incropera, F.P. and DeWitt D.P., “Isı ve kütle geçişinin temelleri”, **Literatür Yayıncılık**, İstanbul, 130-150 (2003).

52. Çengel, Y.A., “Isı ve kütle transferine pratik bir yaklaşım”, **Güven Kitabevi**, İzmir, 78-126 (2011).
53. Zhang, T., Cai, L.F., Chen, P.X. and Li, C.Z., “The second law of thermodynamics in a quantum heat engine model”, **Communications in Theoretical Physics**, 45 (3): 417-420 (2006).
54. Chen, Q., Hammond, G.P. and Norman, J.B., “Energy efficiency potentials: Contrasting thermodynamic, technical and economic limits for organic Rankine cycles within UK industry”, **Applied Energy**, 164: 984-990 (2016).
55. Kaşka, Ö., “Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry”, **Energy Conversion and Management**, 77: 108-117 (2014).
56. Karellas, S., Leontaritis, A.D., Panousis, G., Bellos, E. and Kakaras, E., “Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry”, **Energy**, 58: 147-156 (2013).
57. Gabbrielli, R., “A novel design approach for small scale low enthalpy binary geothermal power plants”, **Energy Conversion and Management**, 64: 263-272 (2012).
58. Zakari, A., Khan, I., Tan, D., Alvaradod, R. and Dagar, V., “Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs)”, **Energy**, 239: 122365 (2022).
59. Saatçioğlu, C. ve Küçükaksoy, İ., “Türkiye ekonomisinin enerji yoğunluğu ve önemli enerji taşıma projelerinin ekonomiye etkisi”, **T.C. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi**, 11: 8-9 (2001).
60. Zenk, H., “Investigation of energy efficiency in Turkey”, **International Journal of Engineering Engineering**, 93-96 (2018).
61. Patterson, M.G., “What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues”, **Energy Policy**, 24 (5): 377-390 (1996).
62. Doğan, H. ve Yılankırkan, N., “Türkiye’nin enerji verimliliği potansiyeli ve projeksiyonu”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, 3 (1): 375-384 (2015).
63. Ünlü, O., “Sanayide enerji tasarrufu çalışmalarının önemi ve buhar sistemleri ile ilgili uygulama örnekleri”, **Mühendis ve Makine Dergisi**, 5-16 (2009).
64. Yıldız, A., Akgül, S., ve Güvercin, S., “Sanayide enerji verimliliği ve uygulamaları”, **İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi**, 7: 1-14 (2017).
65. Yılan, G., Kadirgan, M.A.N. and Çiftçioglu, G.A., “Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey”, **Renewable Energy**, 146: 519-529 (2020).

66. İnternet: T.C. Resmi Gazete, “Enerji verimliliği kanunu, (5627), 2 Mayıs 2007”, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm> (2020).
67. İnternet: T.C. Resmi Gazete, “2008 Enerji verimliliği yılı genelgesi, (26788), 15.02.2008”, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/02/20080215-7.htm> (2020).
68. İnternet: T.C. Resmi Gazete, “Enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına ilişkin yönetmelik, (28097), 27.10.2011”, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/10/20111027-5.htm> (2020).
69. İnternet: T.C. Resmi Gazete, “Enerji verimliliği strateji belgesi 2012-2023, (28215), 25.02.2012”, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/02/20120225-7.htm> (2020).
70. İnternet: T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Ulusal enerji verimliliği eylem planı 2017-2023”, <http://www.eyoder.org.tr/UlusalEVEP.pdf> (2020).
71. Narin M., “Farklı işyeri büyüklüğündeki imalat sanayi alt sektörlerinde enerji yoğunluğu”, *Ekonomik Yaklaşım*, 17 (58): 59-87 (2006).
72. Aydın, K., Taşçı, H., Ağırlioğlu, S. ve Sönmüş, A., “Türkiye’de enerji verimliliğinin performansı”, *Euroasia Journal of Social Sciences & Humanities*, 8 (2): 156-166 (2021).
73. Akdağlı, B., “Avrupa ülkelerinde sektörel enerji verimliliği ve ekonomik büyüme ilişkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Mersin, 28-29 (2017).
74. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Birincil ve nihai enerji yoğunluğu raporu 2000-2017”, [http://www.yegm.gov.tr/duyurular\\_haberler/document/Birincil.pdf](http://www.yegm.gov.tr/duyurular_haberler/document/Birincil.pdf) (2020).
75. Batu-Ağırkaya, M., “Türkiye ekonomik büyümesinde yenilenebilir enerji: mevcut durum, gelecek beklentileri, istihdam ve yatırım fırsatları”, *ODU Journal of Social Sciences Research*, 12 (3): 2327-2350 (2022).
76. Karhan, G., “Enerji yoğunluğu ve ülkelerin gelişmişlik düzeyleri arasındaki ilişkinin analizi: BRICS-T ülkeleri üzerine bir araştırma”, Doktora Tezi, *İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 13-61 (2016).
77. Yalçın, A.Z. ve Doğan, M., “Enerjide dışa bağımlılık sorunu: Türkiye için ampirik bir analiz”, *Yönetim ve Ekonomi*, 30 (2): 203-223 (2023).
78. Alanlı, A., “Türkiye’de enerji verimliliğine yönelik politikaların değerlendirilmesi”, *Sirnak University Journal of Science*, 3 (1): 1-18 (2022).

79. Burgaç-Çil, A., “Türkiye imalat sanayinde enerji yoğunluğu: Firma bazında kanıtlar”, *Academic Review of Economics and Administrative Sciences*, 16 (4): 987-998 (2023).
80. Uzun, A. ve Değirmen, M., “Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliği ve enerji yönetimi”, *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4 (2): 83-97 (2018).
81. İnternet: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Birincil ve nihai enerji yoğunluğu-çevresel göstergeler”, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/birincil-enerji-yogunlugu> (2020).
82. Petek Ali, Ş.O., “Makro ekonomik değişkenler açısından Türkiye’de sanayi sektörünün gelişimi ve imalat sanayinin teknolojik yapısı”, Adnan Menderes Üniversitesi, *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3: 185-203 (2018).
83. Ener-Ruşen, S. ve Çevik, M.S., “Bir gıda fabrikasında enerji verimliliğinin iyileştirilmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24 (3): 539-552 (2020).
84. Kocacı Z. ve Topçu E., “Bir plastik enjeksiyon makinesinin hidrolik sisteminde değişken hız denetimli motor kullanımının enerji verimi açısından kuramsal incelenmesi”, *VI. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi*, 1-14 (2011).
85. Karanfil, G., Ruşen, S.E., Poyraz, Ş.N. ve Can, M., “Atık ısı geri kazanım sistemleri ve ısı verim parametrelerinin deneysel incelenmesi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19: 127-137 (2020).
86. Aslı, T., “Sanayide atık ısıdan yararlanma yöntemleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 49-51 (2006).
87. Coşkun, S., “İş süreçlerinde zayıf noktaların belirlenmesi analizi ve geliştirilmesine yönelik süreç geliştirme tekniklerinin modellenmesi ve uygulanması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7-177 (2006).
88. Erden-Topal, Y., “Veriye dayalı bir politika tasarım modeli önerisi: Türkiye’de yenilenebilir enerji teknolojilerinin yayılmasının niteliksel analizi”, *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 50: 133-155 (2023).
89. Ervural-Çayır, B., Ervural, B. ve Evren, R., “Enerjide optimizasyon uygulamaları: Bir literatür araştırması”, *Ege Akademik Bakış*, 16: 51-70 (2016).
90. Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A.S. and Anpalagan, A., “Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 640-654 (2014).
91. Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A. and Gomez, J., “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy:

