

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



BOLU İLİ OSB BÜNYESİNDEKİ İNŞAAT MALZEMELERİ
ÜRETEN ENDÜSTRİYEL BİR TESİSTE ENERJİ
VERİMLİLİĞİ ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET KABAŞ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

BOLU, TEMMUZ 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ahmet KABAŞ tarafından hazırlanan “**BOLU İLİ OSB BÜNYESİNDEKİ İNŞAAT MALZEMELERİ ÜRETEN ENDÜSTRİYEL BİR TESİSTE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir. 28/07/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ömer ÖZYURT
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Fikret POLAT
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

AHMET KABAŞ

Oğullarım Furkan'a, Alper'e ve eşim İlknur'a ithafen



ÖZET

BOLU İLİ OSB BÜNYESİNDEKİ İNŞAAT MALZEMELERİ ÜRETen ENDÜSTRİYEL BİR TESİSTE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABAŞ, Ahmet

**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖMER ÖZYURT)**

BOLU, TEMMUZ - 2025

XV + 108 sayfa

Bu tez çalışmasında, Bolu ili Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren ve inşaat malzemeleri üreten bir endüstriyel tesisin enerji verimliliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırma, tesisteki enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik uygulanabilir stratejilerin belirlenmesini ve bunların enerji tasarrufuna ve karbon salınımına olan etkisinin ölçülmesini amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, güneş panelleri ile enerji üretimi, basınçlı hava sistemlerindeki hava kaçaklarının analizi, kompresör sistemleri emiş havası analizi, atık ısı analizi, basınç set değeri analizi, vakum sistemleri, yalıtım uygulamaları, soğutma sistemleri, elektrik sistemleri ve aydınlatma sistemlerinde yapılabilecek iyileştirmeler değerlendirilmiştir. Ölçümler, sahada uzman kişiler eşliğinde gerçekleştirilmiş; güneş enerji potansiyel analizi için PVsyst programı kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile enerji verimliliği kazanımları hesaplanmış ve bu analizler ışığında ekonomik ve çevresel kazanımlar hesaplanmıştır.

Bulgular, enerji tasarrufu sağlayan yöntemlerin uygulanmasıyla işletmede hem enerji tüketiminin hem de maliyetlerin ciddi oranda azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca enerji verimliliği çalışmalarının sürdürülebilirlik ve karbon salınımının azaltılması açısından da katkı sunduğu belirlenmiştir. Tezde elde edilen sonuçlar, ileride yapılacak benzer çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Enerji verimliliği, Enerji tasarrufu

ABSTRACT

**ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS IN AN INDUSTRIAL FACILITY
MANUFACTURING CONSTRUCTION MATERIALS IN BOLU
PROVINCE OIZ
MASTER THESIS
KABAŞ, AHMET
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
MASTER PROGRAM DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. ÖMER ÖZYURT)**

**BOLU, JULY 2025
XV + 108 pages**

In this thesis study, the energy efficiency of an industrial facility operating in the Organized Industrial Zone of Bolu province and producing construction materials has been analyzed in detail. The research aims to identify feasible strategies to reduce the facility's energy consumption and to measure their impact on energy savings and carbon emissions.

Within the scope of the study, various improvement opportunities were evaluated, including solar energy production, analysis of compressed air leaks, intake air analysis of compressor systems, waste heat recovery, pressure setpoint analysis, vacuum systems, insulation applications, cooling systems, electrical systems, and lighting systems. Measurements were carried out on-site with the assistance of experts, and the PVsyst software was used to analyze the solar energy potential. Based on the collected data, energy efficiency gains were calculated, and both economic and environmental benefits were assessed accordingly.

The findings revealed that implementing energy-saving measures can significantly reduce both energy consumption and operating costs of the facility. Furthermore, the study demonstrated that energy efficiency practices contribute positively to sustainability and the reduction of carbon emissions. The results obtained from this thesis are expected to serve as a guiding reference for similar future studies.

KEYWORDS: Energy efficiency, Energy saving

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Enerji ve Enerji Verimliliği	1
1.1.1 Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği	2
1.1.2 Kompresör Sistemlerinde Enerji Verimliliği.....	7
1.1.3 Vakum Sistemlerinde Enerji Verimliliği	8
1.1.4 Yalıtım İle Enerji Verimliliği	10
1.1.5 Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Verimliliği.....	10
1.1.6 Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği	12
1.1.7 Elektrik Sistemlerinde Enerji Verimliliği.....	15
1.1.8 Güneş Enerjisi Sistemlerinde Enerji Verimliliği	17
1.2 Türkiye ve Dünya’da Enerjinin Genel Durumu	19
1.2.1 Elektrik	22
1.2.2 Doğalgaz.....	25
1.2.3 Hidroelektrik.....	26
1.2.4 Rüzgâr.....	28
1.2.5 Güneş	30
1.2.6 Jeotermal.....	35
1.2.1 Nükleer	37
1.3 Karbon Emisyonu	40
1.4 Literatür Araştırması.....	42
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	48
2.1 Kuramsal Temeller	48
2.1.1 Basınçlı Hava Sistemleri ve Hava Tabancalarının Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri.....	48
2.1.2 Kompresör Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri	49
2.1.3 Kompresör Emiş Havası İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri	51
2.1.4 Kompresör Çalışma Basıncının Düşürülmesi İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri.....	52

2.1.5 Aydınlatma İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri ..	53
2.1.6 Yalıtım Sistemlerinin İyileştirilmesi İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri	54
2.1.7 Karbon Emisyonu Hesaplarında Kullanılan Analiz Yöntemleri	54
2.2 Materyaller.....	55
2.2.1 Basınçlı Hava Sistemleri Ölçümlerinde Kullanılan Cihazlar	55
2.2.2 Kompresör Sistemleri Ölçümlerinde Kullanılan Cihazlar.....	55
2.2.3 Geogrid Makinesi	57
2.2.4 Geomebran Makinesi.....	58
2.2.5 Drenaj Makinesi	58
2.2.6 Geocell Makinesi	59
2.2.7 Vakum Makinesi	60
2.2.8 Hava Tabancaları.....	60
2.2.9 Elektrik Panoları	61
2.2.10 Çiller Soğutma Sistemleri	62
2.2.11 Kompresörler.....	62
2.2.12 Güneş Enerjisi Sistem Tasarımında Kullanılan Program.....	63
2.3 Yöntem	63
3. BULGULAR	65
3.1 Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	66
3.1.1 Geogrid Makinesi	66
3.1.2 Drenaj Makinesi	67
3.1.3 Vakum Makinesi	68
3.1.4 Geocell Makinesi.....	69
3.1.5 Hava Tabancaları.....	70
3.1.6 Drenaj Makinesi Pnömatik Piston Sistemi	71
3.1.7 Drenaj Makinesi Pnömatik Piston Sitemi.....	73
3.1.8 Geocell Makinesi Pnömatik Piston Sitemi	74
3.2 Kompresör Sistemlerinin Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	75
3.2.1 Kompresörlerin Ölçüm Analizleri İle Elde Edilen Bulgular	76
3.2.1.1 Kompresör Dairesi 1 Ölçüm Analizleri.....	76
3.2.1.2 Kompresör Dairesi 2 Ölçüm Analizleri	79
3.2.1.3 Kompresörlerin Enerji Tasarrufu Analizi	81
3.2.2 Kompresör Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Analizi.....	83
3.2.3 Kompresör Emiş Havası İle Enerji Analizi	86
3.2.4 Kompresörün Basınç Düşürmesi İle Enerji Analizi	88
3.2.5 Vakum Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	89
3.2.6 Yalıtım Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	91
3.2.7 Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular...	94
3.2.8 Soğutma Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	96
3.2.9 Elektrik Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular.....	96
3.2.10 Güneş Enerji Sisteminin Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular	98
3.2.11 Karbon Ayak İzi Analizi İle Elde Edilen Bulgular	101

4. TARTIŞMA	103
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	105
KAYNAKLAR	106



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Basınçlı hava sistemlerinin bir yıllık giderleri (Karataş, 2012).....	3
Şekil 1.2. AB üyesi 15 ülkede basınçlı hava enerjisinin kullanımı (Radgen, P. 2006).....	4
Şekil 1.3. Delik çapı büyüklüğünün enerji maliyetine etkisi (Sert, M. Ö. 2018)5	
Şekil 1.4. AB normlarına göre uygulanabilir tasarruf noktaları (Karataş,2012) 6	
Şekil 1.5. Basınçlı hava sistemi genel görünüşü (McKane, A., Perry, W., & Taranto, T. 2016).	7
Şekil 1.6. Chiller Sistem Şeması.....	13
Şekil 1.7. Mevcut chiller sistemleri	13
Şekil 1.8. Güneş enerjisi potansiyel atlası (https://enerji.gov.tr)	17
Şekil 1.9. Türkiye'nin aylara göre güneşlenme süreleri (https://enerji.gov.tr).18	
Şekil 1.10. Türkiye'nin yıllara göre kurulu güç durumu (Tüik, 2023).....	19
Şekil 1.11. 2013-2023 yılları arası Türkiye'de yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılım oranları (Tüik, 2023).....	20
Şekil 1.12. 2013-2023 yılları arası Türkiye'de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişim oranları (Tüik, 2023).....	20
Şekil 1.13. 2013-2023 yılları arası Türkiye'de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişimi (Tüik, 2023).	21
Şekil 1.14. Sanayide nihai enerji tüketiminin sektörlere göre yüzdelik dağılımı (Tüik, 2023).....	22
Şekil 1.15. Enerji kullanımının ekonomik faaliyetlere dağılımı, 2021 (https://enerji.gov.tr).....	22
Şekil 1.16. Türkiye'nin yıllara göre elektrik tüketimi	23
Şekil 1.17. Dünya elektrik üretimi dağılımı (IEA, 2023)	25
Şekil 1.18. Doğalgazın dünya genelindeki kullanım alanları (https://enerji.gov.tr)	25
Şekil 1.19. Ülkelere göre doğalgaz rezervleri (https://enerji.gov.tr)	26
Şekil 1.20. Türkiye'deki hidroelektrik enerjisine dayalı kurulu güç (https://enerji.gov.tr).....	27
Şekil 1.21. Hidroelektrik enerjisinin Türkiye'deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (https://enerji.gov.tr)	27
Şekil 1.22. Dünya genelinde hidroelektrik enerji üretimi (IEA, 2021)	28
Şekil 1.23. Türkiye'de rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç (https://enerji.gov.tr)29	
Şekil 1.24. Rüzgâr enerjisinin Türkiye'deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (https://enerji.gov.tr).....	29
Şekil 1.25. Dünya genelinde rüzgâr enerjisi kurulu gücü (IRENA, 2023)	30
Şekil 1.26. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli görünümü (https://enerji.gov.tr)32	
Şekil 1.27. Türkiye'nin aylık ortalama radyasyon dağılımı (https://enerji.gov.tr)32	
Şekil 1.28. Türkiye'de güneş enerjisine dayalı kurulu güç (https://enerji.gov.tr)33	
Şekil 1.29. Güneş enerjisinin Türkiye'deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (https://enerji.gov.tr).....	33
Şekil 1.30. Dünya genelinde güneş enerjisi kurulu gücü (IRENA, 2023).....	34
Şekil 1.31. Türkiye'de jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası (https://enerji.gov.tr).....	36

Şekil 1.32. Türkiye’de jeotermal kaynaklı kurulu güç (https://enerji.gov.tr) ...	36
Şekil 1.33. Jeotermal enerjisinin Türkiye’deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (https://enerji.gov.tr).....	37
Şekil 1.34. Dünyada genelinde jeotermal enerji kurulu gücü (IRENA, 2023).37	
Şekil 1.35. Dünyada genelinde nükleer reaktöre sahip ülkeler (IEA, 2023)	39
Şekil 1.36. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2022.....	40
Şekil 1.37. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2022 (Tük, 2024).....	41
Şekil 2.1. Hava kaçak ölçümünde kullanılan SMC marka debimetre ve teknik özellikleri (SMC, 2024).....	55
Şekil 2.2. Kompresör ölçümünde kullanılan Atlas Copco ölçüm cihazı (Atlas Copco, 2024)	56
Şekil 2.3. Kompresörlerin yükte-boşta çalışma süresi tespiti (Atlas Copco, 2024)	56
Şekil 2.4. Geogrid makinesi ve makinede üretilen ürün.....	57
Şekil 2.5. Geomebran makinesi ve makinede üretilen ürün	58
Şekil 2.6. Drenaj makinesi ve makinede üretilen ürün	59
Şekil 2.7. Geocell makinesi ve makinede üretilen ürün.....	59
Şekil 2.8. Vakum makinesi ve makinede üretilen ürün	60
Şekil 2.9. Tesiste standart hava tabancası görünümü	61
Şekil 2.10. Geogrid makinesi elektrik panosunu görünümü.....	61
Şekil 2.11. Çiller soğutma sistemleri görünümü.....	62
Şekil 2.12. Kompresör dairesi 1 ve 2’deki kompresörlerin görünümü.....	63
Şekil 3.1. İşletmenin Eylül 2022 ve Ağustos 2023 arası aylık elektrik tüketimi	65
Şekil 3.2. Geogrid makinesi hava kaçak ölçümü	67
Şekil 3.3. Membran makinesi hava kaçak ölçümü	68
Şekil 3.4. Vakum 4 makinesi hava kaçak ölçümü	69
Şekil 3.5. Geocell makinesi hava kaçak ölçümü.....	70
Şekil 3.6. Tesiste standart hava tabancasının hava kaçak ölçümü	71
Şekil 3.7. Problem yaşanan eş ikiz pistonların görünümü	72
Şekil 3.8. Mevcut hava hatlarının görünümü.....	72
Şekil 3.9. Drenaj makinesinde 8,3 bar’da hava tüketim ölçümü	73
Şekil 3.10. Drenaj makinesinde 4,12 bar’da hava tüketim ölçümü	73
Şekil 3.11. Geocell makinesinde su problemi yaşanan yer.....	74
Şekil 3.12. KD1’in mevcut kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri ...	78
Şekil 3.13. KD1’de önerilen kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri .	79
Şekil 3.14. KD2’in mevcut kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri ...	80
Şekil 3.15. KD2’de önerilen kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri .	81
Şekil 3.16. Isı Geri Kazanımı (Kaya, M. (2012))......	84
Şekil 3.17. Kompresör Dairesi 1 Etiket Değerleri	88
Şekil 3.18. Mevcut vakum pompasının görünümü ve etiket değerleri	89
Şekil 3.19. Vakum makinelerinden genel bir görünüm	92
Şekil 3.20. Vakum makinelerindeki yalıtım probleminden görünüm.....	93
Şekil 3.21. Geogrid makinesi elektrik panosunu görünümü.....	97
Şekil 3.22. 33 derece sabit panellerin perspektif görünümü.....	99
Şekil 3.23. 33 derece sabit panellerinin çatı yerleşiminin görünümü	99
Şekil 3.24. 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerjinin grafik ile gösterimi.....	100
Şekil 3.25. 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerjinin grafik ile gösterimi.....	101
Şekil 3.26. Enerji analizi sonucu karbon ayak izi grafiği	102

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Endüstriyel sektörde basınçlı hava kullanımı	4
Tablo 1.2. Farklı basınçlarda hava kaçaklarının delik çapı ve basınç artışı ile ilişkisi	6
Tablo 1.3. Aydınlatma amaçlı kullanılmakta olan lambaların teknik özellikleri (Yüce D., Perdahçı C., Ünsalan Ü. 2015)	12
Tablo 1.4. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişim oranları (Tüik, 2023).....	21
Tablo 1.5. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişimi (Tüik, 2023).	21
Tablo 1.6. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2022	41
Tablo 3.1. İşletmenin Eylül 2022 - Ağustos 2023 yıllık elektrik tüketimi.....	65
Tablo 3.2. Hava kaçakları ile oluşan enerji kaybı tablosu.....	74
Tablo 3.3. Mevcut kompresör dairesi 1 ölçüm değerleri.....	77
Tablo 3.4. Mevcut kompresör dairesi 2 ölçüm değerleri.....	80
Tablo 3.5. Mevcut ve yeni kompresörlerin karşılaştırma tablosu	81
Tablo 3.6. KD1 mevcut ve yeni kompresör enerji tasarruf tablosu.....	81
Tablo 3.7. KD2 mevcut ve yeni kompresör enerji tasarruf tablosu.....	82
Tablo 3.8. Kompresörlerin değişimi sonrası enerji kazancı ve geri ödeme süresi tablosu	82
Tablo 3.9. Kompresörlerin atık ısı ile enerji kazancı tablosu.....	86
Tablo 3.10. Vakum pompası değişim sonrası enerji kazancı ve geri ödeme süresi	91
Tablo 3.11. Vakum makinelerinde yalıtım öncesi enerji tüketimi tablosu	92
Tablo 3.12. Vakum makinelerinde yalıtım sonrası enerji tüketimi tablosu	93
Tablo 3.13. Vakum makinelerinde yalıtım öncesi ve sonrası kazanç tablosu..	94
Tablo 3.14. Bölümlere göre aydınlatma sayıları ve güçleri	95
Tablo 3.15. Mevcut durum ile yeni nesil led aydınlatmanın karşılaştırılması .	95
Tablo 3.16. PVsyst ile 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerji.....	98
Tablo 3.17. Güneş panelleri yatırımı ve geri dönüş süresi	100
Tablo 3.18. Enerji Analizi Sonucu Karbon Ayak İzi Tablosu	102

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

BAİBÜ	: Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
TC	: Türkiye Cumhuriyeti
ΔT	: Sıcaklık Farkı
η_{verim}	: Doğalgaz Yakma Verimi
A	: Alan
c	: Suyun Özgöl Isısı
$D_{gazyıllık}$	: Yıllık Tasarruf Edilen Doğalgaz Miktarı
$D_{gazaltısııldeğer}$	: Doğalgaz Alt Isıl Değeri
$E_{maliyeti}$	: Elektrik Maliyeti
GDO	: Güç Düşüm Oranı
$G_{üretim}$	: Günlük Üretim Miktarı
$gk_{yüzdesi}$	: Atık Isı Geri Kazanım Yüzdesi
$h_{günlük}$	: Günlük Çalışma Saati
$h_{haftalık}$	: Haftalık Çalışma Saati
$h_{yıllık}$	: Yıllık Çalışma Saati
$hf_{yıllık}$	: Yıllık Çalışma Hafta Sayısı
hf_{yaz}	: Yaz Dönemi Çalışma Hafta Sayısı
$hg_{yıllık}$	: Yıllık Çalışma Gün Sayısı
$hv_{maliyeti}$	: $1 m^3$ Hava Maliyeti
$IE_{yüzdesi}$	: Atık Isı Enerji Yüzdesi
KD1	: Kompresör Dairesi 1
KD2	: Kompresör Dairesi 2
L_{adet}	: Armatür Sayısı
$L_{tüketim}$	: Armatür Gücü
$\dot{m}$	: Saatteki Isıtılabilecek Su Miktarı
$\dot{W}$	: Kompresör Gücü
$W_{günlük}$	: Günlük Tüketilen Güç
$M_{kzyıllık,€}$	: Yıllık Enerji Kazancı Miktarı
M	: Mevcut Kompresör
P_{atm}	: Atmosfer Basıncı

P_h	: Kompresör Yüksek Çalışma Basıncı
P_i	: Kompresör Düşük Çalışma Basıncı
$R_{tüketimi}$	: Rezistans Gücü
R_{adet}	: Rezistans Sayısı
$R_{toptük}$	: Toplam Rezistans Gücü
$\dot{Q}_{atık}$	: Saatteki Atık Isı Gücü
$\dot{Q}_{gkatık}$	: Saatteki Geri Kazanılan Atık Isı Gücü
$Q_{dkkaçak}$	: Dakikadaki Kaçak Debisi
$\dot{Q}_{saat}$	: Saat Başına Üretilen Isı Miktarı
$\dot{Q}_{yıllık}$	: Yıllık Geri Kazanılan Atık Isı Enerji Miktarı
$\dot{Q}_{yıllıkısı}$	: Yıllık Üretilen Isı Miktarı
TY	: Tasarruf Yüzdesi
$\dot{W}_{kzsaatlik}$	: Saatteki Geri Kazanılan Güç
$\dot{W}_{kzyıllık}$	: Yıllık Geri Kazanılan Güç
Y	: Yeni Önerilen Kompresör
$Z_{kaybı}$	: Zaman Kaybı
η_{motor}	: Motor Verimi
η_{verim}	: Doğalgaz Yakma Verimi

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın düşünce aşamasından bitiş kısmına kadar bana destek olan ve rehberlik ederek bu tezi bitirmeme yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Ömer ÖZYURT'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.



1. GİRİŞ

1.1 Enerji ve Enerji Verimliliği

Yaşadığımız çağda, günlük rutinlerimizin engellere takılmadan devam edebilmesi için gerekli olan, ölçümleri doğrudan olmasa da bir sistemin var olan koşullarını değiştirmek için gereken iş gücüdür.

Enerji; dünyadaki endüstriyel işletmelerde çeşitli amaçlar için kullanılan birincil ihtiyaçtır. İşletmelerin daha hızlı ekonomik kalkınma için devletler çok fazla miktarda enerjiye gereksinim duyarlar. Enerji bu sebeple ekonomik rekabet ve istihdam için çok önemli bir faktördür (Abdelaziz ve ark., 2011).

Modern dünyada enerji, devletlerin varlıklarını sürdürebilmeleri, artan nüfuslarının enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmeleri ve gelişen teknoloji ile sanayi, ulaşım, askerî gibi birçok alanda faaliyetlerini devam ettirebilmeleri için kritik bir öneme sahiptir. Tarih boyunca odun ile başlayan enerji kaynakları, teknolojik ilerlemeler ve bilgi birikimi ile kömür, petrol ve doğalgaz gibi kaynaklarla çeşitlenmiştir. Ancak, bu kaynakların sınırlı olması ve tükenme riski, alternatif enerji kaynaklarının aranmasını gerektirmiştir.

Bilim insanları, hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde enerji kaynaklarının mevcut durumunu ele almıştır. Enerji kaynaklarının rezervleri, üretim miktarları ve tüketim seviyeleri üzerinde durmuştur. Çeşitli ülkelerin enerji, üretim-tüketim verileri, karbondioksit salınımları ve elektrik enerjisi kullanımı analiz edilerek, kişi başına düşen enerji ve elektrik tüketimi açısından ülkeler arası karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır (Koç & Şenel, 2013: 33).

Enerji, bu bağlamda birincil ve ikincil enerji olarak ikiye ayrılır. Enerji kaynağının ham maddesi birincil enerji kaynağı olarak kabul edilir. Örneğin, petrol, kömür ve doğalgaz fosil enerji kaynakları; güneş, rüzgâr ve su yenilenebilir enerji kaynakları; nükleer enerji ise çekirdek kökenli enerji kaynağıdır. Bu kaynaklardan üretilen elektrik ise ikincil enerji kaynağı olarak adlandırılır.

Fosil kaynaklar veya yenilenemez enerji kaynakları kömür, petrol ve doğalgazdır. Günümüzde fosil enerji kaynaklarının bakım ve onarım maliyetlerinin düşük olması, rezerv sahibi ülkeler için yakıt maliyetlerinin ve gecelik maliyetlerinin daha az olması, ticaretlerinin kolay olması nedeniyle enerji üretiminde devletlerin ilk tercihi olmaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları,

doğada fosil halde bulunan ve zamanla tükenen, alternatif kaynaklara kıyasla çevreye zararlı kimyasallar yayan enerji kaynaklarıdır. Dünyadaki yenilenemez kaynakların dağılımı eşit değildir. Her ülke fosil yakıt kaynağına sahip olmadığından, bu kaynakları diğer ülkelerden ithal etmek zorunda kalmaktadır. Bu dengesiz dağılım, ülkeleri enerjide dışa bağımlı hale getirir ve bu durum da ülkeleri nükleer enerji gibi alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirir.

Enerji verimliliği; binalarda yaşam standardını ve hizmet kalitesini, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarını düşürmeden, birim veya ürün başına düşen enerji tüketimini azaltmaktır. Bir ekonominin gelişimi ve bu gelişimin uzun vadeli ve sürdürülebilir olması, gerekli enerjinin yeterli miktarda, en düşük maliyetle, güvenilir bir şekilde ve çevreye en az zarar vererek temin edilmesine bağlıdır.

Enerji verimliliği, artan enerji ihtiyacımızın karşılanmasında en temiz ve en ucuz enerji kaynağıdır. Bu enerji arz güvenliği ve kaynak yönetimi anlamına gelir. Aynı zamanda, iklim değişikliği ve yoksullukla mücadelede önemli bir rol oynar. Cari açığın azaltılmasında da büyük bir öneme sahiptir. Enerji üretimi ve tüketimi sırasında atmosfere salınan sera gazları, ekosistemin bozulmasında önemli bir rol oynar.

Enerji verimliliği, ekonomik büyüme ve sosyal kalkınma hedeflerinin sürdürülebilirliği ile doğrudan ilişkili olup, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında oynadığı kilit rol nedeniyle de büyük bir hassasiyetle ele alınması gereken bir konudur.

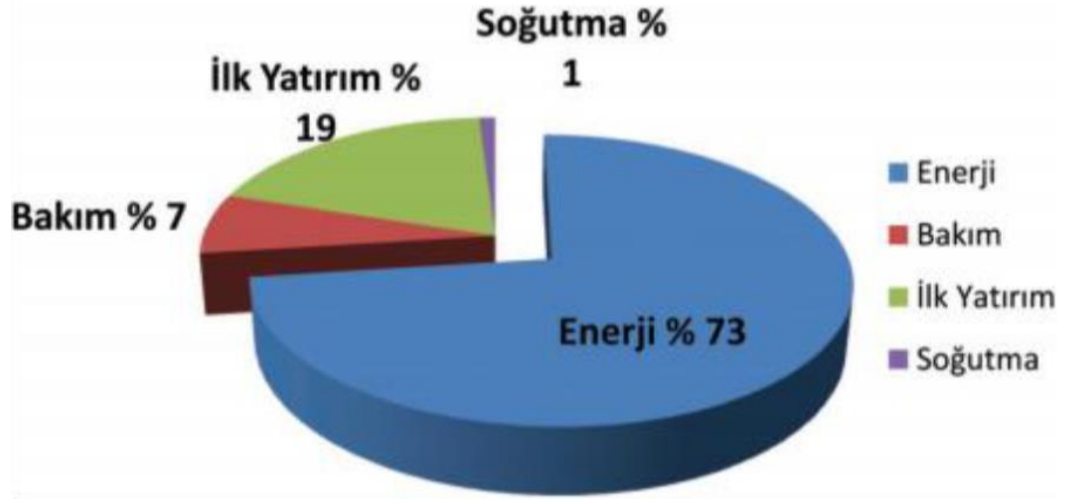
1.1.1 Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Basınçlı hava sistemlerinin iyi anlaşılabilmesi için öncelikle konu ile ilgili kavramların bilinmesi ve anlaşılması gerekmektedir. Bu kapsamda basınç, hava sistemleri ve enerji verimliliği gibi kavramların tanımlarını kısaca vermek gerekir. Basınç, birim yüzeye uygulanan güç şeklinde tanımlanabilir. Basınçlı hava sistemi ise havanın bir kompresör yardımıyla yüksek basınca çıkarılarak iş yaptığı sistemlere denir.

Enerji, iş yapabilme yeteneğinin ölçülmesidir. Maddesel bir varlık değildir. Enerji birçok farklı şekilde depolanabilir veya taşınabilir. Enerji verimliliği, enerji faturalarını düşürürken ve enerji güvenliğini güçlendirirken en hızlı ve en uygun maliyetli CO_2 azaltma seçeneklerinden bazılarını sağladığı için temiz enerji geçişlerinde "ilk yakıt" olarak adlandırılmaktadır. Enerji verimliliği,

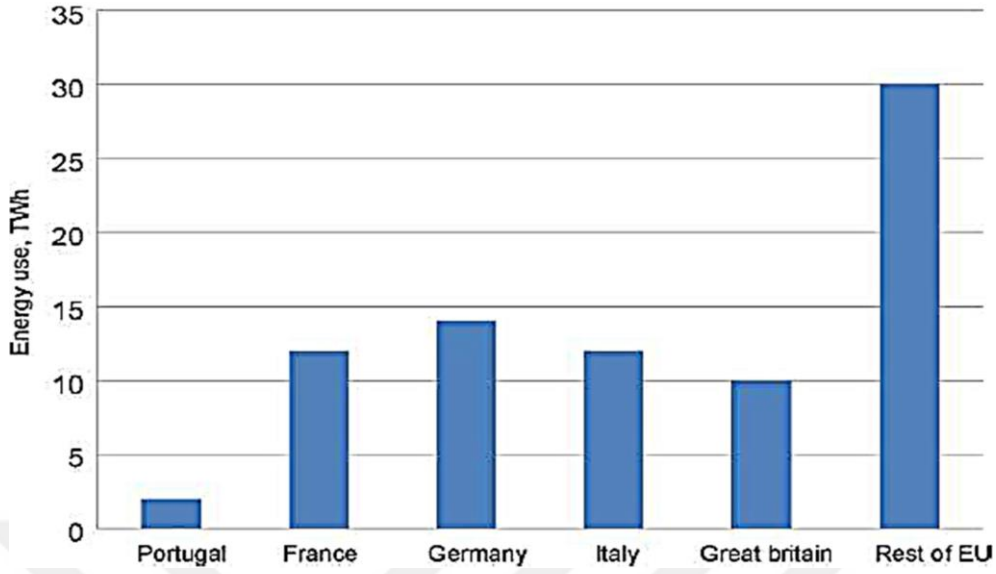
elektrifikasyon, davranış değişikliği, dijitalleşme ve malzeme verimliliği gibi yakından ilişkili önlemlerle birlikte 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon (NZE) Senaryosunda enerji talebini önlemeye yönelik en büyük önlemdir. Tüm bu ölçütler birlikte küresel enerji yoğunluğunu - bir birim GSYH üretmek için gereken enerji miktarını - şekillendirmektedir. Küresel enerji yoğunluğu NZE Senaryosunda bu on yılda, yılda ortalama %4 civarında düşmektedir; bu oran son 10 yılda %1,7'dir.

Endüstride en sık kullanılan metotlar elektrikli, hidrolik veya basınçlı hava sistemleridir. Endüstride ve hizmet sektörlerinde basınçlı hava kullanımı yaygındır. Basınçlı hava üretimi diğer üretimlere göre yoğundur ve farklı endüstriyel işlerde, basınçlı havanın enerji maliyeti oranı, diğer tüm enerji maliyetlerine nazaran daha sınırlıdır. Basınçlı hava temizliği, pratikliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle endüstriyel üretim süreçlerinin desteklenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Basınçlı sistemlerin enerji verimliliği hususunda çeşitli çalışmalar yapılarak işverenlerin bilgisine sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Basınçlı hava sistemlerinin bir yıllık giderleri (Karataş, 2012).

Basınçlı hava, Avrupa Birliği'ndeki endüstriyel elektrik tüketiminin %10'unu oluşturmaktadır. Şekil 1.2.'de 15 Avrupa Birliği ülkesinde basınçlı hava enerjisi kullanımını göstermektedir. Çin'deki basınçlı hava sistemleri, Çin elektriğinin %9,4'ünü kullanmaktadır. Basınçlı hava, muhtemelen tesislerdeki en pahalı enerji biçimidir, çünkü gücünün yalnızca %19'u kullanılabilir. ABD'de basınçlı hava sistemleri, Malezya'da olduğu gibi toplam endüstriyel enerji kullanımının yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır. Güney Afrika'da sıkıştırılmış hava, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %9'unu tüketmektedir.



Şekil 1.2. AB üyesi 15 ülkede basınçlı hava enerjisinin kullanımı
(Radgen, P. 2006)

Tablo 1.1. Endüstriyel sektörde basınçlı hava kullanımı

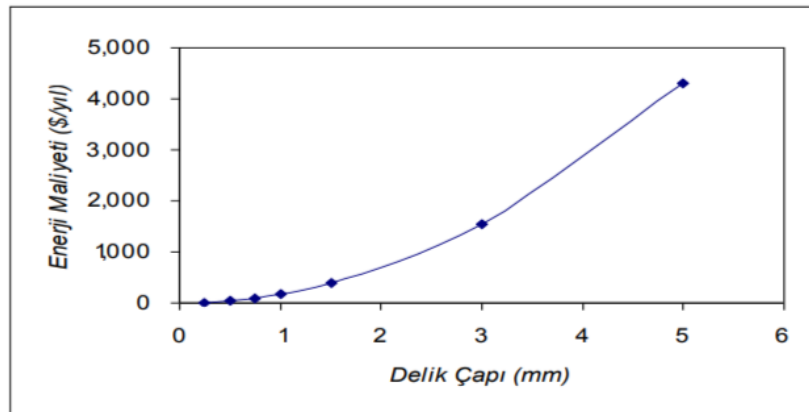
Endüstri	
Yemek	Dehidrasyon, şişeleme, kontroller ve aktüatörler, taşıma, püskürtme kaplamalar, temizleme, vakum
Tekstil	Sıvıları karıştırma, sıkıştırma, taşıma, otomatik ekipmanlar, kontroller ve aktüatörler
Konfeksiyon	Taşıma, sıkıştırma, takım güçlendirme, kontroller ve aktüatörler, otomatik ekipman
Kereste ve ahşap mobilya	Kesme, kaldırma, sıkıştırma, basınçlı işlem, kontroller ve aktüatörler
Mobilya	Hava pistonu gücü, alet gücü, sıkıştırma, püskürtme, kontroller ve aktüatörler
Kâğıt hamuru ve kâğıt	Taşıma, kontroller ve aktüatörler
Kimyasallar	Taşıma, kontroller ve aktüatörler
Petrol	Proses gazı sıkıştırma, kontroller ve aktüatörler
Kauçuk ve plastik	Takım güçlendirme, sıkıştırma, kontroller ve aktüatörler, şekillendirme, kalıp pres güçlendirme
Taş, kil ve cam	Harmanlama, karıştırma, kontroller ve aktüatörler, cam üfleme ve kalıplama, soğutma
Birincil metaller	Vakum eritme, kontroller ve aktüatörler, kaldırma
Metal imalatı	Montaj istasyonu güçlendirme, alet güçlendirme, kontroller ve aktüatörler, enjeksiyon kalıplama

Bir basınçlı hava sistemi genellikle hem enerji hem de maliyette verimliliğin sağlanması için çeşitli kazanımlar sunar. Sistemin genel verimliliğini optimize

etmek için güç gereksinimleri, çalışma basıncı, hava tüketimi, düzenleme yöntemi, hava kalitesi, enerjinin geri kazanımı ve bakım gibi parametreler dikkate alınmalıdır.

Güç gereksinimi, çalışma basıncına bağlıdır; yüksek çalışma basıncı yüksek enerji kullanımına karşılık gelir. Ayrıca filtreler, kurutucular, valfler, alıcılar ve borular gibi basınçlı hava sisteminin tüm parçalarını dâhil etmek de önemlidir. Çünkü çeşitli bileşenler sistemde basınç düşmelerine neden olur. Bu sebeple, sistemdeki yardımcı donanım üzerindeki gereksiz basınç düşüşlerinin en aza indirgenmesi, çalışma basıncının telafi edilmesi gerekmediğinden enerji kullanımını azaltır.

İhtiyaca göre değişkenlik gösteren basınçlı hava sistemlerinin tasarımı esneklik sunmalıdır; çeşitli kapasitelerde kompresörlerin ve hız kontrolünün bir kontrol ve düzenleme sistemi ile birlikte kombinasyonu, enerji kullanımını optimize eder ve dolayısıyla maliyeti en aza indirir. Enerji kullanımını optimize etmek ve basınçlı hava ekipmanının ve yardımcı ekipmanlarının ömrünü uzatmanın yolu uygun şekillerde bakım yapmaktan geçmektedir. Bakım seviyesi, kompresör tipi, yardımcı ekipman, çalışma, enerji geri kazanımı ve kullanım derecesi gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Yüksek kaliteli basınçlı hava, yani temiz hava, tipik olarak daha az bakım gerektirir ve makinelerdeki aşınma ve yıpranmayı minimize eder. Bundan dolayı, bir sistemin ilk bölümündeki kuru ve yağsız basınçlı hava daha az işlem gerektirdiğinden daha ucuzdur ve bu da genellikle daha fazla enerji kullanımına yol açar.



Şekil 1.3. Delik çapı büyüklüğünün enerji maliyetine etkisi (Sert, M. Ö. 2018)

Tablo 1.2. Farklı basınçlarda hava kaçaklarının delik çapı ve basınç artışı ile ilişkisi

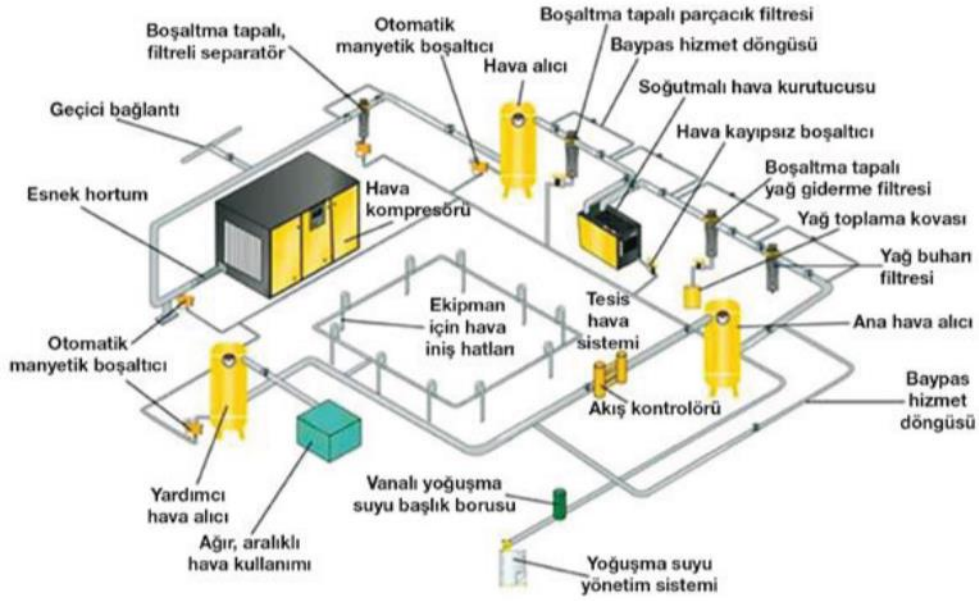
Basınç (Bar)	Değişik çaptaki deliklerde (m ³ /h) meydana gelen hava kaçakları						
	0,5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	10 mm	12,5 mm
0,5	0,22	0,79	3,31	7,56	20,52	82,08	127,8
1,0	0,29	1,19	4,79	10,8	30,24	120,96	189
2,5	0,5	2,09	8,39	19,8	52,56	210,96	329,04
5,0	0,9	3,49	14,11	31,68	87,84	351	547,2
7,0	1,19	4,72	18,68	41,76	117	464,4	727,2



Şekil 1.4. AB normlarına göre uygulanabilir tasarruf noktaları (Karataş,2012)

Ülkemizde sanayi sektörü, toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %36'sını ve elektrik tüketiminin ise %55'ini karşılayarak büyük bir paya sahiptir. Endüstriyel tesislerde enerji harcamaları değerlendirildiğinde, fırınlar, kazanlar, fanlar, pompalar, aydınlatma sistemleri ve basınçlı hava sistemleri gibi yaygın kullanılan ekipmanlarda önemli enerji kayıplarının olduğu görülmektedir. Özellikle basınçlı hava sistemleri, bu kayıpların sıkça yaşandığı sistemler arasında yer almaktadır (Sapmaz, 2014).

