

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASINÇLI HAVA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE
UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Sefa ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Doç. Dr. Şaban PUSAT

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BASINÇLI HAVA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE
UYGULAMA ÖRNEKLERİ**

Sefa ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şaban PUSAT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Şaban PUSAT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali Volkan AKKAYA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yasin KARAGÖZ, Üye
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Şaban PUSAT sorumluluğunda tarafımca hazırlanan basınçlı hava sistemlerinde enerji verimliliği ve uygulama örneği başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sefa ŞAHİN

İmza



Aileme

ve

biricik hayat arkadaşına

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında beni destekleyen çalışma arkadaşlarıma, değerli yöneticilerime ve tüm Atlas Copco Makinaları İmalat A. Ş. ailesine teşekkürlerimi sunarım.

İlköğretim, ortaöğretim, lise, lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım süresince üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime, bu çalışma sırasında beni destekleyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Şaban PUSAT'a ve bizlere her daim ışık olan başöğretmenimiz Mustafa Kemal ATATÜRK'e şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan ve benden desteğini hiç esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Sefa ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	2
2 ENERJİ VERİMLİLİĞİ.....	3
2.1 Dünyanın ve Türkiye'nin Enerji Kullanım Profili	3
2.2 Türkiye'de Enerji Verimliliği	9
2.3 Enerji Performans Sözleşmeleri	12
2.3.1 Tasarruf Garantili EPS	13
2.3.2 Tasarruf Paylaşımlı EPS	14
2.4 Enerji Verimliliği Projelerinde Ölçme ve Doğrulama	15
3 BASINÇLI HAVA KOMPRESÖRLERİ	20
3.1 Basınçlı Hava Kompresör Teknolojileri	20
3.1.1 Pozitif Deplasmanlı Kompresörler	20
3.1.2 Dinamik Kompresörler	27
4 BASINÇLI HAVA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARI	29
4.1 Basınçlı Hava Isı Geri Kazanım Uygulamaları	29
4.2 Basınçlı Hava Kaçak Giderimi	34

4.3	Hız Sürücülü Basınçlı Hava Kompresör Kullanımı	37
4.4	Merkezi Kontrol Cihazı Kullanımı	38
4.5	Uygun Tank Hacmi	41
4.6	Emiş Havaının Soğutulması.....	42
4.7	Basınç Kayıplarının ve İşletme Basıncının Düşürülmesi	44
4.8	Diğer Uygulamalar	46
5	UYGULAMA ÖRNEKLERİ	48
5.1	Basınçlı Hava Kaçak Taramaları	48
5.2	Merkezi Kontrolör Simülasyon Çalışmaları	52
5.2.1	1. Örnek Çalışma	53
5.2.2	2. Örnek Çalışma	64
5.2.3	3. Örnek Çalışma	74
5.3	Isı Geri Kazanım Uygulama Örneği.....	84
5.4	İşletme Basıncının Düşürülmesi	85
5.5	Eski Sabit Devirli Kompresörlerin Yeni Hız Sürücülü Kompresör İle Değişimi.....	89
6	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	99
	KAYNAKÇA.....	101
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	103

SİMGE LİSTESİ

f_{max}	Maximum Çevrim Frekansı
kJ	Kilojul
kW	Kilovat
kWh	Kilovatsaat
Nm^3	Normal metreküp
P_1	Kompresör giriş basıncı
T_0	Depodaki hava sıcaklığı
T_1	Kompresör hava giriş sıcaklığı
T_1	İlk Durumdaki Emiş Havası Sıcaklığı
T_2	Soğutulmuş Emiş Havası Sıcaklığı
V	Tank Hacmi
WR	Kompresör Sıkıştırma İşindeki Azalma Oranı
Q_k	Kompresör Kapasitesi
Δp	Basınç Farkı
ΔT	Sıcaklık Farkı
$^{\circ}C$	Santigrat Derece

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
EPS	Enerji Performans Sözleşmesi
ESCO	Enerji Hizmet Şirketi
EVO	Verimlilik Değerleme Kuruluşu
GSYH	Gayri Safi Yurtiçi Hasılaya
IPMVP	Uluslararası Performans Ölçme ve Doğrulama Protokolü
KTEP	Bin Ton Eşdeğer Petrol
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
SET	Spesifik Enerji Tüketimi
UEVEP	Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı
TEP	Ton Eşdeğer Petrol

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Dünya genelinde toplam birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı [1]	3
Şekil 2.2 Türkiye toplam birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı [1]	4
Şekil 2.3 Dünya elektrik enerjisi tüketim trendi [1]	5
Şekil 2.4 Türkiye elektrik enerjisi tüketim trendi [1]	5
Şekil 2.5 Türkiye elektrik santrali kurulu gücünün yıllara göre değişimi [2].....	6
Şekil 2.6 Dünya enerji tüketim sektörel dağılımı [1]	8
Şekil 2.7 Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı [1].....	8
Şekil 2.8 Bazı ülkelerde enerji yoğunluğu ve kişi başı birincil enerji arzı [5]	10
Şekil 2.9 Türkiye enerji verimliliği alanındaki politika belgeleri ve mevzuatları [5]	11
Şekil 2.10 Enerji performans sözleşme(EPS) aşamaları [7]	13
Şekil 2.11 Tasarruf garantili EPS'de riskler [7]	13
Şekil 2.12 Tasarruf paylaşımlı EPS'de riskler [7]	14
Şekil 2.13 EVO'nun yayımladığı güncel IPMVP belgeleri [8].....	16
Şekil 2.14 IPMVP'nin ülkelere göre kullanım durumu [8].....	16
Şekil 2.15 IPMVP kapsamındaki temel kavramlar [8]	18
Şekil 3.1 Basınçlı hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]	20
Şekil 3.2 Deplasmanlı basınçlı hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]	21
Şekil 3.3 Örnek pozitif deplasmanlı kompresör (pistonlu) [11]	21
Şekil 3.4 Şematik diyaframlı kompresör [11]	22
Şekil 3.5 Yağlı vidalı kompresör elemanının ve tahrik mekanizmasının tipik örneği [11]	23
Şekil 3.6 Yağlı vidalı kompresör akış şeması [11]	24
Şekil 3.7 Yağsız vidalı kompresörün akış şeması [11]	25

Şekil 3.8 Çift dişli kompresörün çalışma prensibi [11].....	25
Şekil 3.9 Spiral kompresör kesit görünüşü [11]	26
Şekil 3.10 Kanatlı kompresör çalışma prensibi [11].....	27
Şekil 3.11 Dinamik basınç hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]	27
Şekil 3.12 3 kademeli santrifüj kompresör [11]	28
Şekil 4.1 Yağlı vidalı kompresör enerji dengesi [12].....	29
Şekil 4.2 Yağsız vidalı kompresör enerji dengesi [12].....	30
Şekil 4.3 Yağlı vidalı kompresör atık ısı geri kazanım kiti akış şeması [12].....	30
Şekil 4.4 Kompresör egzozunun mahal ısıtmasında kullanımı [12]	32
Şekil 4.5 Yağsız vidalı kompresör akış şeması [12]	33
Şekil 4.6 Yağsız vidalı kompresör ısı geri kazanım sistemi [12]	33
Şekil 4.7 Delik çapına göre yaklaşık kaçak miktarı [11].....	35
Şekil 4.8 Ultrasonik akustik kamera [15].....	35
Şekil 4.9 Basınçlı hava kaçaklarının bulunduğu frekans aralığı [16].....	36
Şekil 4.10 Değişken hız sürücülü ve sabit hızlı kompresörlerin farklı kapasitelerde verim karşılaştırılması [3]	38
Şekil 4.11 Yerel kontrolde ve merkezi kontrolde çalıştırılan kompresörlerin ortalama çalışma basınçlarındaki değişim [17]	39
Şekil 4.12 Merkezi kontrolör şematik çalışma şekli [11].....	40
Şekil 4.13 Kompresör egzoz kanalı uygulaması [18]	43
Şekil 4.14 Üretim ve tüketim noktaları arası basınç kaybı [16].....	44
Şekil 4.15 Basınç 7 bar olduğunda delikten çıkan basınçlı hava debileri [22]	45
Şekil 4.16 Basınç 5.5 bar olduğunda delikten çıkan basınçlı hava debileri [22] .	46
Şekil 4.17 Motor gücü ve verim sınıflarına göre verimlilikleri [23].....	47
Şekil 5.1 Örnek basınçlı hava kaçağı-1.....	49
Şekil 5.2 Örnek basınçlı hava kaçağı-2.....	49
Şekil 5.3 Örnek basınçlı hava kaçağı-3.....	50

Şekil 5.4 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi.....	55
Şekil 5.5 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı	55
Şekil 5.6 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba.....	56
Şekil 5.7 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe.....	56
Şekil 5.8 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma	57
Şekil 5.9 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi	57
Şekil 5.10 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar	58
Şekil 5.11 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	59
Şekil 5.12 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	60
Şekil 5.13 1. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	61
Şekil 5.14 1. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	63
Şekil 5.15 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi.....	65
Şekil 5.16 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı	65
Şekil 5.17 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba.....	66
Şekil 5.18 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe.....	66
Şekil 5.19 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma	67
Şekil 5.20 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi	67
Şekil 5.21 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar	68
Şekil 5.22 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	69
Şekil 5.23 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	70
Şekil 5.24 2. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	71
Şekil 5.25 2. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	73

Şekil 5.26 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi.....	75
Şekil 5.27 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı	75
Şekil 5.28 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba.....	76
Şekil 5.29 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe.....	76
Şekil 5.30 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma	77
Şekil 5.31 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi	77
Şekil 5.32 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar	78
Şekil 5.33 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	79
Şekil 5.34 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	80
Şekil 5.35 3. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	81
Şekil 5.36 3. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	83
Şekil 5.37 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi	90
Şekil 5.38 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı	90
Şekil 5.39 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba.....	91
Şekil 5.40 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe	91
Şekil 5.41 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma.....	92
Şekil 5.42 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi	92
Şekil 5.43 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar.....	93
Şekil 5.44 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	94
Şekil 5.45 Mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı	95
Şekil 5.46 Yeni kompresörün 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı	96
Şekil 5.47 Yeni kompresörün yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı.....	97

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 2019 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [2]	6
Tablo 2.2 UEVEP gerekli yatırım tutarı ve hedeflenen enerji tasarrufu [5]	11
Tablo 4.1 İşletme basıncının düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf yüzdeleri [14]	44
Tablo 5.1 Akustik kamera teknik özellikleri	48
Tablo 5.2 Basıncılı hava kaçak tarama hesap işlem adımları.....	51
Tablo 5.3 1. örnek mevcut makine parkuru	54
Tablo 5.4 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	58
Tablo 5.5 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	59
Tablo 5.6 1. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	61
Tablo 5.7 1. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	62
Tablo 5.8 2. örnek mevcut makine parkuru	64
Tablo 5.9 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	68
Tablo 5.10 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	69
Tablo 5.11 2. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	71
Tablo 5.12 2. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	72
Tablo 5.13 3. örnek mevcut makine parkuru	74
Tablo 5.14 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri.....	78
Tablo 5.15 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	79

Tablo 5.16 3. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	81
Tablo 5.17 3. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	82
Tablo 5.18 Kompresörlerin SET (J/l) değerleri @7bar	86
Tablo 5.19 Kompresörlerin SET (J/l) değerleri @6bar	87
Tablo 5.20 Kompresörlerin basınç ayarlarının 7 bardan 6 bara düşürülmesi ile SET değeri değişimi	88
Tablo 5.21 Mevcut makine parkuru	89
Tablo 5.22 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri	93
Tablo 5.23 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri	94
Tablo 5.24 Yeni kompresörün simülasyon sonucu 1 haftalık çalışma saatleri	96
Tablo 5.25 Yeni kompresörün simülasyon sonucu 1 haftalık enerji tüketimleri .	97

Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Uygulama Örnekleri

Sefa ŞAHİN

Enerji Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Şaban PUSAT

Zorlaşan küresel rekabet şartları, gelişen teknoloji ve refah seviyesi ile birlikte artan tüketim alışkanlıkları, dünya nüfusunun çok hızlı artması ve sürekli artan enerji tüketimleri küresel sorunları beraberinde getirmektedir. Bu durumları göz önüne aldığımızda enerji verimliliği uygulamalarının önemi her geçen gün artmaktadır. Dünya toplam enerji tüketimindeki endüstrinin payı yaklaşık %30, endüstri enerji tüketimindeki basınçlı hava kompresörlerinin payı ise yaklaşık %10 mertebelerindedir. Bu veriler başlı başına basınçlı hava kompresörlerinde enerji verimliliği uygulamalarının ne denli önemli olduğunu güzel bir göstergesidir.

Bu çalışma ile basınçlı hava kompresörlerinde enerji verimliliği uygulamaları incelenmiştir. Bazı enerji verimliliği uygulamaları yapılan ölçüm ve analizler ile desteklenerek etkileri gözlenmiştir. 22 farklı işletmede yapılan basınçlı hava kaçak taramasında, 1,394 adet basınçlı hava kaçak noktası saptanmıştır. Bir kaçağın ortalama yıllık maliyeti 3,164.4 TL olarak hesaplanmıştır. Bir kaçağın sebebiyet verdiği yıllık CO₂ emisyon miktarı ise 1.44 ton olarak saptanmıştır.

3 farklı kompresör dairesinde birer hafta boyunca tamamlanan enerji ölçümleri ve simülasyon çalışmaları neticesinde, ilgili kompresör dairelerinde bulunan kompresörlerin üzerinde akıllı kontrol algoritmaları olan merkezi kontrol cihazları ile kontrol edilmesi sonucunda sırasıyla %7.45, %5.63 ve %17.42 enerji tasarruf potansiyeli olduğu saptanmıştır. Yine bu 3 farklı proje ile yıllık sırasıyla 70.49 ton, 88.48 ton ve 67.34 ton CO₂ emisyon salınımının önüne geçilebileceği hesaplanmıştır.

200 kW nominal elektrik tüketimine sahip yağlı vidalı tip bir basınçlı hava kompresörünün yağından atık ısı geri kazanımı yapılarak yıllık 125.040 Nm³ doğalgaz tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır. Yıllık CO₂ emisyon azaltma potansiyeli ise 242.24 ton olarak belirlenmiştir.

Değişken basınçlı hava talebi olmasına karşın 2 adet sabit devirli kompresör kullanılan bir basınçlı hava sisteminde bir hafta boyunca enerji ölçümleri alınmıştır. Aynı basınçlı hava talebine cevap verebilecek bir adet yeni hız sürücülü kompresör simülasyonu yapıldığında %18.02 enerji tasarruf potansiyeli olduğu görülmüştür. Yıllık önlenebilecek CO₂ emisyon miktarı ise 96.83 ton olarak hesaplanmıştır.

Kompresörler ve basınçlı hava sistemleri enerji verimlilik potansiyeli açısından incelendiğinde, çok basit uygulamalarla ciddi bir enerji verimlilik imkanının olduğu görülmüştür. Sonuç olarak enerji verimliliği bakış açısı ile enerji tüketen ekipmanlarda iyileştirme için sürekli aksiyon planlarının olması çok önemli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Basınçlı hava kompresörü, enerji verimliliği, enerji tüketimi

Energy Efficiency in Compressed Air Systems and Implementation Examples

Sefa ŞAHİN

Department of Energy

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Şaban PUSAT

Increasing global competition conditions, increasing consumption habits with the developing technology and welfare level, and the ever-increasing energy consumption with the rapid rise of the world population bring global problems. Considering these situations, the importance of energy efficiency applications is increasing day by day. The industry's share in the world's total energy consumption is around 30%, and the share of compressed air compressors in industry energy consumption is around 10%. These data are a good indication of how important energy efficiency applications are in compressed air compressors.

In the compressed air leak scanning carried out in 22 different industrial facilities, 1,394 compressed air leak points were detected. The average annual cost of a leakage was calculated as 3,164.4 TL. The annual amount of CO₂ emissions caused by a leak has been determined as 1.44 tons.

As a result of energy measurements and simulation studies done for one week in 3 different compressor rooms, it has been determined that there is 7.45%, 5.63% and 17.42% energy saving potentials, respectively, as a result of controlling the compressors in the relevant compressor rooms with central control devices with smart control algorithms. Again, with these 3 different projects, it has been

calculated that annual CO₂ emissions of 70.49 tons, 88.48 tons and 67.34 tons can be prevented.

It has been calculated that 125,040 Nm³ of natural gas can be saved annually by recovering waste heat from the oil of an oiled screw type compressed air compressor with a nominal electricity consumption of 200 kW. The annual CO₂ emission reduction potential is calculated as 242.24 tons.

Despite the variable compressed air demand, energy measurements were taken for a week in a compressed air system using 2 fixed speed compressors. When a new speed driven compressor is simulated that can respond to the same compressed air demand, it is seen that there is an energy saving potential of 18.02%. Annual preventable CO₂ emission amount was calculated as 96.83 tons.

When compressors and compressed air systems are examined for their energy efficiency potential, it is seen that there is a serious energy efficiency possibility with very simple applications. As a result, it has been seen that it is very important to have continuous action plans for improvement in energy consuming equipment with an energy efficiency perspective.

Keywords: Compressed air compressor, energy efficiency, energy consumption

1.1 Literatür Özeti

Dünya enerji tüketiminin her geçen yıl arttığı, fosil kaynakların sınırlı olduğu ve bu yakıtların çevreye olan olumsuz etkileri bilinen bir gerçektir. Hali hazırda yapılan bilinçlendirme ve teşvik çalışmalarıyla yenilenebilir enerji kullanımında artış olsa da halen hem ülkemiz hem de dünya genelinde fosil yakıtlar kullanılmaya devam etmektedir. Bu durum, enerji verimliliği çalışmalarının dünyamız için ne denli önemli olduğunun güzel bir göstergesidir.

Birçok ülke enerji verimliliği ile ilgili bilinçlendirme ve teşvik konularında ciddi çalışmalar yapmakta, kendilerine rasyonel hedefler koymaktadır. Bu hedefleri gerçekleştirebilmek adına enerji verimliliği yatırım teşvikleri verilmekte, enerji verimliliği projelerinde sağlanan enerji tasarrufu ile projelerin finansmanının sağlandığı yeni nesil finansman yöntemi olan enerji performans sözleşmelerinin kullanılması özendirilmektedir. Dünya enerji tüketimindeki endüstriyel tesislerin payının yaklaşık 1/3'ü ve endüstrinin enerji tüketimindeki basınçlı hava kompresörlerinin payının yaklaşık %10 olduğu göz önüne alındığında, basınçlı hava kompresörlerindeki enerji verimliliği uygulamalarının ne denli önemli olduğu görülmektedir. Basınçlı hava kompresörleri hem yüksek enerji tüketim potansiyeline sahiptir hem de çok ciddi enerji verimlilik artış imkanına sahiptir. Dolayısıyla, kompresörler ve basınçlı hava hatlarının dikkatlice ve sürekli incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Basınçlı hava kompresörlerinde ve hava hatlarında atık ısı geri kazanımı, merkezi kontrolör kullanımı, kaçakların giderimi ile ilgili düzenli aksiyon planı, basınçlı hava hatlarındaki kayıpların azaltılması, mümkün mertebe en düşük işletme basıncının kullanımı, değişken hız sürücülü kompresör kullanımı, uygun depolama, emiş havasının soğutulması ve yüksek verimli elektrik motoru kullanımı ile ciddi enerji verimlilik artışı sağlanması mümkündür.

1.2 Tezin Amacı

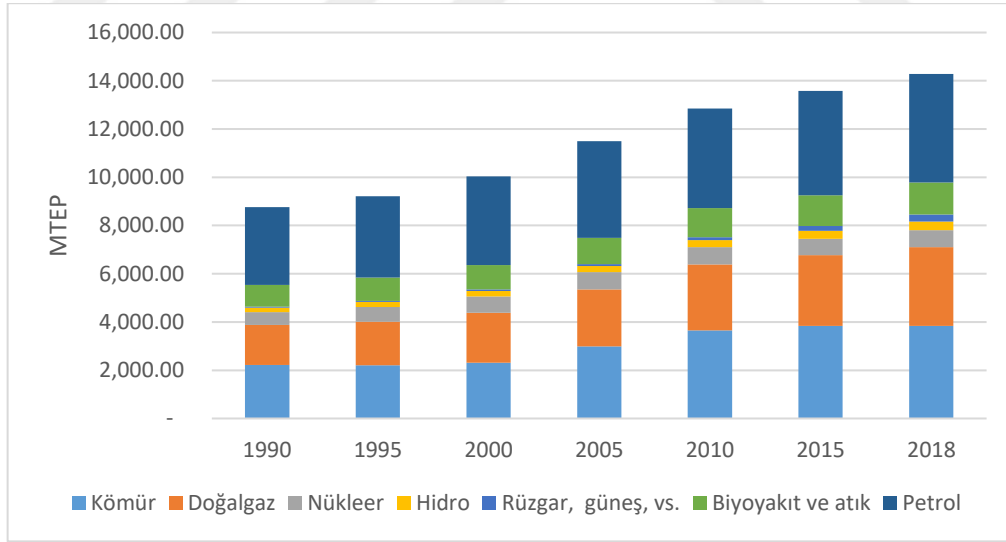
Dünya genelinde enerji verimliliğinin öneminin her geçen gün arttığına literatür özeti kısmında değinilmiştir. Buna istinaden endüstride ve binalarda enerji verimliliği uygulamaları çok yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, çok geniş kullanım alanına sahip basınçlı hava kompresörlerinde ve hatlarında enerji verimliliği potansiyelleri teorik hesaplar ve ölçümler ile desteklenerek ortaya konulmuştur. Bu tezin diğer bir amacı ise basınçlı hava işletimi ve kullanımı konusunda çalışan profesyonellere basınçlı hava kompresörlerinde ve hatlarında enerji verimliliği uygulamalarına dair yol gösterici ve fikir verici olmaktır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışması ile basınçlı hava kompresörü işleten profesyonellere çeşitli enerji verimliliği aksiyonları önerilmiştir. Teorik hesaplamalar, ölçümler ve analizler sonucunda önerilen enerji verimliliği çalışmaları ile sağlanabilecek enerji tasarrufuna dair somut analizler ortaya konmuştur.