- A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4): 1753-1766 (2011).
92. Zhou, P., Ang, B.W. and Poh, K.L., “Decision analysis in energy and environmental modeling: An update”, *Energy*, 31 (14): 2604-2622 (2006).
  93. Mendez-Pinero, M. and Colon-Vazquez, M., “Mathematical model to optimize the energy consumed by a semiconductors manufacturing industry-An application”, *Journal of Mathematical Modelling and Application*, 8: 78-83 (2013).
  94. Colon-Vazquez, Melitza., “Sensitivity analysis in the minimization energy cost by combining the PREPA supply with photovoltaic system”, Master of Science Thesis, *University of Puerto Rico*, Mayaguez, 30-40 (2011).
  95. Shi, G., Bi J. and Wang J., “Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs”, *Energy Policy*, 38: 6172-6179 (2010).
  96. Xia, X. and Zhang, J., “Mathematical description for the measurement and verification of energy efficiency improvement”, *Applied Energy*, 111: 247-256 (2013).
  97. Uzel, E., “A Mathematical modeling approach to energy cost saving in a manufacturing plant”, Master of Science Thesis, *Izmir Institute of Technology Energy Engineering*, İzmir, 30-50 (2004).
  98. Giagnorio, M., Amelio, A., Grüttner, H. and Tiraferri, A., “Environmental impacts of detergents and benefits of their recovery in the laundering industry”, *Journal of Cleaner Production*, 154: 593-601 (2017).
  99. Liang, S., Wang, P., Jia, C. and Zhu, J., “Studying green financing, factor allocation efficiency, and regional productivity growth in renewable energy industries”, *Renewable Energy*, 214: 130-139 (2023).
  100. Fang, W., Liu, Z. and Surya Putra, A.R., “Role of research and development in green economic growth through renewable energy development: empirical evidence from South Asia”, *Renewable Energy*, 194: 1142-1152 (2022).
  101. Beheshtinia, M.A. and Fathi, M., “Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry”, *Energy Science Engineering*, 11: 357-382 (2023).
  102. Si, B., Tian, Z., Jin, X., Zhou, X., Tang, P. and Shi, X., “Performance indices and evaluation of algorithms in building energy efficient design optimization”, *Energy*, 114, 100-112 (2016).

103. Si, B., Tian, Z., Chen, W., Jin, X., Zhou, X. and Shi, X., “Performance assessment of algorithms for building energy optimization problems with different properties”, *Sustainability*, 11: 18 (2018).
104. Tic, W.J. and Guzialowska-Tic, J., “A System of improving energy and ecological efficiency, using the example of fuel oil combustion in power plant boilers”, *Energies*, 16 (3): 1107 (2023).
105. Malec, M., “The prospects for decarbonisation in the context of reported resources and energy policy goals: The case of Poland”, *Energy Policy*, 161: 112763 (2022).
106. Bermeo-Ayerbe, M.A., Ocampo-Martínez, C. and Diaz-Rozo, J., “Adaptive predictive control for peripheral equipment management to enhanced energy efficiency in smart manufacturing systems”, *Journal of Cleaner Production*, 291: 125556 (2021).
107. Apostolos, F., Alexios, P., Georgios, P., Panagiotis, S. and George, C., “Energy efficiency of manufacturing processes: A critical review”, *Procedia CIRP*, 7: 628-633 (2013).
108. Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M. and Thollander, P., “Energy management in industry easy stematic review of previous findings and an integrative conceptual framework”, *Journal of Cleaner Production*, 112: 3692-3708 (2016).
109. Andrei, M., Thollander, P. and Sannö, A., “Knowledge demands for energy management in manufacturing industry-A systematic literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159: 112168 (2022).
110. Oliveira, M.C., Iten, M., Cruz, P.L. and Monteiro, H., “Review on energy efficiency progresses, technologies and strategies in the ceramic sector focusing on waste heat recovery”, *Energies*, 13 (22): 6096 (2020).
111. Gangoellis, M., Casals, M., Forcada, N., MacArulla, M. and Giretti, A., “Energy performance assessment of an intelligent energy management system”, *Renewable Sustain Energy Reviews*, 55: 662-700 (2016).
112. Sihag, N. and Sangwan, K.S., “A systematic literature review on machine tool energy consumption”, *Journal of Cleaner Production*, 275: 123125 (2020).
113. Sa, A., Thollander, P. and Cagno, E., “Assessing the driving factors for energy management program adoption”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74: 538-547 (2017).
114. Sarnovsky, M., Bednar, P. and Smatana, M., “Cross-Sectorial semantic model for support of data analytics in process industrial”, *Processes*, 7 (5): 281 (2019).

115. Panwar, A., Nepal, B.P., Jain, R. and Rathore, A.P.S., “On the adoption of lean manufacturing principles in process industries”, ***Production Planning & Control***, 26 (7): 564-587 (2015).
116. Shahabuddin, M., Brooks, G. and Rhamdhani, M.A., “Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis”, ***Journal of Cleaner Production***, 395: 136391 (2023).
117. Friederich, J., and Lazarova-Molnar, S., “Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities”, ***Journal of Manufacturing Systems***, 72: 38-58 (2024).
118. Perry, S., Klemeš, J. and Bulatov, I., “Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors”, ***Energy***, 33 (10): 1489-1497 (2008).
119. Carapellucci, R., Giordano, L. and Vaccarelli, M., “Studying heat integration options for steam-gas power plants retrofitted with CO<sub>2</sub> post-combustion capture”, ***Energy***, 85: 594-608 (2015).
120. Mores, P.L., Manassaldi, J.I., Scenna, N.J., Caballero, J.A., Mussati, M.C. and Mussati, S.F., “Optimization of the design, operating conditions, and coupling configuration of combined cycle power plants and CO<sub>2</sub> capture processes by minimizing the mitigation cost”, ***Chemical Engineering Journal***, 331: 870-894 (2018).
121. Benhelal, E., Zahedi, G. And Hashim, H., “A novel design for green and economical cement manufacturing”, ***Journal of Cleaner Production***, 22 (1): 60-66 (2012).
122. Carapellucci, R. And Giordano, L., “Regenerative gas turbines and steam injection for repowering combined cycle power plants: Design and part-load performance”, ***Energy conversion and management***, 227: 113519 (2021).
123. Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R. and Meyer, B., “Estimating the global waste heat potential”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 57: 1568-1579 (2016).
124. Nemitallah, M.A., Nabhan, M.A., Alowaifeer, M., Haeruman, A., Alzahrani, F., Habib, M. A. and Alfarraj, M., “Artificial intelligence for control and optimization of boilers’ performance and emissions: A review”, ***Journal of Cleaner Production***, 417: 138109 (2023).
125. Internet: Industrial Emissions Directive 2010, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants”, *JRC Science for Policy Report*, [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/files/201911/JRC\\_LCPBref\\_2017.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/files/201911/JRC_LCPBref_2017.pdf) (2020).
126. CEFIC, "Guidelines for Energy Efficiency in Combustion installation", (2005).

127. Podder, J., Patra, B.R., Pattnaik, F., Nanda, S. and Dalai, A.K., “A review of carbon capture and valorization technologies”, *Energies*, 16 (6): 2589 (2023).
128. Tinaut, F. V., Melgar, A., Perez, J. F. and Horrillo, A., “Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier: An experimental and modelling study”, *Fuel processing technology*, 89 (11): 1076-1089 (2008).
129. Aliyon, K., Hajinezhad, A. and Mehrpooya, M., “Energy assessment of coal-fired steam power plant, carbon capture, and carbon liquefaction process chain as a whole”, *Energy Conversion and Management*, 199: 1-19 (2019).
130. Kilicaslan, I. and Ozdemir E., “Energy economy with a variable speed drive in an oxygen trim controlled boiler house”, *Energy Resource Technology*, 127 (1): 59-65 (2005).
131. González, J.F., González-García, C.M., Ramiro, A., González, J., Sabio, E., Gañán, J. and Rodríguez, M.A., “Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler”, *Biomass and Bioenergy*, 27 (2): 145-154 (2004).
132. Lee C.L. and Jou C.G., “Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace”, *Fuel Process Technology*, 92 (12): 2335-2340 (2011).
133. Jayamaha L., “Energy-efficient building systems: green strategies for operation and maintenance”, *McGraw Hill Professional*, United States of America, 40-250 (2006).
134. Barma, M.C., Saidur, R., Rahman, S.M.A., Allouhi, A., Akash, B.A. and Sadiq, M., “A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79: 970-983 (2017).
135. Shafiei, D., Mostafavi, S. A., Mehrabadi, S.J. and Toghraie, D., “Analysis of the effects of forced convective heat transfer to reduce the efficiency of heaters of gas pressure reducing stations”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 38: 102356 (2022).
136. Hong, G.B., Ma, C.M., Chen, H.W., Chuang, K.J., Chang, C. T. And Su, T.L., “Energy flow analysis in pulp and paper industry”, *Energy*, 36 (5): 3063-3068 (2011).
137. Sladewski, L., Wojdan, K., Swirski, K., Janda, T., Nabagło, D. and Chachuła, J., “Optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of acoustic system for in-furnace temperature measurement”, *Applied Thermal Engineering*, 123: 711-720 (2017).