Endüstriyel tesislerde basınçlı hava; su, elektrik ve doğalgazın ardından üretim süreçlerini destekleyen dördüncü en önemli enerji kaynağıdır ve birçok endüstriyel tesiste elektrik tüketiminde üçüncü sırada yer almaktadır. Ayrıca, basınçlı hava, Avrupa Birliği'nde endüstriyel enerji tüketiminin %10'unu oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji maliyetlerini azaltmak amacıyla basınçlı hava sistemleri, büyük öneme sahip enerji tüketim sistemleri arasında yer almaktadır (Sapmaz ve Kaya, 2017).



Şekil 1.5. Basınçlı hava sistemi genel görünüşü (McKane, A., Perry, W., & Taranto, T. 2016).

Kurutulan hava, sistemde kullanılmaya uygun hale gelir. Ancak, tesisin hava kullanımındaki değişiklikler, kompresörün uzun süreler boyunca sürekli çalışmasına veya sık sık durup başlamasına neden olabilir. Bu sorunu önlemek için, kurutulmuş hava bir tankta depolanarak, buradan sisteme düzenli ve sürekli bir şekilde gönderilmelidir.

Kompresörler, havayı serbest atmosferden alıp, önce filtrelerden geçirerek sıkıştırır. Eğer filtre kullanılmazsa, havayla gelen tozlar kompresöre ve sistemdeki diğer ekipmanlara zarar verebilir. Filtrelerin tıkalı olması veya yeterince hava akışı sağlamaması durumunda ise kompresör motoru aşırı yüklenir ve bu da basınçlı havanın maliyetini artırır. Hava sıkıştırma işlemi, ihtiyaç duyulan basınca göre tek veya çok kademeli olarak yapılabilir. Sıkıştırma sırasında büyük miktarda ısı oluşur ve kompresörü çalıştıran enerjinin büyük kısmı, kompresörün soğutma sistemi aracılığıyla taşınır. Atmosferik hava, yüksek miktarda nem içerdiği için, bu nem basınçlı hava sisteminden uzaklaştırılmazsa, sistemdeki hatlar ve ekipmanlar içinde sıvılaşıp korozyon ve hasar riskine yol açar.

1.1.2 Kompresör Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan hava kompresörleri, ciddi enerji tüketimine sahiptir. Elektrik enerjisinin çoğu, basınçlı hava üretiminde kullanılmakta ve bu süreçteki verimlilik kayıpları, toplam enerji giderlerini artırmaktadır. Endüstride enerji verimliliğini artırmak için genel olarak ihtiyaca

göre kompresör seçimi, kompresör emiş havasının iyileştirilmesi, kompresör atık ısı geri kazanımı ve basınç set ayarlarının yapılması gibi uygulamalar üzerinde çalışılarak enerji kazançları sağlanabilir.

Kompresörler, ortamdan aldıkları havayı sıkıştırarak kullanılabilir hale getirir. Bu havanın sıcaklığı ve nem oranı, kompresör verimliliğini doğrudan etkiler. Soğuk ve temiz hava kullanımı, hava yoğunluğunu artırarak daha az enerjiyle daha fazla hava sağlanmasını mümkün kılar. İyi tasarlanmış bir hava emme kanalları ile kompresör odasındaki sıcak havayı dışarı atarak dışarıdan temiz ve soğuk hava alımına imkân verilerek kompresör verimi artırılabilir. Eğer emilen hava sıcaklığı 5°C düşürülürse, enerji tüketiminde yaklaşık %2 tasarruf sağlanabilir.

Kompresör sistemlerinin çalışma basıncı genellikle ihtiyaçtan daha yüksek ayarlanır. Bu durum enerji tüketimini artırır. Her 1 bar fazla basınç, yaklaşık %7 fazladan enerji tüketimine neden olur. Sistem ihtiyacı doğrultusunda basınç seviyeleri optimize edilmelidir. Çok kademeli basınç sistemleriyle farklı ihtiyaçlara uygun çözümler sunulurken enerji kazançları sağlanabilir.

Kompresörlerin tükettikleri enerjinin %70-90'ı, ısıya dönüşür. Bu ısının geri kazanılması, tesisin toplam enerji verimliliğini artırır. Sıcak hava ile ortam veya proses alanının ısıtılması, sıcak su üretimi (duş, temizlik, proses kullanımı), ısıtma sistemlerine entegre edilerek yakıt tüketiminin azaltılması sağlanabilir.

Eski ve düşük verimli kompresörlerin yeni nesil, yüksek verimli modellerle değiştirilmesi; önemli düzeyde enerji tasarrufu sağlar. Yüksek verimli motor ve değişken hız tahrikli kompresörler, yük değişimlerine daha iyi uyum sağlayarak enerji tüketimini optimize eder. Yeni kompresör sistemlerinde ayrıca bakım maliyetleri düşer ve sistem güvenilirliği artar.

1.1.3 Vakum Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Vakum pompası, bir hacimdeki gaz veya havayı dışarı atarak iç basıncı atmosfer basıncının altına düşüren cihazdır. Bu şekilde bir vakum, birçok sanayi uygulamasında farklı amaçlarla kullanılır.

Vakum pompalarında enerji verimliliği, sistemin operasyonel maliyetlerini düşürmek ve çevresel etkileri azaltmak için çok önemli bir faktördür. Vakum pompaları, özellikle endüstriyel tesislerde yüksek enerji tüketimine sahip cihazlardır. Bu nedenle, enerji verimliliğini artıran stratejiler ve teknolojiler kullanmak, işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir.

Vakum sistemlerinin en büyük enerji kaybı, gereksiz yere yüksek kapasitede çalıştırılmasıdır. Vakum pompasının sürekli tam kapasitede çalıştırılması, enerji israfına yol açar. Vakum pompasının verimliliği, kullanılan teknolojisine ve tasarımına bağlıdır. Yüksek verimli vakum pompaları, daha düşük güçle daha yüksek performans sağlayabilir. Bireysel vakum pompalarının yerine merkezi vakum sistemleri kurulması, çok sayıda ekipmanın ortak vakum kaynağından faydalanmasını sağlar. Enerji verimliliği açısından bu büyük bir avantajdır. Vakum pompalarının düzenli bakımı, sistemin verimli çalışmasını sağlar. Aksi takdirde, kirlenmiş filtreler, düşük yağ seviyesi veya aşınmış parçalar, pompanın verimini düşürür ve enerji tüketimini artırır. Vakum pompalarında kullanılan motorlar, pompanın toplam verimliliğini etkiler. Verimli motorlar (enerji sınıfı IE3 veya IE4 sınıfı motorlar) kullanmak, pompanın daha az enerji ile aynı verimi sağlamasına yardımcı olur. Ayrıca, akıllı sistemler ve otonom kontrol ile enerji yönetimi yapılabilir. Bu tür sistemler, enerji tüketimi ile ilgili verileri izler ve gerektiğinde pompa performansını optimize eder. Bazı vakum sistemlerinde, atık enerjinin geri kazanılması ve kullanılabilir hale getirilmesi mümkündür.

Vakum pompalarının çalışma mantığı her ne kadar temel bir yapıya sahip olsa da, kullanım alanlarına ve teknolojik yapılarına bağlı olarak birçok farklı türü bulunmaktadır. Kuru vakum pompaları, kirlenmeye yol açmadan vakum elde etmek amacıyla tercih edilir. Diğer vakum pompası türlerine kıyasla daha az bakım gerektirir ve atık oluşumuna neden olmaz. Ancak, ilk yatırım maliyetleri genellikle daha yüksektir. Bu pompalar; diyaframlı, pistonlu, scroll (kaydırmalı) ve turbo moleküler gibi farklı modellerde bulunur. Yağlı vakum pompaları, yüksek vakum elde etme yetenekleri sayesinde diğer pompa türlerinden ayrılır. Genellikle daha ekonomik olmaları ve güçlü performans sunmalarıyla öne çıkarlar. Ancak, belirli aralıklarla bakım yapılması gerekmektedir. Özellikle yağın yenilenmesi ve filtrelerin temizlenmesi sistemin verimli çalışması açısından kritiktir. Bu tür pompalar, döner kanatlı ve dişli yapıya sahip modeller gibi çeşitli versiyonlarda bulunabilir. Su bazlı vakum pompaları, düşük kurulum maliyetleri ve az bakım ihtiyacı ile dikkat çeker. Genellikle korozyona karşı dirençli olacak şekilde tasarlanırlar ve çoğunlukla atık veya kirli suyun uzaklaştırılması gibi uygulamalarda tercih edilirler.

Vakum pompalarında enerji verimliliğini artırmak, sadece maliyetleri düşürmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkiyi de azaltır. İhtiyaca uygun

pompaların seçilmesi, bakımın düzenli yapılması, merkezi sistemlerin kullanılması ve enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu ile verimliliği en üst seviyeye çıkarabilir. Böylece uzun vadede hem işletme giderlerini azaltır hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlar.

1.1.4 Yalıtım İle Enerji Verimliliği

Yalıtım, enerji verimliliğini artırmada kilit bir rol oynayan önemli bir faktördür. Yalıtım sayesinde, bir yapıdaki ısı kayıpları en aza indirgenebilir ve enerji tüketimi azaltılabilir. Bu, hem çevreye olan etkisini hem de işletme maliyetlerini düşürür. Yalıtım, binalarda, endüstriyel tesislerde ve hatta taşıma araçlarında verimli bir enerji kullanımı sağlamak için kritik bir yöntemdir.

Yalıtım, enerji verimliliğini artırmada temel bir araçtır. İyi bir yalıtım, ısı kaybını azaltarak hem enerji tüketimini düşürür hem de çevresel etkileri azaltır. Ayrıca, ekonomik olarak da uzun vadede önemli tasarruf sağlar. Yalıtım, binalardan endüstriyel tesislere kadar geniş bir yelpazede verimliliği artırır ve daha sürdürülebilir bir enerji kullanımı sağlar.

1.1.5 Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Günlük yaşamımızda, çalışma hayatımızda ve bulunduğumuz alan içindeki nesneleri görebilmemiz için belirli bir ışık seviyesi gereklidir. Aydınlatma, çevremizdeki alanların ve objelerin algılanmasını sağlamak amacıyla ışığın uygulanmasıdır. Güneş, ay ve yıldızlar gibi doğal ışık kaynakları her zaman yeterli düzeyde olmadığında veya bu ışık kaynakları belirli alanlara ulaşmadığında, yapay ışık kaynakları devreye girer. Özellikle karanlık saatlerde veya yetersiz ışıkta, ihtiyaç duyulan bölgeleri aydınlatmak için yapay ışık kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Aydınlatma, güvenliğin sağlanması, çalışma alanlarında verimliliğin artırılması, göz sağlığının korunması, kazaların önlenmesi ve yaşam kalitesinin yükseltilmesi gibi pek çok açıdan kritik bir role sahiptir. Bu nedenle hem doğal hem de yapay ışık kaynaklarının etkin ve doğru bir şekilde kullanılması çok önemlidir (Yücel, U., 2019).

Enerjinin giderek artan stratejik önemi ve mevcut enerji kaynaklarının sınırlılığı göz önüne alındığında, enerji verimliliği kavramı günümüz dünyasında yadsınamaz bir gereklilik olarak belirginleşmektedir. Zira, modern yaşamın sürdürülebilirliği için elzem olan birçok faaliyet alanında enerji temel bir girdi teşkil etmektedir. Üretim ve tüketim süreçlerinin ana girdisi olarak enerji, dünya nüfusundaki artışla birlikte ivme kazanan seri üretim metotlarının da vazgeçilmez

bir bileşenidir. İnsanlığın çeşitli ihtiyaçlarının kitlesel ölçekte karşılanabilmesi, her türden enerji kaynağının etkin kullanımına dayanmaktadır (Eser, O., 2013).

Aydınlatma teknolojileri, modern uygarlığın temel unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Elektrik enerjisiyle doğrudan ilişkili olarak gelişen bu sektörde de enerji talebi kayda değer düzeydedir. Günlük yaşamın çeşitli aşamalarında farklı amaçlarla kullanılan aydınlatma sistemleri, çeşitli enerji türleri aracılığıyla işlevsellik kazanmaktadır. Aydınlatma uygulamalarında tüketilen enerji miktarının minimize edilmesi veya aynı enerji girdisiyle daha uzun süreli aydınlatma sürekliliğinin sağlanması, enerji verimliliği prensiplerinin temelini oluşturmaktadır.

Türkiye genelindeki elektrik talebinin yaklaşık %19'u aydınlatma ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Küresel ölçekte aydınlatma sistemleri, yılda yaklaşık 3.400 terawatt-saat enerji tüketmektedir. Bu tüketimin %43'ü ticari binalarda (ofisler, perakende işletmeler, okullar ve hastaneler), %18'i endüstriyel tesislerde, %31'i evlerde ve %8'i dış mekân aydınlatmasında gerçekleşmektedir. Ayrıca, tipik bir ticari binada tüketilen enerjinin %41'i aydınlatmaya harcanmaktadır. Aydınlatma için artan enerji talebi, daha verimli teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Doğal ışık kaynaklarının daha etkin kullanılması, enerji tasarruflu lambaların tercih edilmesi ve aydınlatma sistemlerinin kontrol mekanizmalarıyla, yalnızca ihtiyaç duyulan kısım kadar çalıştırılması, enerji verimliliği sağlama çalışmalarının temel unsurlarıdır. Doğal ışığı maksimum düzeyde kullanmak, yapay aydınlatma sistemlerine olan yüksek maliyetli bağımlılığı azaltmaktadır. Binaların mimari tasarımlarının gün ışığından daha fazla yararlanacak şekilde yapılması, yapay aydınlatmanın kullanım seviyesinin gün ışığına göre kontrol edilmesi, varlık ve yokluk sensörlerinin kullanılması ile aydınlatma sistemlerinin zaman ayarlı olarak çalıştırılması, ciddi enerji tasarrufu sağlamaktadır (Yücel, U., 2019).

Aydınlatma teknolojileri, enerji verimliliği ve lamba ömrü açısından önemli farklılıklar gösterir. En verimsiz aydınlatma tipi olan enkandesan lambalar, sadece 6-16 lümen/watt (lm/W) etkinlik faktörüne sahiptir ve yaklaşık 1.000 saatlik kısa bir ömre sahiptir. Bu nedenle, enerji tüketimi yüksek ve kullanım süresi oldukça sınırlıdır. Bir üst seviyede yer alan tungsten halojen lambalar, 16-19 lm/W verimliliğe ve 2.000-4.000 saatlik ömre ulaşarak, enkandesanlara kıyasla daha dayanıklıdır ancak hâlâ yeterli enerji tasarrufu sunmazlar.

Tablo 1.3. Aydınlatma amaçlı kullanılmakta olan lambaların teknik özellikleri
(Yüce D., Perdahçı C., Ünsalan Ü. 2015)

Tipi	Gücü [W]	Etkinlik Faktörü [lm/W]	Lamba Ömrü [h]	Renksel İzlenim	Renk Sıcaklığı [K]	Renksel Geriverim (Ra)
Enkandesen	15-200	6-16	1.000	Sıcak	2.700-3.000	100
Tungsten Halojen	25-500	16-19	2.000-4.000	Sıcak	2.700-3.000	100
Kompakt Floresan (Kendinden Balastlı)	5-33	42-65	12.000	Çeşitli	3.000, 4.000, 6.500	>70
Tüp Floresan	14-54	86-93	12.000-20.000	Çeşitli	3.000, 4.000, 6.500	>70
Metal Halojen	35-150	86-97	6.000-20.000	Çeşitli	3.000, 4.000, 6.500	>70
LED	0,5-180	80-130	35.000-50.000	Çeşitli	3.000 10.000	>80

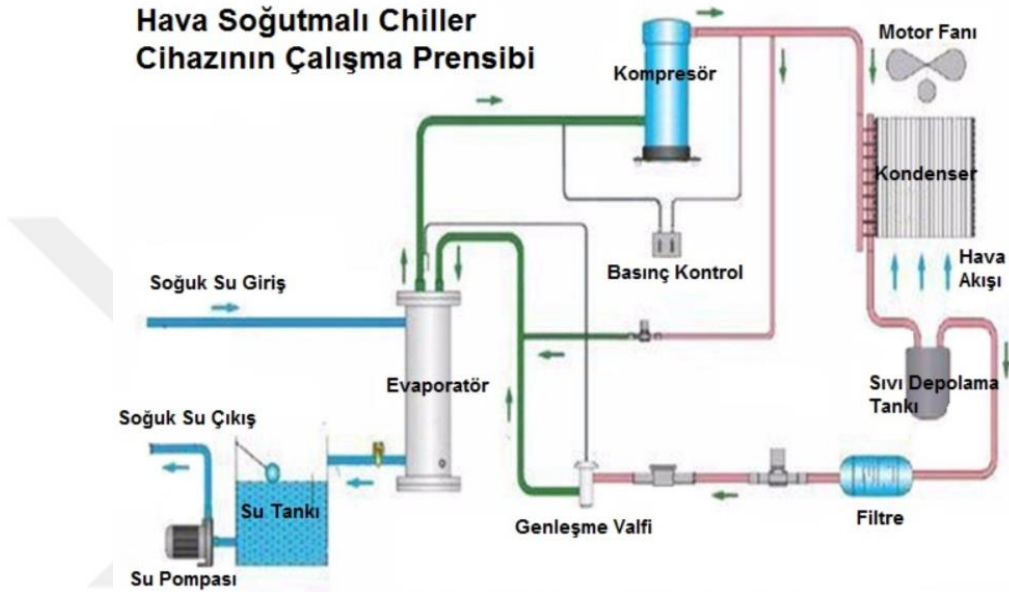
Kompakt floresan lambalar, 42-65 lm/W aralığındaki verimlilikleriyle daha az enerji tüketirken, yaklaşık 12.000 saatlik ömürleriyle uzun vadede daha ekonomik bir çözüm sunar. Bu lambaların ardından gelen tüp floresan ve metal halojen lambalar, 86-97 lm/W gibi yüksek etkinlik faktörlerine sahiptir. Tüp floresan lambalar 12.000 ila 20.000 saat, metal halojen lambalar ise 6.000 ila 20.000 saat arasında değişen ömürleriyle hem verimli hem de uzun ömürlü aydınlatma sağlar.

Tüm bu seçeneklerin üzerinde ise LED (ışık yayan diyot) teknolojisi yer alır. LED'ler, 80-130 lm/W gibi en yüksek enerji verimliliğine ulaşabilmekte ve 35.000 ila 50.000 saat gibi çok uzun bir kullanım ömrü sunmaktadır. Ayrıca farklı güç aralıkları ve renk sıcaklığı seçenekleriyle her türlü aydınlatma ihtiyacına cevap verebilecek esnekliğe sahiptir. Bu özellikleri sayesinde LED'ler, günümüzün en avantajlı, ekonomik ve çevre dostu aydınlatma seçeneği olarak öne çıkmaktadır.

1.1.6 Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Hava soğutmalı soğutma sistemlerinde, yüksek basınç ve sıcaklıktaki gaz halindeki soğutucu akışkanın ısısı, bir ısı değiştirici görevi gören kondenser yardımıyla daha düşük sıcaklıktaki havaya aktarılır. Şekil 1.6.'da, hava soğutmalı bir soğutma grubunun çalışma prensibini gösteren bir şema yer almaktadır. Bu sistem; soğutucu akışkanı sıkıştırarak basıncını artıran bir kompresör, fanlar yardımıyla hava akışı sağlanan bir kondenser ünitesi, genleşme valfi ve soğutma suyundan ısıyı alarak buharlaşmanın gerçekleştiği bir evaporatörden meydana gelir.

Hava soğutmalı soğutma grupları, sürekli taze hava dolaşımının bulunduğu açık alanlarda konumlandırılmalıdır. Eğer birden fazla soğutma grubu kullanılacaksa, gruplar arasında uygun mesafenin sağlanması gereklidir. Bu mesafe, üretici firmaların belirttiği tavsiyelere uygun şekilde düzenlenmelidir. Bu tür soğutma sistemleri genellikle su tüketiminin arzu edilmediği, bakım ekibinin bulunmadığı ya da paket tip cihazların daha ekonomik bir tercih olarak görüldüğü durumlar için ideal bir seçenektir.



Şekil 1.6. Chiller Sistem Şeması



Şekil 1.7. Mevcut chiller sistemleri

Araştırmacılar, bir soğutma grubunda (chiller) bulunan fanların dönüş hızlarının dış hava sıcaklığına göre ayarlanmasının etkilerini incelemişlerdir. Bu incelemeyi, bir ofis binasının soğutma ihtiyacını karşılayan santrifüjlü bir chiller üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Dış ortam sıcaklıklarının 15 °C, 20 °C, 30 °C ve 35 °C olduğu durumlarda ölçümler yaparak, en uygun fan hızlarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmanın bulguları, dış ortam sıcaklığına bağlı olarak fan hızının optimize edilmesinin, soğutma performans katsayısında (COP) %11,37 ile %237,2 arasında önemli bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Özellikle merkezi soğutma sistemlerinde, değişken soğutma talepleri sonucunda hem cihazın ömründe hem de COP değerinde artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, fan hızlarının optimizasyonunun fanların hizmet ömrünü de olumlu yönde etkileyeceği sonucuna varmışlardır (Yu, F., W., Chan, K., T., 2008).

İbrahim Nasuri ve çalışma arkadaşları (2017), bir ön soğutucu vasıtasıyla kondensere giren havanın sıcaklığını düşürmüşlerdir. Bu amaçla temel bir iklimlendirme sistemi, klima odası, yalıtımlı bir kondens depolama tankı ve bir hava ön soğutucusundan oluşan deneysel bir düzenek kurmuşlardır. Evaporatörden çıkan düşük sıcaklıktaki kondens suyu bu tankta biriktirilmiştir. Bir pompa aracılığıyla basınçlandırılan su, ön soğutucuya sevk edilmiştir. Bu sayede, soğutulmuş hava ile ısı alışverişi gerçekleştiren kondenser sayesinde, sistemin performans katsayısında (COP) %21,4 düzeyinde bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Modern endüstriyel işletmelerde önemli bir konu olup, işletmelerin enerji tüketimini azaltarak maliyetleri düşürmesini sağlar. Aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği artırır. Sıvı soğutma sistemleri, genellikle büyük kapasiteli soğutma gereksinimlerine sahip endüstriyel ve ticari tesislerde kullanılır. Bu sistemlerin enerji verimliliği, doğru tasarım, bakım ve teknoloji kullanımı ile optimize edilebilir.

Günümüzde chiller sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli stratejiler uygulanmaktadır. Bu kapsamda, verimli chiller tasarımları ve yüksek verimli soğutma üniteleri öne çıkarken, kompresör verimliliği ve inverter teknolojisi ile kapasite modülasyonu sayesinde enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Aynı zamanda, çevre dostu ve yüksek verimli soğutucular ile yeni nesil soğutucu akışkanlar, sistem performansını artırarak çevresel etkileri azaltmaktadır. Isı geri kazanım sistemleri ve bu sistemlerle entegre sıcak su üretimi,

atık ısının faydalı enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Dış ortam sıcaklıkları ve dış hava sıcaklığı izleme gibi çevresel değişkenlerin dikkate alınmasıyla, sistemler daha verimli çalışacak şekilde optimize edilebilir. Ek olarak, verimli fanlar ve motorlar, iyi izolasyon, akıllı kontrol sistemleri, enerji yönetim sistemleri (EMS) ve dönemsel bakım ve temizlik gibi unsurların tamamı, chiller sistemlerinin genel enerji verimliliğini yükseltmekte kritik rol oynamaktadır. Son olarak, çalışma koşullarını optimize etme ve kapasite ve yük yönetimi sayesinde sistemler sadece ihtiyaç duyulan kadar enerji tüketerek daha sürdürülebilir hale gelmektedir.

Sıvı soğutma (chiller) sistemlerinde enerji verimliliği, hem işletmelerin enerji maliyetlerini azaltmalarını hem de çevresel etkilerini minimize etmelerini sağlayan kritik bir faktördür. Bu stratejiler, endüstriyel tesislerin operasyonel maliyetlerini düşürürken, enerji tasarrufu sağlar ve çevre dostu bir yaklaşım sunar.

1.1.7 Elektrik Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Fabrikalarda elektrik sistemleri denilince; elektrik panoları, elektrik kablolu sistemleri, elektrik motorları, kompanzasyon panoları akla gelmektedir.

Elektrik panoları, endüstriyel tesislerin enerji dağıtım sistemlerinin kalbinde yer alır ve fabrikanın tüm prosesler ve elektrikli ekipmanlarına güvenli ve verimli bir şekilde güç sağlar. Enerji maliyetlerinin sürekli artması ve sürdürülebilirlik hedeflerinin önem kazanmasıyla birlikte, fabrika elektrik panolarındaki enerji verimliliğini artırmak giderek kritik bir hale gelmiştir. Enerji verimliliği sadece işletme maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkiyi azaltır ve endüstriyel operasyonların uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Aşırı ısınma ve toz, elektrik panolarında önemli bir verimsizlik kaynağıdır. İç sıcaklığın kontrol altına alınması ve toza karşı koruma kritik öneme sahiptir.

Aşırı ısınmayı önlemek için ilk olarak mevcut elektrik panosunu kapalı bir ortam içine alarak uygun havalandırma ile (fanlar, klima). Panoyu dış ısı kaynaklarından korumak ve daha iyi ısı dağılımı için iç cihazların stratejik düzenlenmesi bu konuda alınabilecek önlemler arasındadır. Daha düşük çalışma sıcaklıkları, elektrik bileşenlerinin ömrünü ve verimliliğini artırır. Elektrik panolarının kapalı bir ortama alınması toz ve kirden de koruma sağlayacaktır.

Elektrik panolarının kontrol edilmesi ve termal kamera ile belirli periyotlar içinde sıcaklıkların kayıt altına alınması, görevli ekibin eğitimi verimliliği en üst düzeye çıkarmak için hayati önem taşır. En iyi uygulamalar ve yeni teknolojiler hakkında düzenli eğitimler sağlanmalı, potansiyel sorunların güvenli ve verimli bir

şekilde nasıl tanımlanıp düzeltileceği personele öğretilmelidir. İyi eğitilmiş bir ekibin, enerji verimliliği uygulamalarını doğru bir şekilde uygulama ve potansiyel sorunları erken tespit etme olasılığı daha yüksektir.

Elektrik motorları, modern sanayi üretiminin temel taşlarından biridir. Çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılan makinelerin, pompaların, fanların, kompresörlerin ve konveyör sistemlerinin sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlayarak kritik bir rol oynarlar. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) tahminlerine göre, küresel elektrik tüketiminin %53'ünden elektrik motorlu sistemler sorumludur. Sanayi genelinde ise bu oran oldukça yüksektir; dünya çapında tüketilen elektriğin yaklaşık %40'ı sanayi tarafından kullanılmakta ve bunun da önemli bir bölümü elektrik motorları aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu denli büyük bir enerji tüketimi göz önüne alındığında, elektrik motorlarının enerji verimliliğini artırmak, sanayi tesisleri için hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Kompanzasyon panoları, endüstriyel enerji verimliliğinin temel bir bileşeni olarak kritik bir rol oynamaktadır. Etkili kompanzasyon yoluyla enerji tasarrufu sağlamak için başlıca stratejiler ve teknolojiler arasında doğru yük analizi, uygun kompanzasyon yönteminin seçimi (sabit, otomatik veya gelişmiş), doğru bileşenlerin (kondansatörler, kontaktörler, reaktörler, röleler) seçimi, doğru tasarım ve boyutlandırma, düzenli bakım ve izleme ile adaptif kontrolörler ve IoT özellikli sistemler gibi yeni teknolojilerin benimsenmesi yer almaktadır. Bu stratejilerin uygulanması, maliyet azaltımı, iyileştirilmiş sistem performansı ve çevresel sürdürülebilirlik dahil olmak üzere uzun vadeli faydalar sağlayabilir. Bu nedenle, fabrikaların enerji tüketimini optimize etmek ve daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmak için kompanzasyon panolarının doğru tasarımı, uygulanması ve bakımı önceliklendirilmelidir.

Kompanzasyon panoları, elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinde kullanılan ve güç faktörü düzeltme cihazlarını içeren panolardır. Bu panoların temel işlevi, elektrik şebekelerindeki enerji kaybını en aza indirmek için aşırı veya düşük güç faktörlerini düzelterek reaktif gücü yönetmektir. Artan enerji maliyetleri ve katı çevresel düzenlemeler nedeniyle, endüstriyel tesislerde enerji verimliliği giderek daha önemli hale gelmektedir. En belirgin avantajlarından biri, enerji tüketiminin azalmasıyla birlikte işletme maliyetlerinde sağlanan düşüştür. Daha az enerji tüketimi, aynı zamanda sera gazı emisyonlarının ve çevresel etkinin azalması

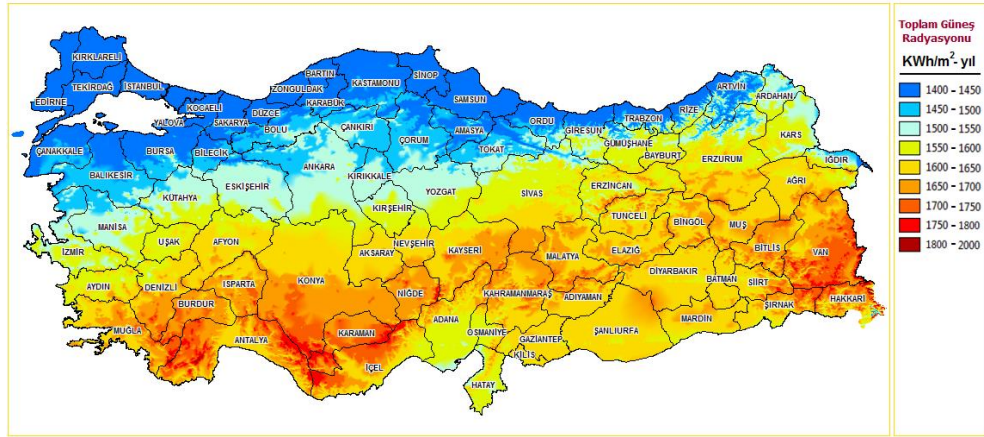
anlamına gelir. Enerji verimliliğine yapılan yatırımlar, işletmelerin rekabet gücünü artırabilir ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olabilir.

1.1.8 Güneş Enerjisi Sistemlerinde Enerji Verimliliği

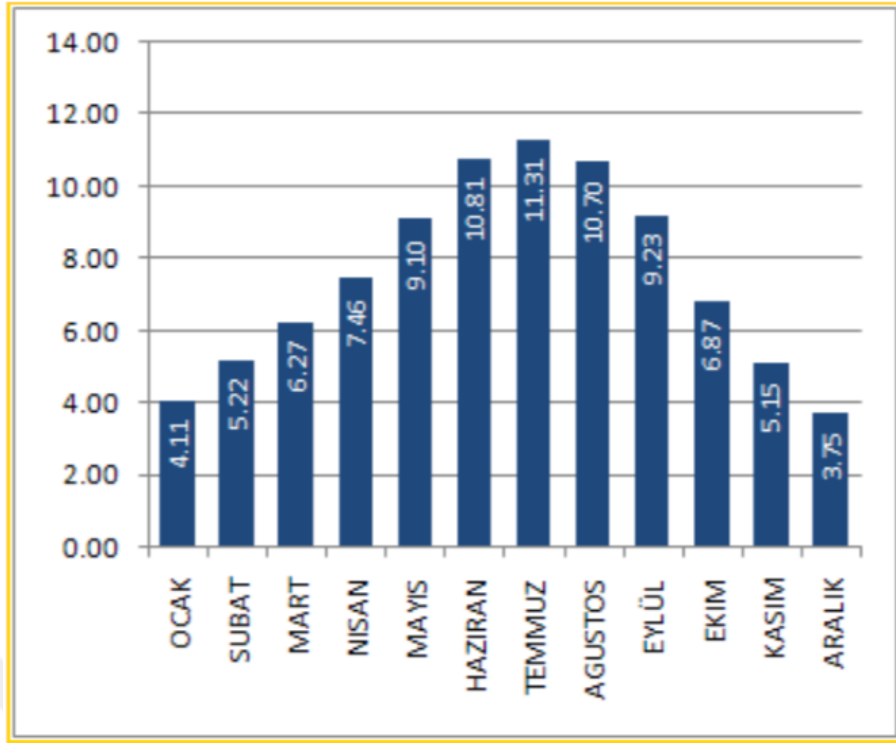
Güneş enerjisiyle elektrik üretimi, güneş panelleri (fotovoltaik paneller) veya güneş termal enerji sistemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Güneş panelleriyle elektrik üretimi, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme sürecidir ve genellikle fotovoltaik (PV) sistemler kullanılarak gerçekleştirilir.

Güneş termal sistemlerle elektrik üretimi, güneş enerjisini ısıya dönüştürerek elektrik elde etme yöntemidir. Bu sistemler genellikle büyük ölçekli enerji üretimi için kullanılır.

Enerji verimliliğinin bir diğer etkeni güneş enerjisi olup, bununla ilgili yararlanılan enerji verimliliği diğer verimlilik kaynaklarına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha öncelikli tercih edilmektedir. Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından verimli bir coğrafi konumdadır. Güneydoğu Anadolu bölgesi ve daha sonra Akdeniz bölgesi, ülkemizde güneş enerjisi bakımından en verimli bölgelerdir. Karadeniz bölgesi, bulutlu gün sayısının yüksek oluşu nedeniyle güneş enerjisi açısından verimsiz bölge olduğu görülmektedir.



Şekil 1.8. Güneş enerjisi potansiyel atlası (<https://enerji.gov.tr>)



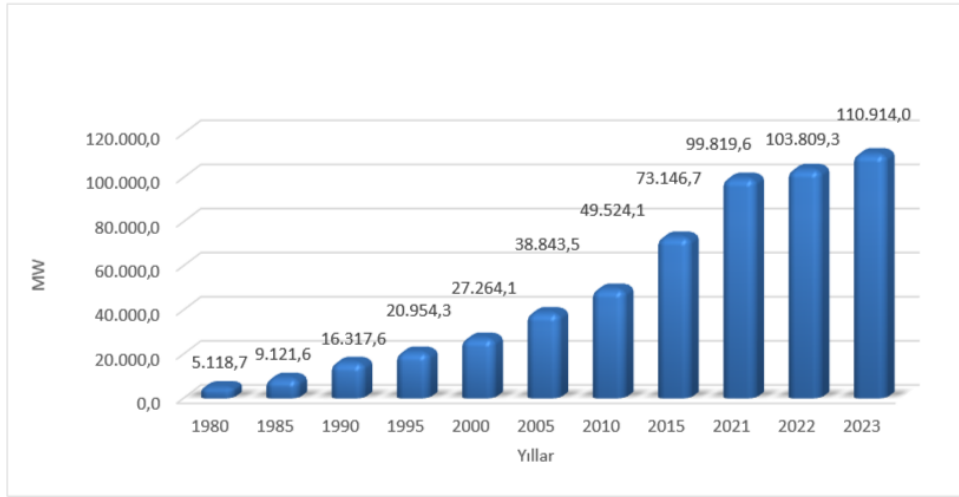
Şekil 1.9. Türkiye'nin aylara göre güneşlenme süreleri (<https://enerji.gov.tr>)

Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşma açısı, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi ve Güneş etrafındaki eliptik yörüngesi nedeniyle yıl içinde değişiklik gösterir. Kuzey Yarım Küre'de yaz mevsiminde güneş ışınları daha dik açıyla gelirken, kış aylarında daha eğik bir açıyla yeryüzüne ulaşmaktadır. Fotovoltaik panellerden maksimum verimi elde edebilmek için, güneş ışınlarının panele mümkün olduğunca dik açıyla gelmesi gerekmektedir. Bu nedenle güneş panellerinin eğim açıları, bulundukları yerin coğrafi konumuna ve mevsimsel koşullara göre ayarlanır. Bazı bölgelerde bu ayarlamalar aylık bazda yapılırken, bazı yerlerde mevsimsel ya da yıllık olarak optimize edilir. Ayrıca, Güneş'in gün içerisindeki gökyüzü hareketi, güneş açıları yardımıyla takip edilir. Bu hareket, konumun enlem ve boylamına bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, aynı saat diliminde dahi farklı lokasyonlarda güneş açıları değişiklik gösterebilir. Güneşin gökyüzündeki konumunun doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu açıların hesaplanması büyük önem taşır. Bu bilgiler, güneş konumuna bağlı çalışan sistemlerin tasarımı ve verimli çalışması açısından temel bir gerekliliktir. Dolayısıyla, fotovoltaik panellerin yüksek verimle çalışabilmesi adına, sabit eğim açıları ay ya da mevsim bazında farklı şekillerde belirlenmektedir.