2.1 Dünyanın ve Türkiye'nin Enerji Kullanım Profili

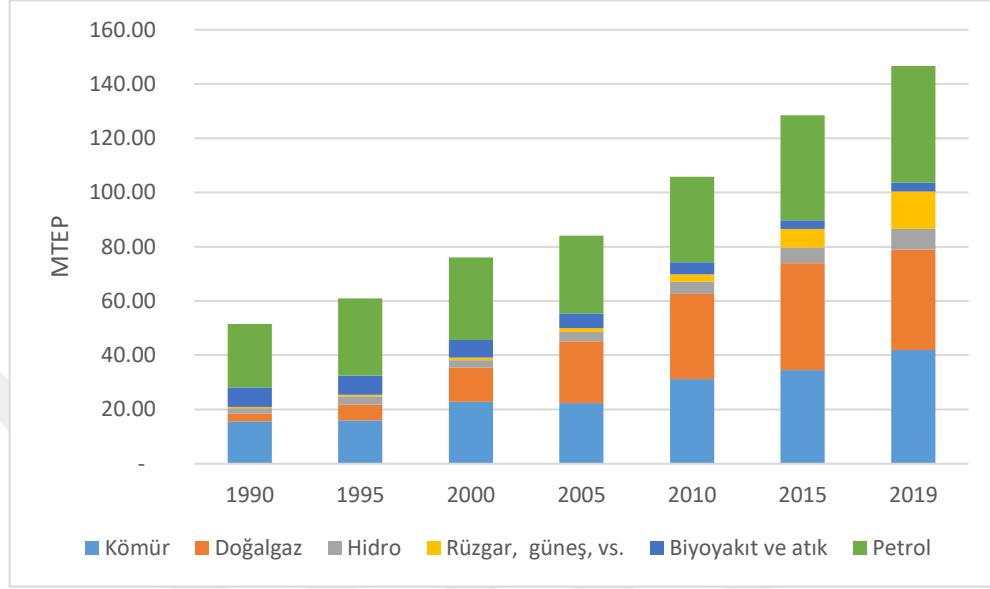
Dünya genelinde artan nüfus, tüketim alışkanlıkları gelişen teknoloji ve insan konforunun her geçen gün artması ile birlikte enerji tüketimi her geçen yıl artış göstermektedir. Dünya genelinde birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağıtılmış hali Şekil 2.1'de gösterilmiştir. 2018 yılında Dünya birincil enerji tüketimi toplam 14,279.57 MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) olarak hesaplanmıştır. Bu birincil enerji tüketimini %31.49'unu petrol (4,497.00 MTEP), %26.88'ini kömür (3,838.33 MTEP), %22.84'ünü doğalgaz (3,261.60 MTEP), %9.29'unu biyoyakıt ve atık (1,327.13 MTEP), %4.95'ini nükleer (706.81 MTEP), %2.54'ünü hidro (362.33 MTEP), ve %2.01'ini rüzgar, güneş vs. (286.38 MTEP) gibi yenilebilir kaynaklar oluşturmaktadır.



Şekil 2.1 Dünya genelinde toplam birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı [1]

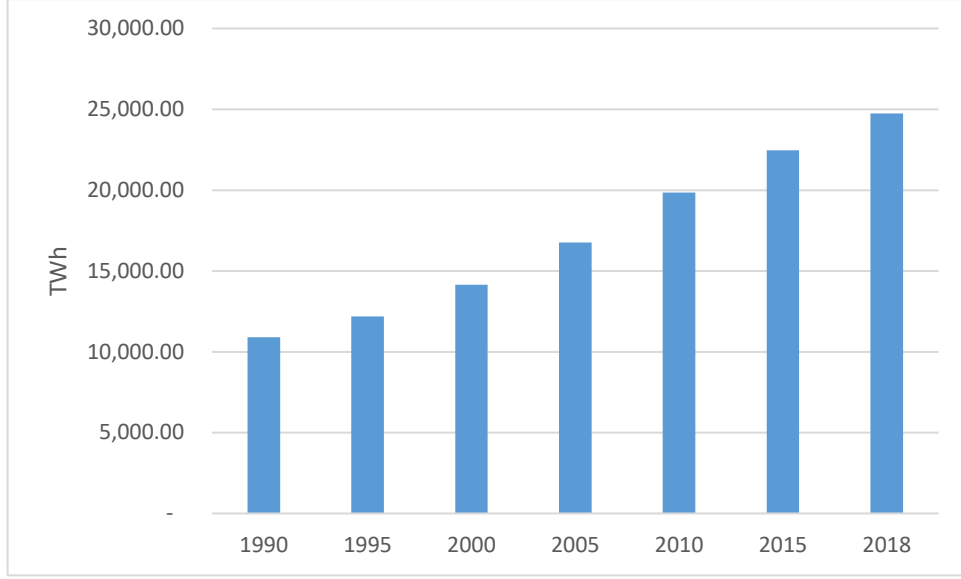
Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağıtılmış hali Şekil 2.2’de gösterilmiştir. 2019 yılında Türkiye birincil enerji tüketimi toplam 146.67 MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) olarak hesaplanmıştır. Bu birincil enerji tüketiminin

%29.32'ini petrol (43.01 MTEP), %28.60'ını kömür (41.95 MTEP), %25.23'ünü doğalgaz (37.01 MTEP), %9.40'ını rüzgar, güneş vs. (13.79 MTEP) gibi yenilebilir kaynakları, %5.21'ini hidro (7.64 MTEP) ve %2.24'ünü biyoyakıt ve atık (3.29 MTEP) kaynaklarından oluşmaktadır.

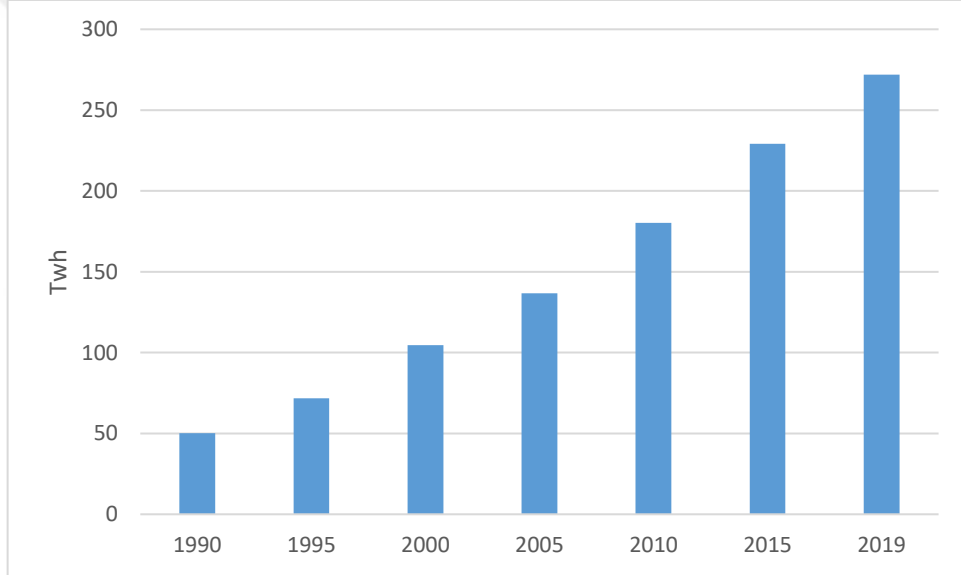


Şekil 2.2 Türkiye toplam birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı [1]

Dünya ve Türkiye'nin elektrik tüketim trendi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterilmiştir. 2018 yılında dünyanın toplam elektrik enerjisi tüketimi 24,738.92 TWh olarak hesaplanırken, 2019 yılında bu değer Türkiye için 272.04 TWh olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden yola çıkarak Türkiye hem birincil enerji tüketiminde hem de elektrik enerjisi tüketiminde dünyanın toplam tüketiminin yaklaşık %1'i kadardır. [1]

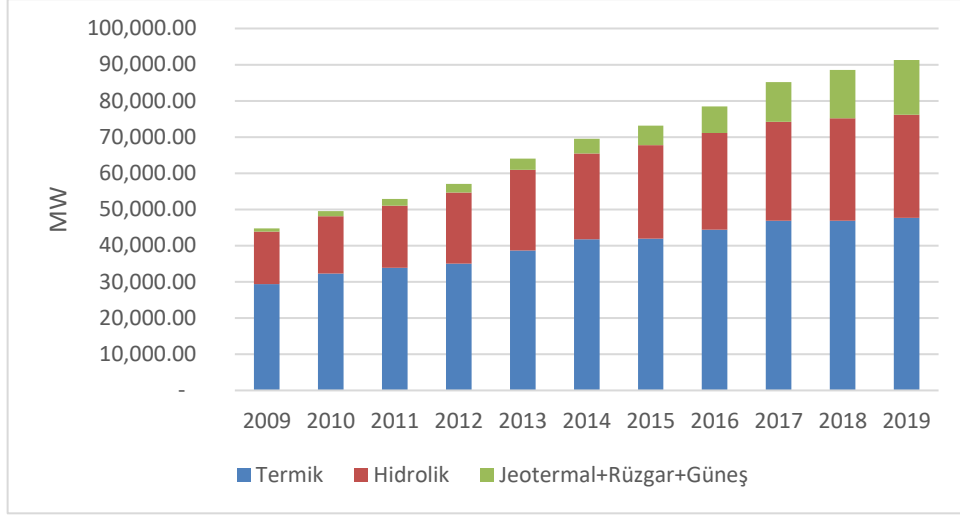


Şekil 2.3 Dünya elektrik enerjisi tüketim trendi [1]



Şekil 2.4 Türkiye elektrik enerjisi tüketim trendi [1]

Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi Şekil 2.5'de belirtilmiştir. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü 2019 yılı itibari ile yaklaşık 91.26 GW'a ulaşmıştır. Bu kurulu gücün %52.22'sini termik santraller (47.66 GW), %31.23'ünü hidroelektrik santraller (28.50 GW) ve %16.55'ini jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji santralleri (15.10 GW) oluşturmaktadır. [2]



Şekil 2.5 Türkiye elektrik santrali kurulu gücünün yıllara göre değişimi [2]

Türkiye'nin 2019 yılı elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Bu üretimin 65.926,2 GWh'i (%21.69) barajlı hidroelektrik, 60.394,7 GWh'i (%19.87) ithal kömür, 57.288,2 GWh'i (%18.85) doğalgaz, 46.872,2 GWh'i (%15.42) linyit, 22.896,6 GWh'i (%7.53) doğal göl ve akarsu, 21.730,7 GWh'i (%7.15) rüzgar, 9.249,8 GWh'i (%3.04) güneş, 8.951,7 GWh'i (%2.95) jeotermal, 5.627,2 GWh'i (%1.85) taşkömürü ve asfaltit, 4.624,2 GWh'i (%1.52) yenilenebilir atık ve atık ısı ve 336,0 GWh'i (%0.11) sıvı yakıtları kaynak olarak kullanan elektrik santralleri ile üretilmiştir.

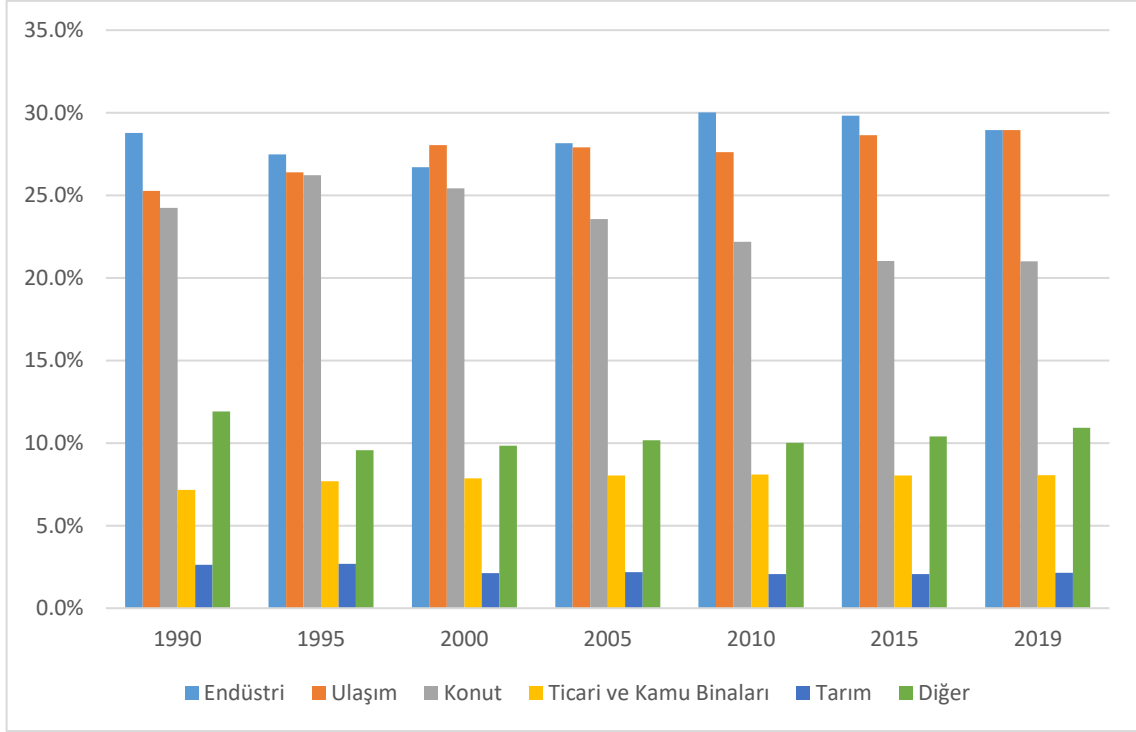
Tablo 2.1 2019 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı
[2]

Kaynak	Üretim Miktarı (GWh)	Üretimdeki Payı (%)
İthal Kömür	60,394.7	19.87
Taşkömürü + Asfaltit	5,627.2	1.85
Linyit	46,872.2	15.42
Doğalgaz	57,288.2	18.85
Sıvı Yakıtlar	336.0	0.11
Barajlı Hidrolik	65,926.2	21.69
Doğal Göl ve Akarsu	22,896.6	7.53
Rüzgar	21,730.7	7.15
Yenilenebilir Atık ve Atık Isı	4,624.2	1.52
Jeotermal	8,951.7	2.95
Güneş	9,249.8	3.04
Toplam	303,897.6	100.0

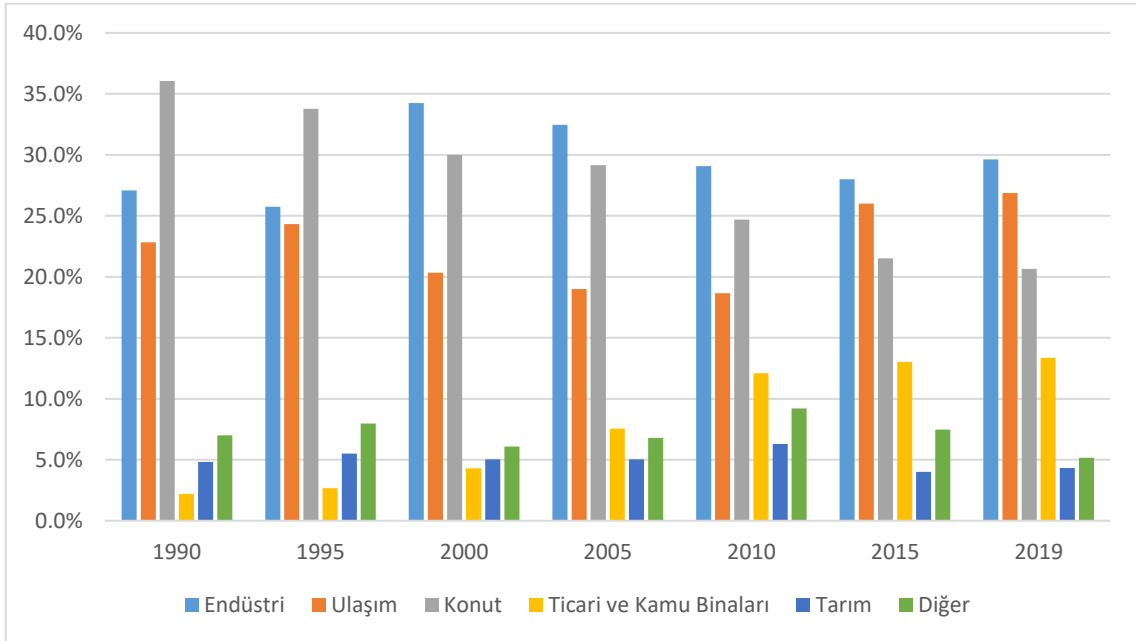
Dünya enerji tüketiminin sektörel dağılımı Şekil 2.6’de belirtilmiştir. 2019 yılında dünya enerji tüketiminin %28.94’ü endüstride, %28.94’ü ulaşımda, %21.00’i konutta, %8.05’i ticari ve kamu binalarında, %2.14’ü tarımda ve %10.92’si diğer kullanım alanlarında gerçekleşmiştir. Enerji tüketim miktarları artmasına rağmen sektörel dağılımda yıllara göre radikal bir değişiklik gözlenmemiştir.

Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı Şekil 2.7’de belirtilmiştir. 2019 yılında dünya enerji tüketiminin %29.63’ü endüstride, %26.87’ü ulaşımda, %20.65’i

konutta, %13.36'sı ticari ve kamu binalarında, %4.33'ü tarımda ve %5.16'sı diğer kullanım alanlarında gerçekleşmiştir. Enerji tüketim miktarları artmasına rağmen sektörel dağılımda yıllara göre radikal bir değişiklik gözlenmemiştir.



Şekil 2.6 Dünya enerji tüketim sektörel dağılımı [1]



Şekil 2.7 Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı [1]

Yukarıdaki verilerden yola çıkarak toplam enerji tüketimindeki endüstrinin payının yaklaşık %30 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Avrupa endüstriyel enerji tüketimindeki basınçlı hava kompresörlerinin payının %10 mertebelerinde olduğu da bilinmektedir. Bu veri bize basınçlı hava kompresörlerinin enerji tüketiminde ne denli kritik ekipmanlar olduğunu göstermektedir [3].

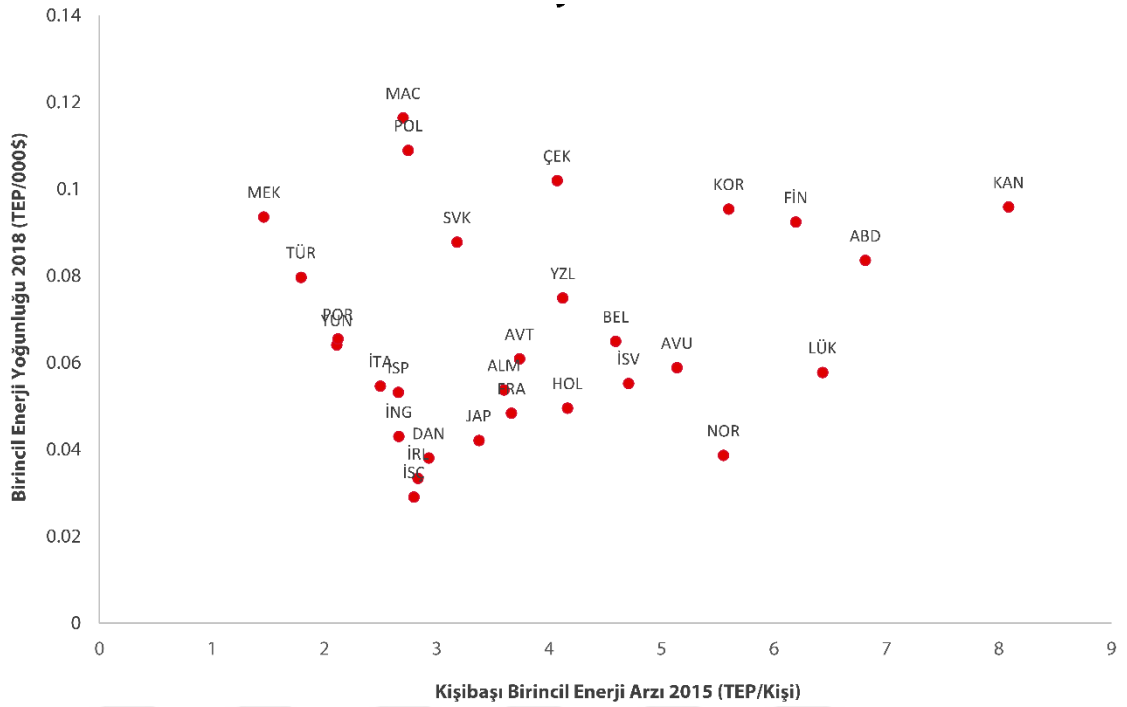
2.2 Türkiye’de Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, Nisan 2007’de çıkarılan Enerji Verimliliği Kanununda; binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan enerji tüketiminin azaltılması olarak tanımlanmıştır [4].