138. Xu, G., Xu, C., Yang, Y., Fang, Y., Zhou, L. and Zhang, K., “Novel partial-subsidence tower-type boiler design in an ultra-supercritical power plant”, *Applied Energy*, 134: 363-373 (2014).
139. Sinanoğlu, U., Esen, D. Ö. ve Karakaş, E., “Enerji ekonomisi açısından geri kazanım sistemleri,” *TMMOB 1. Enerji Sempozyumu*, 25-52 (1996).
140. Kaya, D. and Güngör C., “Energy saving potential in Industry-II”, *Engineer and Machine*, 515: 36-44 (2002).
141. Chauhan, S.S. and Khanam, S., “Energy integration in boiler section of thermal power plant”, *Journal of Cleaner Production*, 202: 601-615 (2018).
142. Pronobis, M., Mroczek, K., Tymoszuik, M., Ciukaj, S., Wejkowski, R., Janda, T. And Jagodzinska, K., “Optimisation of coal fineness in pulverised-fuel boilers”, *Energy*, 139: 655-666 (2017).
143. Kaya, D. and Eyidogan, M., “Energy conservation opportunity in boiler systems”, *J. Energy Resources Technology*, 131 (3): 032401 (2009).
144. Li, G. and Niu, P., “Combustion optimization of a coal-fired boiler with double linear fast learning network”, *Methodologies and Application*, 20: 149-156 (2016).
145. Chen, H., Zhang, M., Wu, Y., Xu, G., Liu, W. and Liu W., “Design and performance evaluation of a new waste incineration power system integrated with a supercritical CO<sub>2</sub> power cycle and a coal-fired power plant”, *Energy Conversion and Management*, 210: 1-17 (2020).
146. Andersen, K.H., Frandsen, F.J., Hansen, P.F., Wieck-Hansen, K., Rasmussen, I., Overgaard, P. and Dam-Johansen, K., “Deposit formation in a 150 MWe utility PF-boiler during co-combustion of coal and straw”, *Energy and fuels*, 14 (4): 765-780 (2000).
147. Rastegarpour, S., Mariotti, A., Ferrarini, L. and Aminyavari, M., “Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC Approach”, *Applied Thermal Engineering*, 229: 120554 (2023).
148. Men, Y., Liu, X. And Zhang, T., “A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range”, *Energy*, 237: 121560 (2021).
149. Che, D., Liu, Y. and Gao C., “Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler” *Energy Conversion and Management*, 45 (20): 3251-3266 (2004).
150. İnternet: KTÜ, Üçüncü, K., “Enerji Yönetimi Ders Notu”, <https://avesis.ktu.edu.tr/kucuncu/dokumanlar.pdf> (2020).

151. Weber, R., Gupta, A.K. and Mochida, S., “High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects”, *Applied Energy*, 278, 115551 (2020).
152. Lee, C., Yu, B.J., Kim, D.H. and Jang, S.H., “Analysis of the thermodynamic performance of a waste-heat-recovery boiler with additional water spray onto combustion air stream”, *Applied Thermal Engineering*, 135: 197-205 (2018).
153. Oh, S.Y., Yun, S. and Kim, J.K., “Process integration and design for maximizing energy efficiency of a coal-fired power plant integrated with amine-based CO<sub>2</sub> capture process”, *Applied Energy*, 216: 311-322 (2018).
154. Zhao, H., Jiang, P., Chen, Z., Ezech, C.I., Hong, Y., Guo, Y., Zheng, C., Džapo, H., Gao, X. and Wu, T., “Improvement of fuel sources and energy products flexibility in coal power plants via energy-cyber-physical-systems approach”, *Applied Energy*, 254: 1-18 (2019).
155. Hanak, D.P., Biliyok, C., Yeung, H. And Bialecki, R., “Heat integration and exergy analysis for a supercritical high-ash coal-fired power plant integrated with a post-combustion carbon capture process”, *Fuel*, 134: 126-139 (2014).
156. Christodoulides, P., Agathokleous, R., Aresti, L., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A. and Florides, G.A., “Waste heat recovery technologies revisited with emphasis on new solutions, including heat pipes, and case studies”, *Energies*, 15 (1): 384 (2022).
157. Larsson, A., Kuba, M., Vilches, T.B., Seemann, M., Hofbauer, H. and Thunman, H., “Steam gasification of biomass—Typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants”, *Fuel Processing Technology*, 212: 106609 (2021).
158. Xu, X., Sun, W., Abeysekera, M. and Qadrdan, M., “Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 36 (1): 313-322 (2020).
159. Mumlu, G., “Enerji yönetim sistemi ve bir sanayi tesisinde enerji yönetimi uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 12-15 (2008).
160. Huang, W.G., Wang, Z.T., Duan, T.H. and Xin, L., “Effect of oxygen and steam on gasification and power generation in industrial tests of underground coal gasification”, *Fuel*, 289: 119855 (2021).
161. Theotokatos, G., Rentizelas, A., Guan, C. and Ancic, I., “Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles”, *Journal of Cleaner Production*, 267: 1-21 (2020).

162. Lu, D., Chen, G. and Gong, M., “Thermodynamic and economic analysis of a gas-fired absorption heat pump for district heating with cascade recovery of flue gas waste heat”, *Energy Conversion and Management*, 185: 87-100 (2019).
163. Jungwon Yu, J., Jang, J., Yoo, J., Park, J.H. and Kim, S., “A fault isolation method via classification and regression tree-based variable ranking for drum-type steam boiler in thermal power plant”, *Energies*, 11: 1-19 (2018).
164. Khaleel, O.J., Ismail, F.B., Ibrahim, T.K. and Bin Abu Hassan, S.H., “Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the classification, development, improvements, and configurations”, *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (3): 101640 (2022).
165. Han, Y., Zheng, J., Luo, X., Qian, Y. and Yang, S., “Multi-scenario data-driven robust optimisation for industrial steam power systems under uncertainty”, *Energy*, 263: 126032 (2023).
166. Kurgankina, M.A., Nyashina, G.S. and Strizhak, P.A., “Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals”, *Science of the Total Environment*, 671: 568-577 (2019).
167. Dhamodharan, P., Ayalur, B.K., Prabakaran, R., Kumar, A.S., Choi, G.S. and Kim, S.C., “Current state of research in air-conditioning condensate utilization and challenges: a review Approach”, *Applied Thermal Engineering*, 233: 121171 (2023).
168. Shen, C., Wang, M., Zhang, C., Dong, Y., Ni, L. and Jiang, Y., “Experimental investigation on a novel sewage-resource-based system with functions of heat recovery and water purification”, *Applied Thermal Engineering*, 165: 114580 (2020).
169. Ashraf, A., Ramamurthy, R. and Rene, E., “Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47: 101432 (2021).
170. Fard, M.S. and Shokri, A., “Principles, operational challenges, and perspectives in boiler feedwater treatment process”, *Environmental Advances*, 13: 100389 (2023).
171. Zeng, G., Wu, W., Chen, G., Li, J. and Wang, X., “Analysis of dynamic characteristics of marine deaerator”, *Energy Reports*, 8: 121-129 (2022).
172. Srinivas, T., “Study of a deaerator location in triple-pressure reheat combined power cycle”, *Energy*, 34: 1364-1371 (2009).
173. Chauhan, S.S. and Khanam, S., “Energy integration in boiler section of thermal power plant”, *Journal of Cleaner Production*, 202: 601-615 (2018).