Ayrıca, sistem konfigürasyonu da önemlidir. Burada, kullanılacak panel türü, panel verimliliği, evirici seçimi ve varsa batarya özellikleri belirlenmelidir. Tasarımla ilgili diğer kritik faktörler, panellerin yerleşimi, eğim ve yönelimi ile gölgeleme etkileridir. Sistemin karşılaması gereken enerji talebi ve toplam kurulu kapasiteye göre tasarım yapılır. Verimlilik üzerinde etkili olan enerji kayıpları, sıcaklık etkisi ve panel yüzeyindeki yansıma gibi faktörler detaylı şekilde analiz edilmelidir.

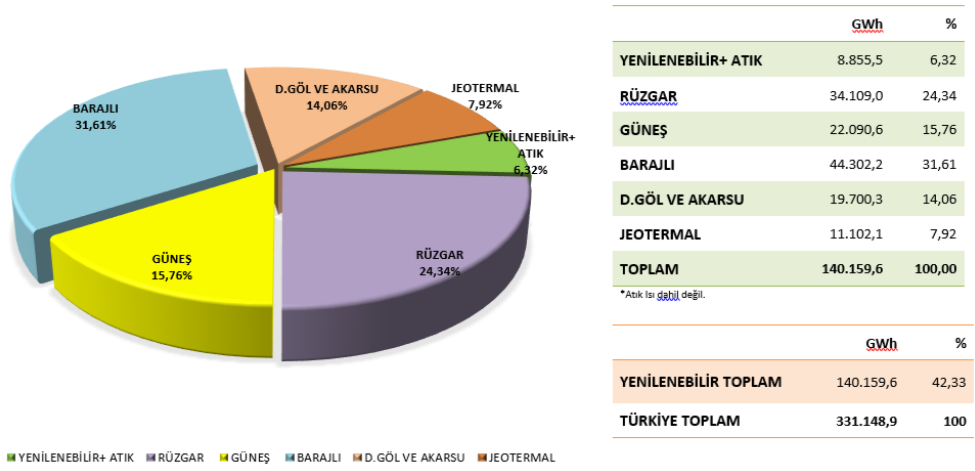
1.2 Türkiye ve Dünya’da Enerjinin Genel Durumu

Enerji, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için ekonomik büyümenin en temel unsurlarından biridir. Sanayi, ulaşım, tarım ve hizmet sektörleri gibi üretim alanlarının hepsi enerjiye bağımlıdır. Türkiye’nin hedeflediği sanayileşme ve ihracat odaklı büyüme modeli, sürdürülebilir ve kesintisiz enerji arzına ihtiyaç duyar. Türkiye’nin enerji kaynaklarının büyük bir kısmı dışa bağımlıdır. Özellikle doğalgaz ve petrolün %90’dan fazlası ithal edilmektedir. Bu durum ülkemizin cari açığını artırır, ülkemizdeki enerji fiyatlarını dış gelişmelere duyarlı hale getirir ve enerji arz güvenliğini riske atar. Bu nedenle yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır.

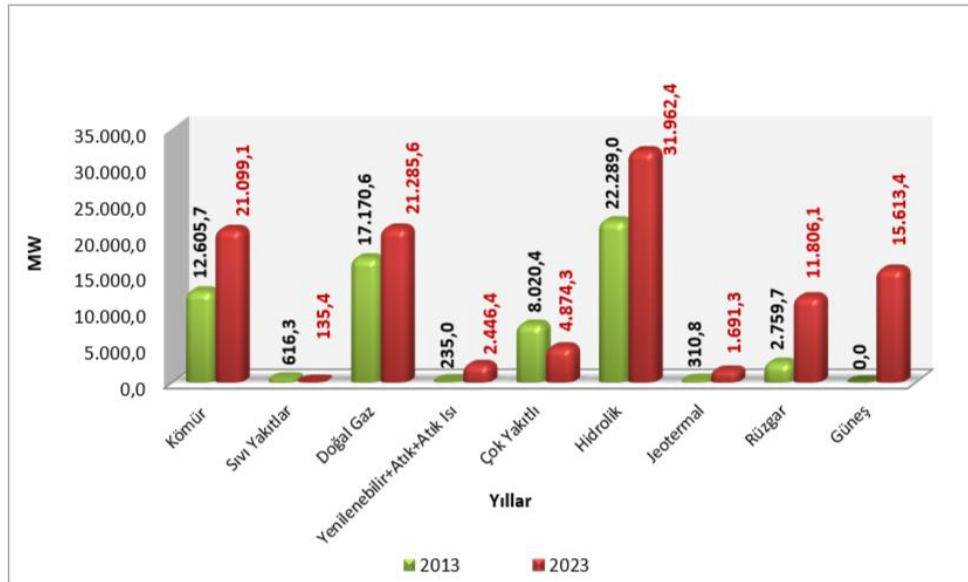


Şekil 1.10. Türkiye’nin yıllara göre kurulu güç durumu (Tüik, 2023)

Türkiye; güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin bir ülkedir. Güneş enerjisi açısından güneşlenme süresi yüksektir, yılda ortalama 2.741 saattir. Rüzgâr enerjisi açısından Ege, Marmara ve İç Anadolu bölgeleri daha avantajlıdır. Jeotermal kaynak zenginliği ile Avrupa’da birinci sıradadır. Bu kaynakların değerlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır.



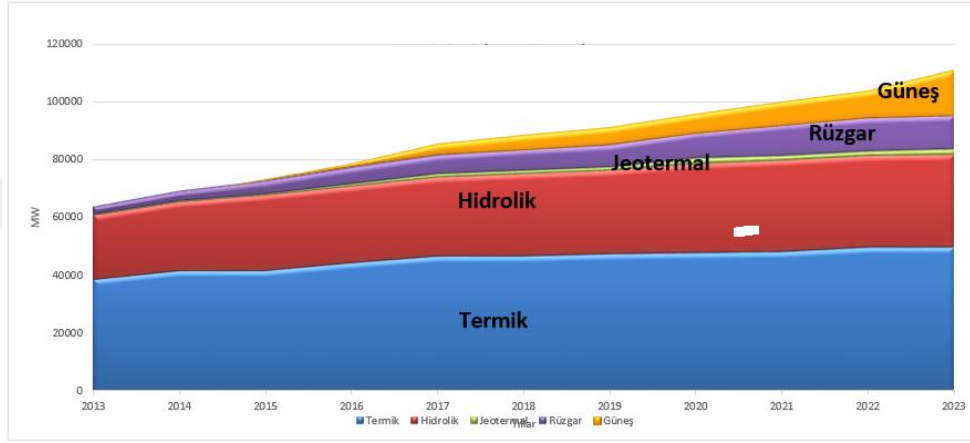
Şekil 1.11. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılım oranları (Tüik, 2023).



Şekil 1.12. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişim oranları (Tüik, 2023).

Tablo 1.4. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişim oranları (Tüik, 2023).

	Birim :MW									
	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğal Gaz	Yenilenebilir +Atık+Atık Isı	Çok Yakıtlı	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2013	12.605,7	616,3	17.170,6	235,0	8.020,4	22.289,0	310,8	2.759,7	-	64.008
%	19,69	0,96	26,83	0,37	12,53	34,82	0,49	4,31	-	100,00
2023	21.099,1	135,4	21.285,6	2.446,4	4.874,3	31.962,4	1.691,3	11.806,1	15.613,4	110.914
%	19,02	0,12	19,19	2,21	4,39	28,82	1,52	10,64	14,08	100,00



Şekil 1.13. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişimi (Tüik, 2023).

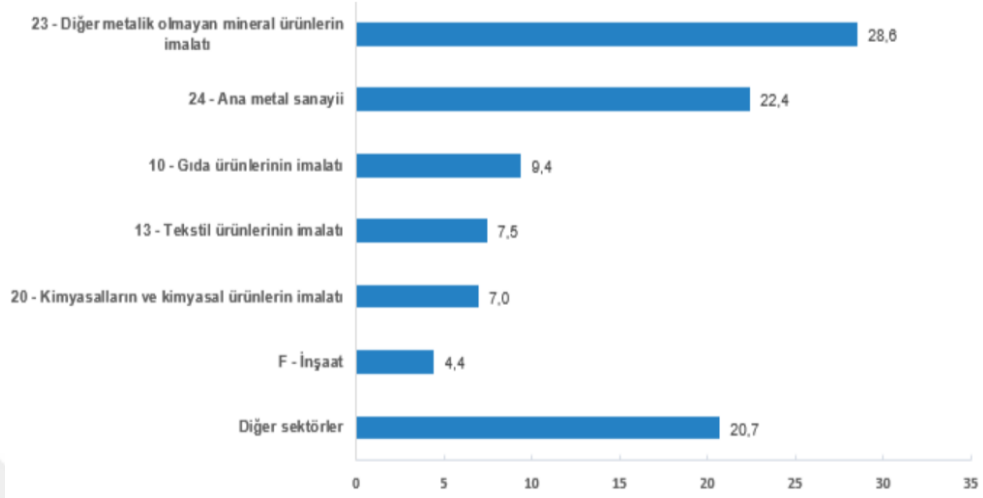
Tablo 1.5. 2013-2023 yılları arası Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre değişimi (Tüik, 2023).

	Birim: MW					
	Termik	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgâr	Güneş	Toplam
2013	38.648,0	22.289,0	310,8	2.759,7	0,0	64.007,5
%	60,38	34,82	0,49	4,31	-	100,00
2023	49.840,8	31.962,4	1.691,3	11.806,1	15.613,4	110.914,0
%	44,94	28,82	1,52	10,64	14,08	100,00

Enerji kullanımı, sera gazı salınımının en büyük nedenlerinden biridir. Türkiye'nin Paris İklim Anlaşması'nı imzalayarak 2053'e kadar net sıfır karbon hedefi koyması, enerji üretiminde daha temiz teknolojilere geçişi zorunlu kılmaktadır.

2023 yılı Sanayi Sektörü Nihai Enerji Tüketimi Araştırması verilerine göre, sanayi sektöründe toplam enerji tüketimi 1 milyon 706 bin 480 terajul olarak hesaplanmıştır. Alt sektörler bazında değerlendirildiğinde, en yüksek enerji tüketimi %28,6 oranıyla "diğer metalik olmayan mineral ürünlerin üretimi" alanında gerçekleşmiştir. Bu sektörü, %22,4 ile "ana metal sanayisi", %9,4 ile "gıda

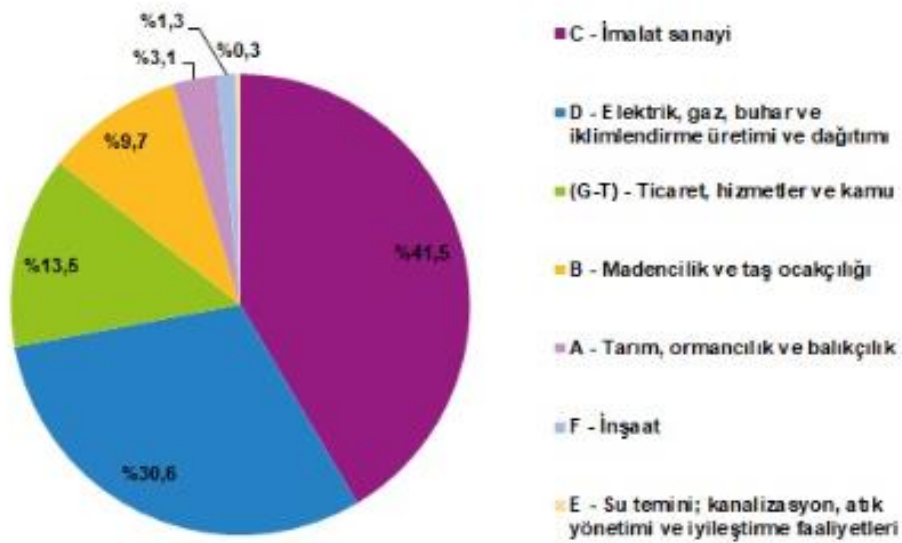
üretimi", %7,5 ile "tekstil ürünleri üretimi" takip etmiştir. "Kimyasal maddeler ve kimyasal ürünlerin imalatı" sektörü %7,0'lık bir pay alırken, "inşaat sektörü" ise %4,4 oranında enerji tüketimiyle daha düşük bir paya sahiptir (Tüik, 2023)



Şekil 1.14. Sanayide nihai enerji tüketiminin sektörlere göre yüzdelik dağılımı (Tüik, 2023).

1.2.1 Elektrik

Elektrik, sanayiden konutlara kadar her yerde en sık kullanılan enerji çeşididir. Özellikle teknolojik gelişmelerle birlikte yaşanan doğal kaynakların tüketiminin hızlanması, çevre kirliliği sorunları, enerji fiyatlarının yüksek olması elektrik enerjisinin de etkin kullanımını zorunlu kılmaktadır (Meral, Teke, Tümay, 2009).

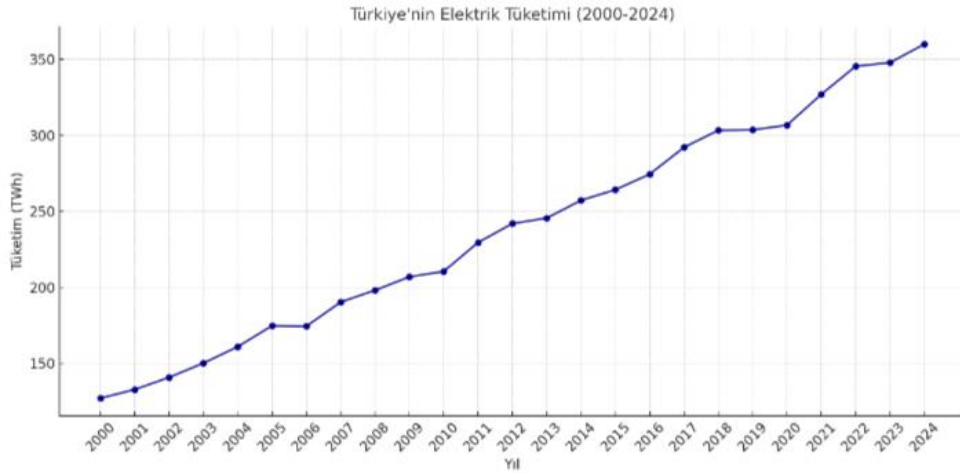


Şekil 1.15. Enerji kullanımının ekonomik faaliyetlere dağılımı, 2021 (<https://enerji.gov.tr>)

Dünya ülkelerinde ve ülkemizde de nüfusun artması ile enerji tüketimi ciddi bir artış göstermektedir. Türkiye’de 2024 yılı verilerine göre elektrik üretiminin %35,2’si kömürden, %21,5’i hidrolik enerjiden, %18,9’u doğal gazdan, %10,5’i rüzgârdan, %7,5’i güneşten, %3,2’si jeotermal enerjiden ve %3,2’si diğer kaynaklardan elde edilmiştir (<https://enerji.gov.tr>).

Grafik incelendiğinde ekonomik faaliyetlerde enerji kullanımında en yüksek payın imalat sanayinde olduğu görülmektedir. Ayrıca ülkemizde elektrik tüketimi her geçen yıl artmaktadır. Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi 2024 yılında bir önceki yıla göre %3,8 oranında artarak 347,9 *TWh*, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %5,4 artarak 348,9 *TWh* olarak gerçekleşmiştir.

Sanayi, ticaret ve konut alanlarında en yoğun biçimde kullanılan enerji türlerinden biri elektrik enerjisidir. Doğal kaynakların hızlı bir şekilde azalması, çevresel kirlilikteki artış ve enerji maliyetlerinin yüksekliği, elektriğin daha bilinçli ve etkin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Elektrik enerjisinde verimliliği artırabilecek stratejiler üzerine yapılan bir çalışmada, bu yöntemler nicel örneklerle detaylandırılmış ve enerji tasarrufuna katkı sağlayabilecek çeşitli öneriler geliştirilmiştir (Meral, Teke, Tümay, 2009).



Şekil 1.16. Türkiye’nin yıllara göre elektrik tüketimi

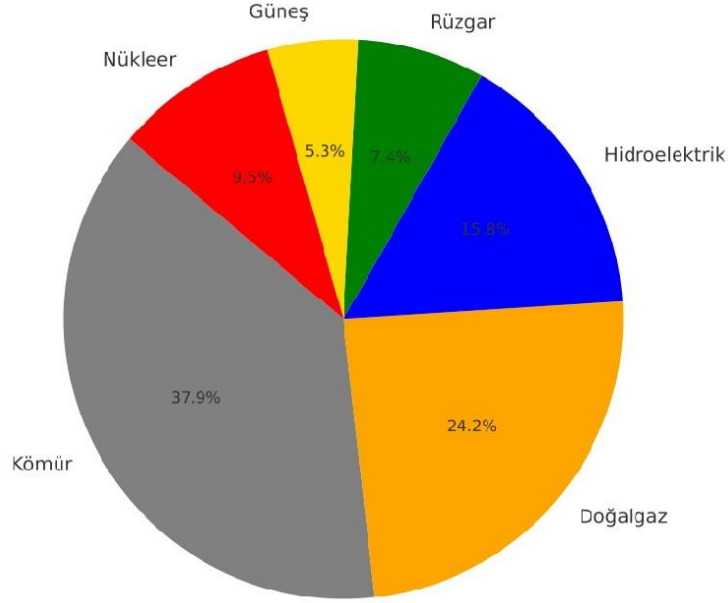
Türkiye’nin enerji tüketimindeki artan oran dikkate alındığında, enerji verimliliğinin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Türkiye enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Tüketimi karşılayabilmek için ise verimlilik ilkesine bağlı kalarak enerji kullanımı önemlidir. Uzun vadeli sürdürülebilir ekonomik büyümeleri elde edebilmek için enerji verimliliğini sağlamak bir gerekliliktir. İşletmeler açısından

ise enerji verimliliğinin düşük olması maliyetlerin yüksek olması anlamına gelmektedir (Doğan ve Yılankıran, 2015).

Ülkemizdeki sanayi sektöründe enerji tasarrufuna yönelik potansiyelin en az %20 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca mevcut potansiyelin yaklaşık %50'si küçük yatırımlarla gerçekleştirilebilecek durumdadır. Organize sanayi bölgelerinde ise (bünyesinde 50'den fazla işletme bulunduran) mevzuatlara göre enerji yönetimi uygulamak zorundadırlar. Enerji yönetiminin iyi organize edilmesi durumunda ise hiç yatırım yapmadan %10'luk enerji tasarrufu sağlamak mümkün olabilmektedir (Doğan ve Yılankıran, 2015).

2025 yılı Şubat ayı sonunda ülkemizin toplam kurulu gücü 117.122 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin verilen kaynaklara göre mevcut dağılımı incelendiğinde; %27,5'lik kısmının hidrolik kaynaklardan, %21'inin doğal gazdan, %18,7'sinin kömürden, %17,8'inin güneş enerjisinden, %11,2'sinin rüzgâr enerjisinden, %1,5'inin jeotermal enerjiden ve %2,3'ünün ise diğer kaynaklardan sağlandığı görülmektedir. Aynı tarih itibarıyla ülke genelindeki elektrik üretim santrallerinin toplam sayısı, lisanssız tesisler dâhil olmak üzere 34.383'e ulaşmıştır. Bu santrallerin 767'si hidroelektrik, 72'si kömür, 376'sı rüzgâr, 66'sı jeotermal, 333'ü doğal gaz ve 462'si diğer enerji kaynaklarına dayalıdır. Güneş enerjisi santralleri ise 32.307 ile en yüksek sayıya sahiptir. (<https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>).

Dünya genelinde 2023 yılı itibarıyla toplam elektrik üretimi yaklaşık 29.165 TWh seviyesindedir. Elektrik üretiminde hâlâ en büyük pay kömür (%36) ve doğalgaz (%23) gibi fosil yakıt kaynaklarına aittir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam içindeki payı artmaktadır, ancak fosil yakıtlar baskınlığını sürdürmektedir. Bu dağılımda hidroelektrik %15, rüzgar %7, güneş %5 ve nükleer enerji %9 oranındadır.

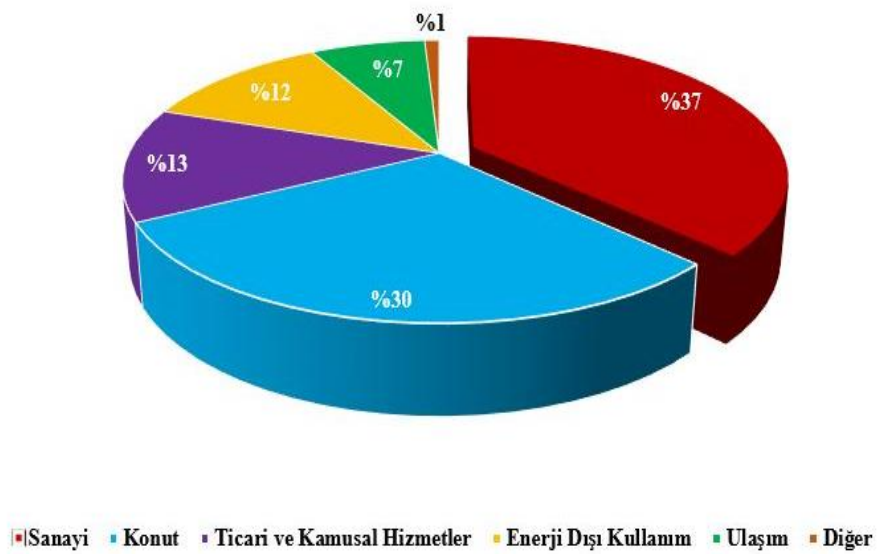


Şekil 1.17. Dünya elektrik üretimi dağılımı (IEA, 2023)

1.2.2 Doğalgaz

Doğal gaz, yanıcı, aynı zamanda havadan hafif, renksiz ve kokusuz bir gaz türüdür. Büyük ölçüde metan gazından oluşur ancak içinde etan ve propan gibi hafif hidrokarbonlar da bulunur. Ayrıca içinde ağır hidrokarbonlar, karbondioksit, azot, helyum ve hidrojen sülfürü de az miktarda barındırır.

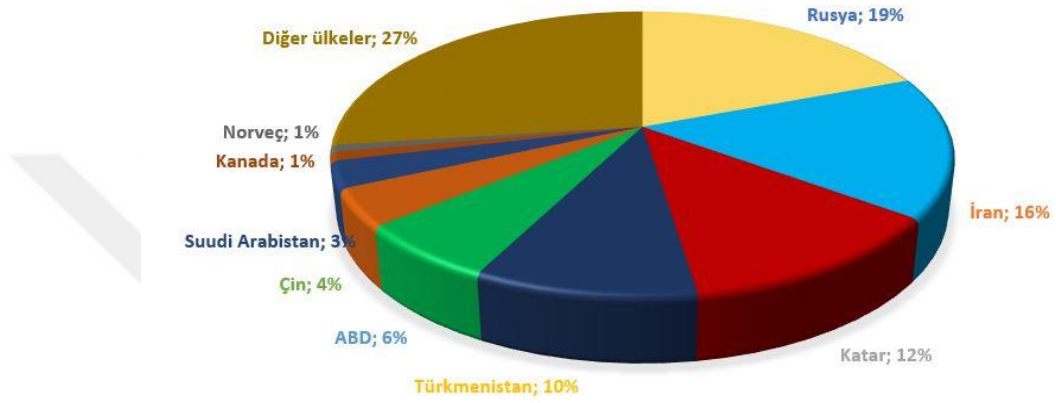
Doğal gaz yer altında tek başına bulunabileceği gibi, petrol ile birlikte de bulunabilir. Yoğun olarak elektrik üretiminde, evlerde, sanayide ve hizmet sektöründe kullanılır.



Şekil 1.18. Doğalgazın dünya genelindeki kullanım alanları (<https://enerji.gov.tr>)

2021 yılı verilerine baktığımızda, dünya genelinde toplam doğal gaz rezervi yaklaşık olarak 188,1 trilyon metreküptür. Bu rezervler %19 Rusya, %17 İran, %13 Katar'dadır. Bu ülkeleri ABD ve Türkmenistan takip etmektedir. Rusya, %19'luk rezerv ile ilk sırada yer almaktadır. ABD ise üretim olarak en büyük paya sahiptir ve dünyada %23 ile bu üretimi gerçekleştirmektedir.

Ülkelere Göre Doğalgaz Rezervleri



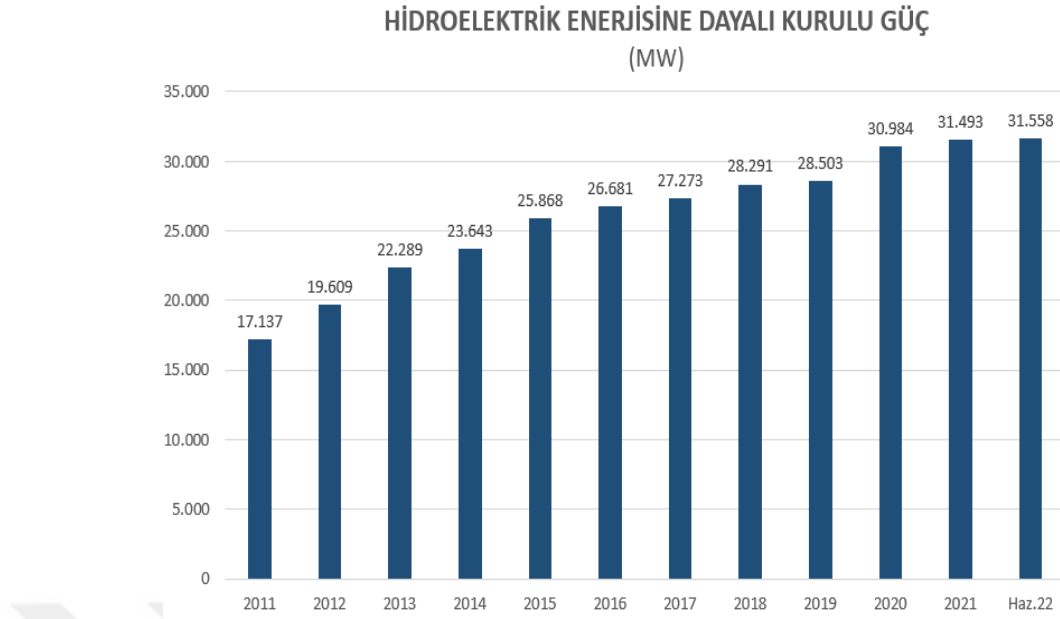
Şekil 1.19. Ülkelere göre doğalgaz rezervleri (<https://enerji.gov.tr>)

2022 yılında ülkemizde 408 milyon metreküp doğal gaz üretilmiştir ve bununla birlikte 54,6 milyar metreküp doğal gaz ithal edilmiştir. Bu verilere göre, Türkiye'nin doğal gaz ihtiyacının %99'u ithalatla karşılanmaktadır. 2022 yılı itibarıyla Türkiye'nin üretilabilir doğalgaz rezervi ise 544 milyar metreküpe yakındır. Bununla birlikte Karadeniz'de ortaya çıkan Sakarya sahasının geliştirilmesi ile Türkiye'nin doğal gaz rezervlerinin daha fazla artması beklenmektedir.

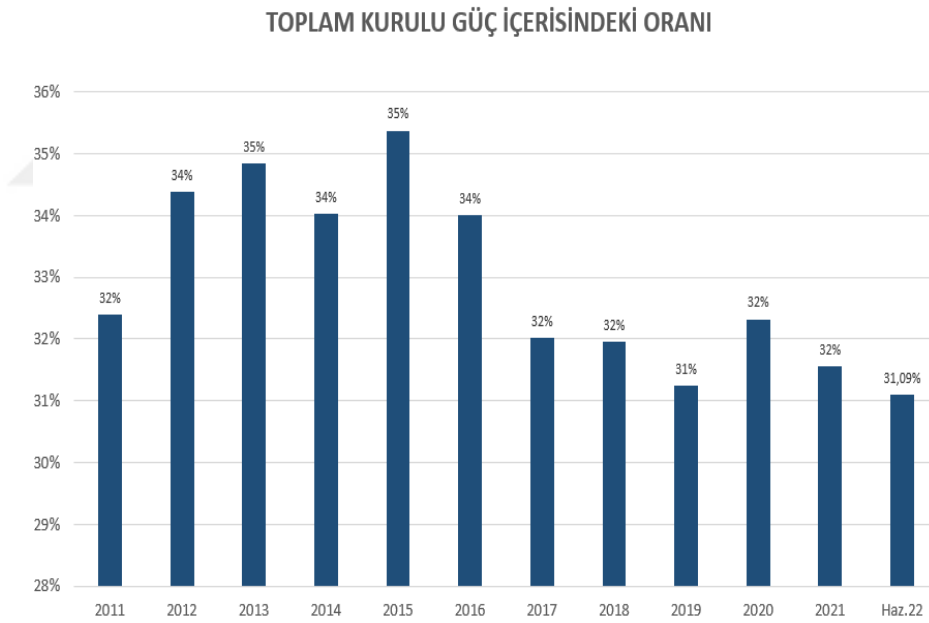
1.2.3 Hidroelektrik

Hidroelektrik enerji santralleri, çevre dostu olmaları ve düşük risk taşımaları nedeniyle tercih edilen enerji kaynaklarıdır. Hidroelektrik santraller; doğaya uyumlu, temiz, yenilenebilir, yüksek verimli, yakıt maliyeti olmayan, uzun ömürlü ve işletme maliyetleri oldukça düşük olan, dışa bağımlı olmayan yerli enerji kaynaklarıdır.

Hidroelektrik santrallerinden 2021 yılında 55,5 milyar kWh elektrik üretilmiştir. 2022 yılının Mayıs ayı sonu itibarıyla hidroelektrik kaynaklı elektrik üretimi yaklaşık 35,2 milyar kWh'a ulaşmıştır.

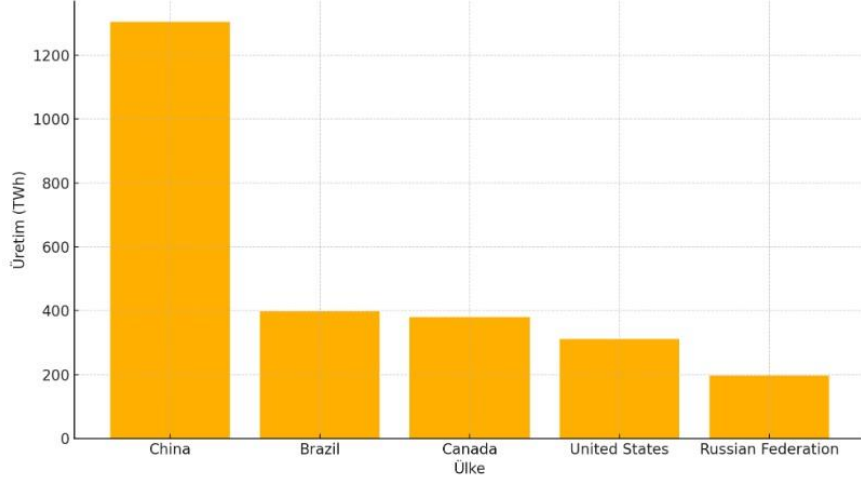


Şekil 1.20. Türkiye’deki hidroelektrik enerjisine dayalı kurulu güç
(<https://enerji.gov.tr>)



Şekil 1.21. Hidroelektrik enerjisinin Türkiye’deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (<https://enerji.gov.tr>)

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden elde edilen yenilenebilir bir kaynaktır. 2021 yılı verilerine göre dünya genelinde hidroelektrik üretimi yaklaşık 4.400 TWh seviyesindedir. En büyük üretici ülkeler: Çin 1304 TWh, Brezilya 398 TWh Kanada 380 TWh, ABD 311 TWh ve Rusya 197 TWh’tir Türkiye, hidroelektrikte Avrupa’da önemli bir konuma sahiptir.



Şekil 1.22. Dünya genelinde hidroelektrik enerji üretimi (İEA, 2021)

1.2.4 Rüzgâr

Rüzgâr, güneşin yeryüzünü farklı derecelerde ısıtması ile oluşur. Yeryüzünün farklı bölgeleri, farklı şekilde ısındığı için hava sıcaklığı, nem ve basınç farklılıkları oluşur. Bu basınç farkları ise havanın hareketine sebep olur. Dünyaya ulaşan bu enerjinin yaklaşık %2'si ise rüzgâr enerjisine dönüşür.

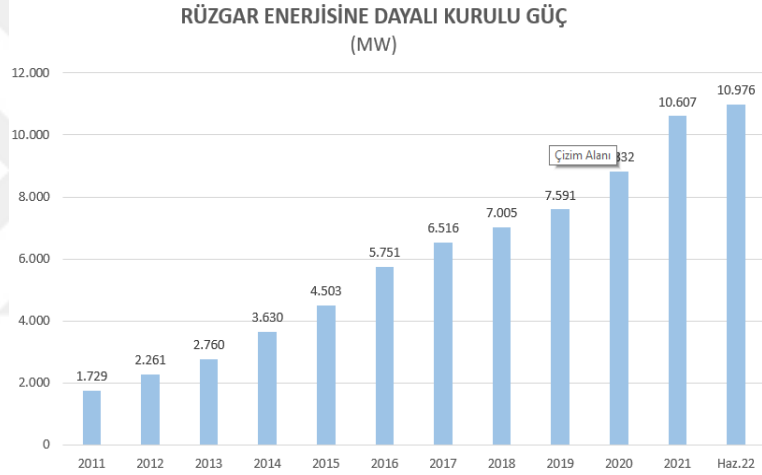
Rüzgârın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün düzensiz ısınmasına bağlı olarak zaman ve mekâna göre değişir. Rüzgâr, hız ve yön olmak üzere iki parametre ile tanımlanır. Rüzgâr hızı, yükseklik arttıkça artar ve teorik olarak gücü, hızının küpü ile orantılıdır. Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminin ilk yatırım maliyetleri yüksek, kapasite faktörleri düşük ve enerji üretimi değişken olsa da bazı avantajları şunlardır.

- Yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır, çevre dostudur.
- Tükenme ve zamanla fiyatının artma riski yoktur.
- Günümüzdeki enerji santralleriyle rekabet edebilecek maliyete sahiptir.
- Bakım ve işletme maliyetleri düşüktür.
- Kurulumu ve işletilmesi nispeten basittir.
- Kısa sürede işletmeye alınabilir.

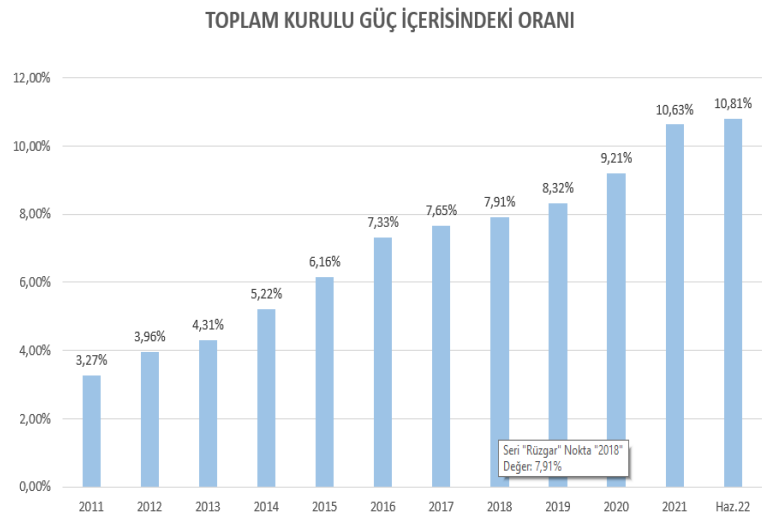
Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerji santrallerinin ana bileşenleridir. Bu makineler, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürür.

2006 yılında, orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak, 200 metre yatay çözünürlükte, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) hazırlandı. Bu verilere göre, yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve yıllık ortalama rüzgâr hızının 7,5 m/s'in üzerinde olduğu kullanılabilir alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği öngörülmüştür. Bu hesaplamalara dayanarak, Türkiye'de kurulabilecek toplam rüzgâr enerji santrallerinin kapasitesinin 47.849,44 MW olduğu belirlenmiştir.

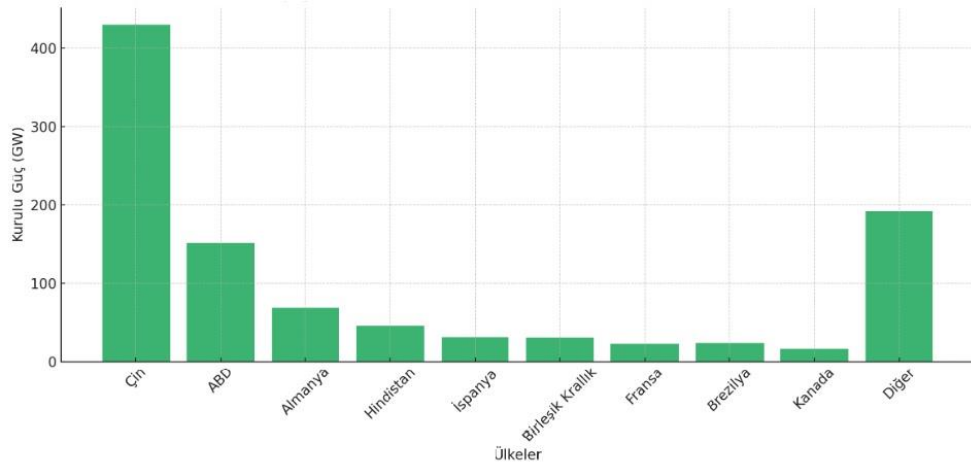
Haziran 2022 yılı sonu itibarıyla, Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10.976 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu toplam elektrik kurulu gücünün %10,81'ini oluşturmaktadır. Yıllara göre rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç ve toplam kurulu güç içerisindeki oran aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 1.23. Türkiye’de rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç (<https://enerji.gov.tr>)



Şekil 1.24. Rüzgâr enerjisinin Türkiye’deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (<https://enerji.gov.tr>)



Şekil 1.25. Dünya genelinde rüzgâr enerjisi kurulu gücü (IRENA, 2023)

Rüzgar enerjisi, çevre dostu ve sürdürülebilir özellikleri sayesinde dünya genelinde hızla gelişen yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. 2023 yılı itibarıyla küresel rüzgar enerjisi kurulu gücü yaklaşık 1.000 GW (gigawatt) seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin büyük bir bölümü birkaç lider ülkenin yatırımları sayesinde oluşmuştur.