Enerji yoğunluğu ise bir birim hasıla üretebilmek için tüketilen enerji miktarı olarak tanımlanmıştır [4]. Genellikle ülkeler bazında enerji verimliliği düzeyini takip etmek adına kullanılan bir anahtar parametredir. Ülke bazında tüketilen toplam enerji miktarının (TEP), aynı ülkede yaratılan Gayri Safi Yurtiçi Hasılaya (GSYH) bölünmesi ile elde edilir (TEP/GYSH). Bu değer ne kadar düşük olursa birim GSYH için o denli az enerji tüketildiği ve dolayısıyla daha yüksek enerji verimliliği olduğu anlamına gelir.

Enerji yoğunluğunun yanında ülkelerdeki gelişmişlik ve refah seviyesinin bir göstergesi olarak kişi başına harcanan enerji miktarı da takip edilir (TEP/kişi). Kişi başına enerji tüketimi ne kadar fazla ise o ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesidir. Fakat bu parametre farklı coğrafyalardaki ülkeleri kıyaslamada tek başına yeterli olmayabilir. Ülkelerin coğrafi yapısı, iklim şartları ve konumu da bu değerlendirmeye dahil edilmelidir [5].

Şekil 2.8’de bazı ülkelerin birincil enerji yoğunluğu ve kişi başı birincil enerji arzı verileri belirtilmiştir.



Şekil 2.8 Bazı ülkelerde enerji yoğunluğu ve kişi başı birincil enerji arzı [5]

Türkiye’de enerji verimliliği ile ilgili kamusal faaliyetler 2000’li yılların başından itibaren başlamıştır. Türkiye’de enerjinin verimli kullanılması, enerjinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve enerjinin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla “Enerji Verimliliği Kanunu” 2007 yılında çıkarılmıştır. Bu yasa gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli yönetmelikler, strateji belgeleri ve eylem planları ile desteklenmiştir. 2012 yılında hazırlanan “Enerji Verimliliği Strateji Belgesi” ile 2023 yılı için enerji verimliliğine dair çeşitli hedefler belirlenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda gelişen ihtiyaçlara cevap verebilmek ve geliştirilen stratejiyi desteklemek adına 2017 yılında “Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP)” hazırlanmıştır [5]. Türkiye’nin enerji verimliliği alanındaki politika belgeleri ve mevzuatları Şekil 2.9’da belirtilmiştir.

2007	2008 2010 2011	2012	2014	2018	2019	2020
Enerji Verimliliği Kanunu	Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik	Enerji Verimliliği Strateji Belgesi	10. Kalkınma Planı	Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı	11. Kalkınma Planı	Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik
	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği					
	Ulaştırımada Enerji Verimliliğinin Artırılmasına Dair Yönetmelik					
	KOSGEB Destek Programları Yönetmeliği	Destekler, Yetki Belgesi ve Eğitim Hakkında Tebliğler	Kojenerasyon Tesislerinin Verimliliğinin Hesaplanmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Tebliğ	Kamu İdarelerinin Enerji Performans Sözleşmesi Yapılmasına İmkân Veren Torba Kanun		Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Strateji Planı (2019-2023)

Şekil 2.9 Türkiye enerji verimliliği alanındaki politika belgeleri ve mevzuatları [5]

Türkiye, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planında 2017-2023 yılları arasında birincil enerji tüketimini 23.9 MTEP azaltmayı hedeflemektedir. Bu hedef ve eylem planları doğrultusunda toplamda 10.9 milyar dolar yatırım yapılması ön görülmektedir. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ile gerekli yatırım tutarı ve hedeflenen enerji tasarruf miktarı Tablo 2.2’de belirtilmiştir [5].

Tablo 2.2 UEVEP gerekli yatırım tutarı ve hedeflenen enerji tasarrufu [5]

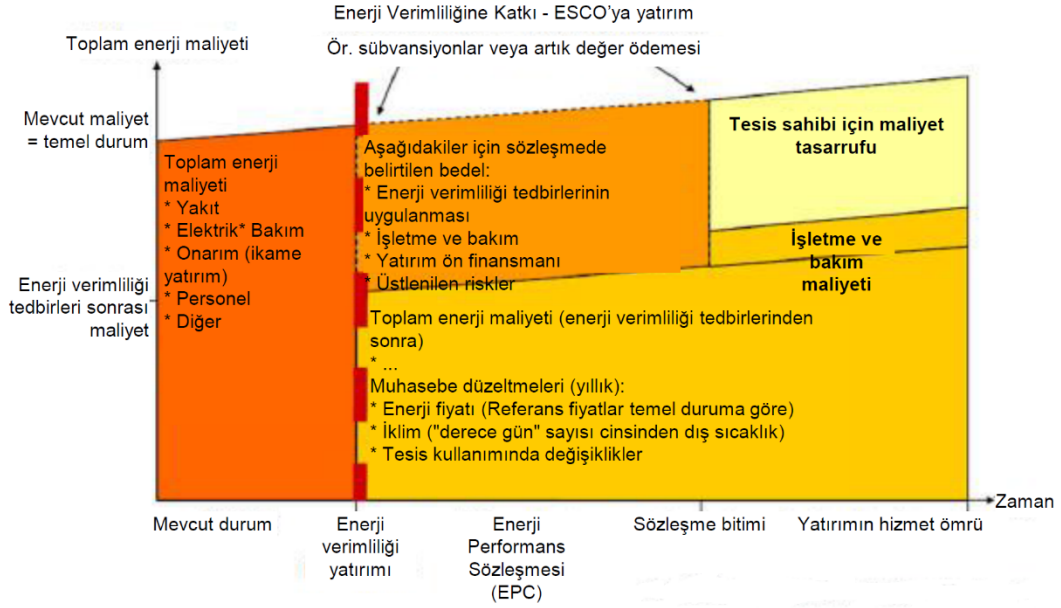
Gerekli Yatırım Tutarı (x 1000 USD)							
2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
958	1,279	1,593	1,681	1,748	1,824	1,846	10,929
Enerji Tasarrufu (x 1000 USD)							
2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
202	571	872	1,182	1,504	1,842	2,191	8,364
Enerji Tasarrufu (kTEP)							
2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
577	1,630	2,493	3,378	4,298	5,264	6,261	23,901

Belirlenen bu hedefler doğrultusunda UEVEP 55 adet eylem içermektedir. Enerji yönetim sistemlerinin kurulması ve etkinliğinin artırılması, enerji verimliliği finansman mekanizmalarının geliştirilmesi, enerji verimliliği projelerinin çeşitli yarışmalar ile desteklenmesi, farkındalık, eğitim ve bilinçlendirme faaliyetleri geliştirilmesi, enerji verimliliği etütleri, kamuda sürdürülebilir işletme ve satın alma yaklaşımının benimsenmesi, bina ve sanayi kuruluşları için enerji tüketim veri tabanı oluşturulması ve sanayi sektöründe verimlilik artırıcı projelerin desteklenmesi bu planlardan bazılarıdır [6].

2.3 Enerji Performans Sözleşmeleri

Enerji Performans Sözleşmeleri (EPS); enerji verimliliği projesini uygulayan enerji hizmet şirketleri (ESCO) ve projeyi uygulattıran işletme arasında imzalanan, enerji verimliliği projelerinden elde edilen tasarrufu kullanarak bu projelerin hayata geçirilmesini sağlayan bir finansman yöntemidir [7].

Şekil 2.10'de Enerji Performans Sözleşme aşamalarını gösterilmiştir. Grafikte kesik kırmızı çizginin sol tarafı işletmenin mevcut durumdaki enerji maliyetini temsil etmektedir. Sağ tarafı ise enerji verimliliği projesi uygulama sonrasında temsil etmektedir. Grafikten de görülebileceği üzere projenin yatırım maliyeti, sağlanan enerji tasarrufu ile enerji verimliliği projesini uygulayan firmaya (ESCO) ödenmekte, ödeme tamamlandıktan sonra sağlanan tasarruf yatırımın ekonomik ömrü boyunca işletmeye kalmaktadır.

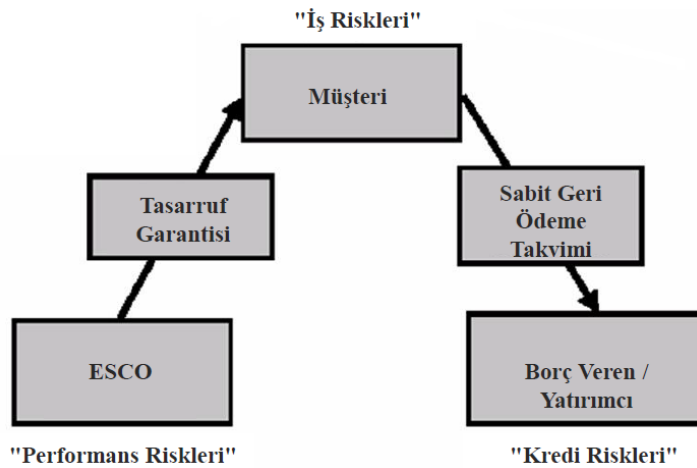


Şekil 2.10 Enerji performans sözleşme (EPS) aşamaları [7]

Enerji performans sözleşmelerinin en sık kullanılan iki tipi; tasarruf garantili EPS ve tasarruf paylaşımlı EPS'dir.

2.3.1 Tasarruf Garantili EPS

Müşterinin üçüncü bir tarafla finansman sözleşmesi yaptığı, performans riskini ESCO'nun aldığı, finansman riskini müşterinin aldığı EPS tipidir. Müşteri finansman sırasında ESCO'nun taahhüt ettiği enerji tasarrufunu ve buna bağlı nakit akışını kullanır [7].

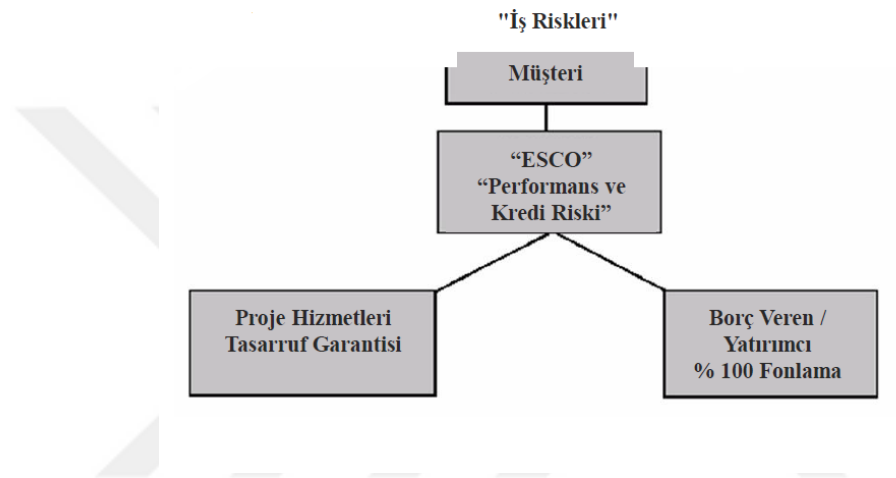


Şekil 2.11 Tasarruf garantili EPS'de riskler [7]

Finansal riski müşteri müşterinin alması gerektiği için bu tipte bir sözleşme henüz EPS piyasası gelişmemiş yerlerde uygulaması zordur. Fakat ESCO'lar finansmanla uğraşmadığı için henüz çok büyümemiş ESCO firmaları büyük yatırımlara kalkışabilir ve bu durum EPS piyasasının gelişimine ciddi katkı sunar [7].

2.3.2 Tasarruf Paylaşımlı EPS

Tasarruf paylaşımlı EPS'de ESCO, enerji verimliliği projesini kendi uygular. Müşteri ise enerji verimliliği projesi ile sağlanan tasarrufun bir kısmına veya tamamına karşılık gelen bir miktar kadar ESCO'ya düzenli ödemeler yapar.



Şekil 2.12 Tasarruf paylaşımlı EPS'de riskler [7]

ESCO'lar finansman riskini üstlendiği ve projeyi uygulamak için gerekli krediyi bulurken zorlanabildiği için nispeten küçük ESCO firmaları bu tarz işlere girmekte zorlanabilir. Bu da EPS piyasasının gelişimini olumsuz etkiler. Fakat müşteri finansal risk almadığı için henüz gelişmemiş EPS piyasası olan yerlerde bile uygulanması kolaydır [7].

Artan rekabet şartları, belirlenen enerji ve karbondioksit azaltımı hedefleri ile, enerji verimliliği birçok firma için olmazsa olmaz konuma gelmiş olup düzenli olarak enerji tüketen ekipmanlarında enerji verimliliği aksiyonlarını planlı bir şekilde ele alınmaktadır. Kendi öz sermayesini kullanmayıp proje finansmanı için vakit kaybetmek istemeyen işletmeler, EPS'ler ile birçok enerji verimliliği aksiyonunu sıfır yatırım ile devreye alabilir. Böylece elde edilen enerji tasarrufu

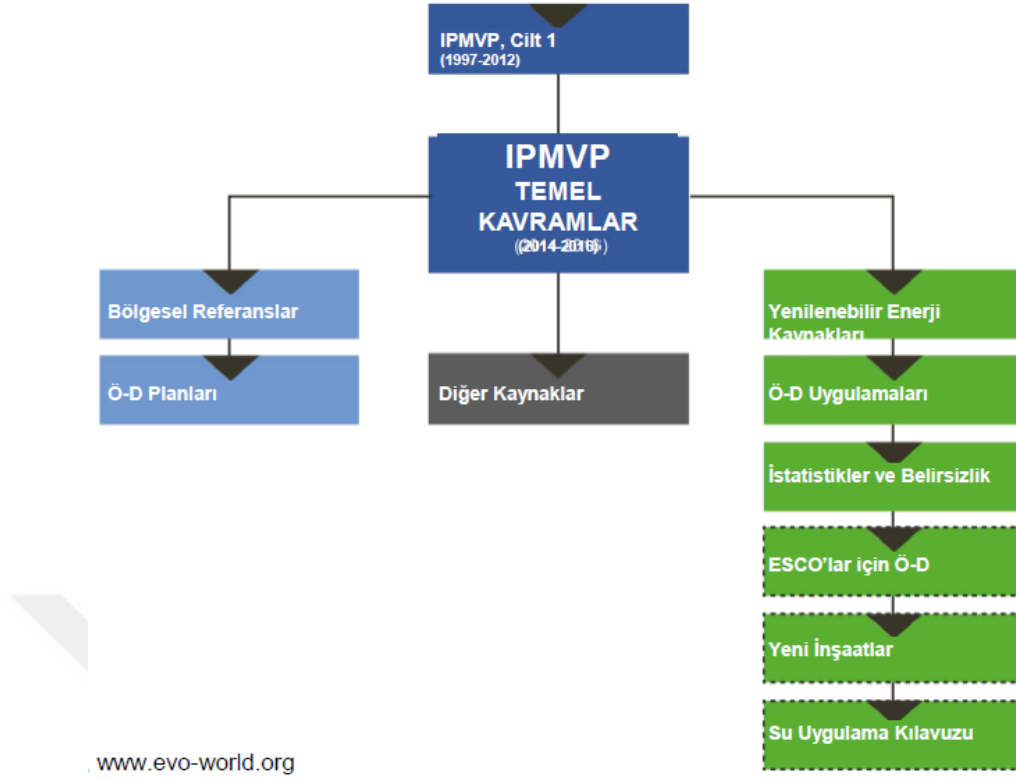
ile proje finansmanı sağlanabilir, hem ESCO firmaları hem de işletmeler için enerji tasarrufu ile sürdürülebilir büyüme sağlanabilir.

Ayrıca Ağustos 2020’de “Kamuda Enerji Performans Sözleşmelerine İlişkin Usul ve Esasları” yayımlanmış olup, kamu kurum ve kuruluşlarında enerji tüketimlerinin EPS’ler ile nasıl azaltılacağı usul ve esaslar ile belirtilmiştir.

2.4 Enerji Verimliliği Projelerinde Ölçme ve Doğrulama

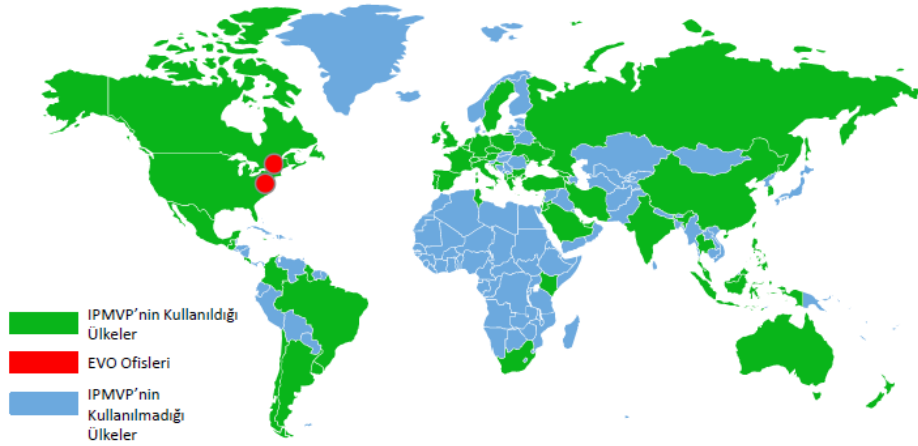
Enerji verimliliği projelerinde en önemli aşamalardan biri de ilgili projenin sağladığı tasarrufun ölçülmesi ve doğrulanmasıdır. Özellikle Enerji Performans Sözleşmelerine (EPS) dayalı enerji verimliliği projelerinde ölçme ve doğrulama protokolü kullanılması, sağlanan tasarrufa karşılık yapılacak ödemelerin sağlam temellere oturtulmasına yardımcı olmaktadır. Uluslararası Performans Ölçme ve Doğrulama Protokolü (IPMVP) 1996 yılında ABD enerji bakanlığının öncülüğünde 15 ülkeden 150’den fazla gönüllü (mal sahibi, finansör, yüklenici, danışman, akademisyen, kamu kuruluşu) desteği ile Enerji Hizmet Şirketi (ESCO) sektörüne yönelik hazırlanmıştır. ABD Enerji Bakanlığı, IPMVP’nin tüm sorumluluğunu kar amacı gütmeyen kuruluş olan Verimlilik Değerleme Kuruluşu (EVO)’na aktarmıştır. EVO en güncel IPMVP belgesini 2016 yılında yayımlamıştır [8].

Şekil 2.13’de EVO’nun yayımladığı Ölçme ve Doğrulama uygulamalarına kılavuz olabilecek belgeler belirtilmiştir.