174. Zhang, Y., Wanga, J., Yan, J., Chong, D. and Liu, J., “Experimental study on energy transformation and separation characteristic of circulatory flash evaporation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99: 862-871 (2016).
175. Hao, Z., Yanting, Z., Lin, W., Jingyu, X., Zheng, H., Guangzhi, Z. and Yunlong, Z., “System optimization of steam generation in the dual-flash compound circulation system”, *Frontiers in Energy Research*, 10: 1043087 (2023).
176. Pradeep Varmaa, G.V. and Srinivas, T., “Comparative study on steam flash, organic flash and Kalina for enhanced power generation from waste heat recovery”, *Journal of Power Technologies*, 96 (2): 81-91 (2016).
177. Kocabaş, C. and Savaş, A.F., “Reducing energy losses of steam boilers caused by blowdown with using the FMEA method”, *Smart Science*, 9 (2): 70-79 (2021).
178. Sornek, K., “Prototypical biomass fired micro cogeneration systems energy and ecological analysis”, *Energies*, 13: 1-16 (2020).
179. Usubharatana, P. and Phungrassami, H., “Life cycle assessment for enhanced efficiency of small power plants by reducing air input temperature”, *Polish Journal of Environmental Studies*, 27 (4): 1781-1793 (2018).
180. Kornienko, V., Radchenko, M., Radchenko, A., Koshlak, H. and Radchenko, R., “Enhancing the fuel efficiency of cogeneration plants by fuel oil afterburning in exhaust gas before boilers”, *Energies*, 16 (18): 6743 (2023).
181. Fan, J., Hong, H., Zhu, L., Jiang, Q. and Jin, H., “Thermodynamic and environmental evaluation of biomass and coal co-fuelled gasification chemical looping combustion with CO<sub>2</sub> capture for combined cooling, heating and power production”, *Applied Energy*, 195: 861-876 (2017).
182. Chicco, G. And Mancarella, P., “Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems part I: Models and indicators”, *Energy*, 33: 410-417 (2008).
183. İnternet: Tanpera, “Buhar türbini verileri”, <https://www.tanpera.com.tr/haberler/> (2022).
184. Trianni, A., Cagno, E. and Accordini, D., “A review of energy efficiency measures within electric motors systems”, *Energy Procedia*, 158: 3346-3351 (2019).
185. Zuberi, M.J.S., Tijdink, A. and Patel, M.K., “Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in swiss industry”, *Applied Energy*, 205: 85-104 (2017).

186. Nehler, T., “Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits -a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89: 72-87 (2018).
187. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Sanayide enerji verimli teknolojiler”,  
<https://enerji.gov.tr/enerji-verimliliği> (2021).
188. Bosu, I., Mahmoud, H. and Hassan, H., “Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis”, *Applied Energy*, 333: 120619 (2023).
189. İnternet: T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü, “Elektrik motorlarında enerji verimliliği, 2015”,  
<http://www.iaosb.org.tr/Media/FileDocument/ElektrikMotorlarbrosur> (2020).
190. Washington State Energy Office (WSEO), “Motor Master Database”, WA. (1993).
191. Çengel, Y. A. and Çerçi, Y., “Opportunities to save energy in industry”, *12. Turkish National Conference on Thermal Sciences and Technologies with International Participation*, 2: 392-399 (2000).
192. İnternet: Kanoğlu, M., “Enerji Verimliliği Örnek Projeleri”,  
<http://www.tskb.com.tr/i/content/486> (2021).
193. İnternet: IEC 60034-30-1, “Rotating electrical machines Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE code)”,  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/21121813-0e07-4234-b3c3> (2021).
194. İnternet: Voltmotor, “Elektrik motor sistemleri”,  
<https://voltmotor.com.tr/urunler/> (2022).
195. Dinolova, P., Ruseva, V. and Dinolov, O., “Energy efficiency of induction motor drives: state of the art, analysis and recommendations”, *Energies*, 16 (20): 7136 (2023).
196. Çengel, Y. A., Çerçi, Y. and Turner, R.H., “Some simple and economical ways of savings energy in industrial facilities”, *ASME Advanced Energy Systems Division*, 38: 146 (1998).
197. Karakoç, T.H., Söğüt, Z., Üren, S., Çelik, C., Durmaz, Ş. ve Orhan, İ., “Sanayide enerji ekonomisi”, Editör: Karakoç, T.H., *Anadolu Üniversitesi Yayınları*, Eskişehir, 142-169 (2012).
198. Tarell, R. E., “Improving compressed air system efficiency- know what you really need”, *Energy Engineering*, 1 (96): 7-15 (1999).

199. Dindorf, R., Takosoglu, J. and Wos, P., “Review of compressed air receiver tanks for improved energy efficiency of various pneumatic systems”, *Energies*, 16 (10): 4153 (2023).
200. Etemoğlu, A.B., Aypak, N., Gülbül, A., Çakal, C., Aydemir, E. ve Gümüş, Z., “Basınçlı hava sistemlerinde enerji verimliliği el kitabı”, *Busiad Yayınları*, Bursa, 92 (2016).
201. Dai, B., Wang, Q., Liu, S., Wang, D., Yu, L., Li, X. and Wang, Y., “Novel configuration of dual-temperature condensation and dual-temperature evaporation high-temperature heat pump system: Carbon footprint, energy consumption, and financial assessment”, *Energy Conversion and Management*, 292: 117360 (2023).
202. İnternet: Dalgakıran, “Kompresör”, <https://www.dalgakiran.com/dosyalar> (2022).
203. Sousa, A.S., Serra, J., Estevens, C., Costa, R. and Ribeiro, A.J., “Leveraging a multivariate approach towards enhanced development of direct compression extended release tablets”, *International Journal of Pharmaceutics*, 646: 123432 (2023).
204. O’Callaghan, O. And Donnellan, P., “Liquid air energy storage systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146: 1-12 (2021).
205. Qing, H., Lijian, W., Qian, Z., Chang, L., Dongmei, D. and Wenyi, L., “Thermodynamic analysis and optimization of liquefied air energy storage system”, *Energy*, 173: 162-173 (2019).
206. İnternet: Masgrup, “Pompa”, <https://masgrup.com/pompa-ekipmanlari> (2022).
207. Shojaeefard, M.H. and Saremian, S., “Analyzing the impact of blade geometrical parameters on energy recovery and efficiency of centrifugal pump as turbine installed in the pressure-reducing station”, *Energy*, 289: 130004 (2024).
208. Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M. and Yuan, W., “Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems”, *Processes*, 11 (12): 3304 (2023).
209. Jouhara, H., Bertrand, D., Axcell, B., Montorsi, L., Venturelli, M., Almahmoud, S., Milani, M., Ahmad, L. and Chauhan, A., “Investigation on a full-scale heat pipe heat exchanger in the ceramics industry for waste heat recovery”, *Energy*, 223: 120037 (2021).
210. Jouhara, H., Nieto, N., Egilegor, B., Zuazua, J., Gonz’alez, E., Yebra, I., Igesias, A., Delpech, B., Almahmoud, S., Brough, D., Malinauskaite, J., Vlasopoulos, A., Hill, M. and Brian Axcell, B., “Waste heat recovery solution based on a heat pipe