En büyük rüzgar enerjisi kurulu gücüne sahip ülkeler Çin 430 GW, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) 150 GW, Almanya 67 GW, Hindistan 44 GW, İspanya 30 GW, Birleşik Krallık 29 GW, Fransa 21 GW, Brezilya 22 GW, Kanada 15 GW, Diğer ülkeler 192 GW kurulu güce sahiptirler.

Çin, toplam küresel kurulu gücün yaklaşık %43'ünü tek başına karşılamaktadır. Çin'in ardından gelen ABD ve Almanya da dünya genelinde önemli paylara sahiptir. Avrupa ülkeleri arasında Almanya, İspanya ve Birleşik Krallık öne çıkarken; Brezilya ve Hindistan gibi gelişmekte olan ekonomiler de ciddi yatırımlarla listede yer almaktadır.

Rüzgar enerjisinin hem karasal (onshore) hem de deniz üstü (offshore) türleri gelişim göstermektedir. Özellikle Avrupa'da offshore rüzgar projeleri, yüksek verimliliği sayesinde enerji politikalarında stratejik öneme sahiptir.

1.2.5 Güneş

Güneş enerjisi, kurulum ve kullanım kolaylığı olmasının yanı sıra çevreyi kirletmemesi ve zararlı atık oluşturmaması gibi özelliklere sahip bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Nüfus artışının tetiklediği küresel enerji talebindeki sürekli yükseliş, büyük ölçüde fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmaktadır. Ancak bu durum, özellikle sera gazı emisyonlarını artırarak küresel iklim değişikliği sürecini hızlandırmaktadır. Bu bağlamda, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini minimize etmek ve sürdürülebilir bir çevresel gelecek inşa etmek amacıyla, fosil kaynaklara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu yenilenebilir kaynaklar arasında güneş enerjisi, yaygın uygulanabilirliği sayesinde son dönemde önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi, coğrafi konumdan bağımsız olarak potansiyel sunsa da, bölgesel değişkenler bu potansiyelin etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Öztürk, C., 2020).

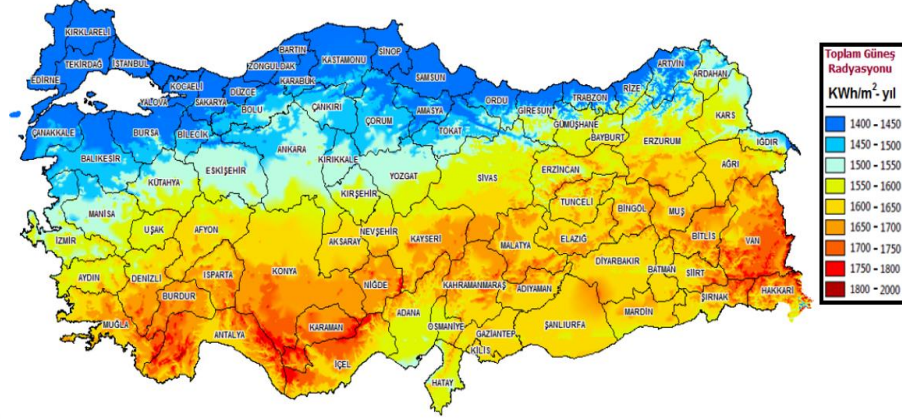
Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ısıma enerjisidir. Güneş, yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ W güç yayan, temiz ve tükenmez yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşten yayılan bu enerjinin çok az bir miktarı Dünyaya ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1.367 W güç düşmektedir. Atmosfere gelen bu ışımanın genellikle X ışınlarından ve ultraviyole ışıklardan oluşan bir kısmını emerken bir kısmını ise yansıtmaktadır.

Bu derece büyük ve yenilenebilir enerji kaynağının değerlendirilmesi adına Bakanlığımızca yapılan çalışmalar son dönemde hız kazanmıştır. Ülkeler fosil kaynakların çevreye verdiği zararlardan kaçınmak için yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmıştır. Bu sayede güneş enerjisinden ısı ve elektrik üretimi ile ilgili birçok araştırma yapılmakta ve kullanımı yıllar geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi için birden fazla metot olmasına rağmen genel olarak eğilim güneşten gelen ışığın doğrudan elektriğe çevrildiği fotovoltaiik sistemlere yoğunlaşmıştır.

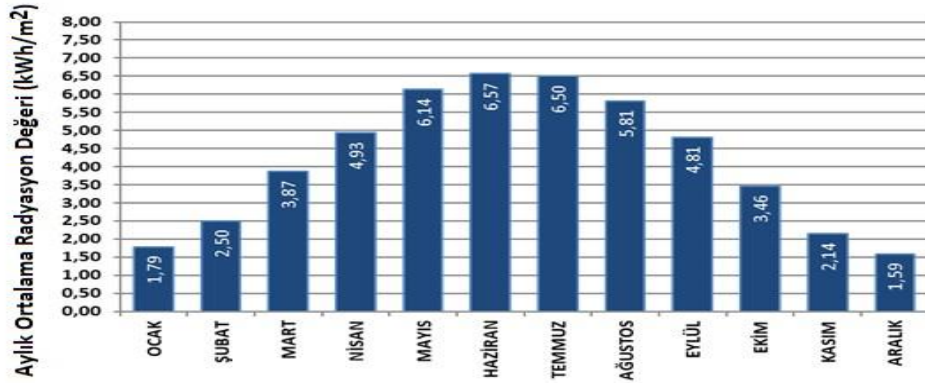
Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından azalma göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Özellikle temiz bir enerji kaynağı olması ve kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışması, güneş enerjisinin önemini artırmaktadır.

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bakanlığımızca hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına

(GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA’da yer alan genel potansiyel görünümü ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı aşağıda yer almaktadır (<https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>)

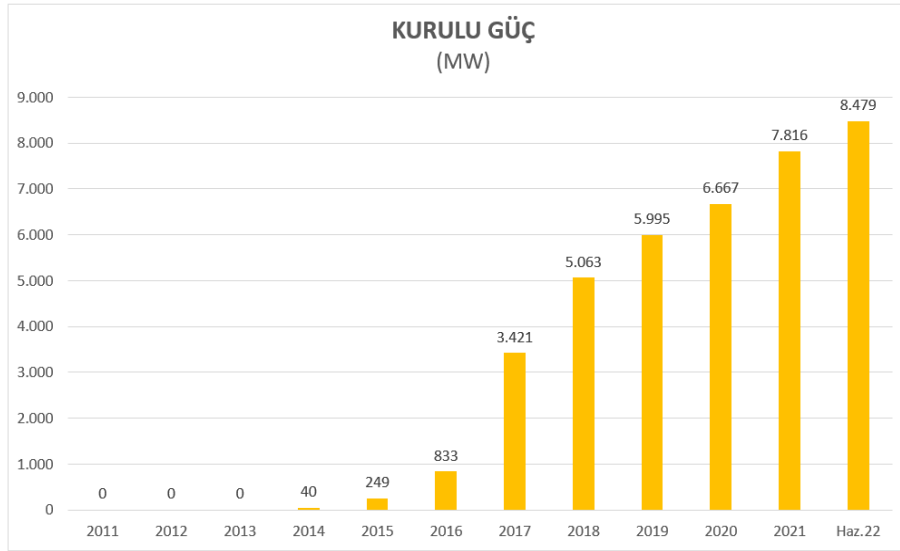


Şekil 1.26. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli görünümü (<https://enerji.gov.tr>)

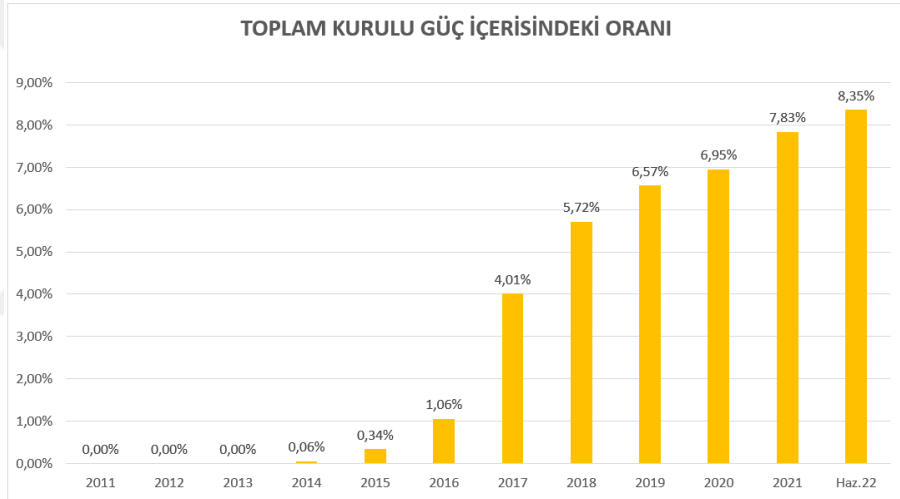


Şekil 1.27. Türkiye’nin aylık ortalama radyasyon dağılımı (<https://enerji.gov.tr>)

Haziran 2022 sonu itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz 8,479 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı %8,35 olup yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı aşağıdaki grafiklerde yer almaktadır.



Şekil 1.28. Türkiye’de güneş enerjisine dayalı kurulu güç (<https://enerji.gov.tr>)



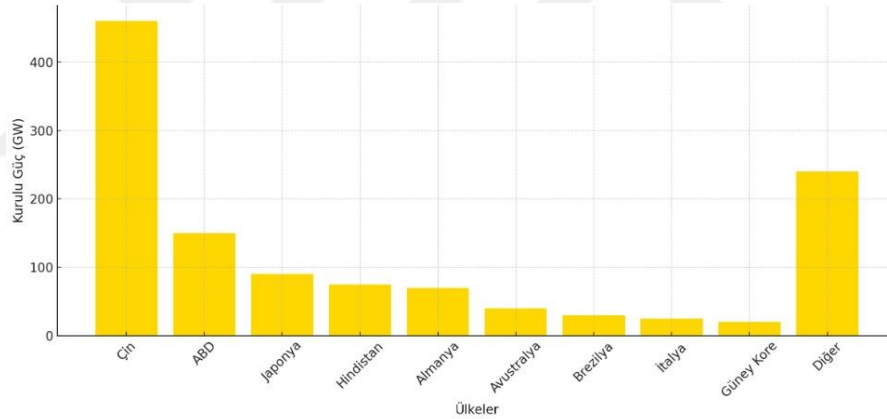
Şekil 1.29. Güneş enerjisinin Türkiye’deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (<https://enerji.gov.tr>)

Günümüzdeki sanayi, konut ve bireysel enerji gereksinimlerinin doğrudan güneş kaynağından karşılanması pratik olarak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisinin farklı enerji türlerine dönüştürülerek kullanılması zorunludur. Güneş radyasyonundan faydalanmaya yönelik çeşitli teknolojik inovasyonlar geliştirilmiştir. Güneş enerjisi teknolojileri, kullanılan yöntem, malzeme ve teknolojik olgunluk seviyesi bakımından geniş bir çeşitlilik arz etmekle birlikte, bazıları güneş enerjisini doğrudan ışık veya ısı enerjisi formunda kullanırken, diğerleri bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanmaktadır. Güneş enerjisinin uygulama sahaları arasında doğrudan veya dolaylı elektrik

üretimi, sıcak su temini, mekân ısıtma ve soğutma sistemleri, endüstriyel prosesler için gerekli ısı enerjisi ve sera ortamlarının ısıtılması önemli yer tutmaktadır (<https://enerji.gov.tr>).

Elektrik enerjisi, modern yaşam biçimimizin vazgeçilmez bir unsurudur. Günümüzde elektrik ihtiyacının büyük bir bölümü konvansiyonel termik veya hidroelektrik santraller aracılığıyla karşılanmaktadır. Ancak, sera gazı emisyonlarına dair artan endişeler ve diğer çevresel sorunlar neticesinde, fotovoltaik hücreler gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin elektrik üretimi için kullanımı giderek daha fazla önerilmektedir (Kandasamy, C. P., Prabhu, P., & Niruba, K., 2013).

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla doğrudan elektrik üreten, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. 2023 yılı itibarıyla dünya genelindeki toplam kurulu güneş enerjisi kapasitesi yaklaşık 1.200 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu, yalnızca son on yılda gerçekleşen hızlı büyümeyle mümkün olmuştur.



Şekil 1.30. Dünya genelinde güneş enerjisi kurulu gücü (IRENA, 2023)

Yukarıdaki çubuk grafikte, 2023 yılı itibarıyla güneş enerjisi kurulu gücü en yüksek olan ülkeler gösterilmektedir. Güneş enerjisi, karbon salımı olmayan, doğrudan güneş ışınlarından elektrik üreten yenilenebilir bir kaynaktır. En fazla kurulu güce sahip ülkeler Çin 460 GW, ABD 150 GW, Japonya 90 GW, Hindistan 75 GW, Almanya 70 GW, Avusturalya 40 GW, Brezilya 30 GW, İtalya 25 GW, Güney Kore 20 GW, diğer ülkeler 240 GW kurulu güce sahiptirler.

Çin, dünyadaki toplam kapasitenin neredeyse %40'ını tek başına oluşturmakta ve açık ara lider konumdadır. ABD ve Japonya büyük ölçekli PV santralleri ve konut tipi sistemleriyle sıralamada öne çıkmaktadır. Hindistan ve Almanya, yüksek güneşlenme süresi ve altyapı yatırımlarıyla güçlü bir büyüme

trendi sergilemektedir. Güneş enerjisi, özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerjiye erişimi artırma, enerji ithalatını azaltma ve sera gazı emisyonlarını düşürme yönünden stratejik önem taşımaktadır. Ayrıca modüler yapısı sayesinde küçük ölçekli uygulamalarda da yaygınlaşmaktadır.

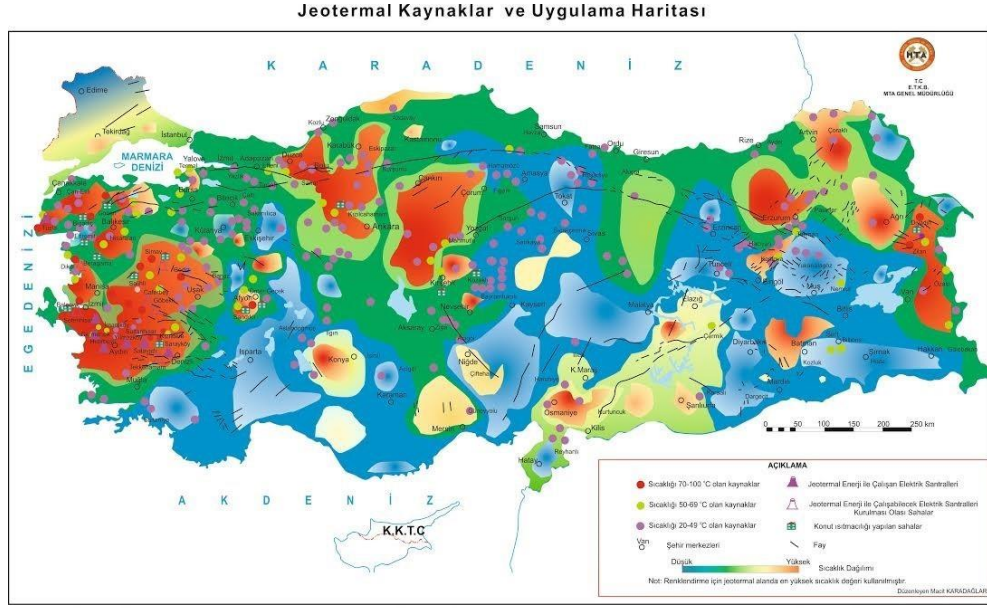
1.2.6 Jeotermal

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde depolanmış olan ısı enerjisidir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir.

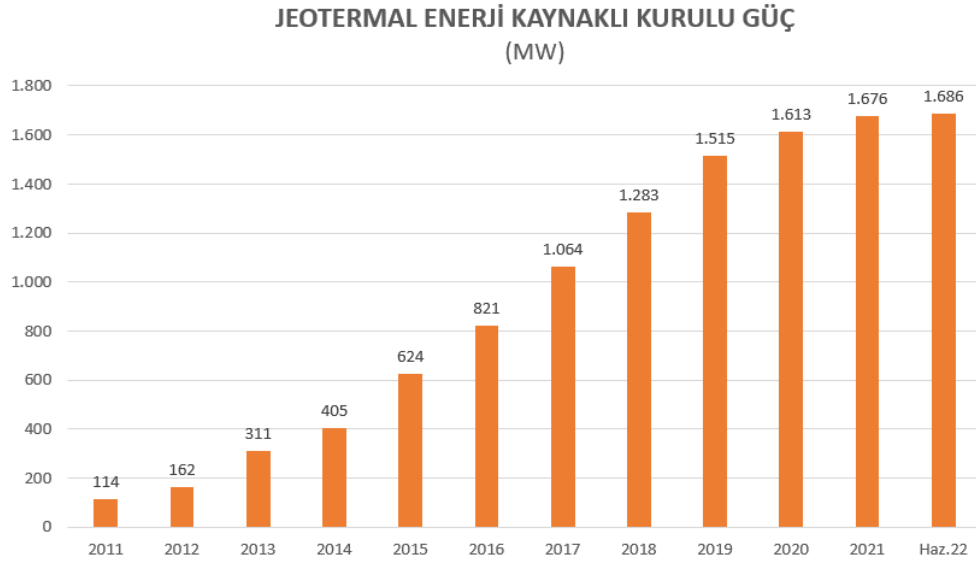
Türkiye, jeolojik konumu itibarıyla önemli bir jeotermal potansiyele sahip bir ülkedir. Aktif tektonik kuşakta yer alması sayesinde, ülke genelinde çok sayıda sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Bu durum, jeotermal enerjinin hem elektrik üretimi hem de doğrudan kullanım uygulamaları açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Jeotermal enerjinin kullanım alanları, Elektrik üretimi, ısı üretimi ve termal turizm ve sağlık amaçlı olarak kullanım alanına sahiptir.

Bilindiği gibi jeotermal enerji, yenilenebilir, temiz, ucuz ve çevre dostu olan yerli bir yer altı kaynağıdır. Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumu itibarıyla aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır. Türkiye Cumhuriyeti'nin jeotermal enerji rezervleri dikkate değer bir büyüklüğe sahip olup, bu potansiyelin coğrafi dağılımı heterojen bir özellik sergilemektedir. Belirlenen potansiyel alanların büyük bir çoğunluğu %78 Batı Anadolu Bölgesi'nde yoğunlaşırken, bunu sırasıyla İç Anadolu %9, Marmara Bölgesi %7, Doğu Anadolu %5 ve diğer coğrafi bölgeler %1 takip etmektedir. Mevcut jeotermal kaynakların yaklaşık %90'lık bir bölümünün düşük ve orta sıcaklık aralığında olduğu tespit edilmiş olup, bu durum söz konusu kaynakların öncelikli olarak doğrudan ısı temini uygulamalarında (mekân ısıtması, termal turizm faaliyetleri, endüstriyel prosesler vb.) kullanımına işaret etmektedir. Geriye kalan %10'luk dilimin ise elektrik enerjisi üretimi için uygun termodinamik özelliklere sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Türkiye, sahip olduğu jeotermal enerji potansiyeli itibarıyla Avrupa kıtasında en üst sırada yer almakta olup, kurulu jeotermal enerji kapasitesi açısından ise küresel ölçekte dördüncü konumdadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi gerçekleştiren ilk beş ülke sıralamasında ise Amerika Birleşik Devletleri, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda bulunmaktadır. Ülkemizdeki jeotermal kaynakların bölgesel yayılımını gösteren kartografik bir sunum aşağıda yer almaktadır.

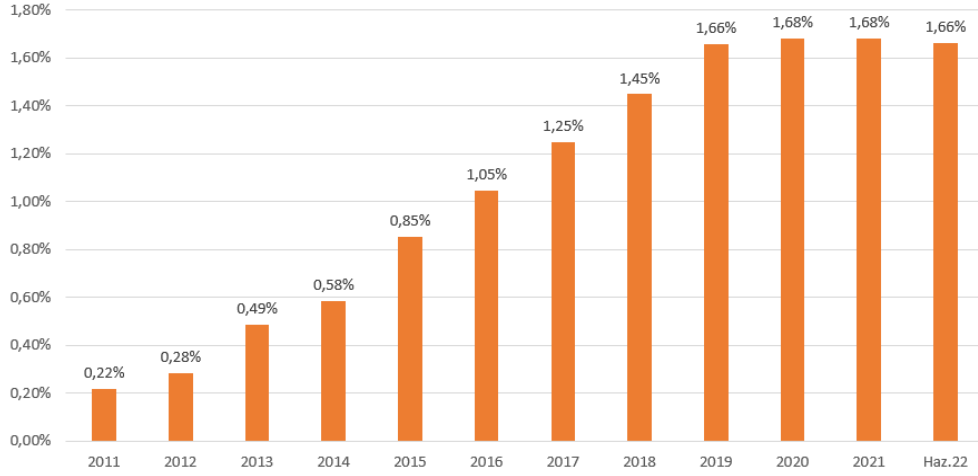


Şekil 1.31. Türkiye’de jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası
(<https://enerji.gov.tr>)

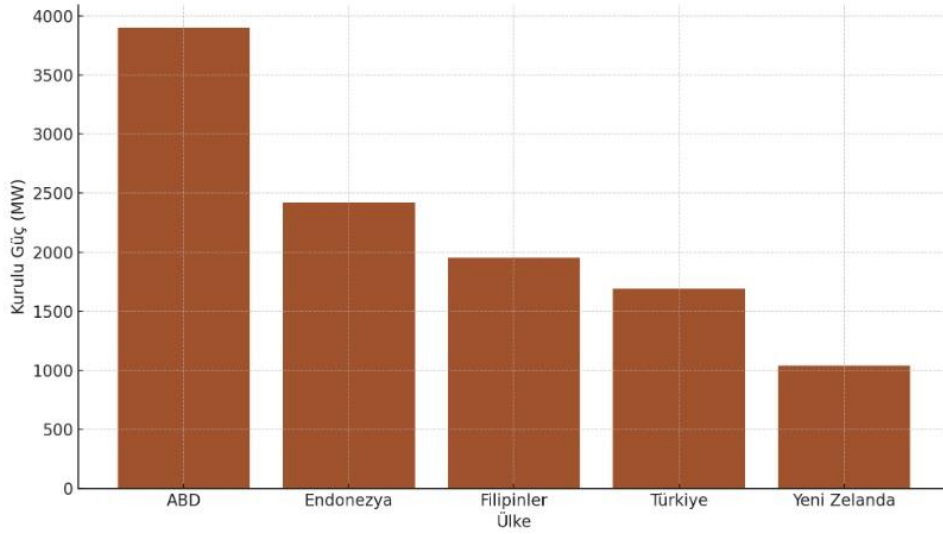


Şekil 1.32. Türkiye’de jeotermal kaynaklı kurulu güç (<https://enerji.gov.tr>)

TOPLAM KURULU GÜÇ İÇERİSİNDEKİ ORANI



Şekil 1.33. Jeotermal enerjisinin Türkiye’deki toplam kurulu güç içerisindeki oranı (<https://enerji.gov.tr>)



Şekil 1.34. Dünyada genelinde jeotermal enerji kurulu gücü (IRENA, 2023)

1.2.1 Nükleer

Nükleer enerjiyle ilgili gelişmeler, 1789 yılında uranyumun keşfiyle başlamış ve 1934’te atomun parçalanmasıyla hız kazanmıştır. Bu süreç, politikacıların, bilim insanlarının ve sanayicilerin dikkatini çeken önemli bir alan haline gelmiştir. Diğer pek çok teknolojiye olduğu gibi, nükleer enerji üzerindeki ilk çalışmalar da askeri ve savunma amaçlı olarak yürütülmüştür. Zamanla bu çalışmalar, sivil ve ticari kullanımlara yönelmiş ve enerji üretimi alanında önemli adımlar atılmıştır. Atomun parçalanmasıyla ortaya çıkan ısıdan yararlanarak

elektrik üretmeye yönelik sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, yani nükleer enerji santralleri, enerjinin güvenli, kontrollü ve sürdürülebilir biçimde elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

1970’li yılların başında yaşanan petrol krizi, nükleer santral yatırımlarının hız kazanmasına neden olmuştur. Fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan ülkeler, bu enerji kaynaklarına olan bağımlılıklarını azaltmak ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla nükleer enerjiye yönelmişlerdir. Nükleer santraller, hava koşullarından etkilenmeden kesintisiz olarak, 7 gün 24 saat güvenli bir şekilde elektrik üretebilmektedir. Elektrik üretim maliyetinde, nükleer yakıtın payı oldukça düşüktür. Bu nedenle yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, nükleer santrallerde üretilen elektriğin maliyetini önemli ölçüde etkilememektedir. Ayrıca, nükleer yakıtın temel hammaddesi olan uranyumun dünyanın çeşitli bölgelerinde bulunması, tedarik açısından da avantaj sağlamaktadır.

2023 yılı Temmuz ayı itibarıyla, dünya genelinde 31 ülkede toplam 410 nükleer reaktör faaliyetteyken, 17 ülkede 57 nükleer reaktör inşa aşamasındadır. Nükleer santrallerin ürettiği elektrik, dünya elektrik ihtiyacının yaklaşık %10’unu karşılamaktadır. Ülke bazında incelendiğinde, Fransa elektrik ihtiyacının %63’ünü, Slovakya %59’unu, Macaristan %47’sini, Belçika %46’sını, Güney Kore %30’unu ve Amerika Birleşik Devletleri %18’ini nükleer enerjiden elde etmektedir. İnşası devam eden reaktörlerin 21’i Çin’de, 8’i Hindistan’da, 4’ü Türkiye’de yer almaktadır. Ayrıca, Rusya’da 3, Güney Kore’de 3, Birleşik Arap Emirlikleri, ABD ve Fransa’da ise birer nükleer reaktör inşa halindedir.

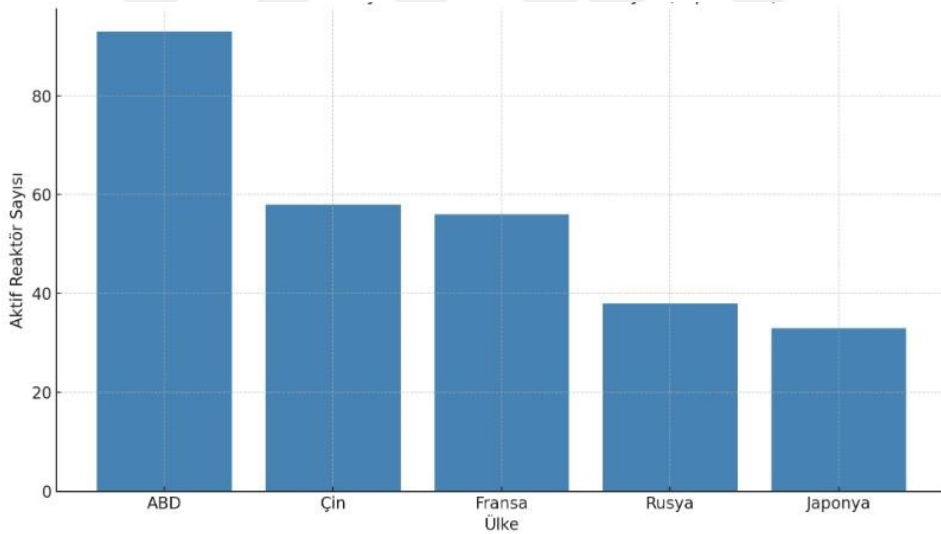
Türkiye ile Rusya arasında, Akkuyu sahasında bir nükleer güç santrali kurulmasına ve işletilmesine yönelik iş birliği anlaşması 12 Mayıs 2010 tarihinde imzalanmıştır. Bu anlaşma, Türkiye’nin yaklaşık 50 yıldır süregelen nükleer enerji hedefi açısından önemli bir dönüm noktasıdır. Anlaşmanın ardından, 13 Aralık 2010’da Proje Şirketi kurulmuş ve çalışmalara resmen başlanmıştır. 1 Aralık 2014 tarihinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’ndan ÇED Olumlu kararı, 15 Haziran 2017’de ise EPDK’dan elektrik üretim lisansı alınmıştır. 3 Mart 2017’de ilk ünitenin inşaat lisansı başvurusu yapılmış ve 19 Ekim 2017’de verilen sınırlı çalışma izniyle sahada nükleer güvenlik gerektirmeyen yapılar için inşaat faaliyetleri başlamıştır.

2 Nisan 2018’de ilk ünitenin inşaat lisansının alınmasıyla birlikte reaktör binasının yapımına geçilmiştir. İkinci ünite için de benzer süreçler yürütülmüş; 30

Kasım 2018’de sınırlı çalışma izni alınmış ve 26 Ağustos 2019 tarihinde inşaat lisansı verilmiştir. İkinci ünitenin temeli 8 Nisan 2020’de atılmıştır. Üçüncü ünite için inşaat lisansı başvurusu 28 Mart 2019’da, dördüncü ünite içinse 12 Mayıs 2020’de yapılmış; sırasıyla 13 Kasım 2020 ve 28 Ekim 2021 tarihlerinde lisanslar alınarak inşaatla başlanmıştır. Böylece dört ünitenin de inşa aşamasına geçilmiş ve Akkuyu Nükleer Güç Santrali sahası, dünyanın en büyük nükleer santral inşaatı konumuna ulaşmıştır.

Nükleer santralleri yalnızca elektrik üreten tesisler olarak görmek yetersiz olur. Yaklaşık 550 bin parçadan oluşan bu dev proje, sanayiye sağlayacağı ivme, diğer sektörlerle kuracağı bağlantılar ve yaratacağı istihdam fırsatlarıyla ülke ekonomisine büyük katma değer sunacaktır (<https://enerji.gov.tr>).

Nükleer enerji karbon emisyonu üretmeyen ve yüksek miktarda, sürekli elektrik sağlama kapasitesine sahip bir enerji kaynağıdır. 2023 yılı itibarıyla dünya genelinde 31 ülkede toplamda yaklaşık 410 aktif nükleer reaktör işletilmektedir. Bu reaktörler, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %9–10’unu karşılar.



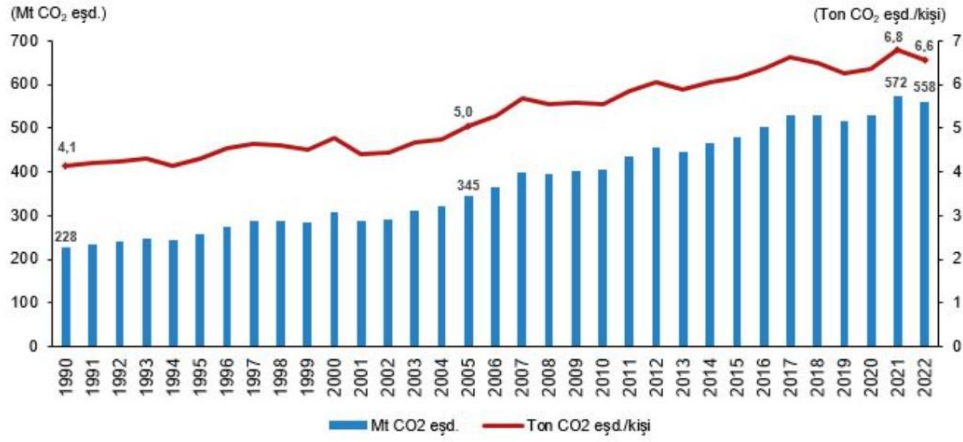
Şekil 1.35. Dünyada genelinde nükleer reaktöre sahip ülkeler (IEA, 2023)

2023 Yılı Aktif Nükleer Reaktör Sayısı ABD 93 reaktör, Çin 58 reaktör, Fransa 56 reaktör, Rusya 38 reaktör, Japonya 33 reaktöre sahiptir.

1.3 Karbon Emisyonu

Endüstride karbon gazı emisyonları, küresel ısınmanın en büyük kaynaklarından biridir. Ancak doğru stratejilerle, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı ve sürdürülebilir üretim yöntemleriyle bu emisyonlar önemli ölçüde azaltılabilir. Hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir sanayi yapısına geçmek, gelecek nesiller için büyük bir sorumluluktur.

Karbon gazı sonuçlarına göre, 2022 yılı toplam karbon gazı emisyonu bir önceki yıla göre %2,4 azalarak 558,3 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplandı. Kişi başı toplam karbon gazı emisyonu 1990 yılında 4,1 ton CO₂ eşd., 2021 yılında 6,8 ton CO₂ eşd. ve 2022 yılında 6,6 ton CO₂ eşd. olarak hesaplandı.



Şekil 1.36. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2022

Toplam sera gazı emisyonlarında 2022 yılında CO₂ eşd. olarak en büyük payı %71,8 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken bunu sırasıyla %12,8 ile tarım, %12,5 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %2,9 ile atık sektörü takip etti.

Enerji sektörü emisyonları 2022 yılında, 1990 yılına göre %179,8 artmakla beraber bir önceki yıla göre %1,4 azalarak 400,6 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplandı. Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı emisyonları 1990 yılına göre %208,1 artmakla beraber bir önceki yıla göre %6,4 azalarak 69,9 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplandı.

Tarım sektörü emisyonları 2022 yılında, 1990 yılına göre %37,9 artmakla beraber bir önceki yıla göre %5,1 azalarak 71,5 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplandı.

Atık sektörü emisyonları ise 1990 yılına göre %57,7 ve bir önceki yıla göre de %5,5 artarak 16,3 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplandı.

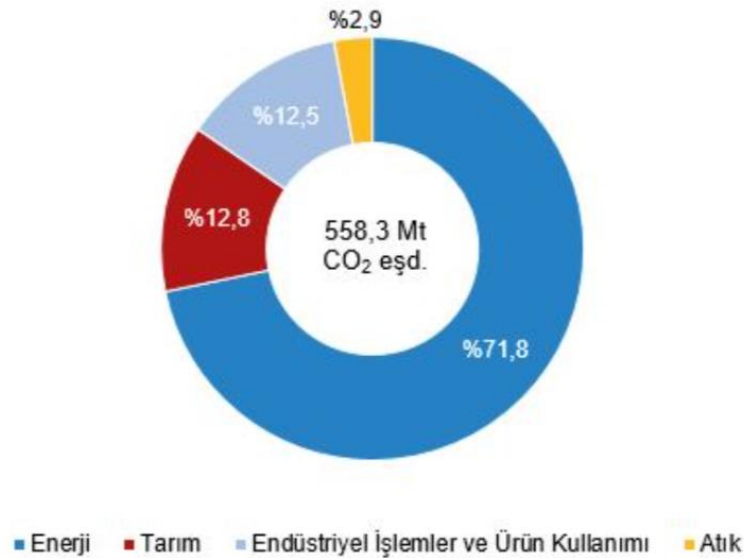
Tablo 1.6. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2022

(Milyon ton CO ₂ eşd.)											
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	1990-2022 değişim (%)	2021-2022 değişim (%)
Toplam emisyon	228,0	256,5	306,4	344,8	405,3	480,1	530,2	572,0	558,3	144,9	-2,4
Enerji	143,1	170,0	219,8	247,7	290,9	344,0	369,5	406,5	400,6	179,8	-1,4
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	22,7	25,4	26,1	34,0	48,6	59,2	67,2	74,7	69,9	208,1	-6,4
Tarım	51,8	49,0	46,0	46,3	47,7	59,2	76,4	75,4	71,5	37,9	-5,1
Atık	10,3	12,1	14,5	16,9	18,1	17,7	17,0	15,4	16,3	57,7	5,5

Tablodaki rakamlar, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.

Toplam CO₂ emisyonlarının 2022 yılında %32,6'sı elektrik ve ısı üretiminden olmak üzere %86,6'sı enerji sektöründen, %13,1'i endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektöründen, %0,3'ü ise tarım ve atık sektörlerinden kaynaklanmıştır.

CH₄ emisyonlarının %60,5'i tarım, %19,9'u enerji, %19,6'sı atık ve %0,02'si endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektöründen; N₂O emisyonlarının ise %77,9'u tarım, %11,2'si enerji, %6,2'si atık ve %4,6'sı da endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektöründen kaynaklanmıştır.



Şekil 1.37. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2022 (Tüik, 2024)

Türkiye’de her kWh elektrik için 426 gCO₂ salınıyor, bu da G20 ortalaması olan 445 gCO₂’den biraz daha azdır. Ülkemizde genel emisyon yoğunluğu 2016-2021 yılları arasında %10,6 oranında azalmıştır. Bunun başlıca nedeni yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının ülkemizde yıllık bazda çok fazla artış olmuştur (Climate Transparency, 2022).

1.4 Literatür Araştırması

Düzgün (2014) çalışmasında Türkiye’de enerji verimliliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda beyaz sertifikalar sisteminin Türkiye’deki uygulanabilirliği araştırılmıştır. 20 yy. sonlarında yaşanan petrol krizleri ile enerji kaynaklarında dışa olan bağımlılığın oluşturduğu durumlar ortaya konularak enerji kaynaklarının önemi ele alınmıştır. Piyasa tabanlı enerji verimliliği politikalarından biri olan Beyaz Sertifikalar (Enerji verimliliği yükümlülükleri) Sisteminin, AB ülkeleri ve Amerika’daki bazı eyaletlerde uygulanması incelenmiştir. Bu sistemin önemli oranlarda enerji tasarrufu sağladığı belirtilmiştir. Çalışmada yine karşılaştırmalı olarak Türkiye’nin enerji verimliliği politikası değerlendirilmiş ve veri zarflama analizi (VZA) teorisi kullanılarak model oluşturulmuştur. Piyasa önündeki engellerde dikkate alınarak Türkiye’de uygulanabilirliğini tartışılmıştır.

Engin (2018) çalışmasında Türkiye’de enerji yönetim sistemi uygulamalarının sanayi alanındaki enerji verimliliği projeleri açısından etkinlikleri değerlendirilmiştir. Enerji yönetim sisteminin enerji verimliliğinin sürdürülebilir hale gelmesi için sistemde iyileştirmeyi hedef alan dinamik bir yönetim anlayışı olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada etkinlikler değerlendirilirken veri zarflama analizi, yöntem olarak tercih edilmiştir. Sanayi kuruluşları için elde edilen etkinlik skorları, yıllık enerji tüketimi, ISO 500001 belgesi sahipliği, KOBİ statüsü gibi kriterlere göre yorumlama yapılmıştır. Çalışmada elde edilen analizlere göre enerji yönetim sistemi, sayesinde sanayi kuruluşlarına enerji ve enerji dışı konularda birçok fayda sağladığı, mikro düzeyde özgün bir örnek sunulduğu ifade edilmiştir.