Şekil 2.13 EVO'nun yayımladığı güncel IPMVP belgeleri [8]

Şekil 2.14'de ise IPMVP'nin kullanıldığı ve kullanılmadığı ülkeler Dünya haritası üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.14 IPMVP'nin ülkelere göre kullanım durumu [8]

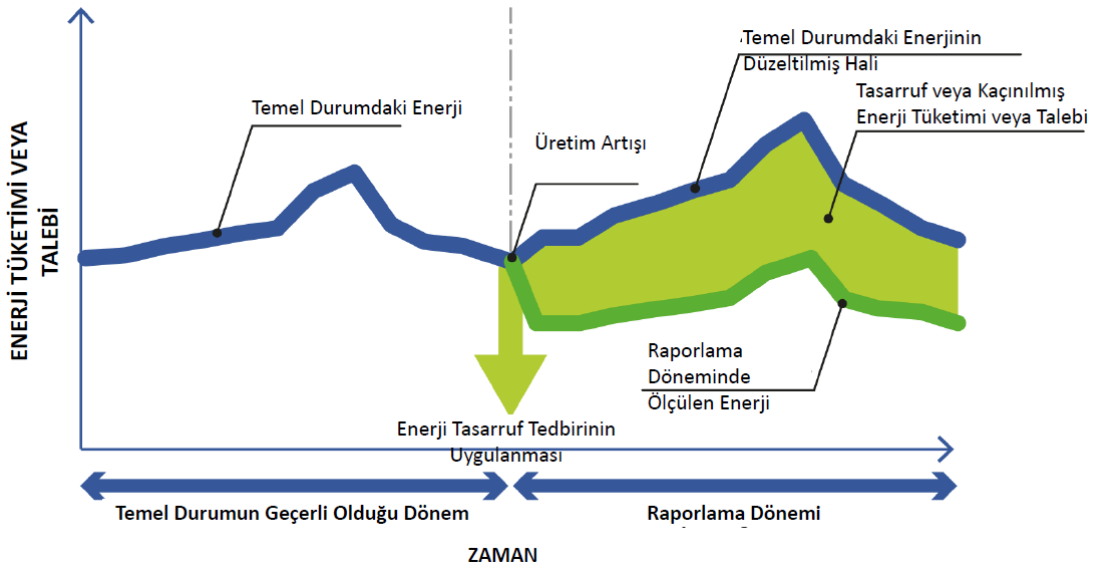
IPMVP enerji verimliliği projelerin değerlendirilmesine bir çerçeve sunar, tasarrufların nasıl hesaplanacağını belirler ve kullanılacak tüm terimleri tanımlar.

Aynı zamanda kaliteli bir Ölçme ve Doğrulama sürecinin geliştirilmesi ve uygulanması için çeşitli opsiyonlar sunmaktadır.

Enerji tasarrufları, bir şeyin yokluğunu temsil ettiği için direkt olarak ölçümlenemez. Ne kadar tasarruf edildiği uygulamadan önce ve sonra ölçülen enerji tüketimleri, değişken çevre şartlarının etkilerini gidermek adına ayarlamalar yapılarak karşılaştırılır. Genel ölçme ve doğrulama denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Tasarruf} = & (\text{Temel Dönem Enerji Tüketimi} \\ & - \text{Raporlama Dönemi Enerji Tüketimi}) \mp \text{Ayarlamalar} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Buradaki ayarlamalar enerji verimliliği projesi uygulama öncesi (Temel Dönem) ve uygulama sonrası (Raporlama Dönemi) enerji tüketimlerini etkileyecek parametrelerin etkilerini gidermek için yapılan matematiksel işlemleri ifade etmektedir. Örneğin bir işletme enerji verimliliği projesi uyguladıktan sonra üretimde artış olmuş olabilir, böyle bir durumda enerji verimliliği projesi uygulanmasına rağmen enerji tüketimlerinde artış olabilir. Bu durumda ilgili projede enerji verimliliği sağlanmadığı anlamına gelmez. Benzer şekilde enerji verimliliği projesi uygulandıktan sonra üretim düşer ise, gerçekleşen enerji tüketimindeki azalışın ne kadarının enerji verimliliği projesinden kaynaklı olduğu ortaya konulmalıdır. Bundan dolayı temel dönemde ve raporlama döneminde çevresel etkileri eşitleyip “elma ile elma” kıyaslaması yapılabilmesi adına matematiksel ayarlamalar yapılır [8].



Şekil 2.15 IPMVP kapsamındaki temel kavramlar [8]

Şekil 2.15’de IPMVP kapsamındaki temel kavramlar grafik ile anlatılmıştır. Grafikte koyu mavi punto ile belirtilen trend temel durumdaki enerji tüketimini, koyu yeşil punto ile belirtilen trend ise enerji verimliliği projesi uygulandıktan sonra raporlama döneminde gerçekleşen enerji tüketimini göstermektedir. Enerji verimliliği projesi uygulandıktan sonra gerçekleşen üretim artışının etkileri, gerekli ayarlamalar ile temel durumdaki enerji tüketime yansıtılmıştır (Grafığın sağ tarafında “temel durumdaki enerjinin düzeltilmiş hali”).

Grafikte temel durumdaki enerji tüketim trendi ve raporlama dönemindeki enerji tüketim trendi arasında kalan açık yeşil puntolu alan gerçekleştirilen enerji tasarrufunu temsil etmektedir.

IPMVP uygulamalarında A-B-C ve D olmak üzere 4 seçenek bulunur. Bunlar:

- A seçeneği – İzole Edilmiş Tadilat: Temel Parametre Ölçümü
- B seçeneği – İzole Edilmiş Tadilat: Tüm Parametrelerin Ölçümü
- C seçeneği – Tüm Tesis
- D seçeneği – Kalibre Edilebilen Simülasyon

olarak tanımlanır.

A seçeneği – İzole Edilmiş Tadilat: Temel Parametre Ölçümü:

Tasarruf, enerji verimliliği projesinden etkilenen sistemlerin enerji tüketimlerinin ve proje başarısında anahtar gösterge olabilecek temel parametrelerin ölçümü ile belirlenir. Temel parametreler dışında diğer parametrelerde makul tahmini değerler kullanılabilir.

B seçeneği – İzole Edilmiş Tadilat: Tüm Parametrelerin Ölçümü:

Tasarruf, enerji verimliliği projesinden etkilenen sistemlerin enerji tüketimlerinin ve proje başarısında anahtar gösterge olabilecek tüm parametrelerin ölçümü ile belirlenir.

C seçeneği – Tüm Tesis:

Tasarruf, tüm tesis düzeyinde şebeke sayaçları üzerinden yapılan enerji tüketimi ölçümleri ile belirlenir. Raporlama dönemi boyunca tüm tesisin enerji tüketimi ölçülmesine devam edilir. Proje çerçevesi çok geniş olduğundan enerji tüketimine etki edebilecek diğer parametrelerin takibinin yapılması gerektiğinde ayarlamalar yapılması çok önemlidir.

D seçeneği – Kalibre Edilebilen Simülasyon:

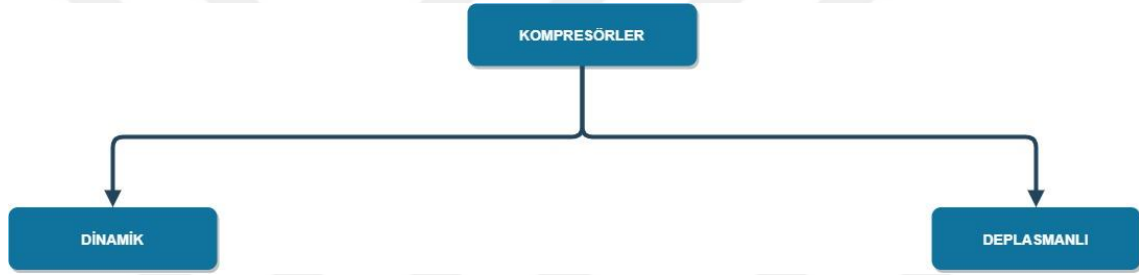
Tasarruf, tüm tesis enerji tüketiminin simülasyonunun yapılması yoluyla belirlenir. Simülasyon sonucu gerçek enerji faturaları ile karşılaştırılarak simülasyon modeli kalibre edilmelidir. Daha çok yeni uygulamalarda kullanılır.

A ve B seçeneği enerji verimliliği projesi özelinde bir değerlendirme istendiği durumlarda tercih edilir. C ve D seçeneği tüm tesis genelinde değerlendir istendiği durumlarda kullanılır [9].

3.1 Basınçlı Hava Kompresör Teknolojileri

Günlük hayatımızda ve endüstride hemen hemen her alanda basınçlı hava kullanımı ile sıkça karşılaşilmektedir. Çoğu üretim tesisinde üretim devamlılığı adına basınçlı hava kompresörleri ciddi önem arz etmektedir.

Kompresörler basınçlı havayı üretme yöntemlerine göre pozitif deplasmanlı ve dinamik olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır [10].

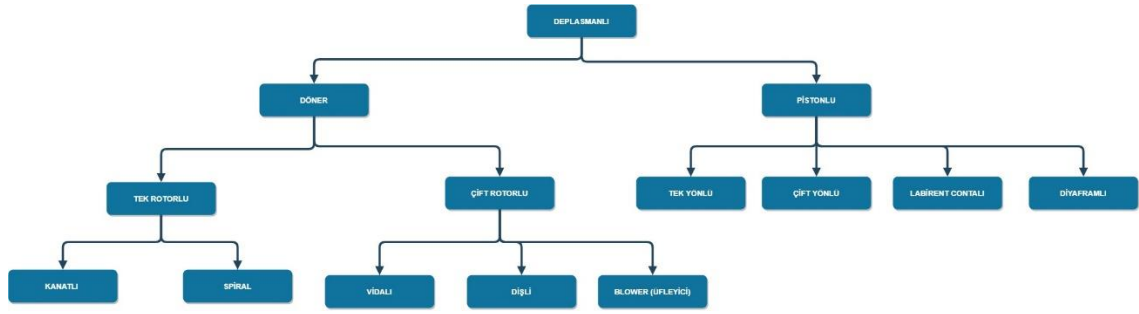


Şekil 3.1 Basınçlı hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]

3.1.1 Pozitif Deplasmanlı Kompresörler

Pozitif deplasmanlı kompresörlere; pistonlu kompresörler, spiral kompresörler ve çeşitli tiplerde döner kompresörler (vidalı, dişli, kanatlı) örnek gösterilebilir. Şekil 3.2’de sıkça kullanılan pozitif deplasmanlı kompresör türleri belirtilmiştir.

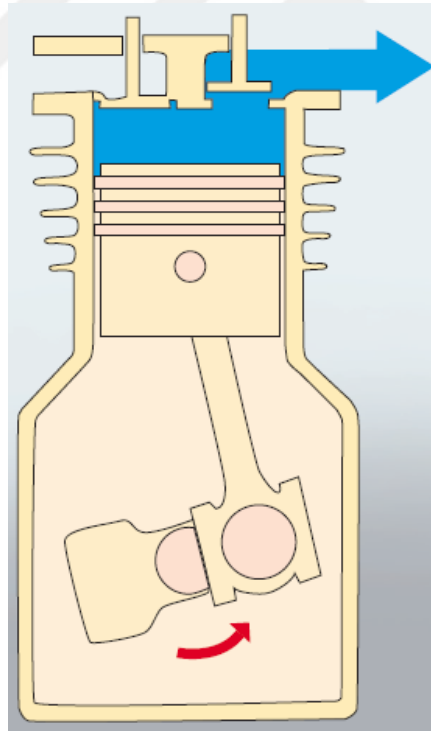
Pozitif deplasmanlı kompresörlerde hava sıkıştırma odasına çekilir ve bu odanın emme bağlantısı kesilir. Sonrasında içeri alınan hava ilerlerken kademeli olarak hacmi azalır ve hava sıkıştırılır. Basınç değeri istenilen değere ulaştığında boşaltma valfi açılır ve sıkıştırılan hava dışarı aktarılır [11].



Şekil 3.2 Deplasmanlı basınçlı hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]

3.1.1.1 Pistonlu Kompresörler

Pistonlu kompresörler en eski ve en yaygın kullanılan kompresör tiplerinden biridir. Çoğunlukla atölye benzeri küçük işletmelerde kısa süreli ve düşük debideki basınçlı hava gereksinimi için kullanılır. Bu tip kompresörlerde piston silindir içine alınan havayı sıkıştırır. İstenilen basınca ulaşan hava dışarı aktarılır. Havanın silindire alınması ve dışarı atılması valfler ile kontrol edilir [10]. Şekil 3.3'te örnek şematik pistonlu kompresör gösterilmiştir.

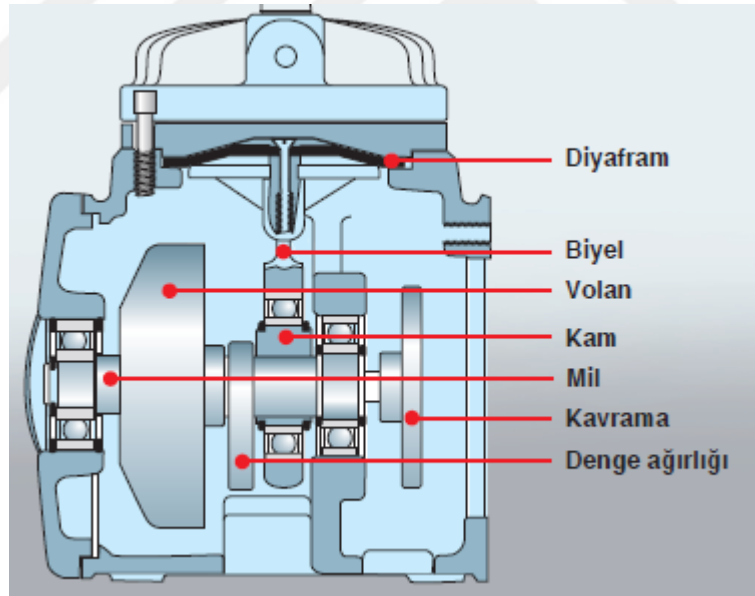


Şekil 3.3 Örnek pozitif deplasmanlı kompresör (pistonlu) [11]

Bazı pistonlu kompresörlerde silindir piston hareketi esnasında hem emme hem sıkıştırma yapar, bu tip pistonlu kompresörler çift etkili pistonlu kompresörler olarak adlandırılır. Çift etkili pistonlu kompresörlerde silindirin alt ve üst kısmındaki valfler yardımıyla iki oda oluşturulur. Piston yukarı doğru hareket ederken üst odadaki hava sıkışırken alt odaya hava emilir. Pistonun aşağı doğru hareketi sırasında alt odadaki hava sıkışır ve üst odaya hava emilir. Piston her iki yönde hareket ederken iş yapmasından dolayı tek etkili pistonlu kompresörlere göre daha verimlidir [10].

3.1.1.2 Diyaframalı Kompresörler

Diyaframalı kompresör şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu çizimde görünen diyaframın aşağı yukarı hareket ettirilmesiyle hava basınçlandırılır. Diyafram mekanik veya hidrolik yolla işletilebilir. Düşük basınç ve düşük debi ihtiyacı olduğunda mekanik diyaframalı kompresörler, yüksek basınç gerektiği durumlarda ise hidrolik diyaframalı kompresörler kullanılır [10].

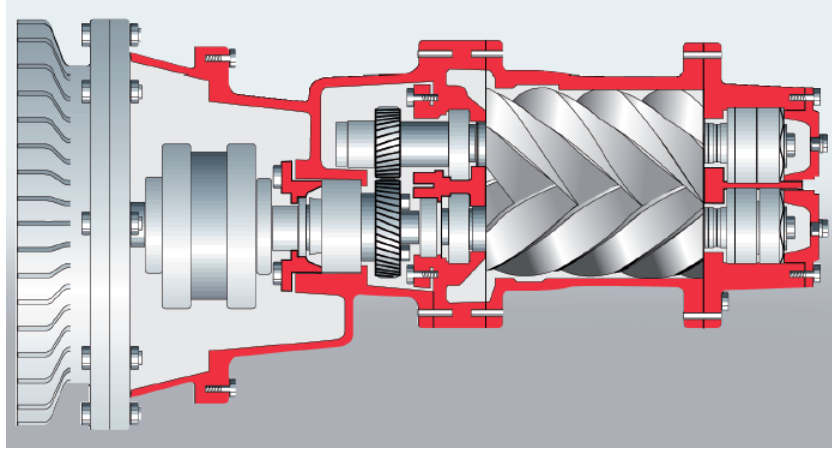


Şekil 3.4 Şematik diyaframalı kompresör [11]

3.1.1.3 Vidalı Kompresörler

Pistonlu kompresörlere göre daha sessiz çalışmaları, dayanıklı olmaları, bakım gerekliliğinin az olması ve verimliliklerinden dolayı vidalı kompresörler endüstride en sık kullanılan kompresör tiplerinden biridir. Bir blok içinde dönerek

havayı sıkıştıran erkek ve dişi rotorlar bulunur. Yağlı ve yağsız tipte vidalı kompresörler bulunmaktadır.



Şekil 3.5 Yağlı vidalı kompresör elemanın ve tahrik mekanizmasının tipik örneği [11]

Şekil 3.5'te yağlı vidalı tip bir kompresörün tipik akış şeması iletilmiştir. Hava giriş filtresi emilen hava içinde bulunan toz ve diğer parçacıkları filtre etmek amacıyla kullanılır. Filtre kullanılmaması halinde emilen hava içinde katı partiküller vida grubundaki erkek ve dişi rotor arasındaki mesafe mikron mertebesinde olduğu için ciddi zarar oluşturabilir [10].

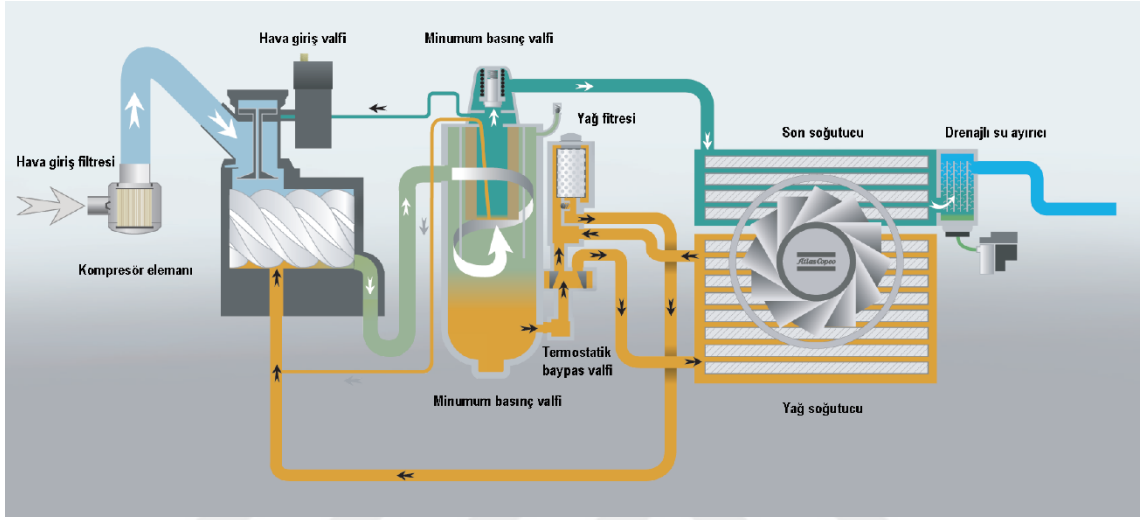
Hava giriş valfi ise kompresöre hava girişini kontrol eder. Hava giriş valfi kompresör istenilen basınç seviyesine ulaşana kadar açık kalarak hava girişine izin verir. İstenilen basınç seviyesine ulaşılnca emiş valfi kapanır ve hava girişini engellenir.

Kompresör vida elemanı bir blok içinde erkek ve dişi rotordan oluşur. Dönme hareketi ile hava hacmini küçülterek sıkıştırır.

Kompresör içerisinde ilave olarak bir pompa yoktur, yağ dolaşımı basınç farkı ile sağlanır. Minimum basınç valfi bu yağ dolaşımı için gerekli minimum basınç farkı oluşmasını sağlar.

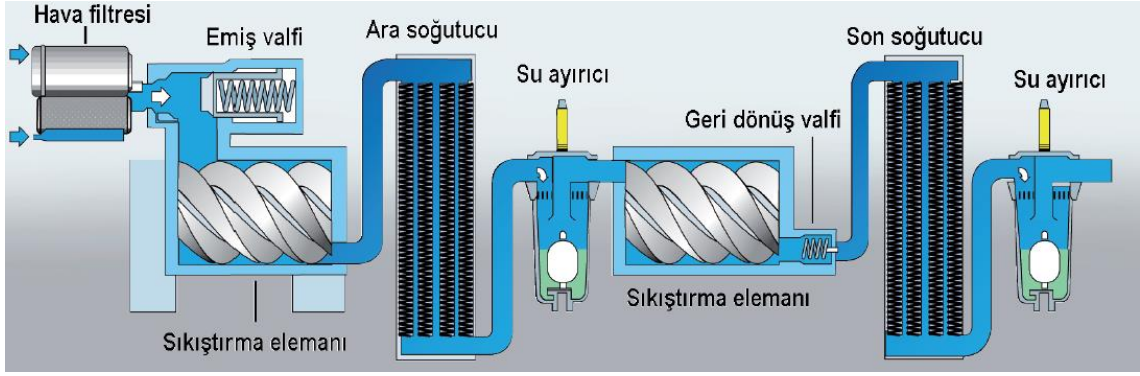
Sıkıştırma sonunda ısınan hava son soğutucuda soğutulur. Soğutma esnasında basınçlı hava içindeki su yoğuşur. Yoğuşan su ise su ayırıcı ile dışarı atılır.

Yağlı vidalı tip bir kompresörde yağın 3 temel işlevi vardır. Rotorların yağlanması, sızdırmazlık ve soğutmadır. Vida grubunda sıkıştırılan hava içindeki yağ, yağ ayırıcı ile havadan ayrıştırılarak yağ tankında depolanır. Basınçlı hava ısındığı gibi vida grubundan sonra yağda ısınır, ısınan yağ yağ soğutucusunda soğutulur ve vida grubuna tekrar iletilir. Yağın içindeki kirleticiler yağ filtresi ile filtrelenir ve yağ tekrar tekrar kullanılır [10].