- heat exchanger for the aluminium die casting industry”, *Energy*, 266: 126459 (2023).
211. Madan, E., “Seramik Fırınlarda Atık Baca Gazından Enerji Geri Kazanımı ve Bir Uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, 38-42 (2014).
  212. Gibbs, B.M., “Boiler fuel savings by heat recovery and reduced standby losses”, *Heat Rec. Systems and CHP Journal*, 7: 151-157 (1987).
  213. Wang, Y., Cao, L., Li, X., Wang, J., Hu, P., Li, B. and Li, Y., “A novel thermodynamic method and insight of heat transfer characteristics on economizer for supercritical thermal power plant”, *Energy*, 191: 1-16 (2020).
  214. Wang, C., He, B., Yan, L., Pei, X. and Chen, S., “Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant”, *Energy Journal*, 65: 80-90 (2014).
  215. Çıtır, H., “Endüstriyel tav fırınında ekonomizer tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 10-13 (2013).
  216. Babu, C.R., Kumar, P., Roy, S. and Kanungo, D., “CFD analysis of an economizer for heat transfer enhancement using serrated finned tube equipped with variable fin segments”, *Materials Today: Proceedings*, 45, 222-230 (2021).
  217. Feng, Z., Xin, C., Zhou, T., Zhang, J. and Fu, T., “Airside thermal-hydraulic and fouling performances of economizers with integrally-molded spiral finned tubes for residual heat recovery”, *Applied Thermal Engineering*, 211: 118365 (2022).
  218. Salehipour, D., Jalili, B. and Jalili, P., “Effect of humidification of combustion products in the boiler economizer with spiral geometry”, *Results in Engineering*, 21: 101906 (2024).
  219. Zhang, G., Li, Y., Mohammed, D.B. and Toghraie, D., “Optimization of a high-temperature recuperator equipped with corrugated helical heat exchanger for improvement of thermal-hydraulic Performance”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 33: 101956 (2022).
  220. Chung, S., Lee, S.W., Kim, N., Shin, S.M., Kim, M.H. and Jo, H., “Experimental study of printed-circuit heat exchangers with airfoil and straight channels for optimized recuperators in nitrogen Brayton cycle”, *Applied Thermal Engineering*, 218: 119348 (2023).
  221. Aras, H., “Doğal gaz yakan sistemlerde baca gazından ısı geri kazanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 1-60 (1991).
  222. Ez Abadi, A.M., Sadi, M., Farzaneh-Gord, M., Ahmadi, M.H., Kumar, R. and Chau, K. W., “A numerical and experimental study on the energy efficiency of a

- regenerative heat and mass exchanger utilizing the counter-flow Maisotsenko cycle”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14 (1): 1-12 (2020).
223. Feng, H., Chen, W., Chen, L. and Tang, W., “Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle”, *Energy conversion and management*, 220: 113079 (2020).
  224. Zaporozhets, A.O. and Zaporozhets, A.O., “Research of the process of fuel combustion in boilers, control of fuel combustion in boilers”, *Springer*, Cham, 287: 35-60 (2020).
  225. West, T., “Mechanical to electronic control in industrial burners, Technical Bulletin”, *Energy Technology and Control Ltd, U.K.*, 152-160 (2002).
  226. Nowak, K. and Rabczak, S., “Co-combustion of biomass with coal in grate water boilers at low load boiler operation”, *Energies*, 14 (9): 2520 (2021).
  227. Paraschiv, L.S., Serban, A. and Paraschiv, S., “Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal/biomass/solid waste) and analysis of flue gas composition”, *Energy Reports*, 6: 36-45 (2020).
  228. Madejski, P. and Żymelka, P., “Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling”, *Energy*, 197: 117221 (2020).
  229. Saidur, R., Atabani, A.E. and Mekhilef, S., “A review on electrical and thermal energy for industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4): 2073-2086 (2011).
  230. Kaya, D., Eyidogan, M., Ozkaymak, M., Turhan, F., Kilinc, E., Kayabasi, E., Sahin, Z., Sonverdi, E. and Selimli, S., “Energy exergy efficiencies and environmental effects of mixed fuelled (solid plus gas) industrial facility steam boiler”, *Journal of the Energy Institute*, 86 (4): 194-201 (2013).
  231. Garrett-Peltier, H., “Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model”, *Economic Modelling*, 61: 439-447 (2017).
  232. Aigba, P.A., Emovon, I., Olusegun David Samuel, O.D., Enweremadu, C.C., Abdeljawad, T., Al-Mdallal, A.M. and Afzal, A., “Exergetic assessment of waste gas to energy in a novel integrated NGL recovery and power generation plant”, *Frontiers in Energy Research*, 9: 798896 (2022).
  233. Mostafavi, S.A. and Shirazi, M., “Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption”, *Energy*, 212: 118390 (2020).



234. İnternet: IPCC, “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories-Volume 2: Energy”  
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html> (2021).
235. Tsoumalis, G.I., Bampas, Z.N., Chatzis, G.V. and Biskas, P.N., “Overview of natural gas boiler optimization technologies and potential applications on gas load balancing services”, *Energies*, 15 (22): 8461 (2022).
236. IPCC, “Greenhouse gas inventory reference manual-Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Edited by Houghton J.T., et al., *Intergovernmental Panel on Climate Change*, (1996).
237. IPCC, “Greenhouse gas inventory reference manual-2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” , *Intergovernmental Panel on Climate Change*, (2006).
238. Kumar, D., Alam, M., Zou, P.X., Sanjayan, J.G. and Memon, R.A., “Comparative analysis of building insulation material properties and performance”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131: 110038 (2020).
239. Pásztor, Z., “An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials”, *Journal of Building Engineering*, 44: 102604 (2021).
240. Füchsl, S., Rheude, F. and Röder, H., “Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review”, *Cleaner Materials*, 5: 100119 (2022).
241. Rabbat, C., Awad, S., Villot, A., Rollet, D. and Andrès, Y., “Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156: 111962 (2022).
242. Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G. and Xu, T., “Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical Climate”, *Sustainable Cities and Society*, 52: 101840 (2020).
243. Kishore, R.A., Bianchi, M.V., Booten, C., Vidal, J. and Jackson, R., “Enhancing building energy performance by effectively using phase change material and dynamic insulation in walls”, *Applied Energy*, 283: 116306 (2021).
244. Wang, H., An, C., Duan, M. and Su, J., “Transient thermal analysis of multilayer pipeline with phase change material”, *Applied Thermal Engineering*, 165: 114512 (2020).
245. Kartal, S. ve Erten, Ş., “Aydınlatma enerjisi verimliliği üzerine bir çalışma: Endüstri yapısı örneği”, *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 10-26 (2016).

246. Demir, H., Çıracı, G., Reyhan, K. ve Ünver, Ü., “Aydınlatmada enerji verimliliği: Yalova üniversitesi mühendislik fakültesi durum değerlendirmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25 (3): 1637-1652 (2020).
247. Eralp, A., “Türkiye sanayi sektöründeki elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin mekânsal analizi”, *Verimlilik Dergisi*, 99-112 (2023).
248. Azcarate, I., Gutierrez, J.J., Lazkano, A., Saiz, P., Redondo, K. and Leturiondo, L.A., “Towards limiting the sensitivity of energy-efficient lighting to voltage fluctuations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59: 1384-1395 (2016).
249. Kwong, Q.J., “Light level, visual comfort and lighting energy savings potential in a green-certified high-rise building”, *Journal of Building Engineering*, 29: 101198 (2020).
250. Kırbaş, İ., “Binalarda enerji verimliliği uygulamaları”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 34 (2): 835-843 (2019).
251. Enongene, K.E., Murray, P., Holland, J. and Abanda, F.H., “Energy savings and economic benefits of transition towards efficient lighting in residential buildings in Cameroon”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78: 731-742 (2017).
252. Sangwan, K.S., Bhakar, V., Naik, S. and Andrat, S.N., “Life cycle assessment of incandescent, fluorescent, compact fluorescent and light emitting diode lamps in an Indian scenario”, *Procedia CIRP*, 15: 467-472 (2014).
253. Montoya, F.G., Peña-García, A., Juaidi, A. and Manzano-Agugliaro, F., “Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving”, *Energy and buildings*, 140: 50-60 (2017).
254. Waide, P. and Tanishima, S., “Light’s Labour’s lost policies for energy efficient lighting energy”, *OECD Publishing*, 561 (2006).
255. Coşkun, S. ve Öztıp, H., “Farklı kullanım alanlarının aydınlatılması: Verimlilik ve temel ilkeler”, *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-dergisi*, 9: 5-7 (2016).
256. Perdahçı, C. ve Hanlı, U., “Verimli aydınlatma yöntemleri”, *III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 323-327 (2009).
257. Agrawal, D. C., Leff, H. S. and Menon, V. J., “Efficiency and efficacy of incandescent lamps”, *American Journal of Physics*, 34 (2): 835-843 (1996).
258. Şahin, D., “Aydınlatma tasarımının kullanıcı üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkileri açısından incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 56-76 (2012).