Doğan ve Yılankıran (2015) çalışmasında Türkiye’nin enerji tüketimindeki artan oran dikkate alındığında enerji verimliliğinin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Türkiye enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Tüketimi karşılayabilmek için ise verimlilik ilkesine bağlı olarak enerji kullanımı önemlidir. Uzun vadeli sürdürülebilir ekonomik büyümeleri elde edebilmek için enerji verimliliğini sağlamak bir gerekliliktir.

Doğan ve Yılankıran (2015) çalışmasında Türkiye’de sanayi sektöründe enerji tasarrufuna yönelik potansiyelin, en az %20 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu potansiyelin yaklaşık olarak %50’si küçük yatırımlarla gerçekleştirilebilecek durumdadır. Organize sanayi bölgelerinde (bünyesinde 50’den fazla işletme bulunduran) mevzuatlara göre enerji yönetimini uygulamak zorundadırlar. Enerji

yönetiminin iyi organize edilmesi durumunda ise hiç yatırım yapmadan %10'luk enerji tasarrufu sağlamak mümkün olabilmektedir.

Akdağlı (2017) yılında yaptığı araştırmada Gelişmiş ve gelişmekte olan Avrupa ülkeleri sektörel enerji verimliliğini saptayarak, enerji verimliliği ile büyüme arasındaki ilişkiyi ortaya koymaya çalışmıştır. Son yıllarda büyüme konusunda enerji verimliliğinin önemine dikkat çekilen çalışmada panel veri analizi yöntemi ile inceleme yapılmıştır. Enerji verimliliğinin iktisadi büyümeyi olumlu yönde etkilediği ve sanayi ya da tarım sektörüne göre hizmet sektöründe bir üstünlük sağladığı belirtilmiştir.

Meşin (2020) çalışmasında firmalar bazında enerji verimliliğine verilen önem ve eğilimleri incelemiştir. Sanayi üretim firmaları ve hizmet sektörü kuruluşlarının incelendiği çalışmada anketler kullanılmış ve kesitsel analiz yönteminden yararlanılmıştır. Sonuç olarak enerji verimliliği konusunda devlet politikalarının 30 yıldır yoğun bir şekilde gündemde olduğu ancak eğilimin az olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedenleri incelendiğinde ise maliyetlere ilişkin farkındalığın az olması ana etken olarak gösterilmiştir. Devlet teşvik mekanizmalarının gelişmiş olmasına rağmen firmaların etüt maliyetlerini engel olarak gördüğü ve konuya milli perspektiften bakmadıkları ifade edilmiştir. Tüketilen enerjinin %90 üzerinde bir oranla ithalat yoluyla sağlanması da milli bir mesele olarak değerlendirilmiştir.

Kaya (2012) çalışmasında sanayide enerji verimliliği potansiyeli ve basınçlı hava sistemlerinde verimlilik konusunu ele almıştır. Enerji ihtiyaçlarının artması ile birlikte artan maliyet ile alternatif enerji kaynağı arayışlarına dikkat çekilen çalışmada Türkiye'de ve dünyada yapılan sanayi alanındaki verimlilik çalışmalarının dağılımları belirlenmiştir. Ayrıca basınçlı hava sistemlerinde yapılan iyileştirme çalışmalarının enerji verimliliğine etkisini incelemiştir. Basınçlı hava sistemlerinde yapılan çalışmaların oranının dünyadaki değerlerden az olduğu tespit edilmiştir. İşletmeye bağlı olmak kaydıyla ise enerjinin %30 seviyesinde kaçaklar, bakım kalitesizliği ve yanlış uygulamalar yüzünden israf edildiği ifade edilmiştir. Çalışmada basınçlı hava sistemlerinde yapılabilecek enerji tasarrufu imkanları ise üç farklı tesis üzerinden incelenmiştir. 10 gün boyunca hava analizi yapılmış ve enerji tüketim değerleri çıkarılmıştır. Alternatif kompresör sistemleri kullanılması durumunda oluşacak tasarruf miktarları bulunmuştur. Sonuç olarak yapılan

iyileştirme çalışmaları sayesinde yıllık elektrik enerjisi tüketiminde %3 oranında enerji verimliliği elde edilmiştir.

Şahin (2022) çalışmasında Basınçlı hava kompresörlerinde enerji verimliliği uygulamalarını incelemiştir. 22 farklı işletmede tarama yapılmış ve hava kaçak noktaları saptanmıştır. Bu kayıp TL olarak hesaplanmış aynı zamanda CO2 emisyon miktarı da tespit edilmiştir. Çalışmada enerji ölçümleri ve simülasyon çalışmaları sonucunda enerji potansiyeli olduğu saptanmıştır. Aynı şekilde ne kadar bir karbon salınımının önüne geçileceği tespit edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda ise %18'lik bir oranda enerji tasarruf potansiyeli tespit edilmiş ve ekipmanlarda iyileştirme için aksiyon planlarının önemine dikkat çekilmiştir.

Tekkol (2019) çalışmasında Türkiye'de il bazında enerji tüketiminde ekonomik büyüme üzerinde olan etkiye odaklanmıştır. 2008-2014 döneminde Yumuşak Geçişli Panel Regresyon modelinin kullanıldığı çalışmada enerji verimliliği eşik düzeyinin %6,519 olduğu tespit edilmiştir. Bu eşik seviyesinin üzerinde eşik seviyesinin enerji tüketimini olumlu etkileyeceği dile getirilmiştir. Enerji tüketiminde yaşanan artışın ekonomik büyümeyi olumlu etkileyebilmesi amacıyla politika yapıcılara öneriler getirilmiş ve büyüme modelleri üzerinde durmuştur.

Kıyılmaz (2019) çalışmasında kuruluşların enerji verimliliğini artırma amacıyla dünya genelinde uygulanan ISO 50001 EnYS standardını ele almıştır. Ülkemizde de son yıllarda enerji verimliliği teşvik paketlerinde bu standardın uygulanmasının istendiğine dikkat çekilmiştir. Bu teşvik paketleri ile hedeflenen enerji verimliliğine ulaşabilmek için sektörel bazda yapılacak çalışmaların önemine dikkat çekilmiştir. Bu amaçla bir üretim tesisinde örnek çalışma yapılmıştır. Mevcut durum tespit edilmiş ve tüketimler incelenerek verimlilik artırıcı proje önerileri sunulmuştur. Tesise yapılacak basit müdahale ile yıllık 929,555 kWh enerji ile 371,822 TL ekonomik değer elde edilebileceği tespit edilmiştir. Uzun vadede ise yılda 1,471,993 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir.

Kalaycı (2021) çalışmasında tekstil sanayisinde boya atık suyundan ısı geri kazanımı üzerine gerçekleştirdiği çalışmasında enerji verimliliğinin önemine dikkat çekmiştir. Kaynakların etkin ve verimli kullanımının öne çıkarıldığı çalışmada enerjinin ana maliyet unsuru olduğu vurgulanmaktadır. Hem enerji tüketimi hem de kirlilik açısından enerji verimliliğinin tekstil sanayiinin öncelikli konusu olduğu belirtilmektedir. Çalışmada atık sudan ısı geri kazanımı ile sağlanan enerji tasarrufu

hesaplanmıştır. Ayrıca kurulum maliyetleri ve karşılama süreleri de dikkate alınmıştır. Tüm bunlar sonunda elde edilen sonuçlar önerilerle birlikte sunulmuştur.

Aydoğduoğlu (2021) çalışmasında enerji tüketimi içerisinde yüksek bir paya sahip olan aydınlatma konusunu ele almıştır. Araştırmada akıllı aydınlatma sistemleri ile elde edilebilecek verimliliğe dikkat çekilmiştir. Işık kaynakları kullanıcılar tarafından elle kontrol edilen bir kamu binasında akıllı aydınlatma sistemi uygulaması yapılması durumunda sağlanabilen enerji verimliliği incelenmiştir. Ayrıca sağlanan aydınlık düzeyi LabVIEW programı ile hazırlanan akıllı aydınlatma sistemi yazılımı ile takip edilmiştir, karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre ise ışık kaynakları zaman, varlık ve gün ışığına göre otomatik olarak kontrol edildiğinde mevcut durumda sağlanan aydınlık düzeyi için %69, aydınlatma standartlarına göre ise %85 daha az enerji tüketilerek aydınlatma yapılabileceği tespit edilmiştir.

Tosun (2018) çalışmasına kamu binaları için enerji verimliliğini artırıcı yöntemler üzerinde gerçekleştirmiştir. Çalışmada kamu kurumlarını ilgilendiren enerji mevzuatına dikkat çekilerek pratik bir enerji etüt formu oluşturulmuştur. Enerji yönetim sistemi kurulabilmesi için ise verimlilik artırıcı projelere yönelik örnek şablonlar sunulmuştur. Bir vaka çalışması gerçekleştirilmiş ve örnek uygulamada enerji giderlerinde %78'lik bir enerji tasarrufu sağlanabileceği kanıtlanmıştır.

Taşkınoğlu (2011) çalışmasında termik santraller üzerinden enerji verimliliği konusunu ele almıştır. Termik santrallerde de üretim süreci için gerekli elektrik enerjisinin maliyeti etkileyen bir faktör olduğu, yapılacak tasarruf çalışmalarının maliyeti düşüreceği ifade edilmiş ve uygulanabilecek yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca elektrik enerjisi verimliliğine yönelik enerji tasarrufları doğrultusunda kWh başına birim enerji üretim maliyeti de hesaplanmıştır.

Kavak (2018) çalışmasında tekstil fabrikalarında enerji kayıplarının belirlenmesine yönelik olarak kızgın yağlı merkezi kazandan, atık enerji geri kazanımına ilişkin bir uygulama yapmıştır. Tekstil sektöründe gerçekleştirilen bu araştırmada Türkiye'nin üretim sektöründe Avrupa birincisi dünyada ise üçüncü olmasına dikkat çekilerek enerji kayıplarının azaltılmasının önemi vurgulanmıştır. Bir tekstil terbiye fabrikasında kızgın yağ kazanından enerji geri kazanımı için bir tasarım yapılmış ve gövde borulu ısı değiştiricisi oluşturulmuştur. Tasarlanan

değiştiriciye yönelik hesaplamalar ve çizimler yapılmıştır. Sistem uygulandığında ise %76 oranında enerji gere kazanımının sağlandığı tespit edilmiştir.

Yücel (2019) çalışmasında aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliği konusunu ele almıştır. Elektrik enerjisine olan talepteki artışın yeni enerji kaynaklarını ve enerji verimliliğini zorunlu kıldığı ifade edilmiştir. Yüksek verimlilik gösteren aydınlatma ürünlerinin yüksek enerji tasarrufu da sağladığı ancak bu ürünlerin kullanımında kurulum maliyetlerinin de yüksek olduğu belirtilmiştir. Araştırmada yüksek maliyet isteyen bu sistemlere alternatif olabilecek bir tasarım önerilmiştir. Bu yeni tasarımda daha düşük maliyetli ve basit bir yapıya sahip kontrol sistemi oluşturulmuştur. Tasarlanan sistemin ise deneysel performans verileri elde edilmiştir. Sonuç olarak ise %59 oranında enerji verimliliği sağlanabildiği ifade edilmiştir.

Eser (2013) çalışmasında aydınlatma sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiş bir çalışmada doğal ve yapay aydınlatma sistemlerinin karmaşık bir şekilde kullanılabileceğinin ifade edildiği çalışmada aydınlatmaya etki eden faktörlere (ortamın mimari yapısı, yerleşim düzeni, yerleşim rengi, bakım faktörü vb.) dikkat çekilmiştir. Araştırmada aydınlatmaya etki eden bu faktörler ayrıntılı ele alınmış ve bu faktörlerin aydınlatmaya olan etkisi bilgisayar ortamında simülasyon ile test edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Erbil (2022) çalışmasında doğru aydınlatmanın hem güvenlik sağladığı hem de estetik gereksinimleri karşıladığı böylelikle yaşam kalitesini artırdığı ifade edilmiştir. Işık kirliliğinin nasıl gerçekleştiği açıklanmış ve insan hayatını nasıl olumsuz etkilediğine yer verilmiştir. Bu nedenlerden yola çıkarak ise Kelebekler Vadisi Parkı'nın aydınlatmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında Relux yazılımı ile iki harita oluşturulmuş ve mevcut aydınlatma ile olması gereken standartlara yönelik aydınlatmanın olduğu iki tasarım karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar doğrultusunda da meslek gruplarına öneriler getirilmiştir.

Küçükyağlıoğlu (2020) çalışmasında basınçlı hava sisteminde enerji tasarrufunu otomotiv yan sanayi üzerinde gerçekleştirmiştir. Enerji tasarrufu ve enerji verimliliğinin artırılmasının hedeflendiği araştırma Konya ilinde gerçekleştirilmiştir. Konya'da karayolu taşıtları için süspansiyon ve direksiyon sistemi bileşenleri üretimi yapan bir tesiste basınçlı hava sistemi üzerinde ölçümler yapılmıştır. Sistemdeki mevcut enerji kayıpları tespit edilmiş, önlemler sıralanmış,

enerji kayıplarının oluşturduğu ekonomik değer hesaplanmış ve belirlenen tasarruf önlemlerinin uygulanması halinde elde edilebilecek artı parasal değer de tespit edilmiştir. Önerilen tedbirlerin uygulanması halinde tesisin yılda enerji tüketiminde %10,8 tasarruf gerçekleştirebileceği belirtilmiştir.

Terzi (2020) çalışmasında am işletme fabrikasında enerji verimliliği konusunu incelemiş ve ürün kalitesini etkilemeden enerji maliyetini azaltmak için çalışma yapılmış, yalıtım kaynaklı ısı kayıpları termal kamera ile tespit edilmiştir. Fırının çalışma kapasitesini artırmak için de ilave besleme hattı kurulmuş ve tüm yatırımların maliyeti hesaplanmıştır. Fırın çıkışında ise camın hızlı soğuması için gerekli olan basınçlı hava miktarı da azaltılmış ve yıllık tasarruf hesaplanmıştır. Hesaplamaların TL olarak yapıldığı bu araştırmada 2020 yılı itibarı ile %8, 33 tasarruf gerçekleşeceği belirtilmiştir.

Güneş (2024) çalışmasında kurumların kendi enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmesi için muhtemel güneş enerji santralleri hakkında bir öngörü oluşturmayı hedeflemiştir. Türkiye'nin farklı bölgelerini temsilen üniversiteler seçilmiş, toplamda 5 üniversitenin yerleşkesi üzerinde kurulum senaryoları yapılmıştır. Üniversitelerin olduğu illerin büyükşehir belediyelerinin imar yönetmeliklerinden yararlanılmış, e kurulan güneş enerji santrali sistemlerinin analizleri için PVGIS çevrim içi veri tabanı ve hesaplama sistemi kullanılmıştır.

Coşkun (2023) çalışmasında tekstil sektöründe karbon ayak izini hesaplamıştır. Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde tekstil alanında faaliyetler yapan bir firmanın karbon ayak izi hesaplanarak çalışma gerçekleştirilmiştir. 2019 yılı verilerinin baz alındığı çalışmada doğrudan sera gazı emisyonları, satın alınan enerji dolaylı sera gazı emisyonları, nakliye ve ulaşım dolaylı sera gazı emisyonları, ham madde ve malzeme kullanımı dolaylı sera gazı emisyonları, ürünlerin yaşam sonu dolaylı sera gazı emisyonları ve diğer dolaylı sera gazı emisyonları üzerine hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonunda elde edilen verilere göre ise yıl sonu için toplam emisyon miktarı 44.719,73-ton CO₂e olarak hesaplanmıştır. Bilimsel Tabanlı Hedefler Örgütü'nün mutlak azalım metodolojisine uygun bir emisyon azalım hedefi belirlenmiş ve %42'lik bir oranda azalım gerçekleştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Kuramsal Temeller

2.1.1 Basınçlı Hava Sistemleri ve Hava Tabancalarının Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

Basınçlı hava sistemlerinde enerji tasarrufu çalışmaları yapılırken makinelerin günlük 24 h ve yıllık 350 gün çalıştığı kabul edilmiştir. Yıllık enerji tasarrufu miktarı hesaplamalarında m^3 başına hava maliyeti 0,015 € alınmıştır.

Basınçlı hava sistemlerinde kullanılan kompresörlerin 1 m^3/dk hava debisi için harcamış olduğu enerji denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$E = W/K \quad (2.1)$$

Burada, E ($kWh/(m^3/dk)$) kompresörün 1 m^3/dk hava debisi için harcanan enerjiyi, W (kWh) kompresör gücünü ve K (m^3/dk) kompresörün ürettiği hava debisini ifade etmektedir.

Basınçlı hava sistemleri ve hava tabancalarındaki yıllık hava kaçak debisi denklem 2.2 ile hesaplanır.

$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yillik} \quad (2.2)$$

Burada, $Q_{ykaçak}$ ($m^3/yıl$) yıllık kaçak debisini, $Q_{dkkaçak}$ (m^3/dk) dakikadaki kaçak miktarını ve h_{yillik} (h) kompresörün yıllık çalışma saatini ifade etmektedir.

İşletmedeki hava kaçaklarının, giderilmesi ile beslendiği kompresör dairesine göre yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanır.

$$W_{kzyillik} = Q_{ykaçak} \times E \quad (2.3)$$

Burada, $W_{kzyillik}$ (kWh) yıllık enerji kazancını, $Q_{ykaçak}$ ($m^3/yıl$) yıllık kaçak debisini ve E ($kWh/(m^3/dk)$) kompresörün 1 m^3/dk hava debisi için harcanan enerjiyi ifade etmektedir.

Basınçlı hava sistemleri ve hava tabancalarındaki hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanır.

$$M_{kzyillik,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{maliyeti} \quad (2.4)$$

Burada, $M_{kzyıllık,€}$ (€) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarını $Q_{ykaçak}$ ($m^3/yıl$) yıllık kaçak debisini ve $h_{v_{malıyeti}}$ (€/m³) m³ başına hava maliyetini ifade etmektedir.

2.1.2 Kompresör Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

Basınçlı hava üretimi sırasında kompresörlerde kullanılan elektrik enerjisinin yaklaşık %94'ü ısı enerjisine dönüşmektedir. Kullanılan bu değer kompresör imalatçısı firmanın verileri dikkate alınarak kullanılmıştır. Kompresör gücünün %94 ü ısı enerjisine dönüştükten sonra geri kazanımı uygun bir ısı değiştirici kullanılarak yaklaşık %80 i de geri kazanılmaktadır.

Kompresörlerin soğutma sisteminde bulunan sıcak yağın bir ısı eşanjöründen geçirilerek başka bir akışkana aktarılması ya da oluşan sıcak havanın doğrudan menfezler aracılığıyla bir ortama yönlendirilmesiyle enerji geri kazanımı sağlanabilir. Farklı yöntemler kullanılarak kompresör yağı, soğutma suyu veya sıcak havadan elde edilen ısı; ortam ısıtması, kazan yanma havasının ısıtılması, besleme suyunun ön ısıtılması, proses ısıtma, kullanım suyu ısıtması ve diğer uygulamalar için değerlendirilebilir.

Kompresörlerin çalışması ile saatteki atık ısı gücü denklem 2.5 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{atık} = \dot{W} \times IE_{yüzdesi} \quad (2.5)$$

Burada, $\dot{Q}_{atık}$ (kWh) saatteki atık ısı gücü, $\dot{W}$ (kWh) kompresör gücü, $IE_{yüzdesi}$ (%) ısı enerji yüzdesini ifade etmektedir. $IE_{yüzdesi} = 0,94$ alınmıştır.

Kompresörden elde edilen atık ısı gücünden saatte geri kazanılan atık ısı gücü ve yıllık geri kazanılan atık ısı gücü denklem 2.6 ve 2.7 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{gkatık} = \dot{Q}_{atık} \times gk_{yüzdesi} \quad (2.6)$$

Burada, $\dot{Q}_{gkatık}$ (kWh) saatteki geri kazanılan atık ısı gücü, $\dot{Q}_{atık}$ (kWh) saatteki atık ısı gücü ve $gk_{yüzdesi}$ (%) atık ısı geri kazanım yüzdesini ifade etmektedir. $gk_{yüzdesi} = 0,8$ alınmıştır.

$$\dot{Q}_{ygkatık} = \dot{Q}_{gkatık} \times h_{haftalık} \times h_{f_{yıllık}} \quad (2.7)$$

Burada, $\dot{Q}_{ygkatık}$ (kWh/yıl) yıllık geri kazanılan atık ısı gücü, $\dot{Q}_{gkatık}$ (kWh) saatteki geri kazanılan atık ısı gücü, $h_{haftalık}$ (h) haftalık çalışma

saatini ve hf_{yillik} yıllık çalışma hafta sayısını ifade etmektedir. $h_{haftalik} = 144 h$ ve $hf_{yillik} = 52$ alınmıştır.

Kompresör atık ısı geri kazanımından elde edilen enerjinin suya aktarılarak, ısıtılacak sıcak su miktarı denklem 2.8 ile hesaplanır. (Ediz, S. B. 2023)

$$\dot{Q}_{ygkatik} = \dot{m} \times c \times \Delta T \quad (2.8)$$

Burada, $\dot{Q}_{ygkatik}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan atık ısı gücü, $\dot{m}$ (kg/h) saatteki ısıtılacak su miktarı, c ($kJ/kg\ ^\circ C$) suyun özgül ısı ve ΔT ($^\circ C$) sıcaklık farkını ifade etmektedir.

Kompresör atık ısının geri kazanımından elde edilen enerjinin değerlendirilerek suya aktarılarak sıcak su elde etmek için kullanıldığında ve bunun sonucunda doğalgaz tüketiminden tasarruf denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$D_{gazyillik} = \dot{Q}_{ygkatik} / (D_{gazaltisildeger} \times \eta_{verim}) \quad (2.9)$$

Burada, $D_{gazyillik}$ (m^3) yıllık tasarruf edilen doğalgaz miktarı, $\dot{Q}_{ygkatik}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan atık ısı gücü $D_{gazaltisildeger}$ ($kcal/h$) doğalgaz alt ısı değeri ve η_{verim} doğalgaz yakma verimini ifade etmektedir. $1 kW = 860 kcal/h$, $\eta_{verim} = 0,90$, $D_{gazaltisildeger} = 8250 kcal/m^3$ olarak alınmıştır.

Kompresör atık ısının geri kazanılması ile işletme alanının ısıtılması, işletmenin bulunduğu bölgedeki iklim şartlarına göre $1 m^2$, alanın ısıtılması için ihtiyaç duyulan enerji $100 - 120 W/m^2$ 'dir. Ortalama $100 W/m^2$ olarak alınmış ve kompresör atık ısının, alan ısıtmasında kullanılarak ne kadar alan ısıtmasında kullanılacağı denklem 2.10 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{ygkatik} = A \times 100 \quad (2.10)$$

Burada, $\dot{Q}_{ygkatik}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan atık ısı gücü ve A (m^2) ısıtılacak alan miktarını ifade etmektedir ve $1 m^2$ alan ısın gerekli olan enerji miktarı $100 W/m^2$ olarak alınmıştır.

2.1.3 Kompresör Emiş Havası İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

Kompresörlerin verimli ve güvenli çalışabilmesi için emiş havasının mümkün olduğunca soğuk ve temiz olması tercih edilir. Soğuk hava, daha yoğun olduğundan kompresörün daha fazla hava çekmesini ve böylece daha yüksek verimle çalışmasını sağlar. Yaz aylarında ortam sıcaklığı arttığı için kompresör odalarının iyi havalandırılması önemlidir; aksi halde yüksek sıcaklık, çıkış havası sıcaklığını ve yağ sıcaklığını artırarak sistem performansını olumsuz etkileyebilir. Kış aylarında ise dış hava genellikle daha soğuk olduğu için verim avantajı sağlanabilir, ancak çok düşük sıcaklıklarda yoğuşma ve donma riski göz önünde bulundurulmalı, emiş havası sıcaklığı +5 °C'nin altına düşmeyecek şekilde kontrol edilmelidir. Bu nedenle, yıl boyunca optimum çalışma için kompresörün emiş havasının sıcaklığı dikkatle izlenmelidir. Kompresörlerin emdiği havanın sıcaklığı her 5°C düştüğünde, enerji verimliliğinde yaklaşık %2 artış sağlanır (Güleç, M.,1999).

Ancak, hava sıcaklığı yalnızca 20 °C'ye kadar düşürülebilir ve bu değer referans kabul edilir. Bu seviyenin altına inildiğinde, kompresörün emdiği hava motora aşırı yük bindirerek cihazda hasara yol açabilir. Bu nedenle, kompresöre giren havanın sıcaklığı, üretici firmalar tarafından belirlenen minimum değerin altına düşmeyecek şekilde kontrol edilmelidir (Atlas Copco, 2018).

Kompresör emiş havası sıcaklığına bağlı olarak kompresördeki güç düşüm oranı denklem 2.11 ile hesaplanır (Kaya, D., 2014).

$$GDO = 1 - \frac{T_d + 273}{T_c + 273} \quad (2.11)$$

Burada, GDO (%) sıcaklığa bağlı güç düşüm oranı, T_d (°C) dış ortam sıcaklığı ve , T_c (°C) emiş havası sıcaklığını ifade etmektedir.

Kompresör emiş havasının iyileştirilmesi sonucunda, güç düşüm oranına bağlı saatteki geri kazanılan güç denklem 2.12 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_{kzsaatlik} = \dot{W} \times GDO \times \eta_{motor} \quad (2.12)$$

Burada, $\dot{W}_{kzsaatlik}$ (kWh) saatteki geri kazanılan güç, $\dot{W}$ (kWh) kompresör gücü, η_{motor} motor verimi ve GDO (%) sıcaklığa bağlı güç düşüm oranını ifade etmektedir. $\eta_{motor} = 0,75$ alınmıştır.

Güç düşüm oranına bağlı yıllık geri kazanılan güç denklem 2.13 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_{kzyillik} = \dot{W}_{kzsaatlik} \times h_{haftalik} \times hf_{yaz} \quad (2.13)$$

Burada, $\dot{W}_{kzyillik}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan güç, $\dot{W}_{kzsaatlik}$ (kWh) saatteki geri kazanılan güç, $h_{haftalik}$ (h) haftalık çalışma saati ve hf_{yaz} yaz dönemi çalışılan hafta sayısını ifade etmektedir. $h_{haftalik} = 144 h$ ve $hf_{yaz} = 20$ alınmıştır.

Kompresör emiş havasının sıcaklığına bağlı olarak, emiş havasının iyileştirilmesi sonucunda işletmenin yıllık kazanç miktarı denklem 2.14 ile hesaplanır.

$$M_{kzyillik,€} = \dot{W}_{kzyillik} \times E_{maliyeti} \quad (2.14)$$

Burada, $M_{kzyillik,€}$ (€) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı, $\dot{W}_{kzyillik}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan güç ve $E_{maliyeti}$ (€/kWh) elektrik maliyetini ifade etmektedir. $E_{maliyeti} = 0,15 €/kWh$ olarak alınmıştır.

2.1.4 Kompresör Çalışma Basıncının Düşürülmesi İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

Kompresörün çalışma basıncını düşürmek, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Basınç arttıkça kompresörün ihtiyaç duyduğu güç katlanarak artar. Çalışma basıncındaki küçük bir düşüş bile enerji tasarrufu sağlayabilir. Basınç her 1 bar düşürüldüğünde, enerji tüketimi yaklaşık %8 azalabilir (Atlas Copco, 2025).

Atmosfer basıncındaki şartlarda P_{atm} , kompresörden çıkışta ayarlanan basınç değerinin daha yüksek bir seviyeden P_h , daha düşük bir seviyeye P_i düşürülmesi ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabilir. Çünkü sıkıştırma işlemi sırasında basınç farkı azaldıkça, kompresörün yaptığı iş (enerji tüketimi) azalır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Kompresörün çalışma basıncının düşürülmesi ile işletmenin kazanmış olduğu enerji miktarı tasarruf yüzdesi denklem 2.15 ile hesaplanır.

$$TY = \frac{\left[\left(\frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{0,286} - \left(\frac{P_i}{P_{atm}} \right)^{0,286} \right]}{\left[\left(\frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{0,286} - 1 \right]} \quad (2.15)$$

Burada, TY (%) kompresörün çalışma basıncının düşürülmesi ile kazanılan tasarruf yüzdesi, P_h (bar) kompresör yüksek çalışma basıncı, P_i (bar) kompresör düşük çalışma basıncı ve P_{atm} (bar) atmosfer basıncını ifade etmektedir.

Kompresör çalışma basıncın düşürülmesi ile yıllık kazanılan enerji miktarı denklem 2.16 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_{kzyıllık} = \dot{W} \times h_{haftalık} \times hf_{yıllık} \times TY (\%) \times \eta_{motor} \quad (2.16)$$

Burada, $\dot{W}_{kzyıllık}$ ($kWh/yıl$) kompresör basınç düşümü ile iletmenin yıllık geri kazanılan güç, $\dot{W}$ (kWh) kompresör gücü, $h_{haftalık}$ (h) haftalık çalışma saati, $hf_{yıllık}$ yıllık çalışma hafta sayısı, η_{motor} motor verimi ve TY (%) kompresörün basınç düşümü ile kompresörden geri kazanılacak tasarruf yüzdesini ifade etmektedir. $hf_{yıllık} = 52$ ve $h_{haftalık} = 144 h$ alınmıştır.

Kompresör basınç düşürülmesine bağlı tasarruf yüzdesinin işletmeye kazandırdığı yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.17 ile hesaplanır.

$$M_{kzyıllık,€} = \dot{W}_{kzyıllık} \times E_{maliyeti} \quad (2.17)$$

Burada, $M_{kzyıllık,€}$ (€) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı, $\dot{W}_{kzyıllık}$ ($kWh/yıl$) yıllık geri kazanılan güç ve $E_{maliyeti}$ (€/kWh) elektrik maliyetini ifade etmektedir. $\eta_{motor} = 0,75$, $E_{maliyeti} = 0,15$ €/kWh alınmıştır.

2.1.5 Aydınlatma İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

LED aydınlatma, geleneksel aydınlatma yöntemlerine göre bir dizi avantaja sahiptir ve fabrikalarda enerji tasarrufu sağlamak için sıkça tercih edilmektedir. LED aydınlatmanın günlük enerji tüketimi denklem 2.18 ile hesaplanır.

$$W_{günlük} = h_{günlük} \times L_{adet} \times L_{tüketimi} \quad (2.18)$$

Burada, $W_{günlük}$ (kW) günlük tüketilen güç, $h_{günlük}$ (h) günlük çalışma saati, L_{adet} ($adet$) işletmedeki armatür sayısı ve $L_{tüketimi}$ (W) armatür gücünü ifade etmektedir.

LED aydınlatma armatürlerinin kullanılması ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.19 ile hesaplanır.

$$M_{kzyıllık,€} = W_{günlük} \times h_{yıllık} \times E_{maliyeti} \quad (2.19)$$

Burada, $M_{kzyıllık,€}$ (€) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı, $W_{günlük}$ (kWh) günlük tüketilen güç ve $E_{maliyeti}$ (€/kWh) elektrik maliyetini ifade etmektedir. $E_{maliyeti} = 0,15$ €/kWh olarak alınmıştır.

2.1.6 Yalıtım Sistemlerinin İyileştirilmesi İle Enerji Tasarrufunda Kullanılan Analiz Yöntemleri

Isı izolasyonu, endüstriyel tesisler açısından kritik öneme sahiptir. İzolasyon, tesislerdeki ekipmanların ihtiyaç olan yerlerinin enerji kaybını minimize etmek amacıyla uygulanan bir sistemdir. Isı transferini azaltarak enerji kayıplarını önler ve prosesin enerji verimliliğini artırır. Vakum makinelerinde bulunan rezistansların saatlik toplam tüketimi denklem 2.20 ile hesaplanır.

$$R_{toptük} = R_{adet} \times R_{tüketimi} \quad (2.20)$$

Burada, $R_{toptük}$ (kW) vakum makinesi toplam rezistans gücü, R_{adet} (adet) makinedeki rezistans sayısı ve $R_{tüketimi}$ (W) rezistans gücünü ifade etmektedir. Vakum makinesinin izolasyon sonrası yıllık geri kazanılan güç 2.21 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_{kzyıllık} = R_{toptük} \times z_{kaybı} \times G_{üretim} \times hg_{yıllık} \quad / \quad (2.21)$$

Burada, $\dot{W}_{kzyıllık}$ (kWh/yıl) yıllık geri kazanılan güç, $R_{toptük}$ (kW) vakum makinesi toplam rezistans gücü, $z_{kaybı}$ (h) yalıtım öncesi ve sonrasındaki makinenin ısınması için kazanılan süre, $G_{üretim}$ (adet) vakum makinesindeki günlük üretim miktarı ve $hg_{yıllık}$ (gün) yıllık çalışma gün sayısını ifade etmektedir.

Vakum makinelerinde yalıtım plakalarının yenilenmesi sonucunda, vakum makinesinde bir adet üretim için süreler kısalmış ve bu zaman kazancının işletmeye kazancı denklem 2.22 ile hesaplanır.

$$M_{kzyıllık,€} = \dot{W}_{kzyıllık} \times E_{malijeti} \quad (2.22)$$

Burada, $M_{kzyıllık,€}$ (€) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı, $\dot{W}_{kzyıllık}$ (kWh/yıl) yıllık geri kazanılan güç ve $E_{malijeti}$ (€/kWh) elektrik maliyetini ifade etmektedir. $E_{malijeti} = 0,15$ €/kW alınmıştır.

2.1.7 Karbon Emisyonu Hesaplarında Kullanılan Analiz Yöntemleri

Türkiye’de her kWh elektrik için 426 gCO₂ salınmaktadır (Climate Transparency, 2022). İşletmede yapılan enerji tasarruf hesaplarında bulunan kWh enerji tasarrufu miktarına karşılık atmosfere daha az karbon salınımı hesabı denklem 2.23 ile hesaplanır.

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426 \quad (2.23)$$

Burada, $CO_{2salınımı}$ ($ton CO_2$) yıllık tasarruf edilen karbon salınımı miktarı, $W_{kzyıllık}$ (kWh) yıllık enerji kazancı miktarı ve 0,426 ($ton CO_2/kWh$) değeri kWh başına salınan CO_2 miktarıdır.

2.2 Materyaller

Bu çalışmada incelemesi yapılan işletme özelindeki enerji kullanan materyaller dikkate alınmıştır. Bu materyaller sırasıyla aşağıda verilmiştir.

2.2.1 Basınçlı Hava Sistemleri Ölçümlerinde Kullanılan Cihazlar

SMC markasına ait bir dijital basınç sensörüdür. Genellikle pnömatik sistemlerde kullanılır. Bu tür dijital basınç sensörleri pnömatik sistemlerde basınç izleme ve kontrolü, endüstriyel otomasyon uygulamaları, basınçlı hava sistemleri, vakum sistemleri (ZSE modelleri), kompresörler ve hava hazırlık ünitelerinde kullanılmaktadır. Bu cihaz analizini yapmış olduğumuz işletmede basınçlı hava sistemlerinde hava kaçakları ile ilgili çalışmalarda kullanılmıştır.



Hava kombinasyon ünitesine bağlanabilir.
Uygulanabilir akışkan: Hava, Azot (N_2)
Debi aralığı: Maks. 2000 L/dak.
Debi oranı: 100:1.

Şekil 2.1. Hava kaçak ölçümünde kullanılan SMC marka debimetre ve teknik özellikleri (SMC, 2024)

2.2.2 Kompresör Sistemleri Ölçümlerinde Kullanılan Cihazlar

Atlas Copco firmasına ait Şekil 2.2.'de gösterilen iiTrak2 modeli cihaz bir akım ölçüm cihazıdır. Bu cihazın AC akım ölçüm aralığı 1 A - 3000 A, frekans aralığı 48...52 Hz / 58...62 Hz olup bu tür cihazlar genellikle elektrik motorları, kompresörler, endüstriyel makineler gibi ekipmanların çalışma sırasında çektikleri akımı hassas bir şekilde ölçmek için kullanılır. Bu ölçümler, enerji tüketiminin analizinde, bakım planlamasında veya arıza teşhisinde önemli rol oynar.



Şekil 2.2. Kompresör ölçümünde kullanılan Atlas Copco ölçüm cihazı (Atlas Copco, 2024)



Şekil 2.3. Kompresörlerin yükte-boşta çalışma süresi tespiti (Atlas Copco, 2024)

2.2.3 Geogrid Makinesi

Geogridler, inşaat ve altyapı projelerinde yüksek dayanıklılığa sahip polimer malzemelerden üretilen, özellikle zemin stabilitesini artırmaya yönelik geosentetik ürünlerdir. Bu malzemeler, istinat duvarlarının inşasında, şev güvenliğini sağlamak, zemin taşıma kapasitesini iyileştirmek ve çeşitli stabilizasyon ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Geogridler, projelerde uzun vadeli, güvenilir ve sürdürülebilir performans sunarak, tek yönlü (uniaxial) ve çift yönlü (biaxial) uygulama gereksinimlerine uygun çözümler sağlamaktadır.



Şekil 2.4. Geogrid makinesi ve makinede üretilen ürün

Geogridler, üretim tekniklerine göre üç ana kategoriye ayrılır: Örgülü, kaynaklı ve ekstrüde geogridler. Örgülü geogridler, yüksek mukavemetli polimer liflerin dokunarak oluşturulduğu ürünlerdir. Esnek yapıları sayesinde zemine rahatça uyum sağlayarak, projelerde uzun süreli ve dayanıklı bir performans sergiler. Kaynaklı geogridler, polimer çubukların termal kaynak yöntemiyle birbirine birleştirilmesiyle üretilir. Bu üretim yöntemi, geogridin sağlamlık ve stabilite özelliklerini artırır. Ekstrüde geogridler, polimer malzemenin ekstrüzyon tekniğiyle tek parça olarak üretilir. Genellikle ağır yük taşıma kapasitesine ihtiyaç duyulan inşaat projelerinde tercih edilir.