Şekil 3.6 Yağlı vidalı kompresör akış şeması [11]

Yukarıda bahsedildiği gibi yağlı vidalı tip kompresörlerde hava ile yağ vida bloğu içinde temas ettiği için basınçlı hava içerisinde bir miktarda olsa yağ bulunur. Gıda, ilaç gibi bazı endüstrilerde basınçlı hava içerisinde yağ istenmez. Bundan dolayı yağsız vidalı basınçlı hava kompresörü kullanılır. Şekil 3.7’de yağsız vidalı kompresörün akış şeması gösterilmiştir. Yağlı vidalı kompresörlerde olduğu gibi yağ vida bloğu ile direkt temas etmediğinden, yağın soğutma görevinden faydalanılamaz. Bu durumdan dolayı yağsız vidalı kompresörlerde erkek ve dişi rotor yüksek ısı ve sürtünmeye dayanıklı bir malzeme ile kaplanırlar. Bu kaplama malzemelerinde çalışabileceği maksimum sıcaklık sınırlı olduğundan, yağsız vidalı kompresörlerde sıkıştırma işlemi birden fazla kademede yapılabilir. Rotorda izin verilen maksimum sıcaklık şartını aşmamak adına ara kademelerde soğutma işlemi uygulanır [10].



Şekil 3.7 Yağsız vidalı kompresörün akış şeması [11]

3.1.1.4 Dişli Kompresörler

Dişli kompresörlerin sıkıştırma elemanı birbirine zıt yönde dönen iki rotordan oluşur. Bu rotorların şekli dişe benzediği için dişli kompresör olarak adlandırılır. Şekil 3.8’de görülebileceği gibi basınçlandırma işlem aşamaları sırasıyla emme, sıkıştırma ve basma adımlarından oluşur. Emme aşamasında, rotorlar emme portunu kapatana dek içeriye hava alınır. Sonrasında içeri alınan hava odanın hacmi küçültülerek sıkıştırılır. Daha sonra çıkış portu açıldığında sıkıştırılan hava dışarı itilerek basınçlandırma işlemi tamamlanır [10].

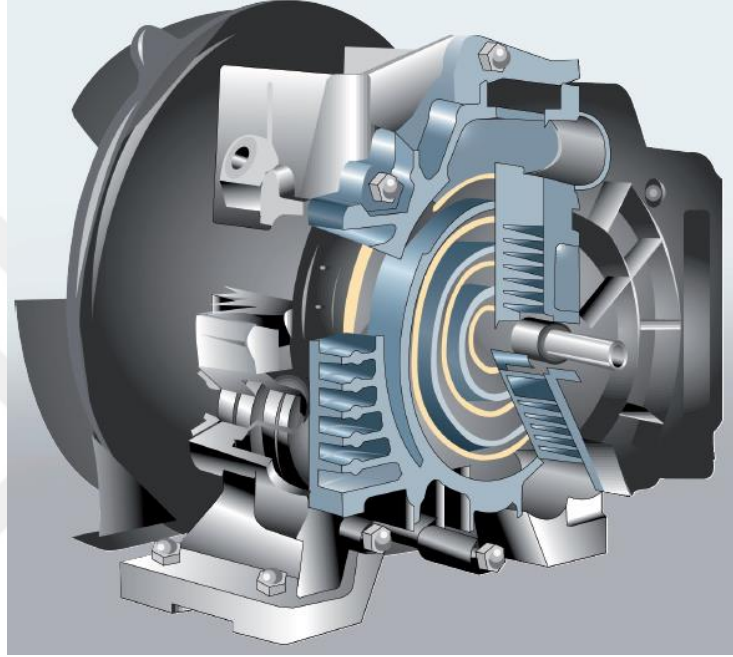


Şekil 3.8 Çift dişli kompresörün çalışma prensibi [11]

3.1.1.5 Spiral Kompresörler

Spiral kompresörler biri sabit diğeri yörüngesel hareketli iki adet sarmal biçimindeki eleman ile havayı sıkıştıran kompresör tipidir. Genellikle 15 kW'tan küçük kapasitelerde kullanılırlar.

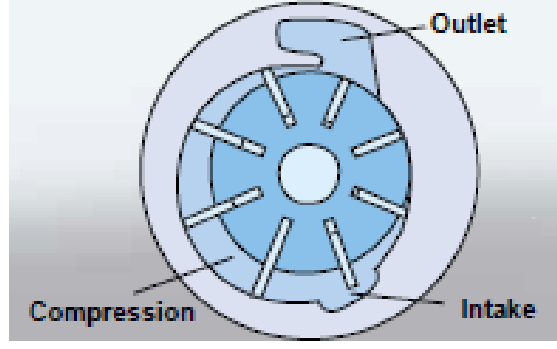
Belirli bir miktarda içeri alınan hava sürekli olarak daralan bir hacim içerisinde sıkıştırılır [10].



Şekil 3.9 Spiral kompresör kesit görünüşü [11]

3.1.1.6 Kanatlı Kompresörler

Kanatlı kompresörler rotor üzerindeki kanatların radyal hareketi ile sıkıştırma işlemini gerçekleştirir. Dönme hareketi ile ceplerin içinde hava sıkışır ve hacmi azalır. Kanatlar basma portuna geldiğinde ise sıkıştırılan hava dışarı iletilir [10].



Şekil 3.10 Kanatlı kompresör çalışma prensibi [11]

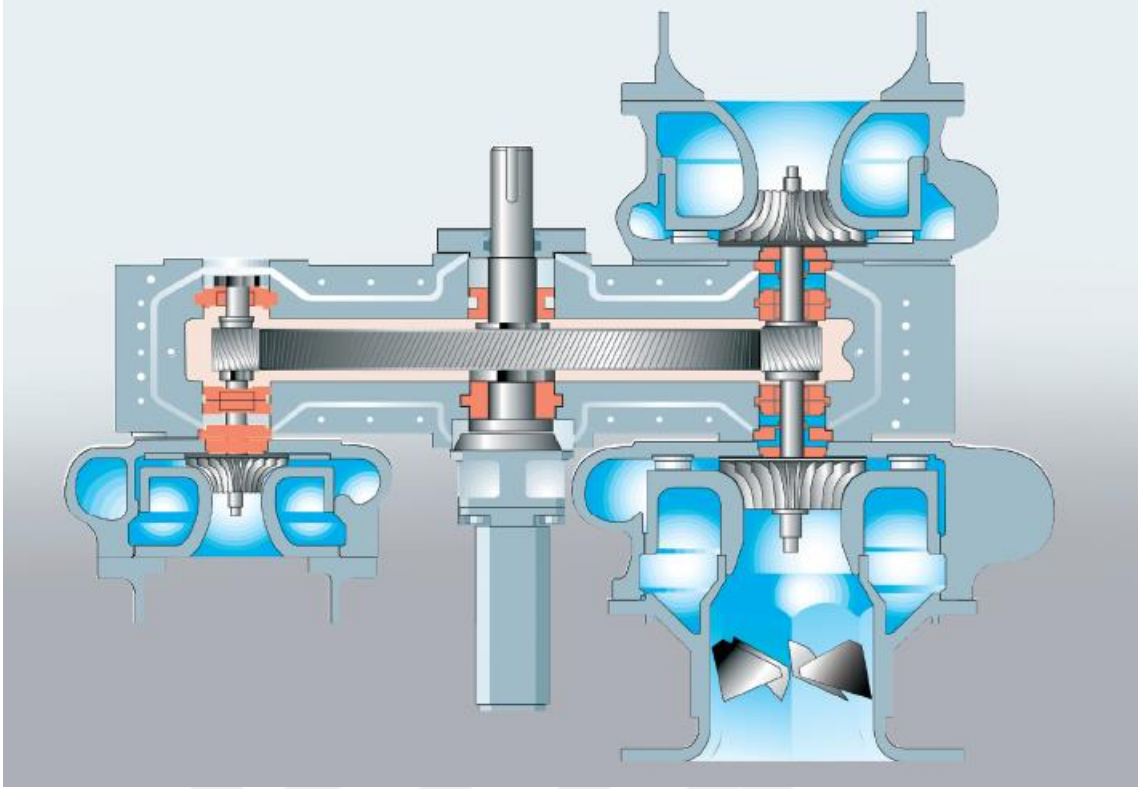
3.1.2 Dinamik Kompresörler

Dinamik kompresörlerde sıkıştırma işlemi; içeri alınan havanın döner çarklar vasıtasıyla hızının artırılmasıyla yapılır. Ardından hava yayıcıdan (difüzör) boşaltılır ve bu esnada havanın artırılmış kinetik enerjisi statik basınca dönüşür. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi dinamik kompresörlerin büyük bölümünü aksel ve radyal (santrifüj) akışlı turbo kompresörler oluşturur. Bu tip kompresörlerin tamamı yüksek hacimsel debiler için tasarlanır [11].



Şekil 3.11 Dinamik basınç hava kompresörlerinin sınıflandırılması [11]

Şekil 3.12’de 3 kademeli bir santrifüj kompresörün kesiti verilmiştir. Kompresör içine alınan hava bu üç kademede sıkıştırılıp, ara ve son soğutucuda soğutulup sisteme gönderilir. Çok yüksek hızlarından dolayı bu kompresörlerde özel rulmanlar ve yağlar kullanılır. Turbo kompresörlerdeki yüksek hızdan kaynaklı yağ sıcaklığı çok kritik olduğu için ilk çalıştırmada da yağ sıcaklığı belirli bir seviyede olması gerekir. Bunun için ilave olarak yağ ısıtıcısı ve yağ pompası bulunur [10].



Şekil 3.12 3 kademeli santrifüj kompresör [11]

Standart turbo kompresörlerde basınçlı hava kapasite kontrolü iki şekilde yapılır. Kompresör girişinde bulunan emiş kontrol vanası ile içeri alınan hava belirli sınırlar dahilinde kısılabılır. Eğer bu sınıra ulaşılmış ve hala üretim tüketimden fazla ise kompresör fazla miktarı atmosfere deşarj eder [10].

Emiş kontrol vanasını kısma sınırı aşılrısa kompresör yeterli basıncı oluştıramayacaktır. Böyle durumlarda kompresörden çıkan hava basıncı sistem hava basıncından az olduğu için geri teper. Bu geri tepme olayı çok yüksek hızda dönen türbinlerde titreşime neden olur ve kompresörün bu tür istenmeyen durumda çalışmasına “surge”te çalışması denir [10].

Turbo kompresörler teknoloji gereği yağ ile hava temas etmediği için yağsız hava üretirler. Yukarıda bahsi geçen kapasite kontrolünün sınırlı olması ve teknolojisinin sürekli devreye girip çıkmaya uygun olmamasından dolayı sürekli çalıştırılacak şekilde turbo kompresör kullanılmalıdır [10].

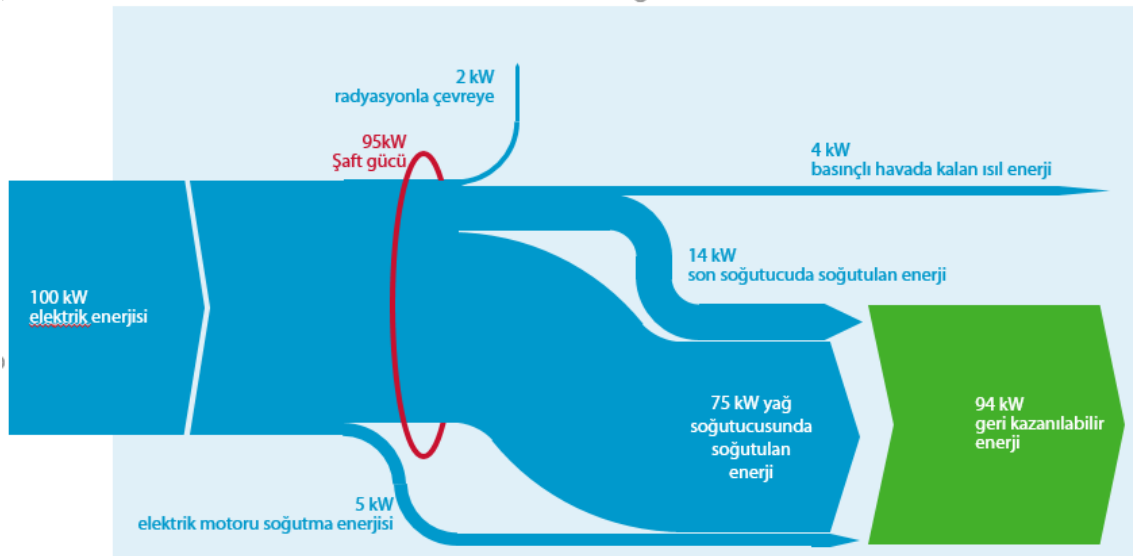
BASINÇLI HAVA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARI

4.1 Basınçlı Hava Isı Geri Kazanım Uygulamaları

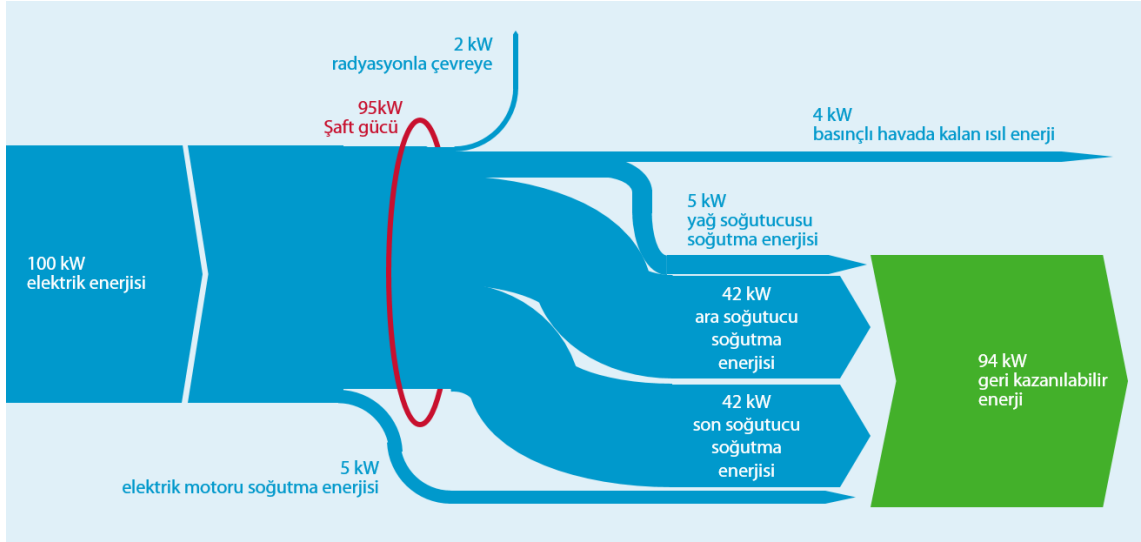
Basınçlı hava kompresörlerinde, emilen hava elementte sıkıştırıldıktan sonra sıcaklığı artar. Sisteme sıcak basınçlı hava gönderilmesi istenmediğinden, bu fazla ısı kompresör soğutma sistemi ile atık ısı olarak basınçlı havadan uzaklaştırılır.

Kompresöre verilen enerjinin %94'ünün geri kazanılması teorik olarak mümkündür.

Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de yağlı ve yağsız vidalı kompresörün enerji dengesini gösterilmiştir [12].

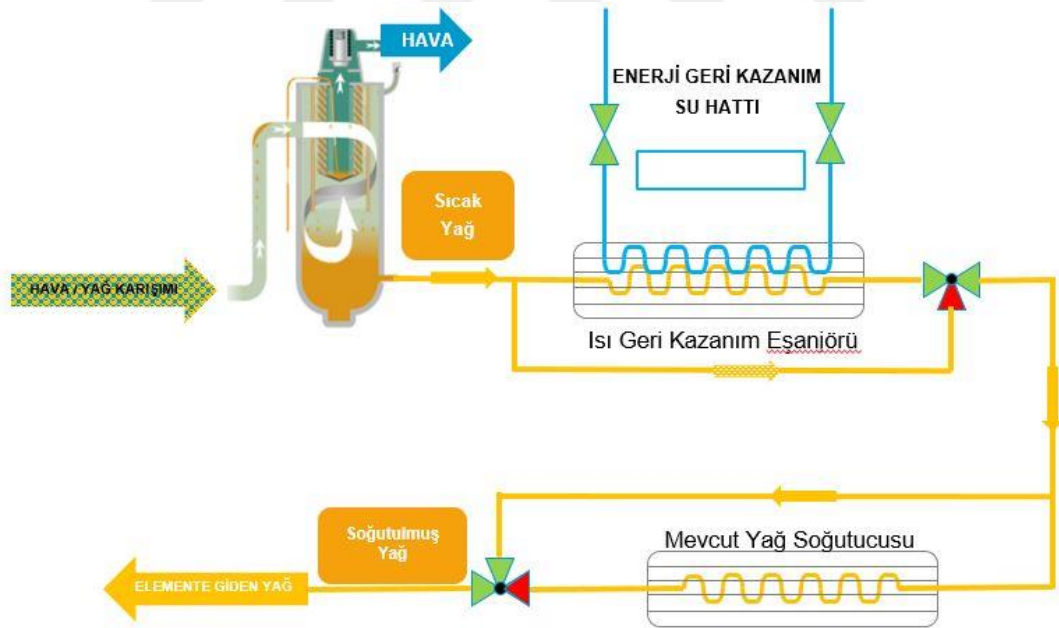


Şekil 4.1 Yağlı vidalı kompresör enerji dengesi [12]



Şekil 4.2 Yağsız vidalı kompresör enerji dengesi [12]

Kompresör üreticileri bu atık ısılardan faydalanmak için standart olarak ısı geri kazanım üniteleri geliştirip piyasaya sunmaktadır. Şekil 4.3'te piyasada örneklerine sıkça rastlanan yağlı vidalı tip kompresörün yağdaki atık ısıdan faydalanmak için geliştirilen ısı geri kazanım kitlerinin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Yağlı vidalı kompresör atık ısı geri kazanım kiti akış şeması [12]

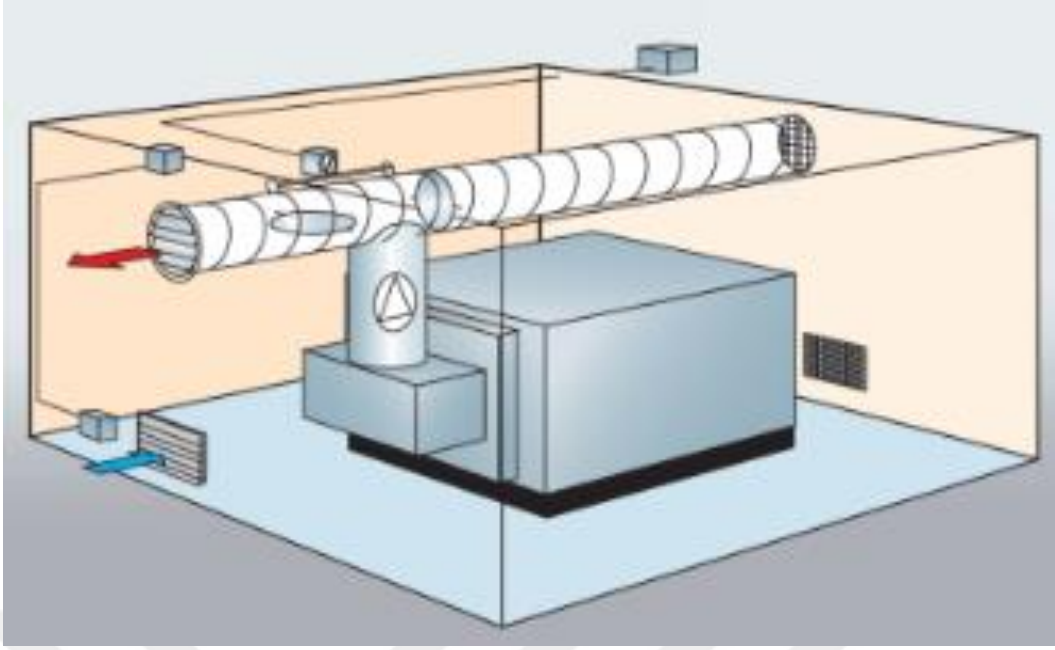
Yukarıdaki akış şemasında da görülebileceği üzere, yağlı vidalı kompresörün elementinden çıkan hava-yag karışımı yağ tankında ayrıştırılır. Normal şartlarda elementte ısınan yağ ve hava kompresörün mevcut hava-yag soğutucu

bataryalarında soğutulur. Yağdaki atık ısı mevcut soğutucuya gönderilmeden önce atık ısı geri kazanım kitine sokularak ve atık ısı faydalı ısıya dönüştürülebilir. Atık ısı geri kazanım kitinin diğer tarafında ısıtılan su, işletmelerde kullanım sıcak suyu ısıtmasında, proses sıcak suyu ön ısıtmasında, sıcak su kazanı dönüş suyu ısıtmasında, ısıtma tesisatında vb. gibi çeşitli noktalarda kullanılabilir.