259. Onaygil, S., “Aydınlatmada verimlilik ve enerji tasarrufu”, *İzmir Aydınlatma Sempozyumu*, İzmir, 6-12 (2001).
260. Pode, R., “Organic light emitting diode devices: An energy efficient solid state lighting for applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133: 110043 (2020).
261. Loisel, R., Butler, J., Brady, G., Walton, M. and Henze, N., “LED Lighting for oil and gas facilities”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (2): 1369-1374 (2015).
262. Beu, D., Ciugudeanu, C. and Buzdugan, M., “Circular economy aspects regarding led lighting retrofit-from case studies to vision”, *Sustainability*, 10: 1-14 (2018).
263. Kumar, A., Jain, S.K. and Bansal, N.K., “Disseminating energy-efficient technologies: a case study of compact fluorescent lamps (CFLs) in India”, *Energy Policy*, 31 (3): 259-272 (2003).
264. Collin, A.J., Djokic, S., Drapela, J., Guo, Z., Langella, R., Testa, A. and Watson, N.R., “Analysis of approaches for modeling the low frequency emission of LED lamps”, *Energies*, 13 (7): 1571 (2020).
265. Byun, J. and Shin, T., “Design and implementation of an energy-saving lighting control system considering user satisfaction”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 51 (2): 1369-1374 (2018).
266. Manav, B., Erkin, E., Güler, Ö. and Onaygil, S., “An experimental study on tubular fluorescent and led lamps with respect to energy performance and visual comfort”, *Light & Engineering*, 21 (4): 50-57 (2013).
267. Damerdash, A.M., Abdelhameed, D., Aly, M., Ahmed, E.M. and Ahmed, M.A., “Energy efficiency assessment of power electronic drivers and led lamps in li-fi communication systems”, *Energy Reports*, 7: 7648-7662 (2021).
268. İnternet: Elektrikport, “Aydınlatma armatürleri”, <https://www.elektrikport.com/> (2022).
269. İnternet: Aktif Elektroteknik, “Aydınlatma enerji verimliliğinde led teknolojisi”, <https://aktif.net/aydinlatma-enerji-verimliliginde-led-teknolojisi/> (2022).
270. Sathre, R., “Comparing the heat of combustion of fossil fuels to the heat accumulated by their lifecycle greenhouse gases”, *Fuel*, 115: 674-677 (2014).
271. Park, Y.K. and Kim, B.S., “Catalytic removal of nitrogen oxides (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) from ammonia-fueled combustion exhaust: A review of applicable technologies”, *Chemical Engineering Journal*, 461: 141958 (2023).

272. Jeon, M., Lee, E., Kim, M., Jegal, H., Park, S., Chi, J. H. and Keel, S.I., "Nitric oxide (NO) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions during selective non-catalytic reduction and selective catalytic reduction processes in a pulverized coal/Ammonia Co-fired boiler", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (2): 109398 (2023).
273. Jeffry, L., Ong, M.Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M. and Show, P.L., "Greenhouse gases utilization: A review", *Fuel*, 301: 1-12 (2021).
274. Pugnaire, F.I., Morillo, J.A., Penuelas, J., Reich, P.B., Bardgett, R.D., Gaxiola, A., Wardle, D.A. and van der Putten, W.H., "Climate change effects on plant-soil feedbacks and consequences for biodiversity and functioning of terrestrial ecosystems", *Ecology*, 5 (11): 1-11 (2019).
275. Kinney, P.L., "Interactions of climate change, air pollution, and human health", *Current Environmental Health Reports*, 5: 179-186 (2018).
276. Song, H., Zhuo, H., Fu, S. and Ren, L., "Air pollution characteristics, health risks, and source analysis in Shanxi Province, China", *Environmental Geochemistry and Health*, 43(1): 391-405 (2021).
277. Can, A., "The statistical modeling of potential biogas production capacity from solid waste disposal sites in Turkey", *Journal of Cleaner Production*, 243: 1-13 (2020).
278. Can, A., "Investigation of provincial capacity to produce biogas from waste disposal sites in Turkey", *Energy*, 258: 1-21 (2022).
279. Can, A., "Excel tabanlı direk sera gazı emisyon hesabı programı", (2023).
280. Carter, A., Imtiaz, S. and Naterer, G.F., "Review of interpretable machine learning for process industries", *Process Safety and Environmental Protection*, 170: 647-659 (2023).
281. Li, X., Wang, H. and Yang, C., "Driving mechanism of digital economy based on regulation algorithm for development of low-carbon industries", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55: 102909 (2023).
282. Zhu, B. and Shan, H., "Impacts of industrial structures reconstructing on carbon emission and energy consumption: A case of Beijing", *Journal of Cleaner Production*, 245: 118916 (2020).
283. Lin, B. and Raza, M.Y., "Coal and economic development in Pakistan: A necessity of energy source", *Energy*, 207: 118244 (2020).

284. Olabi, A.G., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M.A. and Alami, A.H., "Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters-A review", ***Journal of Energy Storage***, 34: 102000 (2021).
285. Nota, G., Nota, F. D., Peluso, D. and Toro Lazo, A., "Energy efficiency in Industry 4.0: The case of batch production processes", ***Sustainability***, 12 (16): 6631 (2020).
286. Madejski, P., Chmiel, K., Subramanian, N. and Kus, T., "Methods and techniques for CO<sub>2</sub> capture: Review of potential solutions and applications in modern energy technologies", ***Energies***, 15 (3): 887 (2022).
287. Zhang, X., Li, K., Zhang, C. and Wang, A., "Performance analysis of biomass gasification coupled with a coal-fired boiler system at various loads", ***Waste Management***, 105: 84-91 (2020).
288. Chantasiriwan, S., "Optimum installation of economizer, air heater, and flue gas dryer in biomass boiler", ***Computers & Chemical Engineering***, 150: 107328 (2021).
289. Udara, S. A., Kohilan, R., Lakshan, M.A.L., Madalagama, M.L., Pathirana, P.P. and Sandupama, P.S., "Simulation of carbon dioxide capture for industrial applications", ***Energy Reports***, 6: 659-663 (2020).
290. Meunier, F., "Co and tri-generation contribution to climate change control", ***Applied Thermal Engineering***, 22: 703-718 (2002).
291. Majchrzak-Kuceba, I., Wawrzyńczak, D., Zdeb, J., Smolka, W. and Zajchowski, A., "Treatment of flue gas in a CO<sub>2</sub> capture pilot plant for a commercial CFB boiler", ***Energies***, 14 (9): 2458 (2021).
292. Gür, T.M., "Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies", ***Progress in Energy and Combustion Science***, 89: 100965 (2022).
293. Sasikumar, C., Sundaresan, R., Kannan, R. and Nagaraja, M., "Investigation on biomass gasification process", ***Materials Today: Proceedings***, 64: 1844-1848 (2022).
294. Han, J., Liang, Y., Hu, J., Qin, L., Street, J., Lu, Y. and Yu, F., "Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus", ***Energy Conversion and Management***, 153: 641-648 (2017).
295. Zhang, Z., Zhao, Z. and Zhang, L., "Recent progress in the gasification reaction behavior of coal char under unconventional combustion modes", ***Applied Thermal Engineering***, 220: 119742 (2023).