2.2.4 Geomebran Makinesi

Geomembranlar, çevre koruma ve mühendislik projelerinde su, gaz ve katı maddelerin geçişini engellemek amacıyla kullanılan sentetik malzemelerdir. Genellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) veya PVC gibi polimerlerden imal edilirler. Bu malzemeler, mühendislik projelerinde su geçirmezlik ve zemin izolasyonu gibi önemli koruma işlevlerini yerine getirir ve çeşitli endüstrilerde güvenilir çözümler sunar.

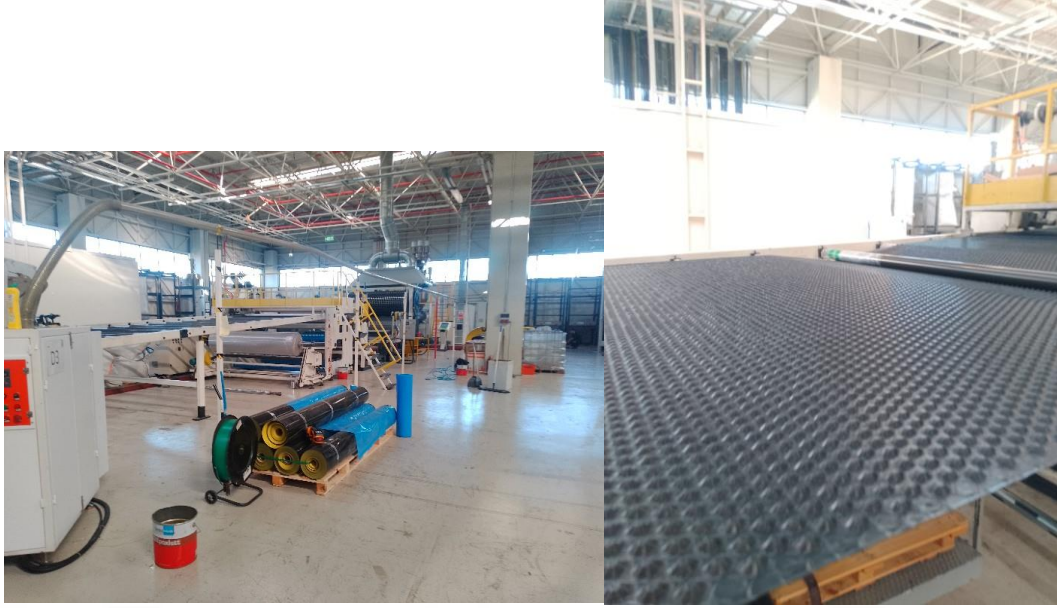


Şekil 2.5. Geomebran makinesi ve makinede üretilen ürün

Atık depolama alanlarının sızıntılarını engeller. Barajlar, göletler, su depoları ve sulama kanallarında suyun dışarıya sızmasını önler. Maden atıklarının ve cevherlerin güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar, aynı zamanda zararlı maddelerin sızmasını engeller. Sulama kanalları ve su depolama alanlarında su kaybını önler. Tüneller, kanalizasyon sistemleri ve yer altı yapılarına su geçirmezlik sağlar. Petrol ve gaz tesislerinde sızıntılara karşı koruma sağlar.

2.2.5 Drenaj Makinesi

Drenaj levhaları, yapıların temelleri, bodrum katları ve yeşil çatı uygulamalarında suyun etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak için kullanılan yüksek performanslı su yalıtım ürünleridir. Bu levhalar, suya maruz kalan yüzeylerde suyun hızla tahliye edilmesine yardımcı olarak yapısal hasarları engeller ve nem ile su kaynaklı sorunların oluşumunu önler. Ayrıca, yüksek basınç altında dahi dayanıklılık göstererek uzun süreli koruma sağlar.



Şekil 2.6. Drenaj makinesi ve makinede üretilen ürün

Drenaj levhaları, özellikle yapıların temelleri, bodrum katları, yer altı yapıları ve yeşil çatılarda yaygın olarak kullanılır. Temel yalıtımında su birikimini önleyerek su basıncını azaltır, yeşil çatılarda ise suyun doğru şekilde akışını yönlendirerek bitkilerin köklerinin zarar görmesini engeller. Bunun yanı sıra, peyzaj düzenlemeleri ve altyapı projelerinde de etkili çözümler sunar.

2.2.6 Geocell Makinesi

Geohücre, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) veya polietilen (PE) alaşımlarından üretilmiş, hücreler arası drenaj sağlayarak üç boyutlu bir yapıya sahip geosentetik bir malzemedir. Bu malzeme, zayıf zeminlerin güçlendirilmesi, erozyonun engellenmesi ve zeminin taşıma kapasitesinin artırılması için kullanılır.



Şekil 2.7. Geocell makinesi ve makinede üretilen ürün

Geohücreler, farklı alanlarda çeşitli işlevler üstlenir. Eğimli yüzeylerde erozyon kontrolü sağlamak için kullanılır, kanallar ve barajlarda koruma amaçlı beton kalıbı işlevi görür, yeşil çatılarda ise toprak taşıyıcı eleman olarak görev alır.

2.2.7 Vakum Makinesi

Vakum makinelerinde üretilen levhalar, yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) imal edilmiş, basınç mukavemeti yüksek çatı uygulamaları için üretilen bir drenaj levhasıdır. Bitki köklerine ve çürümeye karşı dayanıklıdır. Yağmursuz günlerde bitkilerin susuz kalmasını önleyen, su tutma haznesine sahiptir. Binaların teras çatıları ve otopark üstlerinde kullanılır.



Şekil 2.8. Vakum makinesi ve makinede üretilen ürün

Bina izolasyonunda çok önemli bir görev üstlenir. Yeşil bina uygulamalarının ısıtma ve soğutma sistem maliyetlerinde ve karbondioksit emisyonunda önemli bir düşüş sağlamaktadır. Bitki katmanı sayesinde, binanın çatı cephe sistemi dış etkenlere karşı da korunmuş olur. Bitki katmanının çok yönlü kullanımıyla kentsel su yönetimine katkıda bulunur. Yağmur suyunun ciddi bir miktarını bünyesinde tutabilen yeşil çatı ve cephe sistemleri, suyun arınmasına da katkı sağlamaktadır. Yeşil bina sistemlerine yapılan yatırım, kanalizasyon sistemi ile su arıtma sistemi işletmesinde ve yatırımlarında da tasarruf sağlar. Yeşil çatı uygulamalarının hava kalitesini de iyileştirdiği bilinmektedir. Yapıyı etkileyen güneş ışınlarının etkisini azaltır.

2.2.8 Hava Tabancaları

İşletme genelinde kullanılan standart hava tabancası Şekil 2.9. da görülmektedir. Bu tabancalardan yaklaşık 60 adet bulunmaktadır. Bu tabancaların

35 adeti üst katta kompresör dairesi 1 den, 25 adeti alt kat kompresör dairesi 2 den beslenmektedir.



Şekil 2.9. Tesiste standart hava tabancası görünümü

2.2.9 Elektrik Panoları

İşletme genelinde proses makinelerine ait enerji ve otomasyon sistemlerinin içinde barındıran elektrik panoları genel olarak açık bir alanda bulunduğu Şekil 2.10.'da görülmektedir. Bu durum elektrik panolarının toza ve sıcaklığa maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.10. Geogrid makinesi elektrik panosunu görünümü

2.2.10 Çiller Soğutma Sistemleri

İşletmede bulunan soğutma sistemleri üretimde kullanılan proses makinelerinin, üretim aşamasında çıkan ürünlerin istenen sıcaklığa düşürülmesi için kullanılan kullanılmaktadır. Bu soğutma genel olarak makine çıkışlarında soğutma silindirleri içlerinde soğuk su dolaştırılarak yapılmaktadır.



Şekil 2.11. Çiller soğutma sistemleri görünümü

2.2.11 Kompresörler

İşletmede iki adet kompresör dairesi vardır. Üst kattaki kompresörün bulunduğu alana kompresör dairesi 1, alt kattaki kompresörün bulunduğu alana kompresör dairesi 2 olarak düşünülmektedir. Kompresör dairesi 1’de Dalgakıran marka, INV+55 P tipinde, 55 kW gücünde, 8,2 m³/dk hava üretebilecek kapasitede kompresör bulunmaktadır. Kompresör dairesi 2’de Dalgakıran marka, TİDY 30 tipinde, 22 kW gücünde, 3,6 m³/dk hava üretebilecek kapasitede kompresör bulunmaktadır. Kompresör dairesi 1 üst katta bulunan 3 adet geogrid makinesi, 1 adet drenaj makinesi, 1 adet membran makinesin ve 35 adet hava tabancasının hava ihtiyacı için kurulmuştur. Kompresör dairesi 2 alt katta bulunan 4 adet vakum makinesi, 1 adet geocell makinesi ve 25 adet hava tabancasının hava ihtiyacı için kurulmuştur. İşletmede kullanılan kompresörler Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Kompresör dairesi 1 ve 2'deki kompresörlerin görünümü

2.2.12 Güneş Enerjisi Sistem Tasarımında Kullanılan Program

Fotovoltaik (PV) sistemlerin çalışmasını, boyutlandırmasını, simülasyonunu ve veri analizini gerçekleştirmek için kullanılan bir PC yazılım paketidir. Şebekeye bağlı veya bağımsız çalışan sistemler ile DA-grid (toplu taşıma) uygulamaları için kapsamlı bir meteorolojik ve PV bileşen veri tabanı sağlar. Mimarlar, mühendisler ve araştırmacılar için tasarlanmış olup, eğitim amaçlı da faydalı olabilecek bir araçtır. Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen en eski fotovoltaik yazılımlarından biridir (Haydaroğlu, C., 2017).

2.3 Yöntem

Bu tez çalışması Bolu ili Organize Sanayi Bölgesi (OSB) bünyesinde faaliyet gösteren inşaat malzemeleri üreten endüstriyel bir tesiste gerçekleştirilecek olan enerji verimliliği analizi çalışmasını yaparken ilk olarak işletme yetkilisi ile istişare sonucunda enerji verimliliği çalışmalarını hangi alanlarda yapılabileceğini belirlenmiştir. Bu enerji verimliliği analizlerini basınçlı hava sistemlerindeki kaçakların giderilmesi, kompresörlerin değişimi, kompresörlerin emiş havasının iyileştirilmesi, kompresörlerin atık ısısının geri kazanılması, kompresör basınç set değerinin düşürülmesi, aydınlatma sistemlerinin iyileştirilmesi, vakum makinelerindeki izolasyon plakalarının (yalıtların) değişimi, merkezi vakum sisteminin iyileştirilmesi, elektrik sistemlerinin analizi, soğutma sistemlerinin analizi ve güneş enerji sistemlerinin kurulması üzerine karar alınmıştır.

Bu başlıkların bazılarında bazı enerji verimliliği analizlerini yaparken kompresör ve vakum pompası firması olarak Atlas Copco, hava kaçaklarının

ölçülmesi için SMC firması ile, güneş enerjisi panellerinin kurulması için ZONEX firması ile gerekli istişareler ve materyallerin kullanılması için görüşmeler yapılmıştır. Güneş enerjisi panellerinin tasarımı için PVsyst programı kullanılmıştır. Son olarak bu materyaller ile ölçülen değerler ve işletmeden alınan bilgiler ışığında kuramsal temellerde verilen denklemler kullanılarak hesaplamalar ve analizler yapılmıştır.

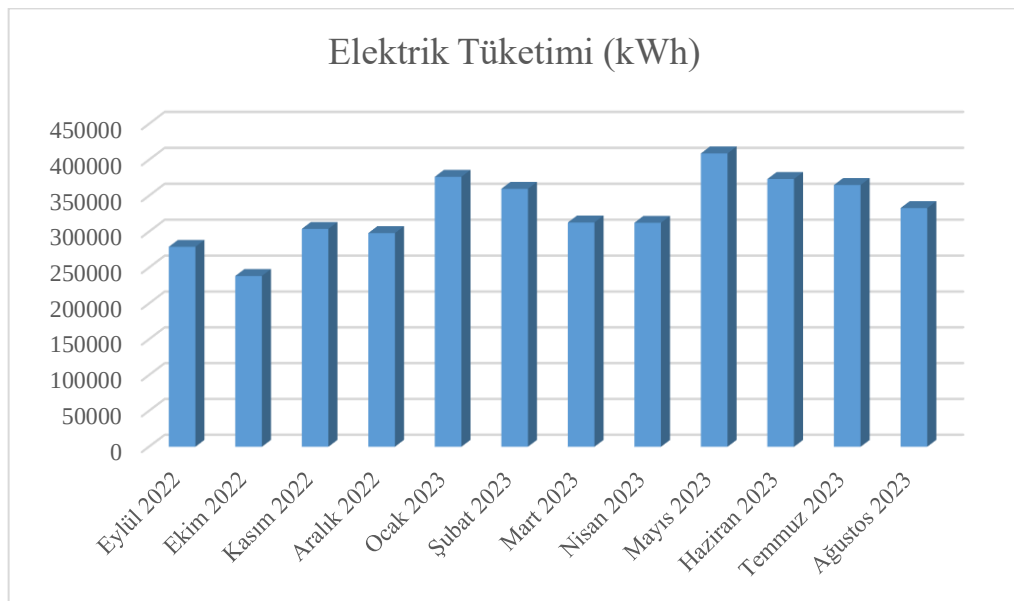


3. BULGULAR

İşletmede geneline bakıldığında basınçlı hava, kompresörlerde, yalıtımda, vakum pompalarında, aydınlatmada, elektrik, soğutma ve güneş panellerinde enerji verimlilikleri incelenmiş olup tesisin yıllık elektrik tüketimine kazancı ve karbon ayak izine sağladığı faydalar hesaplanmıştır. İşletme yeni kurulup devreye alındığından Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında tam kapasite çalıştığı bilgisi alınmıştır. İşletmenin yıllık elektrik tüketimi 3.962.173,8 kWh/yıl'dır.

Tablo 3.1. İşletmenin Eylül 2022 - Ağustos 2023 yıllık elektrik tüketimi

Aylar	Tüketilen Enerji	Birim
Eylül 2022	279022,2	kWh
Ekim 2022	238519,2	kWh
Kasım 2022	304007,1	kWh
Aralık 2022	298218,6	kWh
Ocak 2023	376477,8	kWh
Şubat 2023	359759,1	kWh
Mart 2023	312970,2	kWh
Nisan 2023	312487,2	kWh
Mayıs 2023	409080,3	kWh
Haziran 2023	373441,8	kWh
Temmuz 2023	365175,6	kWh
Ağustos 2023	333014,7	kWh
Toplam	3.962.173,80	kWh



Şekil 3.1. İşletmenin Eylül 2022 ve Ağustos 2023 arası aylık elektrik tüketimi

3.1 Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen

Bulgular

Basınçlı hava enerjisi, gerekli önlem ve tedbirler alınmaması durumunda ciddi maliyetlere sebebiyet verebilmektedir. Basınçlı hava sistemlerinde enerji tasarrufu çalışmaları yapılırken makinelerin günlük 24 *h* ve yıllık 350 gün çalıştığı kabul edilmiştir. Yıllık enerji tasarrufu miktarı hesaplamalarında m^3 başına hava maliyeti 0,015 € alınmıştır.

İncelemesini yaptığımız fabrikada basınçlı sistemlerdeki hava kaçaqları için belirli noktalar belirlenmiş ve bu noktalarda hava kaçaqları analizi yapılmıştır. Bu noktalar; geogrid makinesi, drenaj makinesi, vakum makinesi, geocell makinesi ve hava Tabancalarıdır.

İşletmenin tamamında aralıksız üretim yapıldığından fabrikada makinelerin durdurulamaması nedeniyle ölçülebilen noktalar sınırlı kalmıştır.

Basınçlı hava sistemlerinde kullanılan kompresörlerin 1 m^3/dk hava debisi için harcamış olduğu enerji denklem 2.1 ile hesaplanarak elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Buna göre göre kompresör dairesi 1 için;

$$E = W/K$$

$$E = 0,1118 \text{ kWh}/(m^3/h) \text{ hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$E = W/K$$

$$E = 0,1019 \text{ kWh}/(m^3/h) \text{ hesaplanmıştır.}$$

CO_2 salınım faktörü ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Bu katsayı Türkiye için kWh başına 0,426 kg- CO_2 olarak alınmıştır. Raporda yapılan CO_2 hesaplamalarında bu değer referans alınacaktır (Transparency, C., 2020).

3.1.1 Geogrid Makinesi

Kompresörden gelen basıncın 9,39 bar olup ölçüm sonucunda $Q_{dkkaçak} = 0,024 \text{ m}^3/dk$ kaçak tespit edilmiştir. Yıllık kaçak hava debisi denklem 2,2 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

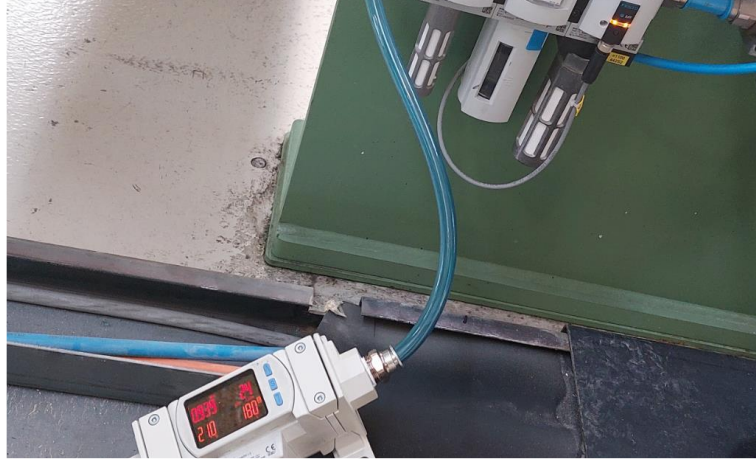
$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yillik}$$

$$Q_{ykaçak} = 12.096,00 \text{ m}^3/yıl \text{ yıllık kaçak hava debisi hesaplanmıştır.}$$

İşletmedeki hava kaçaqlarının, giderilmesi ile kompresör dairesi 1 verilerine göre yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyillik} = Q_{ykaçak} \times E$$

$\dot{W}_{kzyillik} = 1.352,33 \text{ kWh}$ yıllık enerji kazancı hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Geogrid makinesi hava kaçak ölçümü

Basıncılı hava sistemlerindeki hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyillik,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{malijeti}$$

$M_{kzyillik,€} = 181,44 \text{ (€/yıl)}$ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

Bu kaçağın giderilmesiyle yıllık olarak CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyillik} \times 0,426$$

$CO_{2salınımı} = 0,576 \text{ ton } CO_2$ azalma olacaktır.

3.1.2 Drenaj Makinesi

Kompresörden gelen basıncın 9,1 bar olup ölçüm sonucunda $Q_{dkkaçak} = 0,112 \text{ m}^3/dk$ kaçak tespit edilmiştir. Yıllık kaçak hava debisi denklem 2,2 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yillik}$$

$Q_{ykaçak} = 56.448,00 \text{ m}^3/yıl$ yıllık kaçak hava debisi hesaplanmıştır.

İşletmedeki hava kaçaklarının, giderilmesi ile kompresör dairesi 1 verilerine yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyillik} = Q_{ykaçak} \times E$$

$\dot{W}_{kzyillik} = 6.310,88 \text{ kWh}$ yıllık enerji kazancı hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Membran makinesi hava kaçak ölçümü

Basınçlı hava sistemlerindeki hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyıllık,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{malıyeti}$$

$$M_{kzyıllık,€} = 846,72 \text{ (€/yıl)} \text{ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.}$$

Bu kaçağın giderilmesiyle yıllık olarak CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 2,688 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.1.3 Vakum Makinesi

Kompresörden gelen basıncın 5,1 bar olup ölçüm sonucunda $Q_{dkkaçak} = 0,258 \text{ m}^3/dk$ kaçak tespit edilmiştir. Yıllık kaçak hava debisi denklem 2,2 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

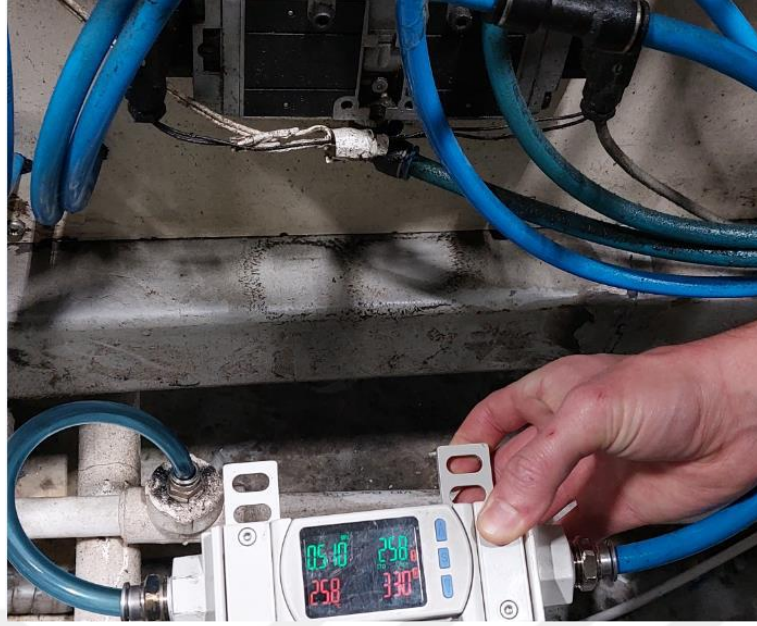
$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yıllık}$$

$$Q_{ykaçak} = 130.032,00 \text{ m}^3/yıl \text{ yıllık kaçak hava debisi hesaplanmıştır.}$$

İşletmedeki hava kaçaklarının, giderilmesi ile kompresör dairesi 2 verilerine göre yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyıllık} = Q_{ykaçak} \times E$$

$$\dot{W}_{kzyıllık} = 13.250,26 \text{ kWh} \text{ yıllık enerji kazancı hesaplanmıştır.}$$



Şekil 3.4. Vakum 4 makinesi hava kaçak ölçümü

Basıncılı hava sistemlerindeki hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyıllık,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{maliyeti}$$

$M_{kzyıllık,€} = 1.950,48$ (€/yıl) yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

Bu kaçağın giderilmesiyle yıllık olarak CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 5,645 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.1.4 Geocell Makinesi

Kompresörden gelen basıncın 5,1 bar olup ölçüm sonucunda $Q_{dkkaçak} = 0,104 \text{ m}^3/dk$ kaçak tespit edilmiştir. Yıllık kaçak hava debisi denklem 2,2 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

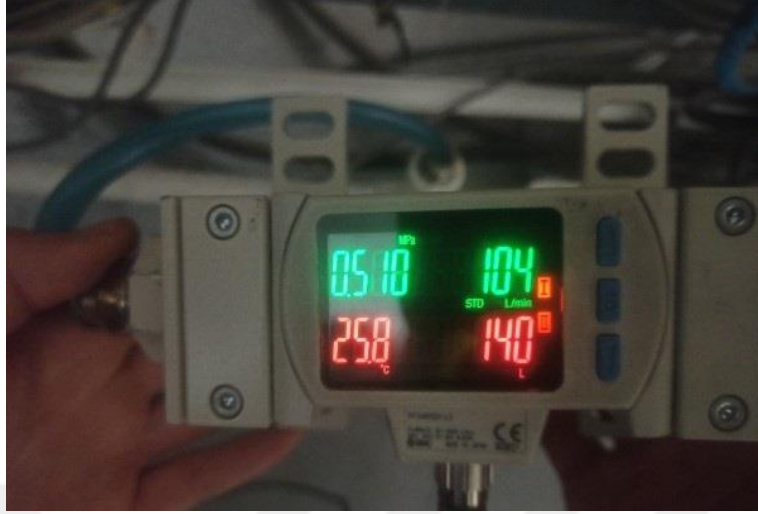
$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yıllık}$$

$$Q_{ykaçak} = 52.416,00 \text{ m}^3/yıl \text{ yıllık kaçak hava debisi hesaplanmıştır.}$$

İşletmedeki hava kaçaklarının, giderilmesi ile kompresör dairesi 2 verilerine göre yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyıllık} = Q_{ykaçak} \times E$$

$\dot{W}_{kzyıllık} = 5.341,19 \text{ kWh}$ yıllık enerji kazancı hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Geocell makinesi hava kaçak ölçümü

Basıncılı hava sistemlerindeki hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyıllık,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{malıyeti}$$

$M_{kzyıllık,€} = 786,24 \text{ (€/yıl)}$ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

Bu kaçığın giderilmesiyle yıllık olarak CO_2 salınımlarında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$CO_{2salınımı} = 2,275 \text{ ton } CO_2$ azalma olacaktır.

3.1.5 Hava Tabancaları

Tesiste hava kaçaklarının incelenmesi sırasında 60 adet hava tabancasının her birinde oluşan kaçak miktarı, toplam hava kaçak miktarının büyük bir bölümünü oluşturduğu görülmüştür. Ve 10 bardaki hava kaçak miktarı hesaplanmıştır. Bu hava tabancası günde 2 saat, yılda 350 gün çalıştığı öngörülmüştür.

Kompresörden gelen basıncın 9,84 bar olup ölçüm sonucunda $Q_{dkkaçak} = 0,036 \text{ m}^3/dk$ kaçak tespit edilmiştir. Yıllık kaçak hava debisi denklem 2,2 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

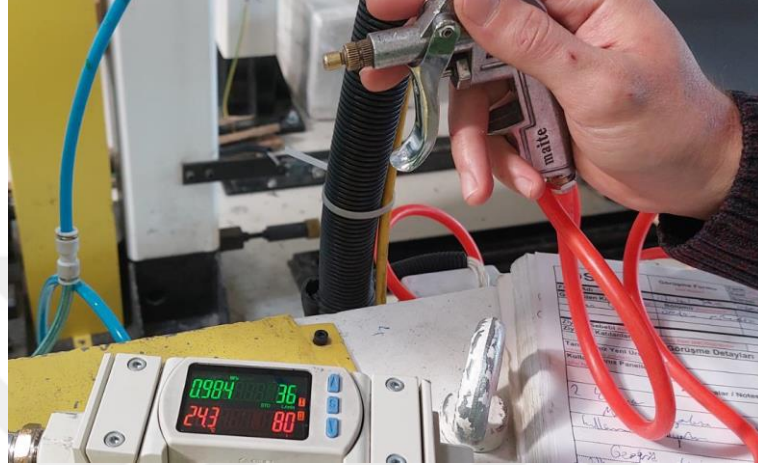
$$Q_{ykaçak} = Q_{dkkaçak} \times h_{yıllık}$$

$Q_{ykaçak} = 18.144,00 \text{ m}^3/\text{yıl}$ yıllık kaçak hava debisi hesaplanmıştır.

İşletmedeki hava kaçaqlarının, giderilmesi ile kompresör dairesi 2 verilerine göre yıllık enerji kazancı denklem 2.3 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyıllık} = Q_{ykaçak} \times E$$

$$\dot{W}_{kzyıllık} = 2.028,49 \text{ kWh} \text{ yıllık enerji kazancı hesaplanmıştır.}$$



Şekil 3.6. Tesiste standart hava tabancasının hava kaçak ölçümü

Basıncılı hava sistemlerindeki kullanılan hava tabancalarındaki hava kaçaqlarının giderilmesi ile yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.4 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyıllık,€} = Q_{ykaçak} \times hv_{malijeti}$$

$$M_{kzyıllık,€} = 272,16 \text{ (€/yıl)} \text{ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.}$$

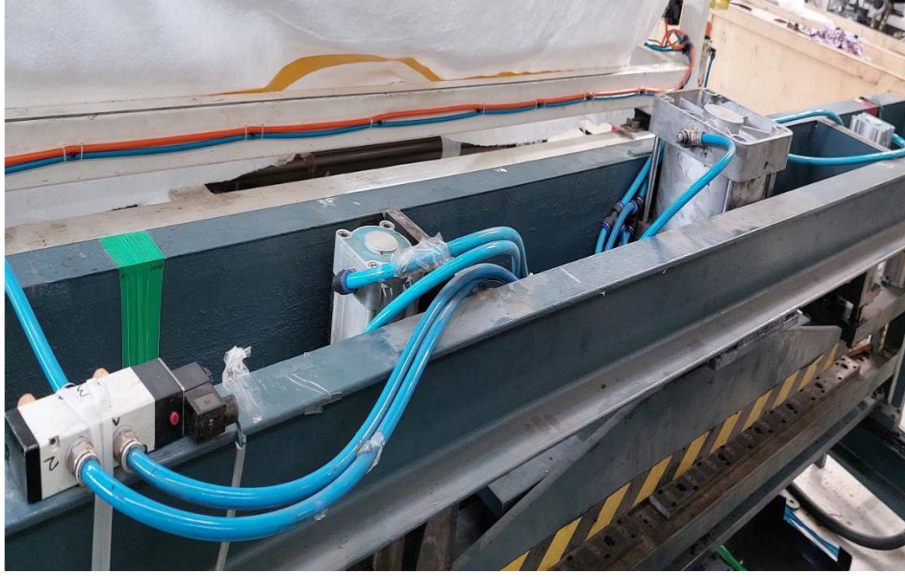
Bu kaçağın giderilmesiyle yıllık olarak CO_2 salınımlarında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 0,864 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.1.6 Drenaj Makinesi Pnömatik Piston Sistemi

Aşağıdaki resimde eş ikiz pistonların çalışma sırasında aynı anda hareket etmediği ve mevcut pistonlarda geri gelirken gecikme yaşandığı ve bu sebeple kompresörleri yüksek basınçta çalıştırıldığı bilgisi alınmıştır.



Şekil 3.7. Problem yaşanan eş ikiz pistonların görünümü



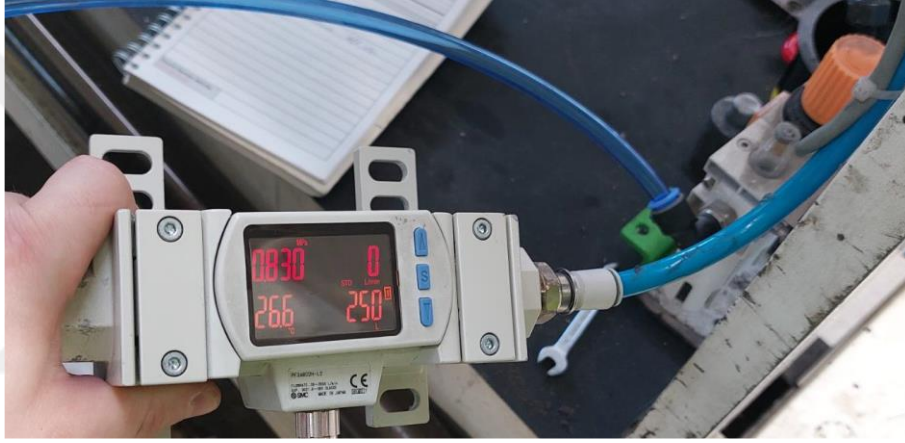
Şekil 3.8. Mevcut hava hatlarının görünümü

Bu bölgede yaşanan pistonların geri gelirken eş zamanlı hareket etmemesi ile ilgili olarak, havanın doğru kullanılmadığı, pnömatik hortumların iki pistona farklı boylarda ve çaplarının küçük çekilmesi, o bölümde bulunan mevcut şartlandırıcının küçük gelmesi, bir pnömatik valften üç adet pnömatik pistonun beslenmesi, pistonlarda hız ayar valflerinin bulunmaması gibi sorunlar sıralanabilir. Bu sorunların çözümü için;

- 1- Mevcut şartlandırıcı grubuna gelen hortumun çapının büyütülmesi (Ø16'lık olabilir)
- 2- Tek valf ile 3 pistonun beslenmesi yerine, her bir piston için yüksek debili valflerin kullanılması önerisi.
- 3- Her piston için kadranlı hız ayar valflerinin kullanılması önerisi
- 4- Kompresör basınçlı hatların pprc boru yerine galvaniz boru kullanılması önerilmektedir.

3.1.7 Drenaj Makinesi Pnömatik Piston Sistemi

Aşağıda ise drenaj makinesi silindir ön tarafında bulunan pistonların hat basıncı 8,3 bar'da 5 çevrim'de oluşturduğu tüketim değeri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi tüketim 250 L/5 çevrim çıkmıştır.



Şekil 3.9. Drenaj makinesinde 8,3 bar'da hava tüketim ölçümü



Şekil 3.10. Drenaj makinesinde 4,12 bar'da hava tüketim ölçümü

Bu makinanın basıncının 4,12 bar'a düşürülmesiyle alınan ölçümler yukarıda gösterilmektedir. Görüldüğü gibi tüketim 130 L/5 çevrim çıkmıştır. Sonuç

olarak basıncın 4 bar mertebelerine düşürülmesiyle sağlanan tasarruf sadece bu piston için % 48'dir.

3.1.8 Geocell Makinesi Pnömatik Piston Sistemi

İşletmede bulunan Geocell makinesinde pistonlar ve hava tabancalarından su geldiği bilgisi alınmıştır.



Şekil 3.11. Geocell makinesinde su problemi yaşanan yer

Bu sorunların çözümü için;

Bu bölge için ise sizlere önerimiz AFF* serisi 1 mikronluk filtre ve %99 oranında su ayırıcısı + AM* serisi 0,1 mikronluk hassas filtre kullanılması gerekmektedir.

İşletmede bulunan makinelerin belirli noktalarında hava kaçıkları ile ölçümler yapılmış olup aşağıda tablo haline getirilmiştir. Bu hesaplamalar yapılırken aynı makineden birden fazla olanlar için bir adet belirlemiş ve makine adeti ile çarpılması ile toplam kaçak miktarı hesaplanmıştır.

Tablo 3.2. Hava kaçıkları ile oluşan enerji kaybı tablosu

Makine Adı	Makine Sayısı (Ad)	Yıllık Kaçak Miktarı (m ³ /yıl)	Toplam Yıllık Kaçak Miktarı (m ³ /yıl)	Enerji Kaybı (kWh)	Yıllık Toplam Kaçak Maliyeti (€/yıl)	Toplam Yıllık Karbon Salınımı ton CO2
Geogrid Makinesi	3	12.096,00	36.288,00	4.056,99	544,32	1,728
Drenaj Makinesi	2	56.448,00	112.896,00	12.621,76	1.693,44	5,376
Vakum Makinesi	4	130.032,00	520.128,00	53.001,04	7.801,92	22,580

Geocell Makinesi	1	52.416,00	52.416,00	5.341,19	786,24	2,275
Hava Tabancası (Üst)	35	18.144,00	635.040,00	70.997,15	9.525,6	30,240
Hava Tabancası (Alt)	25	18.144,00	453.600,00	50.712,25	6.804,00	21,600

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 yılı toplam elektrik tüketimi 3.962.173,8 *kWh/yıl*’dır. İşletmede bulunan makinelerde hava kaçak ölçüm cihazları ile yapılan ölçümlerde 1.810.368,00 *m³ / yıl* hava debisi kaçığı ölçülmüştür. Bu hava kaçaklarının giderilmesi ile yıllık yaklaşık 196.730,38 *kWh/yıl* enerji kazanç sağlamış olup bunun sonucunda işletmede 2023 yılında tüketilen elektriğin yaklaşık olarak % 4,96’ü hava kaçaklarından kaynaklı enerji tasarrufundan elde edilmiş olacaktır.

İşletme Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 27.155,52 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

Bu kaçakların giderilmesiyle toplam yıllık olarak *CO₂* salınımında öngörülen azalma ise 83,799 ton *CO₂* olacaktır.

3.2 Kompresör Sistemlerinin Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular

Kompresörlerin çalışma sürelerinin tespiti, yükte ve boşta çalışma süreleri, pik durumda çalışma durumlarının tespiti için ölçüm cihazları mevcut iki adet kompresöre bağlanmış ve bir hafta boyunca kompresörlerin çalışma durumları incelenmiştir.

Bu ölçümler, sistemdeki her kompresör için yük çevrimi oluşturan, kullanılan aletlerden alınır. Simülasyonun hedefi, üretim haftası boyunca kullanılan hava ve enerjinin bir sunumunu oluşturmaktır. Bir haftalık veriler daha sonra kompresör havasının yıllık kullanımının, kullanılan enerjinin ve maliyetinin ortaya çıkarılması için kullanılacaktır.

Bu parametreleri kullanarak, kurulu kompresör performansı ile kombinasyon içerisinde tipik bir debi profili oluşturulmuştur.

Bu debi profilinden, yıllık değerlerin çıkarımı yapıldı ve her yıl için 50 çalışma haftası ön görülmüştür.

Çalışma basıncının dikkatli şekilde ayarlanması gerekli. Kurulmuş olan makineler ile ilişki içerisinde doğru ayar noktası seçilerek büyük miktarda enerji tasarrufu sağlanabilir. Genel bir kural olarak ihtiyaç duyulan basıncın üzerindeki her basınç değeri %8 daha fazla enerji kullanacaktır.

Kompresörler genellikle, üç farklı durum modunda çalışır. Bunlar;

- Durdu (Hava kompresörü motoru durdu ve enerji kullanılıyor)
- Boşta (Hava kompresörü motoru çalışıyor, ancak hava giriş kontrolü kapalı. Cihaz hava üretmiyor -"rölantide" - ve enerji harcıyor)
- Yükte (Hava kompresörü girişi açık, cihaz tam kapasitede hava üretiyor ve enerjiyi verimli şekilde kullanıyor.

Çalışmamızın hedefi doğru çalışma basıncını seçmek ve araştırma yapılan tesiste üretime faydası olmayan enerji tüketimini azaltmaktır.

3.2.1 Kompresörlerin Ölçüm Analizleri İle Elde Edilen Bulgular

3.2.1.1 Kompresör Dairesi 1 Ölçüm Analizleri

Yük saatleri, kompresörün hava üretiminde aktif olarak çalıştığı (yük altında olduğu) toplam süredir. Bu süre boyunca enerji harcarak hava üretmiştir. Yük/boş saatleri, kompresörün motorunun çalıştığı ancak hava üretimi yapmadığı süredir. Bu süre enerji israfına yol açar çünkü elektrik tüketimi olur ama faydalı iş yapılmaz. Duruş saatleri, kompresörün tamamen kapalı, yani hem hava üretimi hem de motor çalışmasının olmadığı süredir. Yük/(yük/boş) döngüsü kompresörün kaç kez yük altında çalışmaya başlayıp, yük/boşa geçtiğini gösterir. Bu sayı, sistemin ne kadar sık devreye girip çıktığını gösterir. Yüksek döngü sayısı, ekipman üzerinde mekanik yıpranma yaratır. Başlangıç/duruş döngüsü, kompresörün kaç kez tamamen durup tekrar başladığını gösterir. Bu değer, sistemin ne kadar sık açılıp kapandığını belirtir. Fazla sayıda dur-kalk, sistem ömrünü kısaltır. Optimum VSD saatleri, VSD (Değişken Hızlı Sürücü) teknolojisiyle kompresörün en verimli çalıştığı saatleri gösterir. VSD sayesinde enerji ihtiyacına göre motor hızı ayarlanabilir, bu da enerji tasarrufu sağlar.