Şekil 4.1’de yağlı vidalı tip kompresörün enerji dengesinde görülebileceği üzere, yağdan ısı geri kazanım yapılabilen bu kitler ile kompresörün nominal elektrik tüketiminin yaklaşık %75’ine tekabül eden geri kazanılabilir ısı enerji potansiyeli değerlendirilebilir.

Endüstride en sık kullanılan kompresör tiplerinden birinin yağlı vidalı tip kompresör olduğu ve birçok işletmede sıcak su ihtiyacı olduğu göz önüne alındığında bu tip ısı geri kazanım kitlerinin kullanılması enerji tasarrufu için ciddi önem arz etmektedir.

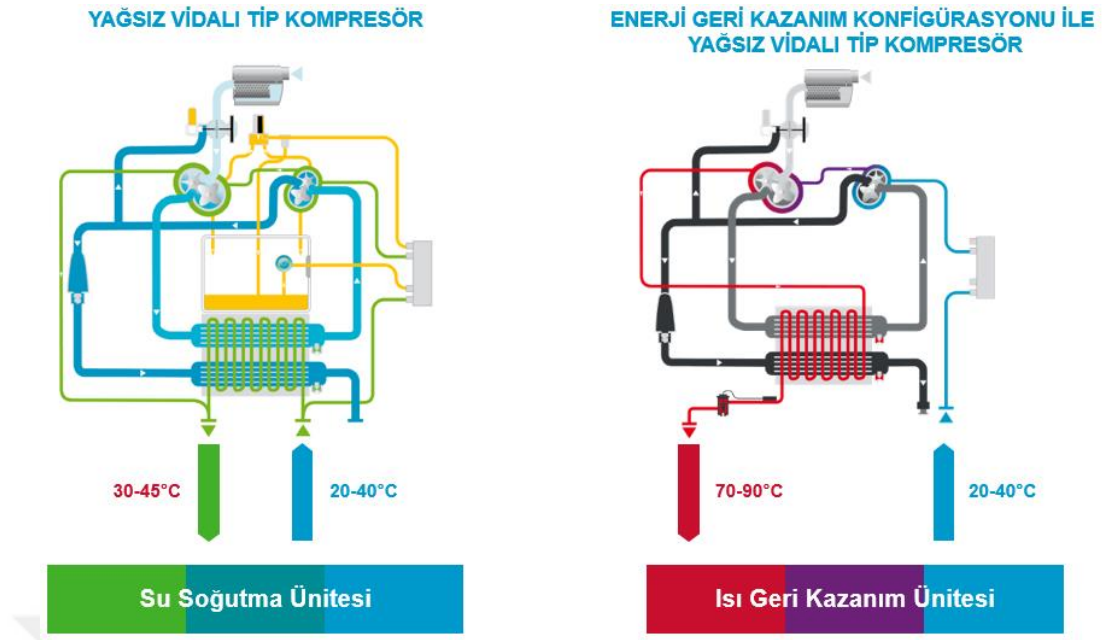
Kompresör yağından ısı geri kazanım kitleri ile su ısıtarak atık ısı kullanılmaması durumunda, kompresör egzozu mahal ısıtmasında kullanılabilir. Şekil 4.3’te görüldüğü gibi yağlı vidalı tip kompresörlerde kompresör egzozunun barındırdığı enerji yağın soğutma enerjisi, son soğutucuda basınçlı havanın soğutma enerjisi ve elektrik motoru soğutma enerjisini barındırmaktadır. Kompresör egzozu ilave kanal ile ısıtılacak mahale iletilebilir, sıcak havalarda bir klape ile dışarıya yönlendirilebilir. Şekil 4.4’te örnek kompresör egzozu kullanımı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Kompresör egzozunun mahal ısıtmasında kullanımı [12]

Şekil 4.2’de yağsız vidalı kompresörün enerji dengesinde de görülebileceği gibi, yağlı vidalı tip kompresörün enerji dengesinden farklılıkları vardır. Yağsız vidalı kompresörde elementin içinde yağ kullanılmaz, sadece hareketli dişlileri yağlama için kullanılır. Bundan dolayı yağlı kompresöre göre yağdaki soğutma ihtiyacı çok daha düşüktür. Fakat ara kademe soğutma enerjisi, son soğutucu soğutma enerjisi, elektrik motoru soğutma enerjisi ve yağ soğutma enerjisi toplamı yağlı vidalı kompresör geri kazanılabilir enerji miktarı ile benzerdir [12].

Yağsız vidalı kompresörlerde ara kademe ve son soğutucuda genellikle soğutma kulesi ile soğutulan su soğutma suyu olarak kullanılır. Kompresörde soğutma işini yaptıktan sonra ısınan soğutma suyu farklı bir yerde ısıl potansiyel olarak kullanılabilir ise ara soğutucu ve son soğutucudaki atık ısıdan faydalı enerji olarak yararlanılmış olur. Fakat soğutma suyu sıcaklığı merteye olarak düşük olduğu için bu atık ısıya kullanım noktası bulmak zor olabilir. Bu durumdan dolayı kompresör üreticileri su soğutmalı yağsız vidalı kompresörlerde soğutma suyu akış konfigürasyonunu değiştirerek soğutma suyunun çıkış sıcaklığını arttırıp, ısıl kaynak olarak daha kolay kullanılmasına olarak sağlayabilir. Şekil 4.5’te yağsız vidalı tip bir kompresörün akış şemasını ve enerji geri kazanım kiti kullanılması durumunda değiştirilen soğutma suyu konfigürasyonu gösterilmiştir [12].



Şekil 4.5 Yağsız vidalı kompresör akış şeması [12]

Yukarıdaki akış şemasında da gösterildiği gibi, yağsız vidalı tip bir kompresörün soğutma suyu normal durumda ara soğutuculara, son soğutuculara ve yağ soğutucusuna ve vida bloğuna paralel olarak gönderilir.

Enerji geri kazanım kiti kullanıldığı durumda soğutma suyu soğutma yapacağı her bölgeye seri olarak gönderilir. Önce yağ soğutucu bataryaya sonra sırasıyla vida bloklarına, ara soğutucu ve son soğutucu bataryaya gönderilerek soğutma işleme yaptırılır. Böylece soğutma suyu çıkış sıcaklığı artırılmış olur ve atık ısı daha fazla kullanılabilir hale gelir.



Şekil 4.6 Yağsız vidalı kompresör ısı geri kazanım sistemi [12]

Şekil 4.6'ta görülebileceği üzere ısı geri kazanım kiti ile alınan ısınmış kompresör soğutma suyu, sıcak su kullanım ısı değiştiricisine iletilir burada kullanıldıktan sonra yedekte soğutma ısı değiştiricisine iletildikten sonra kompresöre tekrar soğutma yapmak üzere iletilir. Sıcak su kullanım noktasında düşük kapasitede kullanım olması veya hiç kullanım olmaması durumuna karşılık, ısı geri kazanım kitinde yedek soğutma ısı değiştiricisi bulunur. Soğutma suyunun yeteri kadar soğutulmadığı durumlarda (sıcak su kullanım noktasında kısmi yük olduğu veya hiç olmadığı durumlarda) bu ısı değiştiricisinde soğutma suyu istenilen sıcaklığa düşürülür. Böylece kompresör işletimi için gerekli soğutma suyu her durumda hazırlanabilecek şekilde tasarlanmış olur [12].

4.2 Basınçlı Hava Kaçak Giderimi

Endüstriyel işletmelerde basınçlı hava kaçakları ciddi miktarda enerji sarfiyatına yol açabilir. Basınçlı hava kaçakları, kompresörlerde üretilen basınçlı havanın %25'e kadar kısmını oluşturabilir [13]. Basınçlı hava üretmek için harcanan enerjiyi düşündüğümüzde bunun ne denli büyük enerji kaybı olduğunu kolayca anlayabiliriz. Basınçlı hava kaçakları sürekli meydana gelebileceği için bununla düzenli bir aksiyon planı ile mücadele etmek çok önemlidir. Tamamen önlemek neredeyse imkânsız olmakla birlikte düzenli tespit ve onarım planları ile %5 mertebelerine indirmek mümkündür [14].

Ayrıca, basınçlı hava kaçakları işletme kapalı olduğu zamanlarda dahi var olduğundan, sistemdeki tüm ekipmanların fabrika duruşta olduğu zamanlarda da çalışmasına yol açar. Böylece sistemdeki ekipmanların ömrü kısılır, bakım maliyetleri artar.

Basınçlı hava kaçakları çoğunlukla boru bağlantı noktalarında, vanalarda, regülatörlerde, yoğunlaşma kapanlarında ve ince plastik hortumlarda meydana gelir [14].

Şekil 4.7'de delik çapına göre yaklaşık kaçak miktarı ve bunun yol açtığı enerji kaybı belirtilmiştir.

Delik çapı: mm	1	3	5	10
Sızıntı (l/s) [6 bar'da]	1	10	27	105
Kompresördeki güç kaybı (kW)	0,3	3,1	8,3	33

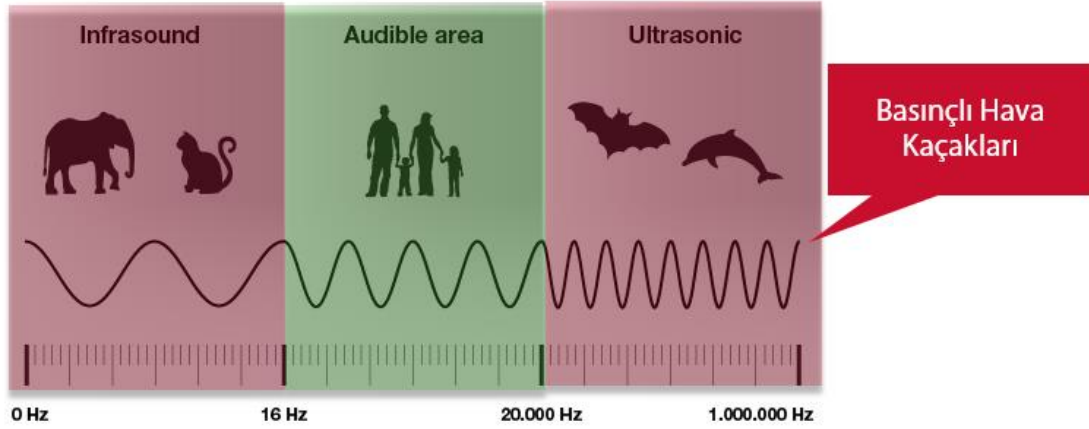
Şekil 4.7 Delik çapına göre yaklaşık kaçak miktarı [11]

Yukarıdaki tablodan da görülebileceği gibi basınçlı hava kaçaklarını önlemek adına düzenli aksiyon planı geliştirmek olmazsa olmazdır.

Endüstride basınçlı hava kaçaklarını tespit edebilmek adına birçok kaçak tespit cihazı kullanılmaktadır. Hava kaçaklarının büyük bir kısmı yüksek frekanslı sesler oluşturduğundan, bunları algılayabilen teknolojiye sahip ultrasonik akustik detektörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.8'de örnek ultrasonik akustik detektör ve Şekil 4.9'da basınçlı hava kaçaklarının frekansı gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Ultrasonik akustik kamera [15]



Şekil 4.9 Basınçlı hava kaçaklarının bulunduğu frekans aralığı [16]

Ultrasonik akustik detektörler ile kullanıcılar insan kulağı ile duyulmayan frekansta sese yol açan basınçlı hava kaçakların dahi tespitini yapabilir.

Haftanın her günü çalışmayan bazı günler duruşa geçen işletmeler, duruşta oldukları zamanlarda basınçlı hava kaçaklarının miktarını yüzde olarak aşağıdaki gibi hesaplayabilir.

Öncelikli olarak tüm basınçlı hava kullanım noktalarındaki vanalar kapatılır ve bir adet kompresör devreye alınır. İşletme duruşta olduğu ve tüm kullanım noktalarındaki vanalar kapalı olduğu için kompresör çalışmasının nedeni mevcut basınçlı hava kaçaklarından kaynaklandığı açıktır. Kompresör kararlı çalışma haline geldikten sonra yükte ve boşta çalışma süreleri not edilir. Bu işlem 5-10 kere tekrar edilip ortalaması alındıktan sonra aşağıdaki formülde yerine konulur.

$$Kaçak (\%) = \left[\frac{T \times 100}{T + t} \right] \quad (4.1)$$

Burada “T” kompresörün yükte çalış süresini (saniye), “t” ise boşta çalışma süresini temsil etmektedir. Buradaki yüzde ile kompresör gücü çarpılarak kaçaklardan meydana gelen enerji tüketim miktarı, kompresör debisi ile çarpılırsa kaçak debisi hesaplanabilir.

Eğer kaçak miktarını görmek adına test sırasında devreye alınan kompresör hiç boşta geçmiyorsa, kaçakların kompresörün ürettiği debiden daha fazla olduğunu anlayabiliriz. Böyle bir durumda ilave kompresör devreye alarak yukarıda tarif

edilen işlem yük-boş yapan kompresör için tekrar edilir ve yük-boş yapan kompresörden kaynaklanan kaçak miktarı hesaplanır. Daha sonra toplam kaçak miktarı hiç boşa geçmeyen kompresörün tüketimi ile yük-boş yapan kompresörün hesaplanan kaçak miktarı ile toplanarak hesaplanabilir.

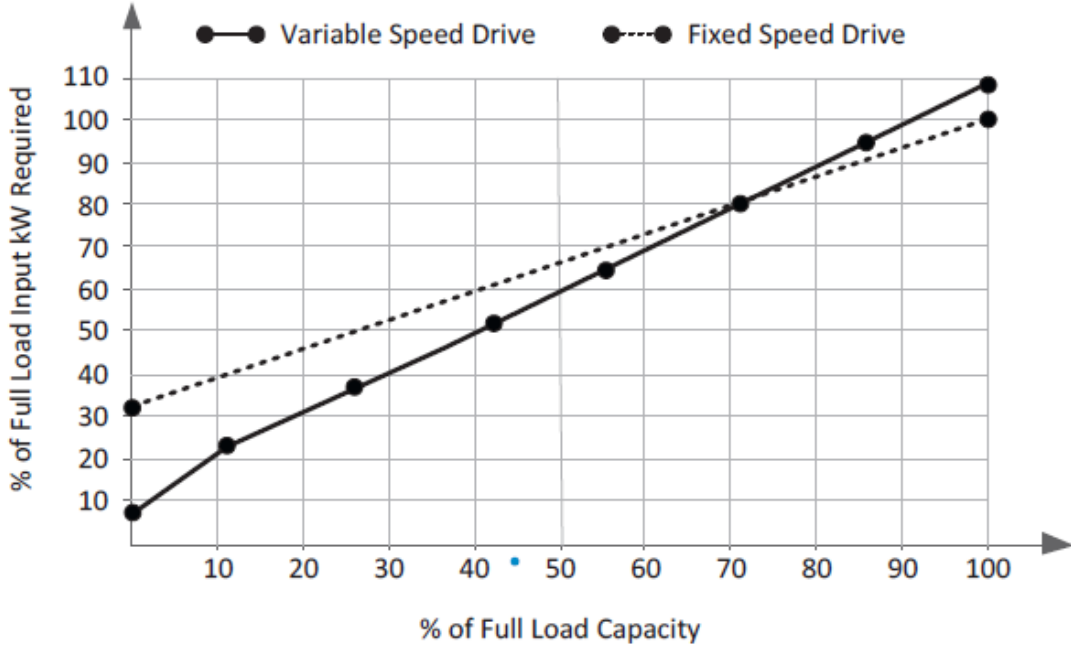
4.3 Hız Sürücülü Basınçlı Hava Kompresör Kullanımı

Değişken hız sürücülü kompresörler, sabit hızlı kompresörlerin aksine, kompresör motor hızını ayarlayarak basınçlı hava çıkış debisini değiştirebilir. Bir frekans kontrolörü motoru yöneterek ne zaman hız arttıracakını ne zaman azaltacağını belirler.

Değişken hız sürücülü kompresörlerde, kompresör tüketim tarafındaki talebe göre ayarlanan hızına göre basınçlı hava üretir ve buna göre enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Yani kompresör farklı hızlarda iken farklı enerji tüketimleri meydana gelmektedir [3].

Sabit hızlı kompresörler yalnızca iki modda çalışabilir: bunlar yükte veya boşta çalışmasıdır. Sabit hızlı kompresörler yükte iken belirli bir miktarda basınçlı hava üretmekte ve enerji tüketimi yükte iken çok değişmemektedir. Kompresörler boşta çalışırken basınçlı hava üretmemesi karşılık, nominal elektrik tüketiminin %20-%30'u kadar enerji tüketmeye devam etmektedir. Sabit devirli kompresörlerin yüke veya boşta girmesi işletmedeki basınçlı hava talebine bağlıdır. Eğer işletmenin basınçlı hava kullanım profili çok değişken ise, sabit devirli kompresörler sürekli yük/boş yapabilir. Böylece kompresörlerin boşta çalışma süresi artar, gereksiz enerji tüketimi meydana gelir. Değişken basınçlı hava kullanımı olan işletmelerin bu boşta enerji tüketimini yapmaması için değişken hız sürücülü kompresör kullanması önerilmektedir.

Şekil 4.10'da değişken hız sürücülü kompresörlerin ve sabit hızlı kompresörlerin farklı yükleme oranlarında gerekli enerji miktarları görülebilmektedir. Değişken hız sürücülü kompresörler değişken taleplerin çok olduğu durumlarda sabit hızlı kompresörlere göre daha verimli olmakla birlikte, talebin çok değişmediği durumlarda sabit hızlı kompresörlerin kullanımı enerji tüketimini olumlu yönde etkileyecektir [3].



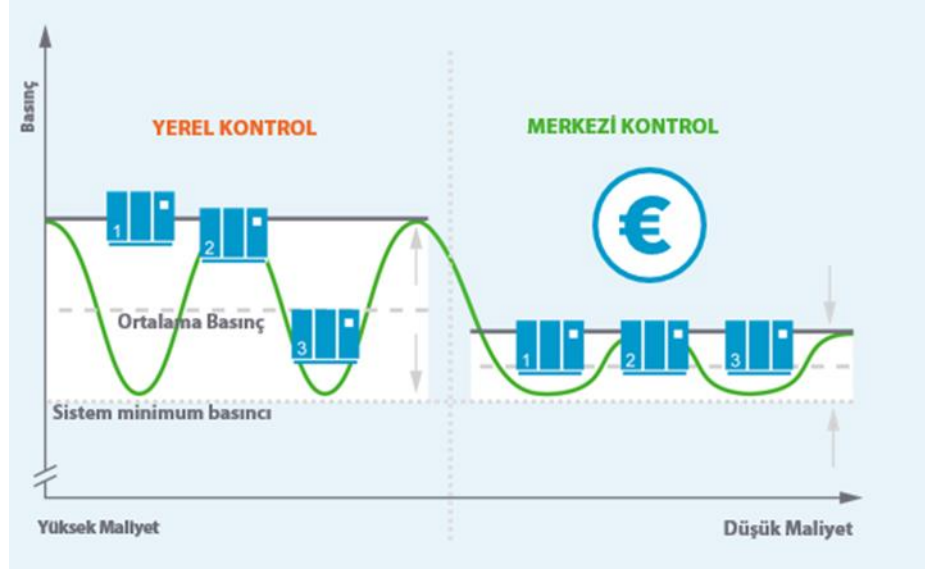
Şekil 4.10 Değişken hız sürücülü ve sabit hızlı kompresörlerin farklı kapasitelerde verim karşılaştırılması [3]

Yukarıdaki grafikten yola çıkarak işletmelerin basınçlı hava talebine baz yükü sabit hızlı kompresörler, değişken yükü ise hız sürücülü kompresörler ile cevap verecek şekilde kompresörleri kontrol etmesi önerilmektedir.

4.4 Merkezi Kontrol Cihazı Kullanımı

Merkezi kontrol cihazı, üzerinde barındırdığı kontrol algoritmaları sayesinde kendisine bağlı birden fazla makineyi tek noktadan kontrol edebilen bir elektronik üründür. Basınçlı hava kompresör üreticileri, birden fazla kompresör kullanılan işletmelerde hem enerji verimliliği sağlamak hem de işletmelere kontrol kolaylığı sağlamak adına merkezi kontrol üniteleri piyasaya sürmektedir.

Birden fazla kompresör kullanan işletmeler, kompresörleri ayrı ayrı kendi kontrol ünitelerinde basınç ayar değeri girerek kontrol edebiliyor. Bu durumda kompresörlerin yüke alma ve boşa alma basıncı kademeli olacak şekilde Şekil 4.11'de görüldüğü gibi ayarlanabiliyor. Durum böyle olduğunda basınçlı hava sisteminde mevcut çalışma basınç bandı aralığı çok geniş olabiliyor. Bu durum gerekli olan belirli basınç değeri için kompresörlerin daha yüksek basınç seviyelerinde çalıştırılmasına sebebiyet verebiliyor.