296. Lu, Y., Li, Z., Zhang, M., Huang, C. and Chen, Z., “The application of thermal-calculation methods in the design and syngas prediction of entrained-flow coal gasifiers”, ***Energy Conversion and Management***, 245: 114627 (2021).
297. Jaszczur, M., Michal Dudek, M., Rosen, M.A. and Kolenda, Z., “An analysis of integration of a power plant with a lignite superheated steam drying unit”, ***Journal of Cleaner Production***, 243: 1-14 (2020).
298. Wang, F., Zhao, J., Zhang, H., Miao, H., Zhao, J., Wang, J., Yuan, J. and Yand, J., “Efficiency evaluation of a coal-fired power plant integrated with chilled ammonia process using an absorption refrigerator”, ***Applied Energy***, 230: 267-276 (2018).
299. Zhao, N., Li, B., Ahmad, R., Ding, F., Zhou, Y., Li, G. and Dong, R., “Dynamic relationships between real-time fuel moisture content and combustion-emission-performance characteristics of wood pellets in a top-lit updraft cookstove”, ***Case Studies in Thermal Engineering***, 28: 101484 (2021).
300. Gopan, A., Verma, P., Yang, Z. and Axelbaum, R. L., “Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants”, ***International Journal of Greenhouse Gas Control***, 95: 102936 (2020).
301. Wu, X., Liu, W., Gao, H., Alfaro, D., Sun, S., Lei, R. and Zheng, M., “Coordinated effects of air pollution control devices on PAH emissions in coal-fired power plants and industrial boilers”, ***Science of The Total Environment***, 756: 144063 (2021).
302. Liao, W., Zhang, X. and Li, Z., “Experimental investigation on the performance of a boiler system with flue gas dehumidification and combustion air humidification”, ***Applied Energy***, 323: 119623 (2022).
303. Xu, C., Xu, G., Zhao, S., Zhou, L., Yang, Y. and Zhang, D., “An improved configuration of lignite pre-drying using a supplementary steam cycle in a lignite fired supercritical power plant”, ***Applied Energy***, 160: 882-891 (2015).
304. Klemes, J.J., Wang, Q.W., Varbanov, P.S., Zeng, M., Chin, H.H., Lal, N.S. and Walmsley, T.G., “Heat transfer enhancement, intensification and optimisation in heat exchanger network retrofit and operation”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 120: 109644 (2020).
305. Araiz, M., Casi, Á., Catalán, L., Martínez, Á. and Astrain, D., “Prospects of waste-heat recovery from a real industry using thermoelectric generators: Economic and power output analysis”, ***Energy Conversion and Management***, 205: 112376 (2020).
306. Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. and Khaled, M., “A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations”, ***Cleaner Engineering and Technology***, 6: 100387 (2022).

307. Ahmadi, G.R. and Toghraie, D., “Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 56: 454-463 (2016).
308. De Antonellis, S., Cignatta, L., Facchini, C. and Liberati, P., “Effect of heat exchanger plates geometry on performance of an indirect evaporative cooling system”, ***Applied Thermal Engineering***, 173: 115200 (2020).
309. Sadeghianjahromi, A. and Wang, C.C., “Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers-A review on different mechanisms”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 137: 110470 (2021).
310. Ghorbani, B., Ebrahimi, A., Rooholamini, S. and Ziabasharhagh, M., “Pinch and exergy evaluation of Kalina/Rankine/gas/steam combined power cycles for tri-generation of power, cooling and hot water using liquefied natural gas regasification”, ***Energy Conversion and Management***, 223: 113328 (2020).
311. Dzikuc, M., Kuryło, P., Dudziak, R., Szufa, S., Dzikuc, M. and Godzisz, K., “Selected aspects of combustion optimization of coal in power plants”, ***Energies***, 13: 1-15 (2020).
312. Thapa, S., Samir, S., Kumar, K. and Singh, S., “A review study on the active methods of heat transfer enhancement in heat exchangers using electroactive and magnetic materials”, ***Materials Today: Proceedings***, 45: 4942-4947 (2021).
313. Maji, A. and Choubey, G., “Improvement of heat transfer through fins: A brief review of recent developments”, ***Heat Transfer***, 49 (3): 1658-1685 (2020).
314. Rauber, W.K., Silva, U.F., Vaz Jr, M., Alves, M.V.C. and Zdanski, P.S.B., “Investigation of the effects of fin perforations on the thermal-hydraulic performance of Plate-Finned heat exchangers”, ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 187: 122561 (2022).
315. Aravinda, B., Khandelwal, B., Ramakrishnac, P.A. and Kumar, S., “Towards the development of a high power density, high efficiency, micro power generator”, ***Applied Energy***, 261: 1-12 (2020).
316. Ji, L., Li, W., Shi, W., Chang, H. and Yang, Z., “Energy characteristics of mixed-flow pump under different tip clearances based on entropy production analysis”, ***Energy***, 199: 117447 (2020).
317. Gaur, A.S., Fitiwi, D.Z. and Curtis, J., “Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review”, ***Energy Research & Social Science***, 71: 101764 (2021).
318. Jesper, M., Schlosser, F., Pag, F., Walmsley, T.G., Schmitt, B. and Vajen, K., “Large-scale heat pumps: Uptake and performance modelling of market-available devices”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 137: 110646 (2021).

319. Saari, J., Sermyagina, E., Kaikko, J., Haider, M., Hamaguchi, M. and Vakkilainen, E., "Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the kraft recovery boiler", **Energies**, 14: 1-21 (2021).
320. Fernández-Yáñez, P., Romero, V., Armas, O. and Cerretti, G., "Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery", **Applied Thermal Engineering**, 196: 117291 (2021).
321. Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. and Khaled, M., "A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations", **Cleaner Engineering and Technology**, 6: 100387 (2022).
322. Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L. and Dai, S., "Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications", **International Journal of Thermofluids**, 9: 100063 (2021).
323. Fernández-Yáñez, P., Romero, V., Armas, O. and Cerretti, G., "Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery", **Applied Thermal Engineering**, 196: 117291 (2021).
324. Bahadori, A. and Vuthaluru, H.B., "A simple correlation for estimation of economic thickness of thermal insulation for process piping and equipment", **Applied Thermal Engineering**, 30 (2-3): 254-259 (2010).
325. Angrisani, G., Canelli, M., Roselli, C. and Sasso, M., "Microcogeneration in buildings with low energy demand in load sharing application", **Energy Conversion and Management**, 100: 78-89 (2015).
326. Kürekçi, N.A. and Özcan, M., "A practical method for determination of economic insulation thickness of steel, plastic and copper hot water pipes", **Journal of Thermal Engineering**, 6: 72-86 (2020).
327. Li, Y., Rezgui, Y. and Zhu, H., "District heating and cooling optimization and enhancement—Towards integration of renewables, storage and smart grid", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 72: 281-294 (2017).
328. Cardona, E., Piacentino, A. and Cardona, F., "Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems", **Energy Conversion and Management**, 47 (20): 3530-3542 (2006).
329. Lund, P.D., Lindgren, J., Mikkola, J. and Salpakari, J., "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity", **Renewable and sustainable energy reviews**, 45: 785-807 (2015).
330. Huang, D., Ding, C.D., Tao, Y., Wen, Z. and Wang, Y., "Multi-objective optimization of energy conservation and emission reduction in China's iron and



steel industry based on dimensionality reduction”, *Journal of Cleaner Production*, 368: 133131 (2022).

331. Pan, M., Aziz, F., Li, B., Perry, S., Zhang, N., Bulatov, I. and Smith, R., “Application of optimal design methodologies in retrofitting natural gas combined cycle power plants with CO<sub>2</sub> capture”, *Applied Energy*, 161: 695-706 (2016).
332. Reijers, H. A., & Mansar, S. L. (2005). Best practices in business process redesign: an overview and qualitative evaluation of successful redesign heuristics. *Omega*, 33(4), 283-306.
333. Li, J., Laredj, A. and Tian, G., “A case study of a CHP system and its energy use mapping”, *Energy Procedia*, 105: 1526-1531 (2017).
334. Santos, C.A., Spim Jr, J.A., Ierardi, M.C. and Garcia, A., “The use of artificial intelligence technique for the optimisation of process parameters used in the continuous casting of steel”, *Applied Mathematical Modelling*, 26 (11): 1077-1092 (2002).
335. Soori, M. and Asmael, M., “A review of the recent development in machining parameter optimization”, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 16 (2): 205-223 (2022).
336. Giacone, E. and Mancò, S., “Energy efficiency measurement in industrial processes”, *Energy*, 38 (1): 331-345 (2012).
337. Zhanga, X., Hongqiang Lia, H., Liu, L., Bai, C., Wang, S., Song, Q., Zeng, J., Liu, X. and Zhang, G., “Exergetic and exergoeconomic assessment of a novel chp system integrating biomass partial gasification with ground source heat pump”, *Energy Conversion and Management*, 156: 666-679 (2018).