Toplam hava debisi (Total flow), kompresörün belirli süre boyunca ürettiği toplam hava miktarıdır. Genellikle bin metreküp ($m^3 \times 1000$) olarak gösterilir. Toplam enerji tüketimi (Total energy), kompresörün hem yükte hem boşta geçirdiği süre boyunca tükettiği toplam elektrik enerjisidir. kWh veya MWh cinsinden verilir. Yüklenen enerji (Yükte tüketilen enerji), kompresörün yalnızca yük altında çalışırken tükettiği enerjidir. Bu enerji faydalı iş üretmiştir. Yük/boş enerji,

kompresörün boшта çalışırken tükettiği enerjidir. Bu enerji genelde israf olarak değerlendirilir çünkü hava üretimi yapılmaz.

Potansiyel Enerji İyileştirmesi, yapılacak optimizasyonlar sayesinde tasarruf edilebilecek enerji miktarıdır. Bu değer yüksekse sistemin verimliliği artırılabilir demektir.

Tablo 3.3. Mevcut kompresör dairesi 1 ölçüm değerleri

M: Mevcut durum				Y: Önerilen yeni kompresör			
Similasyon Verisi	Yük Saatleri	Yükboş Saatleri	Duruş Saatleri	Yük/ Yükboş Döngüsü	Başlangıç/ Duruş Döngüsü	Optimum VSD Saatleri	
M INV+ 55P	101,4 h	4,3 h	63 h	1.399,00	1.455,00	86,4 h	
Y GA 37L VSD+	103,5 h	-	65 h	-	1.409,00	91,9 h	
Enerji Sonuçları (1 Hafta)		Total Flow	Total Energy	Yüklenen Enerji	Yükboş Enerji	Potansiyel Enerji İyileştirmesi	
M INV+ 55P		31,06 m ³ (x 1000)	4.408 kWh	4.337 kWh	71 kWh	-	
Y GA 37L VSD+		31,07 m ³ (x 1000)	3.403 kWh	3.403 kWh	0 kWh	2.531 kWh	
Enerji Sonuçları (1 Yıl)		Total Flow	Total Energy	Yüklenen Enerji	Yükboş Enerji	Potansiyel Enerji İyileştirmesi	
M INV+ 55P		1.553 m ³ (x 1000)	220.382 kWh	216.836 kWh	3.546 kWh	-	
Y GA 37L VSD+		1.553 m ³ (x 1000)	170.155 kWh	170.155 kWh	0 kWh	126.574 kWh	

Mevcut INV+ 55P kompresörü haftalık olarak 101,4 saat yükte, 4,3 saat ise yükboşta çalışmakta olup, 63 saatlik duruş süresi bulunmaktadır. Aynı süre içinde 1.399 yük/yükboş döngüsü ve 1.455 başlangıç/duruş döngüsü gerçekleşmiştir. Kompresör, haftalık olarak yaklaşık 86,4 saat boyunca optimum VSD aralığında çalışmaktadır.

Yeni önerilen GA 37L VSD+ model kompresör ise 103,5 saat yükte çalışmakta, yükboş çalışma süresi sıfıra inmiştir. Duruş süresi 65 saat olup, 1.409

başlangıç/duruş döngüsü gerçekleştirilmiştir. Bu kompresör 91,9 saat boyunca optimum VSD aralığında çalışmaktadır. Bu durum, yükboşta çalışmanın tamamen ortadan kaldırıldığını ve sistemin daha verimli bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir.

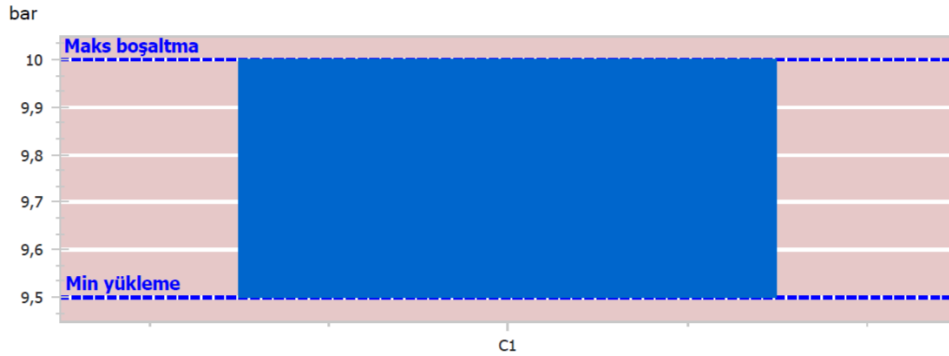
Mevcut sistemde haftalık toplam hava tüketimi 31.060 m³ olup, buna karşılık 4.408 kWh enerji harcanmaktadır. Bunun 4.337 kWh'si yükte, 71 kWh'si ise yükboş çalışmadan kaynaklanmaktadır.

Yeni sistemle hava tüketimi değişmemekle birlikte toplam enerji tüketimi 3.403 kWh'a düşmüştür. Tüm enerji yükte kullanılmış, yükboş enerji tamamen ortadan kaldırılmıştır. Bu da haftalık bazda yaklaşık 1.005 kWh tasarruf anlamına gelmektedir.

Yıllık toplam hava tüketimi her iki sistemde de 1.553.000 m³ olarak sabittir. Ancak mevcut sistemde yıllık enerji tüketimi 220.382 kWh iken, yeni sistemde bu değer 170.155 kWh'ye düşmüştür. Bu da yıllık 50.227 kWh enerji tasarrufu anlamına gelmektedir.

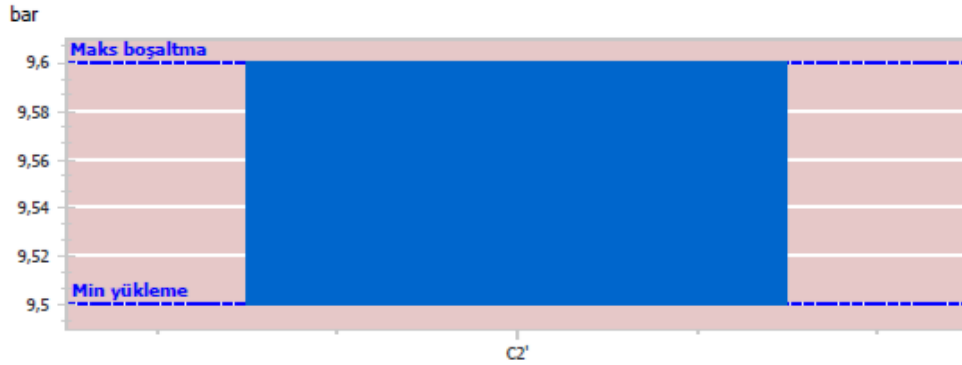
Ayrıca mevcut sistemde yıllık 3.546 kWh yükboş enerji harcanmakta, önerilen yeni sistemde bu değer sıfıra inmektedir. Yeni sistemin yıllık potansiyel enerji iyileştirme değeri 126.574 kWh olarak hesaplanmıştır.

Kompresör dairesi 1 hâlihazırda Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi 0,50 bar basınç bar bandı içerisinde çalışmaktadır. Bu kompresörün 9,50 bar ile 10,00 bar arasındaki bu dalgalanma basıncı içerisinde yüklenip boşalacağı anlamına gelir. Kompresör boşa geçtiğinde, enerji harcar, çünkü kompresör boşta çalıştığında sistem için basınçlı hava üretmemektedir ve bu süreçte motor çalışmakta (rölanti) ve enerji kullanmaktadır.



Şekil 3.12. KD1'in mevcut kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri

Mevcut kompresörlerin yerine yeni takılacak kompresörler hâlihazırda Şekil 3.12 görüldüğü gibi 0,10 bar basınç bandı içerisinde çalışmaktadır. Bu basıncın 9,50 bar ile 9,60 bar arasında dalgalanacağı anlamına gelir.



Şekil 3.13. KD1’de önerilen kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri

3.2.1.2 Kompresör Dairesi 2 Ölçüm Analizleri

Mevcut durumda kullanılan TIDY 30 kompresörü, haftalık olarak toplam 20.350 m³ (bin metreküp) hava üretmektedir. Bu süreçte kompresör, 2.939 kWh toplam enerji tüketirken bunun 2.488 kWh’lık kısmı yük altında, 452 kWh’lık kısmı ise yükboşta harcanmaktadır. Yani, sistemde haftalık olarak önemli miktarda enerji, yük altında olmadan boşa gitmektedir.

Önerilen GA 18 VSDs değişken hızlı kompresör ise haftalık 19.040 m³ hava üretmektedir. Bu kompresör, toplamda 1.984 kWh enerji tüketmekte olup, tamamı yük altında gerçekleşmektedir. Yükboş enerji tüketimi tamamen ortadan kaldırılmıştır. Böylece haftalık bazda yaklaşık 1.482 kWh enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Yıllık ölçekte TIDY 30 kompresörü, 1.018.000 m³ hava üretimi karşılığında toplam 146.965 kWh enerji tüketmektedir. Bu tüketimin 124.376 kWh’si yük altında, 22.589 kWh’si ise yükboşta gerçekleşmektedir.

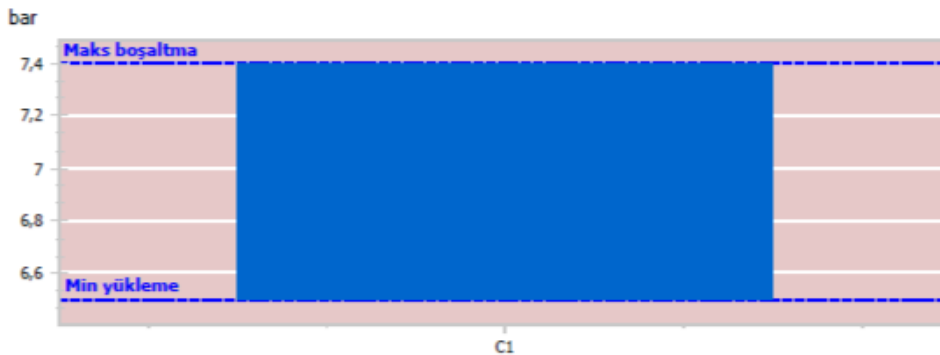
Buna karşın, önerilen GA 18 VSDs kompresör, yıllık 969.000 m³ hava üretimiyle 99.213 kWh enerji harcamaktadır. Tüm enerji yük altında kullanıldığı için yükboş kaybı bulunmamaktadır. Böylece yıllık ölçekte yaklaşık 74.107 kWh enerji tasarrufu elde edilmektedir.

Önerilen GA 18 VSDs kompresör, yükboş enerji tüketimini sıfıra indirerek hem haftalık hem de yıllık bazda ciddi enerji tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle yükboş enerji kayıplarının ortadan kalkması sayesinde sistemin genel verimliliği artmakta, aynı zamanda işletme maliyetleri ve karbon salımı da düşmektedir.

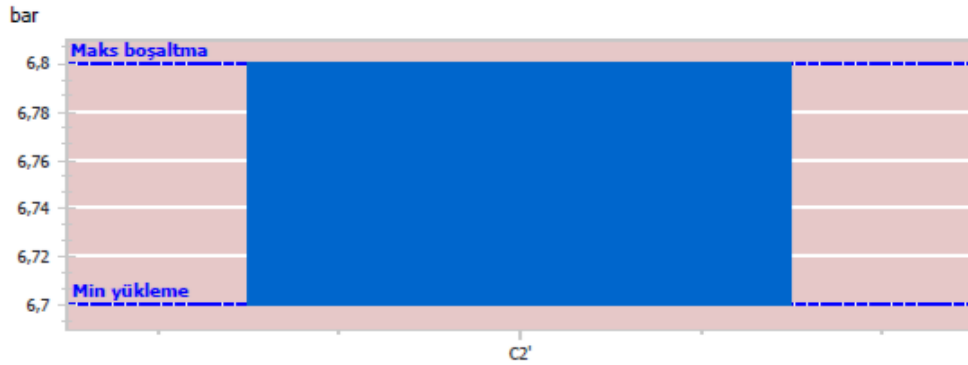
Tablo 3.4. Mevcut kompresör dairesi 2 ölçüm değerleri

M: Mevcut durum				Y: Önerilen yeni kompresör			
Similasyon Verisi		Yük Saatleri	Yükboş Saatleri	Duruş Saatleri	Yük/ Yükboş Döngüsü	Başlangıç/ Duruş Döngüsü	Optimum VSD Saatleri
M	TIDY 30	94,2 h	28 h	46 h	1.846,00	1.472,00	-
Y	GA 18 VDSs	145,6 h	-	22 h	-	682,00	131,8 h
Enerji Sonuçları (1 Hafta)		Total Flow		Total Energy	Yüklenen Enerji	Yükboş Enerji	Potansiyel Enerji İyileştirmesi
M	TIDY 30	20,35 m^3 (x 1000)		2.939 kWh	2.488 kWh	452 kWh	-
Y	GA 18 VDSs	19,04 m^3 (x 1000)		1.984 kWh	1.984 kWh	0 kWh	1.482 kWh
Enerji Sonuçları (1 Yıl)		Total Flow		Total Energy	Yüklenen Enerji	Yükboş Enerji	Potansiyel Enerji İyileştirmesi
M	TIDY 30	1.018 m^3 (x 1000)		146.965 kWh	124.376 kWh	22.589 kWh	-
Y	GA 18 VDSs	969 m^3 (x 1000)		99.213 kWh	99.213 kWh	0 kWh	74.107 kWh

Kompresör dairesi 2 Şekil 3.13.'de görüldüğü gibi 0,90 bar basınç bar bandı içerisinde çalışmaktadır. Bu kompresörün 6,50 bar ile 7,40 bar arasındaki bu dalgalanma basıncı içerisinde yüklenip boşalacağı anlamına gelir. Kompresör boşa geçtiğinde, enerji harcar, çünkü kompresör boşta çalıştığında sistem için basınçlı hava üretmemektedir ve bu süreçte motor çalışmakta (rölanti) ve enerji kullanmaktadır.

**Şekil 3.14.** KD2'in mevcut kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri

Mevcut kompresörlerin yerine yeni takılacak kompresörler Şekil 3.14.'de görüldüğü gibi 0,10 bar basınç bandı içerisinde çalışmaktadır. Bu basıncın 6,70 bar ile 6,80 bar arasında dalgalanacağı anlamına gelir.



Şekil 3.15. KD2’de önerilen kompresörün yükleme-boşaltma ölçüm verileri

3.2.1.3 Kompresörlerin Enerji Tasarrufu Analizi

İşletmede bulunan kompresörlerin gerekli ölçümler sonucunda daha verimli kompresörler ile değişimi hem kompresör kurulu gücünden hem de mevcut kompresörlerin boşa-yükte çalışma durumu göz önünde bulunduğunda, yeni kompresörlerde bu fark daha minimum olacaktır. Dolayısıyla bu fark işletmenin enerji tasarrufu olacaktır. Burada kWh maliyet 0,15 €/kWh olarak alınmıştır.

Tablo 3.5. Mevcut ve yeni kompresörlerin karşılaştırma tablosu

	Kompresör Dairesi 1 Mevcut Kompresör	Kompresör Dairesi 1 Önerilen Kompresör	Kompresör Dairesi 2 Mevcut Kompresör	Kompresör Dairesi 2 Önerilen Kompresör
Kompresör Markası	Dalgakıran	Atlas Copco	Dalgakıran	Atlas Copco
Kompresör Tipi	INV + 55 P	GA 37L VSD+	TİDY 30	GA 18 VSDs
Kompresör Gücü	55 kW	37 kW	22 kW	18 kW
Kompresör Debisi	8,2 m ³ /dk	12,76 m ³ /dk	3,6 m ³ /dk	5,67 m ³ /dk
Tank Hacmi	1,8 m ³	2 m ³	0,9 m ³	1 m ³
Tüketilen Toplam Enerji	220,4 MWh	170 MWh	147 MWh	99,2 MWh

Tablo 3.6. KD1 mevcut ve yeni kompresör enerji tasarruf tablosu

Ürün Adı	Tüketilen Toplam Enerji	Enerji Düşüşü	Yıllık Tasarruf	Yıllık Enerji Maliyet Tasarrufu Miktarı
INV+ 55P	220,4 MWh	-		
GA 37L VSD+	170 MWh	50,4 MWh	22,80%	7.560 €

Kompresör dairesi 1’de mevcut kompresörün ölçümler sonucunda yıllık tüketimi 220,4 MWh’dir. Yerine konulacak olan daha verimli kompresörün yıllık

tüketimi 170,0 *MWh*'dir. Önerilen kompresör ile yıllık 50.400,0 *kWh/yıl* enerji tasarrufu elde edilecektir.

Tablo 3.7. KD2 mevcut ve yeni kompresör enerji tasarruf tablosu

Ürün Adı	Tüketilen Toplam Enerji	Enerji Düşüşü	Yıllık Tasarruf	Yıllık Enerji Maliyet Tasarrufu Miktarı
TIDY 30	147 <i>MWh</i>	-		
GA 18 VDSs	99,2 <i>MWh</i>	47,8 <i>MWh</i>	32,50%	7.170 €

Kompresör dairesi 2'de mevcut kompresörün ölçümler sonucunda yıllık tüketimi 147 *MWh*'dir. Yerine konulacak olan daha verimli kompresörün yıllık tüketimi 99,2 *MWh*'dir. Önerilen kompresör ile yıllık 47.800,0 *kWh/yıl* enerji tasarrufu elde edilecektir.

Kompresörlerin değişimi ile toplam 98.200,0 *kWh/yıl* kazanç sağlanacaktır. İşletmenin Eylül 2022 – Ağustos 2023 yılı toplam 3.962.173,8 *kWh/yıl* elektrik tüketiminin kompresör değişimi ile işletmede 2023 yılında tüketilen elektriğin yaklaşık olarak % 2,47 'si kompresör değişiminden sağladığı enerji ile sağlanmış olacaktır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 14.730,00 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

Mevcut kompresörlerin yeni nesil kompresörlerle değişim yapılması ile yıllık olarak CO_2 salınımlında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 41,833 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

Tablo 3.8. Kompresörlerin değişimi sonrası enerji kazancı ve geri ödeme süresi tablosu

	Mevcut Kompresör Tüketimi (MWh)	Önerilen Kompresör Tüketimi (MWh)	Yıllık Toplam Enerji Tasarrufu (€)
Kompresör Dairesi 1	220,4 MWh	170 MWh	7.560,00 €
Kompresör Dairesi 2	147 MWh	99,2 MWh	7.170,00 €
Toplam Enerji Kazancı (€)	14.730,00 €		

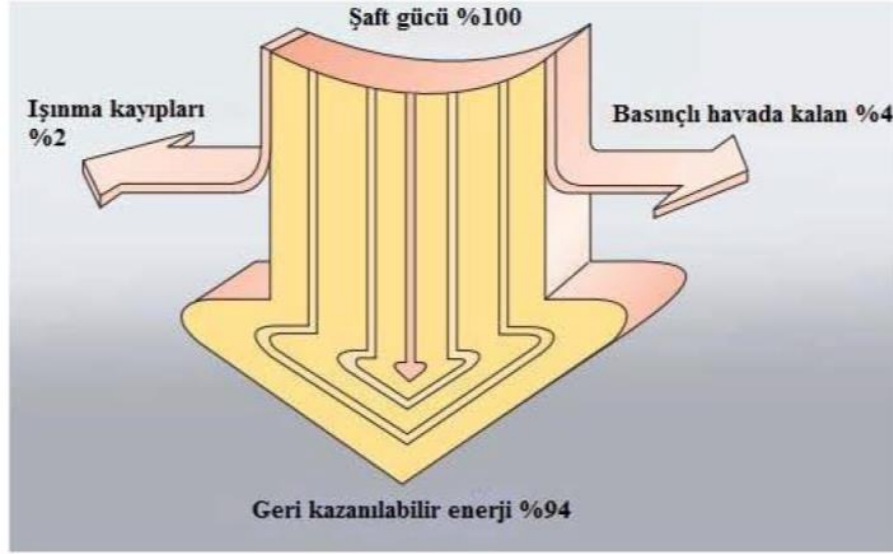
KD1 Yatırım Maliyeti (€)	23.000,00 €
KD2 Yatırım Maliyeti (€)	13.000,00 €
Toplam Yatırım Maliyeti (€)	36.000,00 €
Geri Ödeme Süresi (yıl)	2,44 yıl

3.2.2 Kompresör Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Analizi

Kompresörlerde ısı geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan bir teknolojidir. Bu işlem, kompresörler tarafından üretilen ısıyı yakalamak ve bu ısıyı iş yerinde veya üretim süreçlerinde kullanmak anlamına gelmektedir.

Isı geri kazanımı sayesinde elde edilen ısı, sıcak su veya buhar üretimi gibi iş yerindeki diğer ihtiyaçlar için kullanılabilir. Bu da işletmenin maliyetlerini azaltmakta ve daha sürdürülebilir bir enerji kullanımını teşvik etmektedir. Aynı zamanda enerji verimliliği arttığı için, daha az enerji tüketimi de çevresel etkiyi azaltacaktır.

Kompresörlerde ısı geri kazanımı, enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilir. Ancak, her uygulamanın özellikleri ve gereksinimleri farklı olduğu için, doğru sistem tasarımı ve entegrasyonu önemlidir. Elektrik enerjisinin %94'üne kadar olan kısmı, sıkıştırma işlemi sırasında ısıya dönüşür. Eğer bu ısı geri kazanılmazsa, soğutma sistemleri ve radyasyon yoluyla atmosferde kaybolur. Basınçlı havadan elde edilen sıcak su, temizlik işlemleri ve alan ısıtma gibi amaçlar için kullanılabilir. Ancak bu yöntem, özellikle endüstriyel proseslerde daha verimli sonuçlar verir. Elde edilen sıcak suyu kazanların ön ısıtması için kullanmak veya 50°C ile 70°C arasındaki sıcaklık gerektiren sistemlerde doğrudan kullanmak, doğal gaz ve ısıtma için kullanılan diğer pahalı yakıt türlerinden tasarruf sağlamaya yardımcı olacaktır (Atlas Copco, 2025).



Şekil 3.16. Isı Geri Kazanımı (Kaya, M. (2012))

Çalışma yapılan işletmede iki adet kompresör dairesi bulunmaktadır. Bu kompresör dairelerinin her birinde birer adet farklı kapasitelerde kompresör bulunmaktadır. Kompresörlerin yükte ve boşta çalışmaları bir hafta boyunca takip edilerek analizleri yapılmış çıkan sonuçlarda her iki kompresörün haftalık çalışma saatleri yaklaşık 100 saattir. Kompresör atık ısısından enerji tasarrufu hesaplamaları yapılırken kompresörlerin haftalık çalışma saati 100 saat ve bir yıl 52 hafta olarak alınmıştır.

Kompresörlerin çalışması sırasında saatteki atık ısı gücü denklem 2.5 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$\dot{Q}_{atık} = \dot{W} \times IE_{yüzdesi}$$

$$\dot{Q}_{atık} = 51,7 \text{ kWh saatteki atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$\dot{Q}_{atık} = \dot{W} \times IE_{yüzdesi}$$

$$\dot{Q}_{atık} = 20,68 \text{ kWh saatteki atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresörün saatteki atık ısı gücünden elde edilecek olan saatteki geri kazanılan atık ısı gücü denklem 2.6 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$\dot{Q}_{gkatık} = \dot{Q}_{atık} \times gk_{yüzdesi}$$

$$\dot{Q}_{gkatık} = 41,36 \text{ kWh saatteki geri kazanılan atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$\dot{Q}_{gkatık} = \dot{Q}_{atık} \times gk_{yüzdesi}$$

$$\dot{Q}_{gkatık} = 16,544 \text{ kWh saatteki geri kazanılan atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresörlerde yıllık geri kazanılan atık ısı gücü denklem 2.7 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$\dot{Q}_{ygkatık} = \dot{Q}_{gkatık} \times h_{haftalık} \times hf_{yıllık}$$

$$\dot{Q}_{ygkatık} = 309.703,68 \text{ kWh/yıl} \text{ yıllık geri kazanılan atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$\dot{Q}_{ygkatık} = \dot{Q}_{gkatık} \times h_{haftalık} \times hf_{yıllık}$$

$$\dot{Q}_{ygkatık} = 123.881,47 \text{ kWh/yıl} \text{ yıllık geri kazanılan atık ısı gücü hesaplanmıştır.}$$

Kompresörlerden atık ısısından geri kazanılan atık ısı güçlerinin kullanım sularının ısıtılması, ortam hacimlerinin ısıtılması gibi amaçlar için kullanılarak değerlendirilebilir.

Kompresör atık ısısının geri kazanımından elde edilen atık ısı gücünün suya aktarılarak sıcak su elde etmek için kullanıldığında ve bunun sonucunda yıllık tasarruf edilen doğalgaz miktarı denklem 2.9 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$D_{gazyıllık} = \dot{Q}_{ygkatık} / (D_{gazaltısıldeğer} \times \eta_{verim})$$

$$D_{gazyıllık} = 50.219,96 \text{ m}^3 \text{ doğalgazdan tasarruf edilecektir.}$$

Kompresörlerin atık ısısının geri kazanımı ile toplam 433.585,15 kWh/yıl atık ısı gücü geri kazanılmış olacaktır. İşletmenin Eylül 2022 – Ağustos 2023 yılı toplam 3.962.173,8 kWh/yıl Bu enerjinin geri kazanılması ile işletmede 2023 yılında tüketilen elektriğin yaklaşık olarak % 10,94 'ünü karşılamış olacaktır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 Ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 65.037,77 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

Mevcut kompresörlerden atık ısısının geri kazanımı ile yıllık olarak CO₂ salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{yıllık} \times 0,426$$

$CO_{2salınımı} = 184,71 \text{ ton } CO_2$ azalma olacaktır.

Tablo 3.9. Kompresörlerin atık ısı ile enerji kazancı tablosu

	Kompresör Markası	Kompresör Tipi	Enerji Tüketimi (kW)	Ortalama Güç Tasarufu (kW)	Yıllık Toplam Enerji Tasarufu (€)
Kompresör Dairesi 1	Dalgakıran	INV + 55 P	55 kW	215.072,00	32.260,80 €
Kompresör Dairesi 2	Dalgakıran	TİDY 30	22 kW	86.028,80	12.904,32 €
Toplam					45.165,12 €

3.2.3 Kompresör Emiş Havası İle Enerji Analizi

Kompresörlerde verimli bir sıkıştırma işlemi için soğuk, temiz ve kuru hava girişi büyük önem taşır. Bu yüzden, kompresör odalarının kurulumu sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri, kompresörün hava girişinin en uygun sıcaklıkta olduğu bölgenin belirlenmesidir.

Atlas Copco'nun tüm vidalı kompresörlerinde emiş hava sıcaklığı referans noktası olarak 20 °C kabul edilir. Bu sıcaklık, FAD (Free Air Delivery), ses seviyesi ve enerji tüketimi gibi performans değerlerinin ISO 1217 standardına göre ölçülebilmesi için uluslararası kabul görmüş bir kriterdir. (Atlas Copco, 2018)

Enerji analizi yapılan fabrikada, kompresör odasının birinde bulunan kompresör emiş havasını iç ortamdan almaktadır. Kompresör üzerindeki ekipmanlar, kompresör odasının ısınmasına yol açarak emilen havanın sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Emiş havasının sıcaklığındaki artış, kompresörün verimliliğini olumsuz etkiler. Özellikle kış mevsiminde, kompresör odası ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkı belirgin şekilde artmaktadır. Kompresör emiş havasının sıcaklığının 5 °C düşürülmesi, kompresörün enerji verimliliğinde % 2'ye kadar tasarruf sağlayabilmektedir (Cabak, B., 2018).

Meteoroloji verilerine göre yaz dönemi için dış ortam sıcaklığı ortalama 27 derece, iç ortam sıcaklığı 20 derece, motor verimi %75, haftalık çalışma saati 144 saat ve yaz dönemi şartlarında toplam 20 hafta olarak çalıştığı kabul edilerek kompresördeki güç düşüm oranı denklem 2.11 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$GDO = 1 - \frac{T_d + 273}{T_c + 273}$$

$GDO = \% 2,4$ güç düşüm oranı hesaplanmıştır.

Kompresör emiş havasının iyileştirilmesine bağlı güç düşüm oranına göre saatteki kazanılan güç denklem 2.12 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$\dot{W}_{kzsaatlik} = \dot{W} \times GDO \times \eta_{motor}$$

$$\dot{W}_{kzsaatlik} = 0,99 \text{ kWh} \text{ saatteki kazanılan güç hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$\dot{W}_{kzsaatlik} = \dot{W} \times GDO \times \eta_{motor}$$

$$\dot{W}_{kzsaatlik} = 0,396 \text{ kWh} \text{ saatteki kazanılan güç hesaplanmıştır.}$$

Kompresörlerin güç düşüm oranına bağlı olarak yıllık geri kazanılan güç denklem 2.13 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$\dot{W}_{kzyillik} = \dot{W}_{kzsaatlik} \times h_{haftalik} \times hf_{yaz}$$

$$\dot{W}_{kzyillik} = 2851,2 \text{ kWh/yıl} \text{ yıllık geri kazanılan güç hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$\dot{W}_{kzyillik} = \dot{W}_{kzsaatlik} \times h_{haftalik} \times hf_{yaz}$$

$$\dot{W}_{kzyillik} = 1.140,48 \text{ kWh/yıl} \text{ yıllık geri kazanılan güç hesaplanmıştır.}$$

Kompresör emiş havasının iyileştirilmesi ile geri kazılan güçler hesaplanmış ve bunun sonucunda yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.14 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre kompresör dairesi 1 için;

$$M_{kzyillik,€} = \dot{W}_{kzyillik} \times E_{malijeti}$$

$$M_{kzyillik,€} = 427,68 \text{ €/yıl} \text{ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.}$$

Kompresör dairesi 2 için;

$$M_{kzyillik,€} = \dot{W}_{kzyillik} \times E_{malijeti}$$

$$M_{kzyillik,€} = 171,1 \text{ €/yıl} \text{ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.}$$

Kompresörlerin emiş havasını daha soğuk bir hava ile beslediğimizdeki toplam yıllık geri kazanılan güç $3.991,68 \text{ kWh/yıl}$ olacaktır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 Ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık $598,78 \text{ €/yıl}$ enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

Kompresörden emiş havasının iyileştirilmesi sonucunda CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 1.7 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.2.4 Kompresörün Basınç Düşürmesi İle Enerji Analizi

Kompresörün çalışma basıncını düşürmek, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Basınç arttıkça kompresörün ihtiyaç duyduğu güç katlanarak artar. Çalışma basıncındaki küçük bir düşüş bile enerji tasarrufu sağlayabilir. Basınç her 1 bar düşürüldüğünde, enerji tüketimi yaklaşık %8 azalabilir (Atlas Copco, 2025). Düşük basınç, sızdırmazlık kayıplarını ve sistemdeki aşınmayı da azaltır. Enerji kazancı hesaplamalarında kompresörün haftalık çalışma saati yaklaşık 100 saat ve bir yıl 52 hafta olarak alınmıştır.



Şekil 3.17. Kompresör Dairesi 1 Etiket Değerleri

Kompresör çalışma basıncını 9,5 bardan, 6 bara düşürülmesi ile tasarruf yüzdesi denklem 2.15 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$TY = \frac{\left[\left(\frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{0,286} - \left(\frac{P_l}{P_{atm}} \right)^{0,286} \right]}{\left[\left(\frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{0,286} - 1 \right]}$$

$$TY = 25,9 \text{ tasarruf yüzdesi hesaplanmıştır.}$$

Kompresörün çalışma basıncının düşürülmesi kaynaklı yıllık geri kazanılan güç denklem 2.16 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$\dot{W}_{kzyıllık} = \dot{W} \times h_{haftalık} \times hf_{yıllık} \times TY (\%) \times \eta_{motor}$$

$$\dot{W}_{kzyıllık} = 79.999,92 \text{ kWh/yıl yıllık geri kazanılan güç hesaplanmıştır.}$$

Kompresör basınç düşürülmesine bağlı yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı denklem 2.17 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$M_{kzyıllık,€} = \dot{W}_{kzyıllık} \times E_{malıyeti}$$

$M_{kzyıllık,€} = 11.999,99 \text{ €/yıl}$ yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 Ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 11.999,99 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

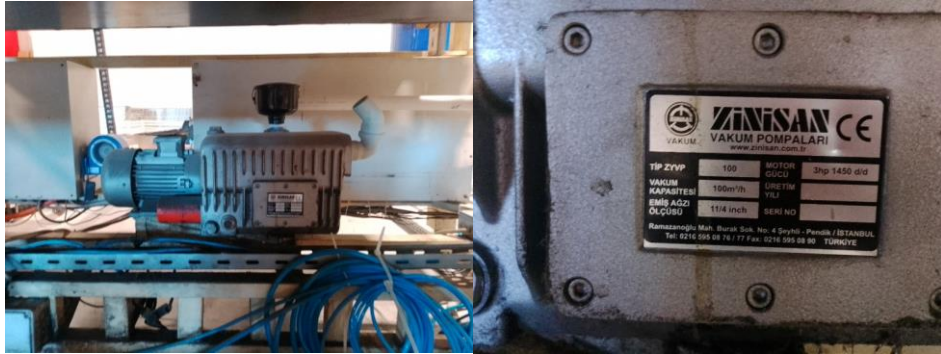
Kompresörden basınç set değerinin düşürülmesi sonucunda yıllık CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 34,1 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.2.5 Vakum Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular

Mevcut sistemde kullanılan vakum pompasının yerine invertörlü olup, üzerindeki yazılım ile istediğimiz vakum aralıklarında çalışıp, ihtiyaç olmadığına kendini kapatıp enerji tüketimini tamamen kesen Atlas Copco marka vakum pompası önerilmektedir. Bu önerilen vakum pompası mevcutta kullanılan vakum pompasına göre yaklaşık % 50 enerji tasarrufludur.



Şekil 3.18. Mevcut vakum pompasının görünümü ve etiket değerleri

Yağlı paletli pompalarda, palet aşınmasından kaynaklı minimum %15 verim kaybı yaşanır ve mevcut pompa $85 \text{ m}^3/\text{h}$ yaklaşık debi vermektedir. Fakat biz çalışmalarımızda mevcut pompanın, etiket değerine göre, paletlerinin hiç aşınmadığını ve verim kaybı olmadığını düşündüğümüzde 2.2 kWh güç ile $100 \text{ m}^3/\text{h}$ debi sağlamaktadır.

Mevcut pompa yerine yeni nesil Atlas Copco marka, kurulu gücü 7.5 kWh ve $560 \text{ m}^3/\text{h}$ debi sağlayan vakum pompası seçilmiştir. Mevcutta kullandığımız

pompanın debisini verebilmek için hiç durmadan sürekli çalışsa bile 1.3 *kWh* tüketim olacaktır. Bunun yanında invertör sayesinde, pompa kendini talebe göre kısır veya kapatacağı için yaklaşık yüzde %35 daha verimli olacaktır. Vakum pompası makinelerinde her bir ürün için yaklaşık 15 saniye vakum yapılmaktadır. Mevcut bu dört makinede 3 vardiyada toplam 1200 adet üretim yapılmaktadır. Bu da vakum pompasının günde yaklaşık 5 saat çalıştığını ve toplam 11 *kWh* enerji tüketeceğini gösterir. Yeni nesil vakum pompası ile bu ihtiyacı yaklaşık 6,5 *kWh* ile sağlanacaktır. Bu durum yeni pompa ile günde 4,5 *kWh/gün* enerji tasarrufu sağlanacaktır. Vakum pompasının verimli olan ile değişimi yapıldığında toplam 1.575 *kWh/yıl* tasarruf edecektir.

Önerilen bu vakum pompası, mevcut pompanın kapasitesinden yaklaşık 6 kat daha fazla debiye sahip olduğundan dolayı vakum sürelerinde belli oranlarda kısalma meydana gelecek olup, buna rağmen üretim adetlerinde artış olacaktır. Ayrıca daha derin vakumlarda daha fazla debi olduğu için ürüne daha kolay şekil verip kalıplardaki ince ve hassas işlemlerin parçaya işlenmesi daha rahat olacaktır. Kapasitesi yüksek olduğu için ilerdeki yatırımlarda tekrar bir vakum pompası almadan merkezi sistemden yeni makineler de beslenebilecektir.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 Ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 236,25 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

İşletmedeki vakum makinelerindeki merkezi vakum sisteminin iyileştirilmesi ile toplam yıllık CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 0,671 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

Tablo 3.10. Vakum pompası değişim sonrası enerji kazancı ve geri ödeme süresi

	Mevcut Vakum Pompası	Önerilen Vakum Pompası
Vakum Pompası Markası	Zinisan	Atlas Copco
Vakum Pompası Tipi	Yağlı	GHS 900 VSD+
Vakum Pompası Gücü	2,2 kW	7,5 kW
Vakum Pompası Debisi	100 m ³ /h	560 m ³ /dk
Günlük Tüketilen Enerji	11 kW	6,5 kW
Günlük Kazanılan Toplam Enerji (kW)	4,5 kW	
Yıllık Kazanılan Toplam Enerji (kW)	1.575 kW	
Yıllık Kazanılan Toplam Kazanç (€)	236,25 €	
Toplam Yatırım Maliyeti (€)	23.840,00 €	
Geri Ödeme Süresi (yıl)	15,14 (yıl)	

3.2.6 Yalıtım Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular

Isı izolasyonu, endüstriyel tesisler açısından kritik öneme sahiptir. İzolasyon, tesislerdeki ekipmanların ihtiyaç olan yerlerinin enerji kaybını minimize etmek amacıyla uygulanan bir sistemdir. Isı transferini azaltarak enerji kayıplarını önler ve prosesin enerji verimliliğini artırır. Endüstriyel tesislerde yapılan bu işlem, endüstrinin maliyetlerini azaltırken aynı zamanda çevresel etkiyi de minimize eder. Daha az enerji tüketimi, karbon emisyonlarının azalmasına ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar.