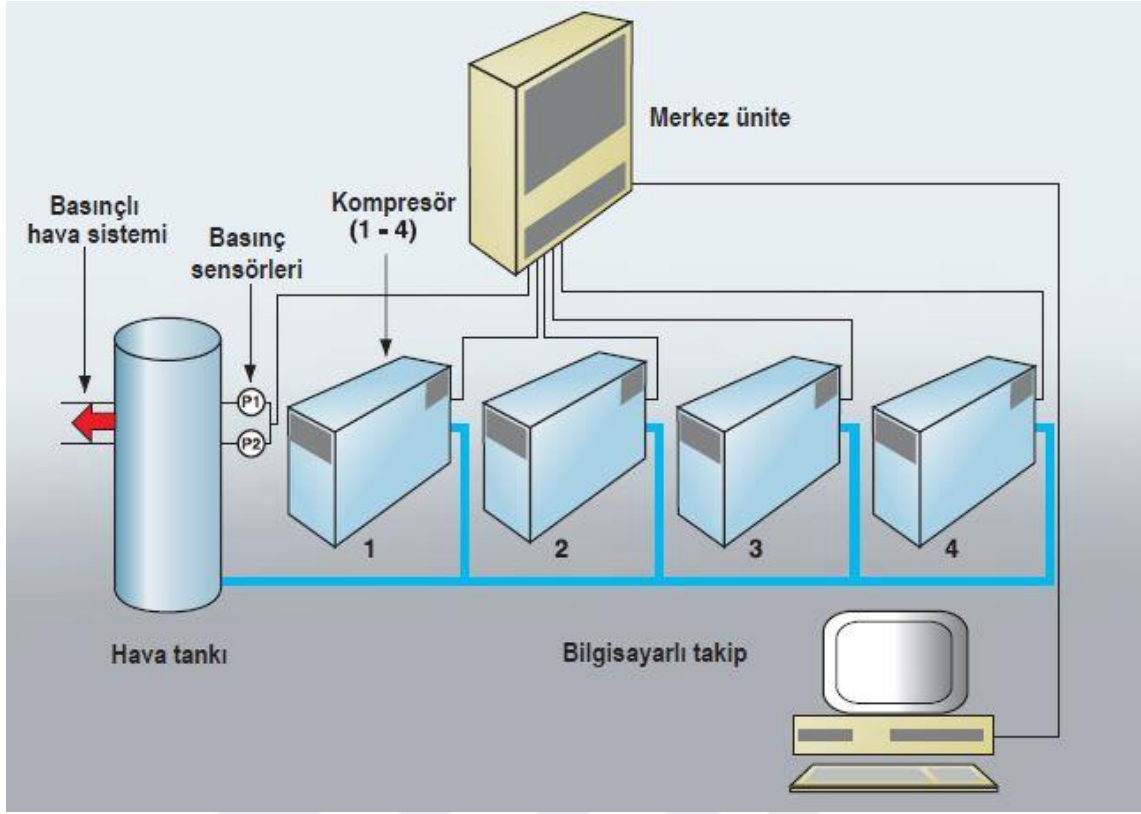


Şekil 4.11 Yerel kontrolde ve merkezi kontrolde çalıştırılan kompresörlerin ortalama çalışma basınçlarındaki değişim [17]

Ayrıca, basınçlı hava kompresör kullanıcıları, belirli basınçlı hava talebine göre mevcut kompresörlerin set basınçlarını ayarlamaktadır. Fakat basınçlı hava talebi üretim durumuna göre değişebilmekte ve kompresörler ilk seferdeki ayar basınç değerlerine göre çalışmaya devam edebilmektedir. Yani ilk durumda ayarlanan basınç ayarları, daha sonraki basınçlı hava talebi için en uygun ayar basınçları olmayabiliyor. Bu durum kompresörlerin istenildiği gibi çalışmamasına sebebiyet verebiliyor.

Sabit devirli kompresör teknolojisi gereği boşa çalışırken nominal elektrik tüketiminin %20-%30'u kadar elektrik enerjisi tüketmektedir. Kompresör kullanıcıları sabit devirli kompresörlerin yüke alma ve boşa alma basınçlarını bu kompresörlerin boşa çalışmasını en az seviyede tutacak şekilde ayarlamaları gerekmektedir. Fakat üretimdeki değişken basınçlı hava talebi ve birden fazla kompresörün olması bu durumun kontrolünü zorlaştırabilmektedir.

Günümüzde basınçlı hava kompresör üreticileri tarafından üretilen merkezi kontrol cihazları, üzerinde barındırdığı algoritmaya bağlı olarak değişmekle birlikte temelde şekil 4.12'de olduğu gibi kontrol sağlamaktadır.



Şekil 4.12 Merkezi kontrolör şematik çalışma şekli [11]

Kompresörler merkezi kontrol ünitesi ile kontrol edileceği için, kompresörler merkezi kontrol cihazına fiziki haberleşme kabloları ile bağlanır. Böylece merkezi kontrol cihazı kendisine bağlanan bu kompresörlere kontrol komutlarını (devreye gir, devreden çık, hızını arttır, hızını azalt vb.) gönderebilecektir. Aynı zamanda, basınçlı hava sisteminde bulunan hava tankına bağlanan basınç sensörleri ile tanktaki basınç verisi merkezi kontrol cihazına aktarılır. Hava tankında istenilen basınç değeri, ayar değeri olarak merkezi kontrol cihazına girilir. Böylece merkezi kontrol cihazı hava tankında istenilen basınç değerini elde edecek şekilde kendisine bağlı kompresörleri çalıştırır (Genellikle tüm kompresörler merkezi kontrol ünitesi ile kontrol edilmediğinde, kendi bünyelerinde basınçlı hava çıkış hattında bağlanan basınç sensörü verisine göre kontrol edilmektedir.).

Böylece değişken hava taleplerine en hızlı şekilde adapte olan merkezi kontrol cihazı, en uygun şekilde kompresörleri kontrol etmeye değişken durumlarda da devam eder. Böylece sabit devirli kompresörlerin boşa çalışma süreleri en aza indirilebilir.

Bilindiği gibi kompresörlerde spesifik enerji tüketimi birim hava üretimi için harcanan enerjiyi temsil etmektedir. Bu değer hız sürücülü kompresörlerde farklı motor hızlarında farklı değerlerde olabilmektedir. İleri kontrol algoritmasına sahip merkezi kontrol cihazları, hız sürücülü kompresörleri spesifik enerji tüketim değeri düşük olan noktada çalıştırarak enerji verimliliği sağlayabilmektedir.

Özetle, merkezi kontrol cihazı üzerindeki akıllı algoritmalar ile ilgili talebe karşılık en uygun kompresörü devreye alıp/çıkararak veya hız sürücülü kompresör ise kompresör hızını ayarlayarak kontrol sağlayan bir cihazdır. Kompresörlerin kendi teknolojilerinde bir değişiklik yapmadan onları en uygun şekilde kontrol eder.

4.5 Uygun Tank Hacmi

Basınçlı hava sistemlerinin en önemli ekipmanlarından bir diğeri ise hava tankıdır. Hava tankının en önemli görevi, basınçlandırılmış havayı depolayarak ani basınçlı hava taleplerine cevap verebilmektir. Bu şekilde ani taleplere cevap vererek sistemdeki basıncı dengeler ve sistemdeki kompresörlerin yük/boş yapma sayısını azaltır. Bu temel fonksiyonlarının yanında basınçlandırıldığı için kompresörden sıcak olarak çıkan basınçlı havanın soğutulmasına yardımcı olur. Bu soğuma sonucunda basınçlı hava içerisinde olan suyun ve yağın yoğunlaşma sonucu bir kısmı tahliye edilebilir. Böylelikle kurutucu ve filtrelerle destek görevi görmüş olur [10].

Yük/boş kontrollü kompresörleri barındıran bir basınçlı hava sisteminde uygun basınçlı hava tank hacmi aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir.

$$V = \left[\frac{0.25 \times Q_k \times P_1 \times T_0}{f_{max} \times \Delta p \times T_1} \right] \quad (4.2)$$

Burada :

V : Tank Hacmi (l)

Q_k : Kompresör Kapasitesi (l/s)

P₁ : Kompresör giriş basıncı (bara)

T₀ : Depodaki hava sıcaklığı (K)

T₁ : Kompresör hava giriş sıcaklığı (K)

Δp : Kompresörlerin yüke geçme ve boşa geçme basınçları arasındaki fark (bar)

f_{max} : Maximum çevrim frekansı

Çevrim frekansı belirli bir zaman içerisinde gerçekleşen çevrim sayısıdır. Bu çevrim yük/boş kompresörleri için yüke çalışma ve boşta çalışma sürelerinin toplamıdır. Örneğin, yükte çalışma süresi 20 saniye, boşta çalışma süresi 10 saniye olan bir kompresörün çevrim süresi 30 saniyedir. Çevrim frekansı ise 1/30 saniye olur.

Uygun çevrim frekansı değeri kompresör üreticisine göre değişiklik gösterebilir. Kompresör üreticisinin öngördüğünden büyük çevrim frekansı, ilgili kompresörün daha fazla yük/boş yapması anlamına geleceğinden, kompresörün bazı parçalarında normalde beklenenden daha fazla aşınmalara sebebiyet verebilir [10]. Dolayısıyla, basınçlı hava sistemindeki kompresörler çok sık yük/boş yapıyorsa tank hacmi arttırılarak yük/boş yapma sayısı uygun limitlerin altında tutulabilir. Böylece hem kompresörlerin erken yıpranması önlenir hem de boşta çalıştığı sırada harcanan gereksiz enerji tüketimi azaltılmış olur. Değişken devirli kompresörü olan basınçlı hava sistemlerin tank hacmi yukarıdaki formüldeki Q_k yerine hız sürücülü kompresörün en düşük hızdaki debi değeri girilerek hesaplanabilir.

4.6 Emiş Havaasının Soğutulması

Bulundukları odanın şartları kompresör çalışmasını etkilemektedir. Dolayısı ile kompresör odaları belirlenirken kompresör üreticilerinin belirttiği uygun şartlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Sıcaklığı yükseldiğinde havanın yoğunluğu düştüğünden, hava sıcaklığı arttığında havayı sıkıştırmak için gereken güçte artar. Dolayısı ile basınçlı hava kompresör odaları mümkün mertebe işletmenin en soğuk olabilecek noktalarına konumlandırılmalıdır. Aynı kompresör egzoz havası ortam sıcaklığını arttırmamak adına odadan uzaklaştırılmalıdır. Şekil 4.13'te örnek kompresör egzoz kanalı görseli paylaşılmıştır.



Şekil 4.13 Kompresör egzoz kanalı uygulaması [18]

Bu egzoz havasının ortam ısıtmasında kullanılabileceği, kompresörlerde atık ısı geri kazanım bölümünde bahsedilmiştir. Atık ısıyı kullanım noktası bulunamaz ise dışarı atılmalıdır.

Kompresör emiş havasının her 5°C azaltılması, kompresör verimliliği %2 arttıracığından, kompresör odası işletmesel olarak uygun görülen limit sıcaklık değerleri içinde kaçak şekilde serin tutulması ciddi tasarruf imkânı barındırmaktadır [18].

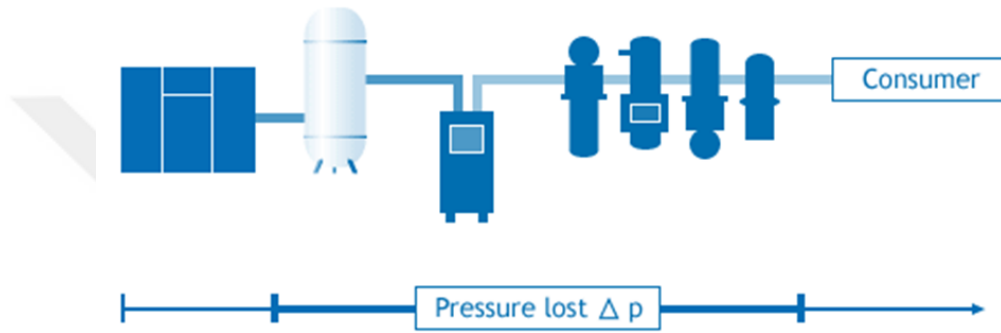
Emiş havasının sıcaklığının düşürülmesi enerji tüketimine etkisi aşağıdaki formülden hesaplanabilir [19].

$$WR = \left[\frac{T1 - T0}{T1 + 273} \right] \quad (4.3)$$

Burada, WR kompresör sıkıştırma işindeki azalma oranı, T1 ilk durumdaki emiş havası sıcaklığı (°C) ve T0 ise soğutulmuş emiş havası sıcaklığını (°C) temsil eder [19].

4.7 Basınç Kayıplarının ve İşletme Basıncının Düşürülmesi

Basıncılı hava kompresörlerinin birim basınçlı hava üretmek için harcadığı enerji ayar basınç değeri arttıkça artar. İşletmeler kullanım noktalarında ihtiyaç duydukları basınç değerinden bir miktar daha yüksek bir basınç değerinde kompresörlerini çalıştırır. Çünkü basınçlı hava üretildikten sonra tüketim noktasına ulaşana kadar çeşitli basınç kayıplarına maruz kalır. Şekil 4.14’de basınçlı hava üretim ve tüketim noktaları arası basınç kaybı yaratan elemanları şematik olarak gösterilmiştir.



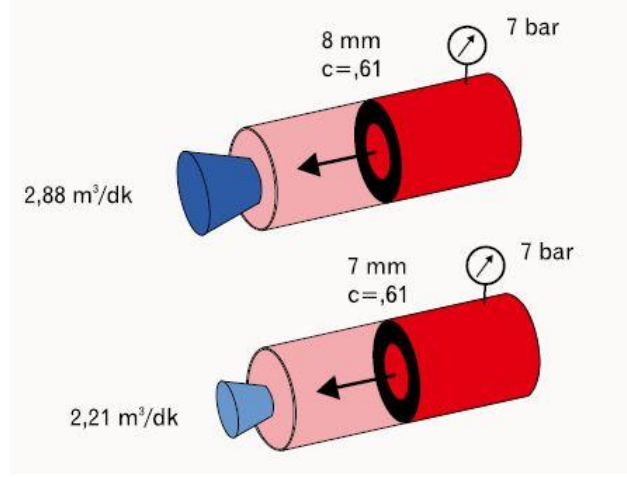
Şekil 4.14 Üretim ve tüketim noktaları arası basınç kaybı [16]

Basıncılı hava sistemi için gerekli olan filtre, tank, kurutucu ve borulama elemanları birer basınç kaybı nedenidir. Dolayısıyla basınçlı hava sistemi tasarım ve uygulama aşamasında ekipman seçimi yaparken yaratılacak basınç kaybı en az indirgenmelidir. Böylece kompresör işletme basıncını gereksiz yükseltilmesi önlenabilir. Düzgün tasarlanmış bir basınçlı hava sisteminde tank basıncı ile kullanım noktasındaki basınç farkı %10’un altında olmalıdır [20]. Tablo 4.1’de farklı basınçlarda 1 barlık basınç düşüşünün yaratacağı enerji tasarruf oranlarını belirtilmiştir [21].

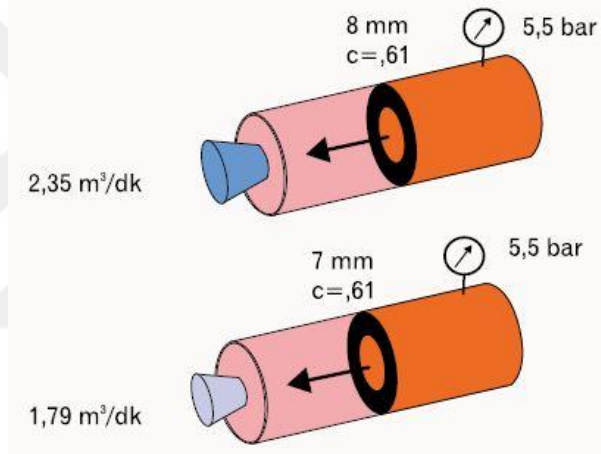
Tablo 4.1 İşletme basıncının düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf yüzdeleri [14]

Basınç Düşüşü (bar)	Tasarruf (%)
12-11	8
11-10	8
10-9	9
9-8	10
8-7	11
7-6	12
6-5	14
5-4	17
4-3	20

Yüksek basınçta basınçlı hava üretmek, birim hava için tüketilecek enerji miktarını arttıracak gibi kullanım noktasında da daha fazla basınçlı hava kullanımına sebebiyet verir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16' da aynı delik çapları için basınç 7 bar ve 5.5 bar olduğunda delikten çıkan basınçlı hava debi değişimi gösterilmiştir. 7 barda 8 milimetrelik bir çaptan 2.88 m³/dk'lık basınçlı hava debi çıkışı olurken, basınç 5.5 bar olduğunda bu debi değeri 2.35 m³/dk'ya düşmektedir. Yani basıncı 1.5 bar düşürmek kullanım tarafında yaklaşık %20 daha az basınçlı hava tüketimi sağlamaktadır [22].



Şekil 4.15 Basınç 7 bar olduğunda delikten çıkan basınçlı hava debileri [22]



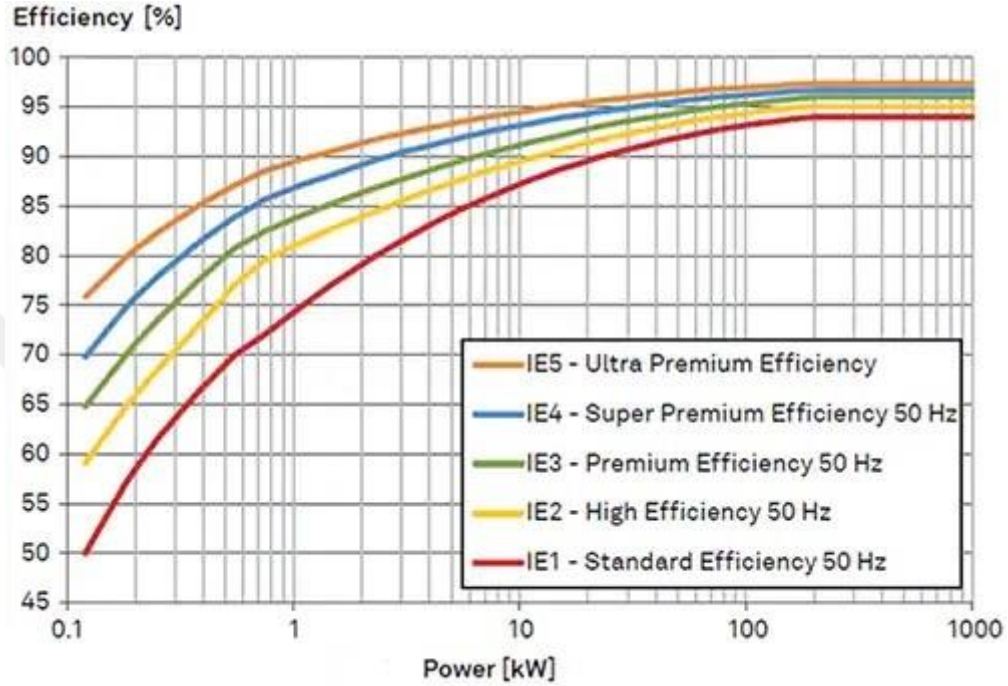
Şekil 4.16 Basınç 5.5 bar olduğunda delikten çıkan basınçlı hava debileri [22]

Dolayısıyla doğru basınçlı hava sistem tasarımı ve doğru ekipman seçimi ile basınç kayıplarını en aza indirgeyip kompresörlerin işletme basıncını mümkün mertebe azaltmak; basınçlı hava üretilirken tüketilen enerji miktarını azaltacağı, tüketim sırasında daha az basınçlı hava kullanımına yol açacağı ve mevcut basınçlı hava kaçak miktarlarını düşüreceğinden ciddi enerji tasarrufuna yol açacaktır.

4.8 Diğer Uygulamalar

Basınçlı hava kompresörü hava emiş filtreleri düzenli aralıklar ile değiştirilmelidir. Emiş filtrelerindeki 3 milibarlık bir basınç artışı enerji tüketimlerini yaklaşık %1 arttırır [18].

Elektrikli basınçlı hava kompresörlerinin enerji tüketimi elektrik motorunun enerji tüketimidir. Şekil 4.17’de motoru gücü ve verim sınıflarına göre verim değerleri verilmiştir. Motor gücü azaldıkça motor verim sınıflarına göre verim değerleri arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Elektrik motorunun mümkün olan en yüksek verim sınıfına sahip olması enerji verimliliği açısından istenen durumdur.