**EK AÇIKLAMALAR A.**

**YAKITLARIN NET KALORİFİK DEĞERLERİ**

| Yakıt Tipi                     | Net kalorifik değer<br>(Tj/Gg) | Alt ısı değer | Üst ısı değer | Net kalorifik değer<br>(Kcal/kg) | Alt ısı değer | Üst ısı değer |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Ham Petrol                     | 42,3                           | 40,1          | 44,8          | 10109,94                         | 9584,13       | 10707,46      |
| Orimülsiyon                    | 27,5                           | 27,5          | 28,3          | 6572,66                          | 6572,66       | 6763,86       |
| Sıvılaştırılmış Doğalgaz       | 44,2                           | 40,9          | 46,9          | 10564,05                         | 9775,33       | 11209,37      |
| Motor Benzinii                 | 44,3                           | 42,5          | 44,8          | 10587,95                         | 10157,74      | 10707,46      |
| Havacılık Benzini              | 44,3                           | 42,5          | 44,8          | 10587,95                         | 10157,74      | 10707,46      |
| Jet Benzini                    | 44,3                           | 42,5          | 44,8          | 10587,95                         | 10157,74      | 10707,46      |
| Diğer Gazyağı                  | 43,8                           | 42,4          | 45,2          | 10468,45                         | 10133,84      | 10803,06      |
| Şist yağı                      | 38,1                           | 32,1          | 45,2          | 9106,12                          | 7672,08       | 10803,06      |
| Gaz/Dizel Yağı                 | 43                             | 41,4          | 43,3          | 10277,25                         | 9894,84       | 10348,95      |
| Artık Fuel Oil                 | 40,4                           | 39,8          | 41,7          | 9655,83                          | 9512,43       | 9966,54       |
| Sıvılaştırılmış Petrol Gazları | 47,3                           | 44,8          | 52,2          | 11304,97                         | 10707,46      | 12476,10      |
| Etan                           | 46,4                           | 44,9          | 48,8          | 11089,87                         | 10731,36      | 11663,48      |
| Nafta                          | 44,5                           | 41,8          | 46,5          | 10635,76                         | 9990,44       | 11113,77      |
| Bitüm                          | 40,2                           | 33,5          | 41,2          | 9608,03                          | 8006,69       | 9847,04       |
| Yağlayıcılar                   | 40,2                           | 33,5          | 42,3          | 9608,03                          | 8006,69       | 10109,94      |
| Petrol Kok                     | 32,5                           | 29,7          | 41,9          | 7767,69                          | 7098,47       | 10014,34      |
| Rafineri Hammaddeleri          | 43                             | 36,3          | 46,4          | 10277,25                         | 8675,91       | 11089,87      |
| Rafineri Gazı                  | 49,5                           | 47,5          | 50,6          | 11830,78                         | 11352,77      | 12093,69      |
| Parafin Mumları                | 40,2                           | 33,7          | 48,2          | 9608,03                          | 8054,49       | 11520,08      |
| Sentetik Tiner ve SBP          | 40,2                           | 33,7          | 48,2          | 9608,03                          | 8054,49       | 11520,08      |
| Diğer Petrol Ürünleri          | 40,2                           | 33,7          | 48,2          | 9608,03                          | 8054,49       | 11520,08      |
| Antrasit                       | 26,7                           | 21,6          | 32,2          | 6381,45                          | 5162,52       | 7695,98       |
| Kok Kömürü                     | 28,2                           | 24            | 31            | 6739,96                          | 5736,14       | 7409,18       |
| Diğer Bitümlü Kömür            | 25,8                           | 19,9          | 30,5          | 6166,35                          | 4756,21       | 7289,67       |
| Alt Bitümlü Kömür              | 18,9                           | 11,5          | 26            | 4517,21                          | 2748,57       | 6214,15       |
| Linyit                         | 11,9                           | 5,5           | 21,6          | 2844,17                          | 1314,53       | 5162,52       |
| Petrol Şeyli ve Katran Kumları | 8,9                            | 7,1           | 11,1          | 2127,15                          | 1696,94       | 2652,96       |
| Kahverengi Kömür Briketleri    | 20,7                           | 15,1          | 32            | 4947,42                          | 3608,99       | 7648,18       |
| Kahverengi Kömür Briketleri    | 20,7                           | 15,1          | 32            | 4947,42                          | 3608,99       | 7648,18       |
| Patentli Yakıt                 | 20,7                           | 15,1          | 32            | 4947,42                          | 3608,99       | 7648,18       |
| Kok Fırını Kok ve Linyit Kok   | 28,2                           | 25,1          | 30,2          | 6739,96                          | 5999,04       | 7217,97       |
| Gaz Kok                        | 28,2                           | 25,1          | 30,2          | 6739,96                          | 5999,04       | 7217,97       |
| Kömür katranı                  | 28                             | 14,1          | 55            | 6692,16                          | 3369,98       | 13145,32      |
| Gas Works Gas                  | 38,7                           | 19,6          | 77            | 9249,52                          | 4684,51       | 18403,44      |
| Kok Fırın Gazı                 | 38,7                           | 10,6          | 77            | 9249,52                          | 2533,46       | 18403,44      |
| Yüksek Fırın Gazı              | 2,47                           | 1,2           | 5             | 590,34                           | 286,81        | 1195,03       |
| Oksijen Çelik Fırın Gazı       | 7,06                           | 3,8           | 15            | 1687,38                          | 908,22        | 3585,09       |
| Doğalgaz                       | 48                             | 46,5          | 50,4          | 11472,28                         | 11113,77      | 12045,89      |
| Evsel Atıklar                  | 10                             | 7             | 18            | 2390,06                          | 1673,04       | 4302,10       |
| Atık Yağ                       | 40,2                           | 20,3          | 80            | 9608,03                          | 4851,82       | 19120,46      |
| Turba                          | 9,76                           | 7,8           | 12,5          | 2332,70                          | 1864,24       | 2987,57       |
| Odun/Odun Atıkları             | 15,6                           | 7,9           | 31            | 3728,49                          | 1888,15       | 7409,18       |
| Sülfür kostikler               | 11,8                           | 5,9           | 23            | 2820,27                          | 1410,13       | 5497,13       |
| Diğer Birincil Katı Biyokütle  | 11,6                           | 5,9           | 23            | 2772,47                          | 1410,13       | 5497,13       |
| Odun Kömürü                    | 29,5                           | 14,9          | 58            | 7050,67                          | 3561,19       | 13862,33      |
| Biyogazın                      | 27                             | 13,6          | 54            | 6453,15                          | 3250,48       | 12906,31      |
| Sıvı Biyodizel                 | 27                             | 13,6          | 54            | 6453,15                          | 3250,48       | 12906,31      |
| Diğer Sıvı Biyoyakıtlar        | 27,4                           | 13,8          | 54            | 6548,76                          | 3298,28       | 12906,31      |
| Çöp Gazı                       | 50,4                           | 25,4          | 100           | 12045,89                         | 6070,75       | 23900,57      |
| Çamur Gazı                     | 50,4                           | 25,4          | 100           | 12045,89                         | 6070,75       | 23900,57      |
| Diğer Biyogazlar               | 50,4                           | 25,4          | 100           | 12045,89                         | 6070,75       | 23900,57      |
| Belediye Atıkları              | 11,6                           | 6,8           | 18            | 2772,47                          | 1625,24       | 4302,10       |

\* Not : Katı yakıtlar için kalorifik değerleri ülke bazında farklılık gösterebilmektedir.

### Şekil Ek A.1. Yakıtların Net Kalorifik Değerleri.

## ÖZGEÇMİŞ

Neslin HASAR OCAK, ilk ve orta öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. 2004 yılında Susurluk Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi- Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Lisans Programı’na başlayıp 2009 yılında mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi - Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Programı’nı 2012 yılında tamamladı. 2015 yılında Karabük Üniversitesi - İmalat Mühendisliği Lisans Programı’na başlayıp 2016 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi - Makine Mühendisliği Lisans Programı’na başlayıp 2020 yılında mezun oldu. 2018 yılında, Karabük Üniversitesi- Makine Mühendisliği Bölümü’nde Doktora imtihanında başarılı olarak, Doktora Programı’na devam etmeye hak kazandı. Aynı yıl doktora çalışması “**YÖK 100/2000 Bursiyer Destek Programı**” ile desteklenmeye değer görüldü. Çalışma bu alanda ilk ve en kapsamlı çalışma olarak Şubat 2024 yılında tamamlandı.