Fabrikada yeşil çatı bölümünde 4 adet vakum makineleri mevcuttur. Bu makinelerin her birinde 120 adet 750 watt'lık rezistans vardır. Bu rezistanslar hareketli bir araba üzerinde olup, kalıp üzerine gelip yarı mamülün şekil almasına ihtiyaç olan sıcaklığı kalıpta yakalayana kadar beklemekte olup, sonrasında rezistansların bulunduğu araba kalıp üzerinden ayrılmakta ve sonrasında kalıplar birleştirilerek ürün elde edilmektedir. Zamanla bu rezistansların bulunduğu arabanın ısı kaybını önlemek amacıyla kaplanan izolasyon plakaları deforme olmuş ve sonrasında ısı kayıpları nedeniyle kalıpların istenilen sıcaklığa gelme süreleri uzamıştır. Her bir makinenin kuruluşunda kalıpta istenilen sıcaklığı ne kadar sürede geldiği bilgileri idareden alınmıştır. İzolasyonların deforme sonrası kalıpların

istenilen sıcaklığı ne kadar sürede geldiği makine başındaki operatör ve dijital sistemlerden alınmıştır. Bu makineler günde ortalama 100 adet ürün çıkarmaktadır.

Tablo 3.11. Vakum makinelerinde yalıtım öncesi enerji tüketimi tablosu

Yalıtım Öncesi				
Makine No'su	Vakum Makines i 1	Vakum Makines i 2	Vakum Makines i 3	Vakum Makines i 4
Kalıp Isınma Süresi (sn)	180	250	180	210
Günlük Üretim Adeti (adet)	300	300	300	300
Makinedeki Rezistans Sayısı (adet)	120	120	120	120
Yıllık Çalışma Gün Sayısı (gün)	350	350	350	350
Rezistans Kapasitesi (kW)	0,75	0,75	0,75	0,75
Elektrik Maliyeti (€/kWh)	0,15	0,15	0,15	0,15
Günlük Tüketilen Enerji (kW)	1.350	1.875	1.350	1.575
Yıllık Tüketilen Enerji (kW)	472.500	656.250	472.500	551.250
Toplam Günlük Tüketilen Enerji (kW)	6.150,00			
Toplam Yıllık Tüketilen Enerji (kW)	2.152.500,00			



Şekil 3.19. Vakum makinelerinden genel bir görünüm



Şekil 3.20. Vakum makinelerindeki yalıtım probleminden görünüm

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 yılı toplam elektrik tüketimi 3.962.173,8 *kWh/yıl*'dır. Vakum makinelerinin yalıtımları sonucunda işletmeye 304.200,0 *kWh/yıl* kazanç sağlamış olup bunun sonucunda işletmede 2023 yılında tüketilen elektriğin yaklaşık olarak % 7,7 'si vakum makinelerinin yalıtımından kaynaklı enerji tasarrufundan elde etmiş olacaktır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 ağustos ayı tarifesine göre yıllık enerji kazancı tasarruf miktarı yaklaşık 45.630 €/yıl tasarruf edecektir.

Tablo 3.12. Vakum makinelerinde yalıtım sonrası enerji tüketimi tablosu

Yalıtım Sonrası				
Makine No'su	Vakum Makines i 1	Vakum Makines i 2	Vakum Makines i 3	Vakum Makines i 4
Kalıp Isınma Süresi (sn)	150	220	140	180
Günlük Üretim Adeti (adet)	300	300	300	300
Makinedeki Rezistans Sayısı (adet)	120	120	120	120
Yıllık Çalışma Gün Sayısı (gün)	350	350	350	350
Rezistans Kapasitesi (kW)	0,75	0,75	0,75	0,75
Elektrik Maliyeti (€/kWh)	0,15	0,15	0,15	0,15
Günlük Tüketilen Enerji (kW)	1.125	1.650	1.050	1.350
Yıllık Tüketilen Enerji (kW)	393.750	577.500	367.500	472.500
Toplam Günlük Tüketilen Enerji (kW)	5.175,00			
Toplam Yıllık Tüketilen Enerji (kW)	1.811.250,00			

Tablo 3.13. Vakum makinelerinde yalıtım öncesi ve sonrası kazanç tablosu

	Yalıtım Öncesi	Yalıtım Sonrası
	Vakum 1-2-3-4	Vakum 1-2-3-4
Elektrik Maliyeti (€/kWh)	0,15	0,15
Toplam Günlük Tüketilen Enerji (kW)	6.150,00	5.175,00
Toplam Yıllık Tüketilen Enerji (kW)	2.152.500,00	1.811.250,00
Yıllık Kazanılan Toplam Enerji (kW)	341.250,00	
Yıllık Kazanılan Toplam Kazanç (€)	51.187,50 €	
Toplam Yatırım Maliyeti (€)	32.000,00 €	
Geri Ödeme Süresi (yıl)	0,62 (yıl)	

İşletmedeki vakum makinelerindeki rezistans bölümü izolasyon plakalarının değişimi ile toplam yıllık CO_2 salınımında öngörülen azalma denklem 2.23 ile hesaplanır.

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 129,589 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

Bu enerji tasarrufuna ek olarak üretim kapasitesi günlük 1200 adet vakumlanmış ürün yapıyor iken, yalıtım sonrası bu kapasite 1465 adete çıkacaktır. Böylece üretim yüzde % 22 artacaktır.

3.2.7 Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen Bulgular

İşletmede mevcutta 241 adet 75 W'lık toplam 241 adet led aydınlatma armatürü bulunmaktadır. Bu aydınlatmaların yerine 67 W'lık led aydınlatma armatürü ile değişimi önerilmektedir. Fakat işletme daha önce led aydınlatmaya geçtiğinden ilk yapılan tasarruf miktarı ve geri ödeme süresine göre çok uzun sürede kendini amorti edebilir. Günlük çalışma süresi 24 saat, yıllık çalışma gün sayısı 350 gün/yıl, enerji maliyeti $E_{maliyeti} = 0,15 \text{ €/kWh}$ olarak alınmıştır.

Tablo 3.14. Bölümlere göre aydınlatma sayıları ve güçleri

BÖLÜMLERE GÖRE AYDINLATMA SAYILARI VE GÜÇLERİ		
Bölüm	Aydınlatma Sayısı (adet)	Aydınlatma Gücü (watt)
Üretim Alanı Üst Kat	105	75 W
Depo Üst Kat	34	75 W
C Blok Üretim Alanı	30	75 W
Üretim Alanı Alt Kat	45	75 W
Kimyasal Üretim Alanı	27	75 W
Toplam	241	

Tablo 3.15. Mevcut durum ile yeni nesil led aydınlatmanın karşılaştırılması

	Mevcut Durum	Önerilen Durum
Kullanım Saat/Gün	24	24
Armatür Adeti	241	241
Yıldaki Gün	350	350
Led Ampül Kapasitesi (Watt)	75	67
Elektrik Birim Maliyet (€/kWh)	0,15 €	0,15 €
Armatür Birim Maliyet (€)	0,00 €	134,00 €
Toplam Yıllık Elektrik Kullanımı (kW)	151.830,00	135.634,80
Toplam Yıllık Elektrik Ödemesi (€)	22.774,50 €	20.345,22 €
Toplam Elektrik Tasarrufu	11,90%	
Toplam Yatırım Tutarı (€)	32.294,00 €	
Yatırım Geri Dönüş Süresi (Ay)	185,18 (ay)	
Yatırım Geri Dönüş Süresi (Yıl)	15,43 (yıl)	

Elimizdeki verilere göre hesapladığımızda mevcut durumda 130.140,0 kWh/yıl, seçmiş olduğumuz led ile yıllık toplam 116.258,0 kWh/yıl tüketim olmaktadır. Yıllık toplam 13.882,0 kWh/yıl tasarruf edilecektir. Toplam yatırım tutarı ise 32.294,8 €/yıl'dır. Toplam elektrik tasarrufu %11,9'dur. Geri ödeme süresi ise 15,5 yıldır.

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 2.082,3 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.

İşletmedeki mevcut led aydınlatmalarının daha verimli led aydınlatma armatürü ile değişimi sonrasında toplam yıllık CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanır.

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 5,914 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$

3.2.8 Soğutma Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen

Bulgular

Yeni teknolojiye sahip, az elektrik harcayan çiller cihazları tercih edilmelidir. İhtiyaca göre uygun büyüklükte cihaz seçmek çok önemlidir. Gereğinden büyük ya da küçük cihaz fazla enerji harcar. Pompa ve fan gibi motorlar, gerektiği kadar çalışmalı. Bunun için hızlarını ayarlayan akıllı sistemler kullanılabilir. Bu sayede fazla enerji boşa gitmez. Cihazların temiz ve bakımlı olması, daha az enerjiyle daha iyi soğutma sağlar. Özellikle ısı alışverişi yapan yüzeyler (örneğin borular ve eşanjörler) kirlenirse verim düşer. Dış hava serinse, çilleri çalıştırmadan doğrudan dış havayla soğutma yapılabilir. Bu sisteme “serbest soğutma” denir ve ciddi tasarruf sağlar. Soğutma ihtiyacı olmayan saatlerde çilleri kapalı tutmak gerekir. Bu, otomatik zamanlayıcılarla kolayca yapılabilir. Eğer birden fazla çiller varsa, en az enerji harcayan cihaz öncelikli çalıştırılmalıdır. Çillerin soğutma sırasında ortaya çıkardığı sıcaklık, sıcak su üretimi gibi başka işler için kullanılabilir. Böylece hem soğutma hem ısıtma bir arada yapılır, tasarruf sağlanır. Sistemin ne kadar enerji harcadığını düzenli olarak izlemek, gereksiz harcamaları fark etmeye yardımcı olur. Gerekirse sistem ayarlarında düzeltmeler yapılabilir.

3.2.9 Elektrik Sistemlerinde Enerji Analizi İle Elde Edilen

Bulgular

Elektrik panoları tozdan ve aşırı sıcaktan olumsuz etkilenir. Bu durum, hem panonun içinde bulunan ekipmanların ömrünü kısaltır hem de enerji kaybına ve arızalara yol açar. Toz, pano içindeki cihazların üzerine birikir. Bu birikinti ısıyı hapseder, cihazlar ısınır. Zamanla kısa devre, yanma, kontak arızası gibi tehlikeli durumlara neden olabilir. Pano içi sıcaklık çok yükselirse cihazlar aşırı ısınır. Bu

da verimin düşmesine, erken arızalara, hatta yangın riskine yol açar. Özellikle yaz aylarında ya da sıcak ortamlarda ciddi sorun olur. Bunun için IP koruma sınıfı yüksek panolar (örneğin IP54, IP65) kullanılmalı. Bunlar suya ve toza karşı daha dayanıklıdır. Pano içine filtreli havalandırma kapağı takılabilir. Ortam tozluysa pano içine pozitif basınçlı fan koyarak toz girişi engellenebilir. Düzenli temizlik yapılmalı. Filtreler belirli aralıklarla değiştirilmelidir. Pano içine termostat kontrollü fan veya klima sistemi eklenebilir. Pano mümkünse gölgelik alanlara kurulmalı, direkt güneş almamalı. Alt ve üst menfezli doğal havalandırmalı panolar kullanılabilir. Bunlara ek olarak ilk başta yapılması gereken proses makinelerinin elektrik panoları kapalı bir ortam altına alınmalıdır. Örneğin; alüminyum profil doğramalar ile yapılabilir. Daha sonra bu alan klima ile soğutularak sıcaklık belli bir seviyede tutulmalıdır.



Şekil 3.21. Geogrid makinesi elektrik panosunu görünümü

Elektrik sistemlerinin termal kamera ile belli aralıklarla kontrolleri, kestirimci bakım sisteminin önemli etkenleri arasında yer alır. Fabrikada bulunan elektrik panolarının içleri, elektrik kablolarının yoğun olarak çekildiği kablo tavaları, kompanzasyon panoları, elektrik motorları gibi etkenler belirli periyotlar ile bu iş ile ilgili eğitim almış personeller tarafından kontrol edilerek alınan sonuçlar analiz edilmelidir. Örneğin bir elektrik motorunun sıcaklığının yükselmesi ve gerekli incelemelerin yapılarak makinenin duruş anının kollanarak bakımlarının yapılması ya da ani bir duruş ile motorun bakımın yapılarak daha fazla üretim

kayıplarının olmamasının önüne geçilir. Bu gibi tespitler enerji verimliliği ve üretim verimliliği açısından önemlidir.

3.2.10 Güneş Enerji Sisteminin Enerji Analizi İle Elde Edilen

Bulgular

İşletmenin toplam çatı alanı yaklaşık $7500 m^2$ 'dir. Bu alan için Pvsyst programı ile panel seçimi, sürücü seçimi gibi parametreler girilerek tasarım yapılmıştır. Bu tasarım aşamasında monokristal hücrelere sahip PV paneller tercih edilmiştir. Bu doğrultuda PV panel gücü 550 Wp, Solar Space TR marka, Hücre Tipi Half-Cut monokristal 182 mm bifacial çift cam PV panelleri ile 33 derecede yerleşim çalışması yapılmıştır. 1560 adet 550 Wp gücünde PV panel kullanılması öngörülmüş olup, toplam DC kurulum gücü 858 kWp olarak hesaplanmıştır,

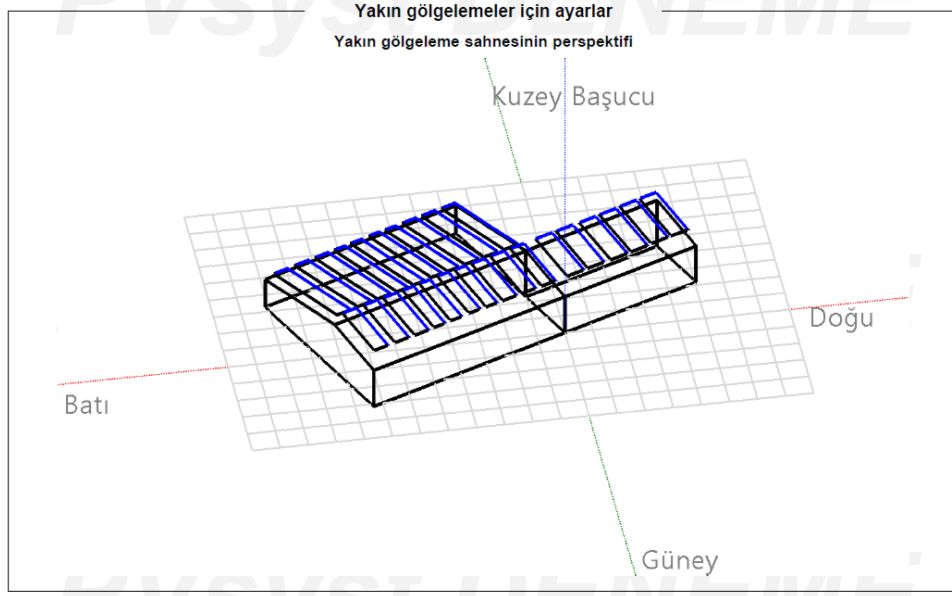
Tablo 3.16. PVsyst ile 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerji

Güneş Açısı	33 °C sabit panel	Birim
Aylar		
Ocak	15.840,00	kWh
Şubat	31.560,00	kWh
Mart	54.820,00	kWh
Nisan	84.830,00	kWh
Mayıs	86.220,00	kWh
Haziran	83.940,00	kWh
Temmuz	106.090,00	kWh
Ağustos	109.130,00	kWh
Eylül	72.340,00	kWh
Ekim	44.430,00	kWh
Kasım	30.650,00	kWh
Aralık	12.220,00	kWh
Toplam	732.070,00	kWh

İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 yılı toplam elektrik tüketimi 3.962.173,8 kWh/yıl'dır. İşletmede kurulumu sağlanacak 1560 adet güneş panellerinden işletme çatısı üzerine 33 derecede PVsyst programı ile hesaplamalar yapılmıştır. 33 derece sabit açılı olarak PV panellerin üretebileceği enerji yaklaşık 732.070,0 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. İşletme için enerji tasarrufu ve karbon

ayak izi hesaplamalarına 10 derece sabit açılı güneş panelleri sisteminden elde edilen değerler ile devam edilecektir. İşletmede 2023 yılında tüketilen elektriğin yaklaşık olarak %18,47'sini güneş enerjisinden temin etmiş olacaktır.

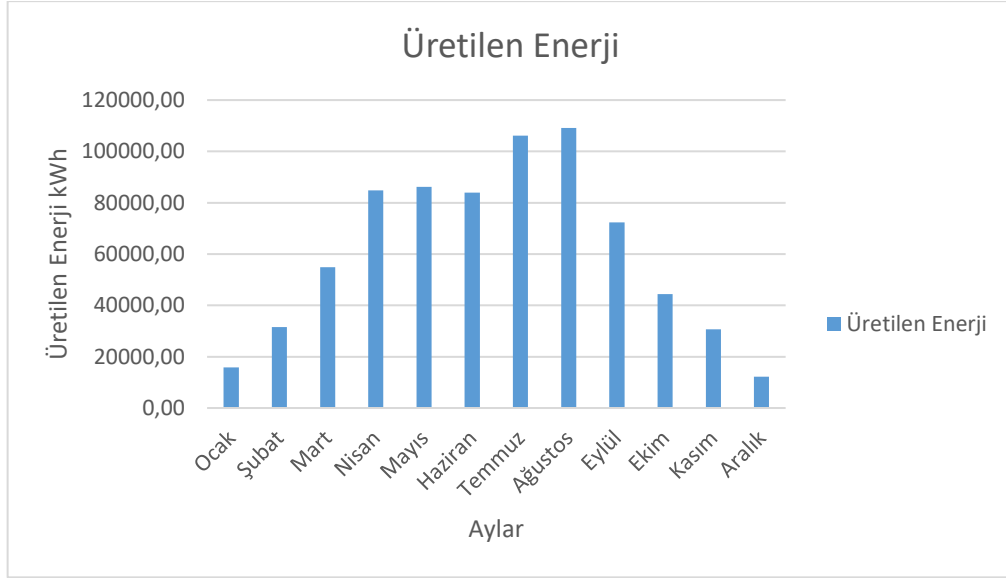
İşletmede Eylül 2022 – Ağustos 2023 tarihleri arasında 2023 Ağustos ayı tarifesine göre yıllık yaklaşık 109.810,5 €/yıl enerji tüketim maliyetinden tasarruf edecektir.



Şekil 3.22. 33 derece sabit panellerin perspektif görünümü



Şekil 3.23. 33 derece sabit panellerinin çatı yerleşiminin görünümü



Şekil 3.24. 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerjinin grafik ile gösterimi

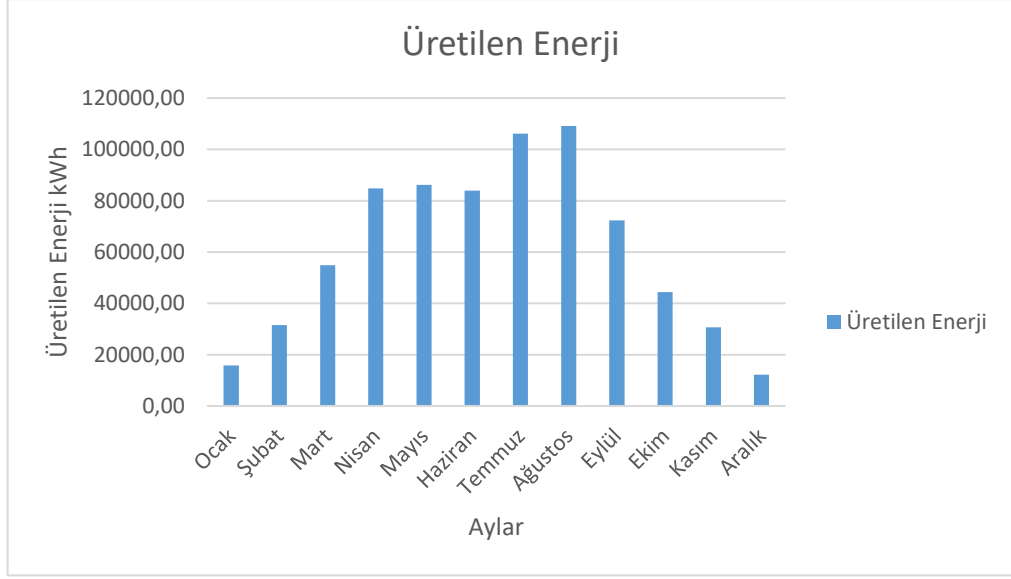
Tablo 3.17. Güneş panelleri yatırımı ve geri dönüş süresi

	Güneş Enerjisi Sistemi
Elektrik Maliyeti (€/kWh)	0,15
Yıllık Kazanılan Toplam Enerji (kW)	732.070,00
Yıllık Kazanılan Toplam Kazanç (€)	109.810,50 €
Toplam Yatırım Maliyeti (€)	489.185,00 €
Geri Ödeme Süresi (yıl)	0,62 (yıl)

İşletmede çatı üzeri 33 derece sabit açılı güneş paneli sistemi yapıldığında toplam yıllık CO_2 salınımında öngörülen azalma miktarı denklem 2.23 ile hesaplanarak aşağıda verilmiştir. Buna göre;

$$CO_{2salınımı} = \dot{W}_{kzyıllık} \times 0,426$$

$$CO_{2salınımı} = 311,862 \text{ ton } CO_2 \text{ azalma olacaktır.}$$



Şekil 3.25. 33 derece sabit açılı panellerin aylık ürettiği enerjinin grafik ile gösterimi

3.2.11 Karbon Ayak İzi Analizi İle Elde Edilen Bulgular

Gerçekleştirilen enerji verimliliği çalışmaları sonucunda farklı bölümlerde önemli miktarda karbon emisyonu azaltımı sağlanmıştır. Bu kapsamda yapılan uygulamalar ve yıllık ton bazında sağlanan CO₂ tasarrufları şu şekildedir:

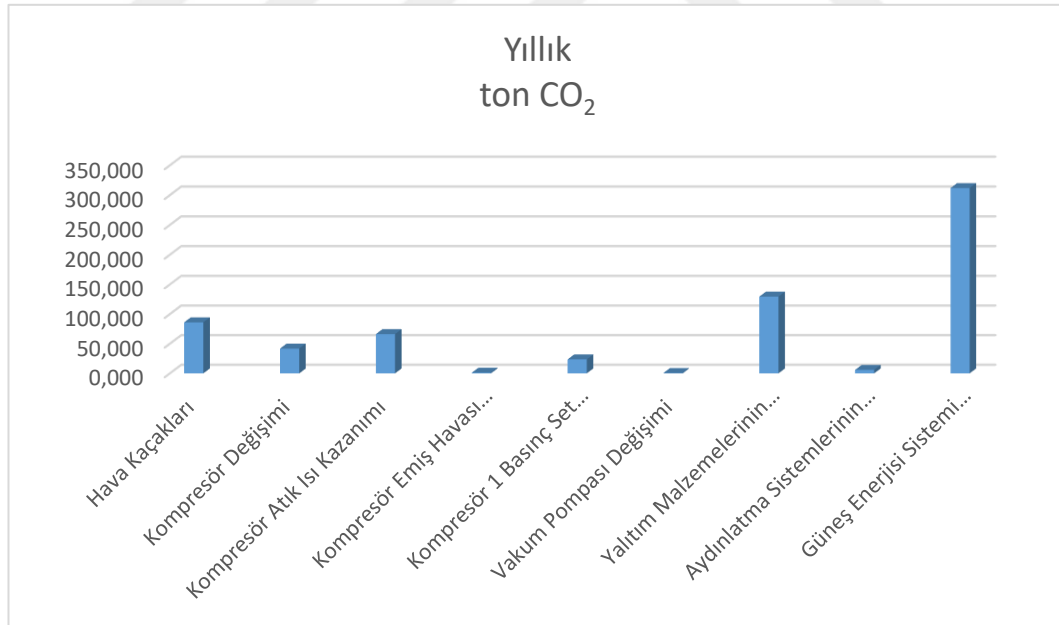
Hava kaçaklarının önlenmesiyle yılda 81,747 ton CO₂ emisyonu azaltılmıştır. Kompresör değişimi sayesinde 41,833 ton CO₂, kompresör atık ısısının geri kazanımı yoluyla ise 184,71 ton CO₂ tasarrufu sağlanmıştır. Kompresör emiş havasının iyileştirilmesiyle 1,7 ton CO₂, kompresörün 1'in basınç set değerinin düşürülmesiyle de 34,1 ton CO₂ emisyon azaltımı elde edilmiştir.

Vakum pompasının daha verimli bir modelle değiştirilmesi sonucu 0,671 ton CO₂, yalıtım malzemelerinin yenilenmesiyle ise 129,589 ton CO₂ tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, aydınlatma sistemlerinin iyileştirilmesiyle 5,914 ton CO₂, güneş enerjisi sistemi kurulmasıyla da yıllık 311,862 ton CO₂ emisyon azaltımı gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu uygulamaların toplamında, yıllık bazda yaklaşık 792,126 ton CO₂ emisyonunun atmosfere salımı engellenmiştir. Bu sonuç, sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk açısından oldukça anlamlı bir kazanım olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 3.18. Enerji Analizi Sonucu Karbon Ayak İzi Tablosu

Enerji Tasarruf Edilen Bölümler	Yıllık ton CO ₂
Hava Kaçakları	81,747
Kompresör Değişimi	41,833
Kompresör Atık Isı Kazanımı	184,71
Kompresör Emiş Havası İyileştirilmesi	1,7
Kompresör 1 Basınç Set Değeri Düşürülmesi	34,1
Vakum Pompası Değişimi	0,671
Yalıtım Malzemelerinin Değişimi	129,589
Aydınlatma Sistemlerinin İyileştirilmesi	5,914
Güneş Enerjisi Sistemi Kurulması	311,862



Şekil 3.26. Enerji analizi sonucu karbon ayak izi grafiği

4. TARTIŞMA

Bu tez çalışması, bir sanayi tesisinde enerji verimliliği uygulamalarının teknik, ekonomik ve çevresel etkilerini çok yönlü olarak ele almıştır. Kompresör sistemleri, basınçlı hava tesisatı, elektrik altyapısı, aydınlatma, güneş enerjisi uygulamaları, yalıtım çalışmaları ve soğutma sistemleri üzerinden detaylı analizler yapılmıştır.

Kompresör sistemlerinde, dört başlık altında iyileştirme yapılmıştır:

- Basınç düşürülerek, her 1 bar düşürülmesi ile yaklaşık %8 enerji tasarrufu sağlanabileceği gözlemlenmiştir.
- Eski kompresörlerin verimli modellerle değişimi, yükte-boşta dengesizliğini ortadan kaldırarak tüketimi düşürmüştür.
- Emiş havasının dış ortamdan alınması, sıkıştırma verimliliğini artırarak enerji tüketimini azaltmıştır.
- Atık ısı geri kazanımıyla, sıcak su üretimi, doğalgaz gibi alanlarda ne kadar enerji kullanabileceğimiz hesaplanmıştır.

Basınçlı hava sistemlerinde, kaçak tespiti ve basınç optimizasyonu yapılarak ciddi tasarruf potansiyeli açığa çıkarılmıştır. Ayrıca hava tabancaları ve pnömatik ekipmanlarda da verimliliğin artırılabilceği gözlemlenmiştir.

Elektrik sistemleri, açısından, elektrik panolarının, elektrik motorlarının, elektrik kablolarının ve kompanzasyon sistemlerinin doğru çalışması incelenmiş ve enerji kalitesini artırıcı öneriler geliştirilmiştir.

Aydınlatma sistemlerinde, led dönüşümü ile birlikte çok düşük olmakla birlikte daha verimli bir led seçeneği sunulmuş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Güneş enerjisi analizinde, PVsyst programıyla yapılan simülasyonlarda 33° eğim açısı ile hesaplamalar yapılmış ve yüksek verim sağlandığı görülmüştür.

Yalıtım uygulamaları, proses ekipmanlarında yapılan dış yüzey izolasyonları sayesinde ciddi oranda ısı kaybı önlenmiş, elektrikle çalışan ısıtıcı yükleri azaltılmıştır.

Soğutma sistemlerinde, kondenser temizliği, kompresör zamanlamaları ve fan kontrolleri gibi faktörler analiz edilmiş, sistemin doğru çalışmasıyla enerji tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir.

Tüm bu uygulamaların ortak noktası, hem ekonomik kazanç (tasarruf) hem de çevresel fayda (emisyon azalımı) sağlamalarıdır. Enerji verimliliği, doğrudan

karbon salınımını düşürmüş; işletmenin enerji performansı da sürdürülebilir biçimde gelişmiştir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonunda yapılan enerji analizleri ve uygulama önerileriyle şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Kompresör basınç seviyesi, emiş havası iyileştirmesi ve atık ısı kullanımı ile elektrik ve doğalgaz tüketiminde belirgin tasarruf sağlanmıştır. Bunların daha detaylı analiz edilerek uygulanabilirliğin kalıcı hale getirilmesi sağlanmalıdır.

Önerilen kompresörlerin, değişken devir teknolojisi sayesinde yükboş çalışma süresini tamamen ortadan kaldırmakta ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yıllık bazda yüksek enerji tasarrufu sağlanmakta ve bu da hem işletme maliyetlerinde düşüş hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir kazanım sunmaktadır.

Basıncılı hava sistemlerindeki hava kaçağın testleri belirli aralıklar ile yapılarak kontrol altına alınmalı ve ölçüm ve izleme sistemleri kurularak bu kaçağın erken tespit edilmesi sağlanmalıdır.

Elektrik sistemlerinde yapılan tespitlerde elektrik motorları, elektrik panoları, elektrik kablo sistemleri ve kompanzasyon panoları eğitimli kişiler ile belirli bir periyodik izleme ile kontrol altına alınmalıdır. Özellikle kompanzasyon panolarının kontrolü ile kaliteli ve düşük kayıplı bir enerji kullanımı sağlanmalıdır.

Aydınlatma sistemlerinde led dönüşünü daha verimli bir led ile değişiminin yapılması fazla bir verimlilik sağlamasa da bu sistemler otomasyon sistemleriyle aydınlatma giderleri azaltılması sağlanmalıdır.

Güneş enerjisi sistemlerinin uygulanabilirliği doğrulanmış, doğru panel açısı ile yıllık elektrik ihtiyacına büyük katkı sağladığı görülmüş olup bu sistemin daha detaylı analiz edilerek devreye alınması sağlanmalıdır.

Yalıtım uygulamaları ile yüzey ısı kayıpları önlenmiş olup makinenin ısınma süreleri yakından belli aralıklar ile takip edilerek yalıtımların ömrünün kontrolü sağlanarak değişimleri sağlanmalıdır.

Soğutma sistemlerinde verimli çalışma koşulları oluşturularak, fan kontrolü ve kondenser bakımı ile birlikte verimli şekilde çalıştırılmalıdır.

Bu iyileştirmeler sonucunda işletmede hem enerji maliyetleri düşmüş hem de çevresel etki azalmış, yani ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik birlikte sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akdağlı, B. (2017). *Avrupa ülkelerinde sektörel enerji verimliliği ve ekonomik büyüme ilişkisi* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1), 150-168.
- Aydoğduoğlu, O. *Enerji verimliliği sağlamada akıllı aydınlatma sistemi uygulaması: Manisa Celal Bayar Üniversitesi rektörlük binası örneği* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Atlas Copco. (2018). *GA 30+-90, GA 37-90 VSD rotary screw compressors: Technical specifications*. Retrieved from <https://www.atlascopco.com>
- Cabak, B. (2018). Tekstil fabrikasında enerji verimliliği uygulamaları.
- Transparency, C. (2020). Climate transparency report 2022. URL: <https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/the-climate-transparency-report-2020#1531904804037-423d5c88-a7a7>.
- Coşgun, G. (2023). *Tekstil sektöründe karbon ayak izi hesaplaması ve analizi* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).
- Dogan, H., & Yilankiran, N. (2015). The potential of energy efficiency and projection of Turkey. *Journal of Institute of Science of University of Gazi*, 3, 375-384.
- Düzgün, B. (2014). Türkiye'nin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi: beyaz sertifikalar sisteminin Türkiye'ye uygulanabilirliğinin incelenmesi.
- Ediz, S. B. (2023). *Otomotiv yan sanayisinde parça üretim faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları, karbon ayak izi hesaplamaları ve enerji verimliliği uygulama önerileri* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).
- Engin, P. (2018). Türkiye'de enerji yönetim sistemi uygulamalarının sanayi kuruluşları ve sanayide enerji verimliliği projeleri açısından etkinliklerinin değerlendirilmesi.
- Erbil, Z. C. (2022). Dış mekân aydınlatmasında enerji verimliliğinin Kelebekler Vadisi Parkı (Konya) örneğinde irdelenmesi.
- Eser, O. (2013). *Aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliğinin incelenmesi* (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Güleç, M. (1999). Pnömatik Sistemlerde Tasarruf Önlemleri ve Yöntemleri. *MMO I. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 3-5.
- Güneş, S., & Hacıoğlu, R. (2024). Enerji Gereksinimlerine Dayalı Fotovoltaik Güneş Enerji Santrali Analizi ve Tasarımı. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 14(2), 97-110.
- Haydaroğlu, C. (2017). Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralinin performans analizi. *Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi*, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
- İbrahim, N. I., Al-Farayedhi, A. A., & Gandhidasan, P. (2017). Experimental investigation of a vapor compression system with condenser air pre-cooling by condensate. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1255-1263.
- International Energy Agency. (2021). *Key world energy statistics 2021*. Paris, France: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable capacity statistics 2023*. Abu Dhabi: IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications>

- International Atomic Energy Agency. (2023). *Nuclear Power Reactors in the World Report 2023*. Vienna: IAEA. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/14762/nuclear-power-reactors-in-the-world-report-2023>
- Kalaycı, E., & Çağlar, E. (2021). TEKSTİLDE BOYAMA ATIKSUYUNDAN ISI GERİ KAZANIMI: GERÇEK İŞLETME ÖRNEĞİ. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 609-628.
- Kandasamy, C. P., Prabu, P., & Niruba, K. (2013, December). Solar potential assessment using PVSYST software. In *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)* (pp. 667-672). IEEE.
- Karataş, M. A. (2012). Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği: Bir Çelik Fabrikasının Basınçlı Hava Denetleme Çalışması. *Tesisat Mühendisliği-Sayı*.
- Kaya, M. (2012). Sanayide enerji verimliliği potansiyeli ve basınçlı hava sistemlerinde verimlilik.
- Kaya, D., & Güngör, C. (2002). Sanayide enerji tasarruf potansiyeli-II. *Mühendis ve Makina*, 43(515), 36-44.
- Kaya, D. (2014). *Sanayide enerji yönetimi ve enerji verimliliği: uygulamalı örneklerle*. Umuttepe Yayınları.
- Kavak, H. *Tekstil terbiye fabrikalarında enerji kayıplarının belirlenmesi ve kızgın yağlı merkezi kazandan atık enerji geri kazanım uygulaması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kiyılmaz, M. B. (2019). *Sanayide enerji yönetimi esasları ve enerji verimliliğinin araştırılması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
- Küçükyağlıoğlu, G. (2020). *Bir otomotiv yan sanayi tesisinin basınçlı hava sisteminde enerji tasarrufu uygulaması* (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi).
- McKane, A., Perry, W., & Taranto, T. (2016). *Basınçlı Hava Sistemleri* (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, UNIDO, Sanayide Enerji Verimliliğinin Artırılması Projesi).
- Meral, M. E., Teke, A., & Tümay, M. (2009). Elektrik tesislerinde enerji verimliliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 14(1).
- Meşin, V. (2020). Türkiye'de Enerji Verimliliği Politikaları Özelinde Konya İlindeki Firmaların Enerji Verimliliği Önem Ve Eğilim Düzeyleri.
- Radgen, P. (2006, September). Efficiency through compressed air energy audits. In *Energy audit conference* (pp. 11-13).
- Sapmaz, S. (2014). *Basınçlı hava sistemlerinde enerji tasarrufu uygulaması* (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Sapmaz, S., & Kaya, D. (2017). Basınçlı hava sistemlerinde enerji verimliliği ve emisyon azaltım fırsatlarının incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 58(689), 23-36.
- SMC Türkiye. (n.d.). *Dijital basınç şalterleri*. 14 Haziran 2025 tarihinde <https://www.smc.eu/tr-tr/products/pressure-control/digital-pressure-switches>
- Sert, M. Ö. (2018). *Tekstil sanayinde enerji verimliliği: Entegre bir tekstil fabrikası örneği* (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Şahin, S. (2022). Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Uygulama Örnekleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Enerji verimliliği eğitim kitabı (Yayın No. 49/V01). EVÇED-TEEDB.
- Yücel, U. (2019). *Aydınlatma sistemlerinde yüksek enerji verimliliği için kontrol sistemi tasarımı ve uygulaması* (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yu, F. W., & Chan, K. T. (2008). Optimizing condenser fan control for air-cooled centrifugal chillers. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(7), 942-953.
- Taşkınoğlu, M. (2011). Termik santrallerde elektrik enerjisi verimliliğinin artırılması-EUAŞ Seyitömer Termik Santrali örneği.
- Tekkol, B. (2019). *Enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki etkisinde enerji verimliliğinin rolü: Türkiye örneği* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü). Terzi,
- Terzi, H. (2020). *Bir cam işleme fabrikasında enerji verimliliğini arttırmaya yönelik bir çalışma* (Master's thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Tosun, İ. B. (2018). *Kamu binaları için enerji etüdü ve verimlilik artırıcı yöntemler* (Master's thesis, Necmettin Erbakan University (Turkey)).
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024, Haziran 5). *Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990-2022* [Veri seti]. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024, Haziran 11). *Sanayi sektörü nihai enerji tüketim istatistikleri, 2023* [Veri seti]. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sanayi-Sektoru-Nihai-Enerji-Tuketim-Istatistikleri-2023-53806>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.). *Enerji verimliliği eğitim kitabı* [PDF dosyası]. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EVCED/tr/EnerjiVerimliliği/Egitimler/Enerji_verimliliği_eğitim_kitabi.pdf