Şekil 4.17 Motor gücü ve verim sınıflarına göre verimlilikleri [23]

Kompresör bakımlarının düzenli ve düzgün bir şekilde yapılması basınçlı hava sistem performansı üzerinde direkt etkiye sahiptir. Yetersiz ve uygunsuz bakım sistem performansının düşmesine ve dolayısıyla ilave enerji maliyetlerine yol açar. Ayrıca ekipman ekonomik ömürlerini olumsuz etkiler. Dolayısıyla basınçlı hava sistemindeki ekipmanların düzenli bakımlarının yapılması ciddi önem arz etmektedir [24].

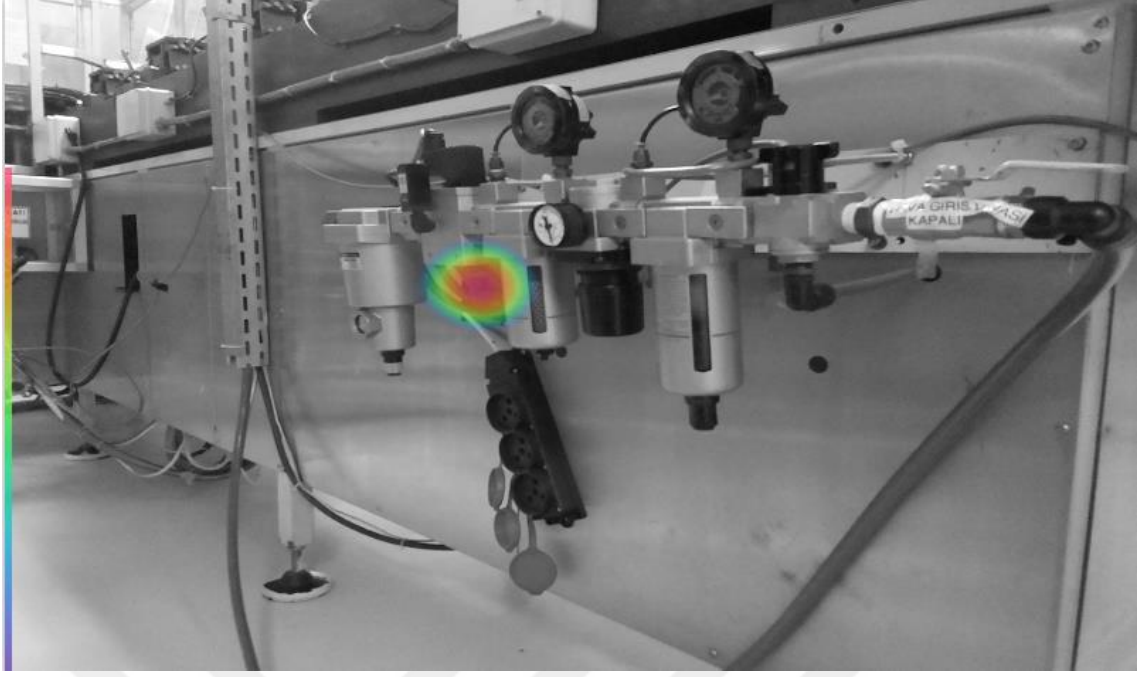
5.1 Basınçlı Hava Kaçak Taramaları

2021 yılı içerisinde 22 farklı işletmede akustik kamera ile basınçlı hava kaçak taraması yapılmıştır. Kullanılan akustik termal kameranın teknik bilgileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

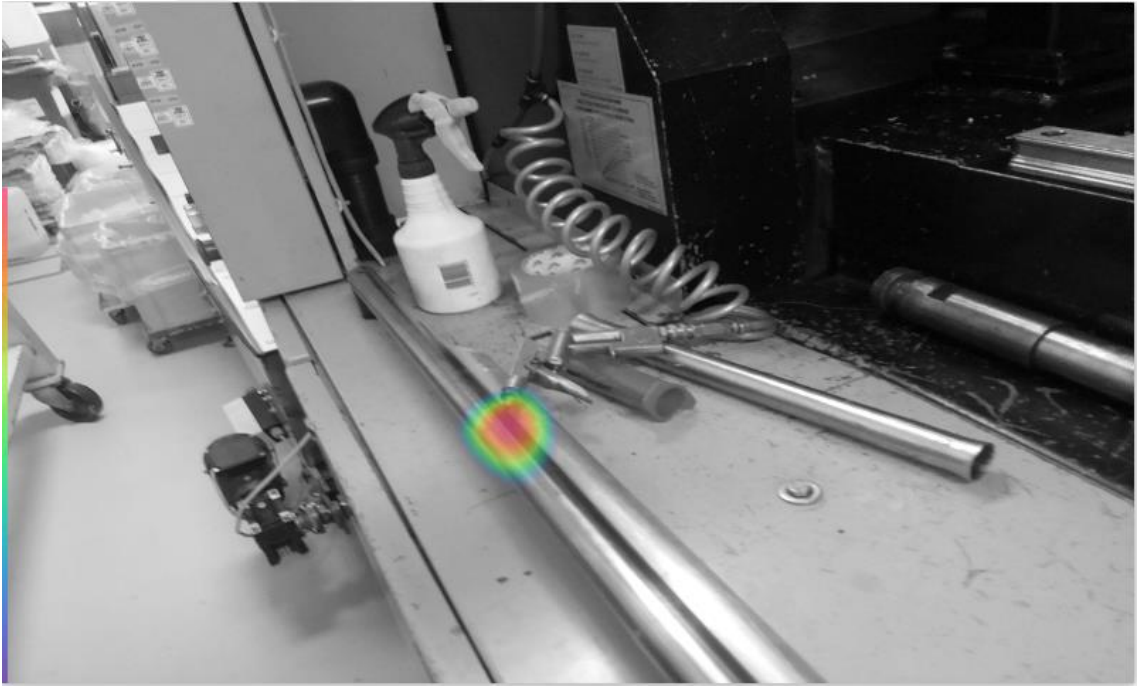
Tablo 5.1 Akustik kamera teknik özellikleri

Marka	Atlas Copco
Model	Akustic Camera
Boyut	273 x 170 x 125 mm
Koruma Sınıfı	IP51
İşletme Şartları	-10 °C – 50 °C - %0 - %90 RH
Akustik Ölçüm	124 adet mikrofon
Bant Genişliği	2 kHz - 31 kHz
Ekran	Dokunmatik 5 inç
Ölçüm Mesafesi	0.3-100 m

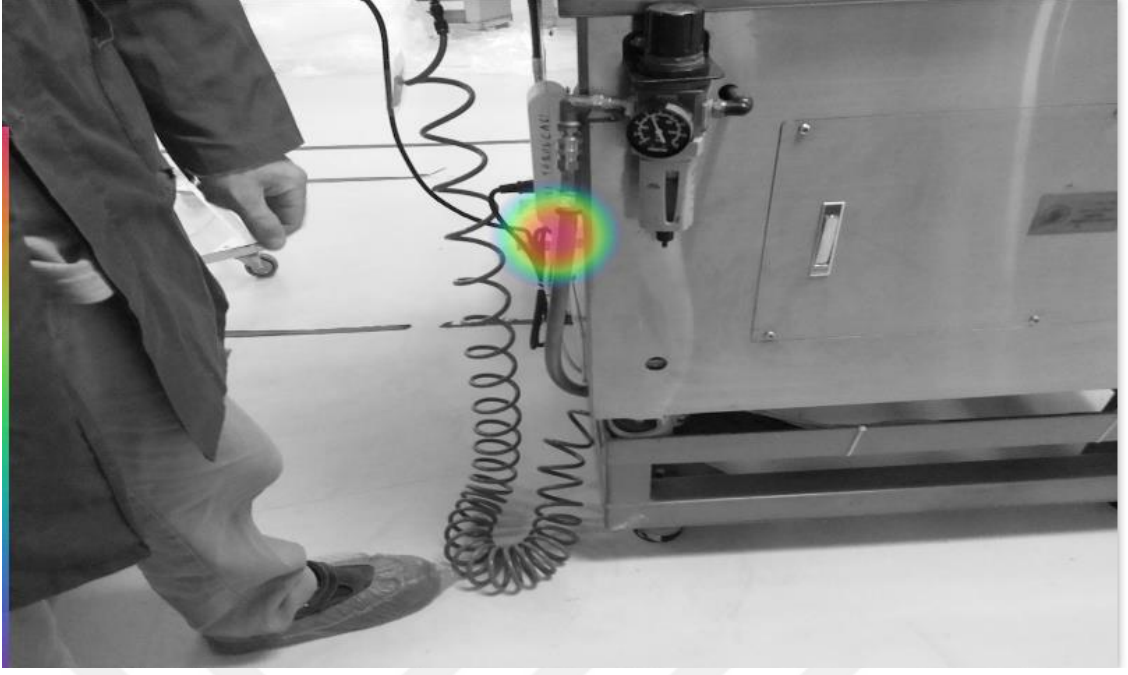
Saptanan basınçlı hava kaçaklarının örnek görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 Örnek basınçlı hava kaçağı-1



Şekil 5.2 Örnek basınçlı hava kaçağı-2



Şekil 5.3 Örnek basınçlı hava kaçağı-3

22 farklı işletmede tamamlanan basınçlı hava kaçak tarama işlemi sonucunda 1,394 farklı noktada basınçlı hava kaçağı olduğu tespit edilmiştir. Bu kaçakların toplam debisi 71,379.8 l/dk olarak ölçülmüştür. Kaçakların noktalarının tespiti ve kaçak debilerinin hesaplanması kullanılan akustik kamera ile yapılmıştır. Kaçak debisi tespit edildikten sonra bu kaçakların sebebiyet verdiği enerji tüketimi hesaplanmıştır. Bu hesap yapılırken birim basınçlı hava üretmek için gerekli olan enerji tüketim değeri (SET) 440 J/l olarak kabul edilmiştir. Bu kabul yapılırken orta basınç seviyelerinde çalıştırılan bazı kompresörlerin SET değerleri incelenmiş ve ortalama olarak 440 J/l değeri kabul edilmiştir.

Daha sonra ölçülen kaçakların sebebiyet verdiği enerji tüketimi yıllık 4,187,614.9 kWh olarak hesaplanmıştır.

Sanayi aboneleri tek terimli elektrik tarifi birim fiyatı 1.0474 TL/kWh olarak belirtilmiştir [25]. Elektrik enerji birim fiyatı olarak bu değeri aldığımızda basınçlı hava kaçaklarının yıllık parasal maliyeti 4,386,107.9 TL olarak hesaplanmıştır.

Türkiye elektrik enerjisi karbondioksit (CO₂) emisyon faktörü 0.481 kg/kWh olarak kabul edilmektedir [26]. CO₂ faktörü olarak bu veriyi kullandığımızda

basıncılı hava kaçaklarının yıllık CO2 emisyon miktarı 2,014.24 ton olarak hesaplanmıştır.

Ortalama bir basıncılı hava kaçağının debisi 51.1 l/dk, yıllık maliyeti ise 3,164.4 TL ve yıllık CO2 emisyon miktarı 1.44 ton olarak hesaplanmıştır. Hesap adımları aşağıdaki tabloda daha detaylı iletilmiştir.

Tablo 5.2 Basıncılı hava kaçak tarama hesap işlem adımları

	Açıklama	Değer	Birim	Formül
A	Tarama Yapılan işletme Sayısı	22.0	adet	-
B	Toplam Kaçak Adeti	1,394.0	adet	Ölçüm
C	Toplam Kaçak Debisi	71,379.8	l/min	Ölçüm
	Toplam Kaçak Debisi	1,189.7	l/s	$C / 60$
D	Ortalama Spesifik Enerji Tüketimi (SET)	440.0	J/l	Kabul
E	Kaçakların Sebebiyet Verdiğı Güç	523.5	kW	$ \times D / 1000$
F	Yıllık Çalışma Saati	8,000.0	h	Kabul
G	Yıllık Enerji Kaybı	4,187,614.9	kWh	$E \times F$
Ğ	Elektrik Birim Fiyat	1.0474	TL/kWh	-
H	Toplam Kaçak Maliyeti	4,386,107.9	TL	$G \times $
I	CO2 Emisyon Faktörü	0.481	kg/kWh	-
İ	Kaçaklardan Meydana Gelen Yıllık CO2 Emisyon Miktarı	2,014.24	Ton CO2	$G \times I$
J	Ortalama Bir Kaçak Debisi	51.2	l/min	C / B
K	Ortalama Bir Kaçak Maliyeti	3,146.4	TL	H / B
L	Ortalama Bir Kaçak CO2 Emisyon Miktarı	1.44	Ton CO2	$İ / B$

Basınçlı hava kaçak taramaları üretim, dağıtım ve kullanım noktalarında yapılmış olup daha sıklıkla kullanım noktalarında kaçaklara rastlanmıştır.

Basınçlı hava regülatörlerinde, hava tabancalarında, hava dağıtım panolarında ve hareketli küçük dağıtım boru, branşman, dirsek gibi noktalarda sıklıkla kaçak saptanmıştır. Basınçlı hava kaçakları ilgili ekipmanların yıpranmasına bağlı olarak meydana geldiği için bugün olmayan bir noktada yarın basınçlı hava kaçağına rastlanabilmektedir. Ayrıca düzenli olarak kaçak taraması yaptıran işletmelerde bulunan kaçak nokta sayıları, düzenli kaçak tarama yaptırmayan işletmelere göre çok daha azdır. Bu durumlardan dolayı basınçlı hava kaçak tarama ve saptanan kaçak noktalarını onarmak ile ilgili düzenli aksiyon planları oluşturulması önerilmektedir.

5.2 Merkezi Kontrolör Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümdeki örnek çalışmalar Atlas Copco Optimizer 4.0 merkezi kontrol cihazı için yapılmıştır. Optimizer 4.0 merkezi kontrol cihazı ile 30'a kadar kompresör tek bir noktadan kontrol edilebilmektedir. Bu cihazın bünyesinde 3 adet kontrol algoritması bulunmaktadır. Bunlar; eş yaşlandırma algoritması, zorunlu sıralama algoritması ve enerji tasarrufu algoritmasıdır. Bu merkezi kontrol cihazı ile kompresörlerini kontrol edecek kullanıcılar, bahsi geçen 3 kontrol algoritmasından herhangi birini seçebilmektedir.

Eş yaşlandırma algoritması ile merkezi kontrol cihazı kendisine bağlı kompresörlerin çalışma saatlerini eşitleyecek şekilde kompresörleri çalıştırmaktadır. Böylece kompresörlerin çalışma saatleri eşitleneceği için bakım planlamaları daha rahat yapılabilecektir. İşletme yetkilileri tek seferde birden fazla kompresör bakımını yapabilecektir. Hem kompresörlerin bakım takibi hem de bakım planlaması için harcanacak zamandan tasarruf edilebilecektir. Aynı zamanda bakım maliyetleri işçilik süresi kısılacağı için azalacaktır.

Zorunlu sıralama algoritması ile işletme kendi belirledikleri çalışma öncelik sıralamasını merkezi kontrol cihazına tanımlayıp, otomatik olarak kompresörler o öncelik sırasına göre çalıştırılabilmektedir.

Enerji tasarrufu algoritması ile kompresörler mevcut basınçlı hava talebine en az enerji tüketerek karşılık verebilecek şekilde otomatik olarak çalıştırılır. Tüm kompresörlerin performans eğrileri (ilgili basınç ve hızda ne kadar basınçlı hava üretebileceği buna karşılık ne kadar enerji tüketiceği) merkezi kontrol cihazına tanımlanır. Böylece merkezi kontrol cihazı farklı basınçlı hava taleplerine karşılık en uygun kompresör opsiyonlarını öğrenmiş olur. Yani basınçlı hava talebi arttığında veya azaldığında hangi kompresörü devreye alacağını veya durduracağını bilir. Benzer durum hız sürücülü kompresörler için geçerlidir. Bilindiği üzere hız sürücülü kompresörler farklı hızlarda farklı spesifik enerji tüketimine sahiptir. Merkezi kontrol cihazı kütüphanesine hız sürücülü kompresörlerinde performans eğrileri tanımlı olacağı için bu hız sürücülü kompresörlerin hangi hızlarda en optimum enerji tüketimine sahip olacağını bilir ve bu hızlarda kompresörleri çalıştırmaya odaklanır.

Yapılan örnek çalışmalarda, 3 farklı kompresör dairesindeki kompresörler Optimizer 4.0 merkezi kontrol cihazı (enerji tasarrufu algoritması) ile kontrol edilseydi ne kadar enerji tasarrufu olabileceği ortaya konulmuştur.

Merkezi kontrolör örnek çalışmaları yapılırken aşağıdaki işlem adımları gerçekleştirilmiştir.

- Mevcut kompresör dairelerinde 1 hafta boyunca enerji ölçümlerinin alınması, ilgili kompresör bilgilerinin toplanması
- Atlas Copco Airchitect yazılımında mevcut kompresör dairelerinin yaratılıp, alınan ölçüm verilerinin sisteme yüklenmesi
- Mevcut durumun simülasyonu ve analizi
- Mevcut kompresör dairesine Optimizer 4.0 merkezi kontrol cihazı aynı basınçlı hava talep trendi ile birlikte entegre edilmesi
- Yeni durumun simülasyonu ve analizi

5.2.1 1. Örnek Çalışma

Merkezi kontrolör ile ne kadar enerji verimliliği sağlanabileceğini görebilmek adına bir işletmede 1 hafta boyunca enerji ölçümü alınmıştır. Sonrasında Atlas

Copco şirketinin Airchitect yazılımı kullanılarak simülasyon çalışması ile merkezi kontrolör cihazının etkileri analiz edilmiştir.

Ölçüm alınan işletmenin makine parkuru Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 1. örnek mevcut makine parkuru

Kompresör No	Kurulu Güç(kW)	Tip	Sürücü	FAD (l/s)
Kompresör 1	160	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	444
Kompresör 2	250	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	632
Kompresör 3	315	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	758
Kompresör 4	132	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	346

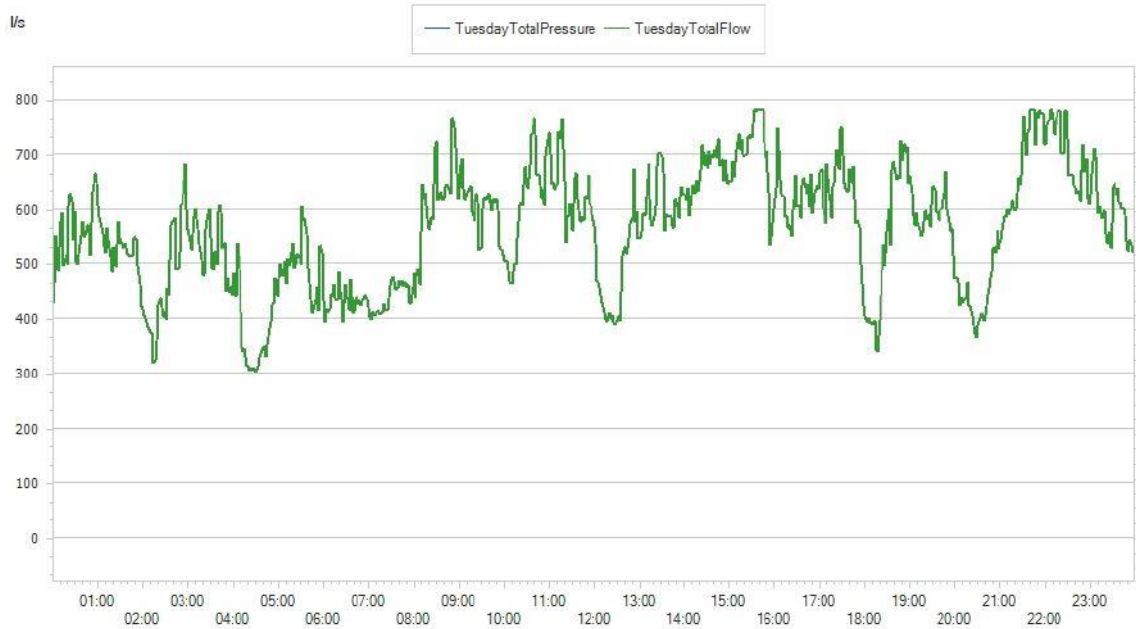
Bu kompresörlerin her birinde 1'er haftalık enerji ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve kayıt altına alınmıştır. Alınan enerji ölçümleri Atlas Copco şirketinin Airchitect yazılımına yüklenerek mevcut durumda ilgili kompresörler kaç saat yükte veya boşta çalışmış ve bu süreçlerde ne kadar enerji tüketmiş bunlar ortaya konmuştur. Aynı zamanda ilgili kompresörlerin performans verileri yazılımda yüklü olduğu için kompresörlerin üreteceği debi değerleri yazılımından faydalanılarak dolaylı yoldan ortaya konulmuştur. 1 haftalık mevcut basınçlı hava talep trend grafikleri aşağıda paylaşılmıştır.

Current situation Monday 4.10.2021



Şekil 5.4 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi

Current situation Tuesday 5.10.2021



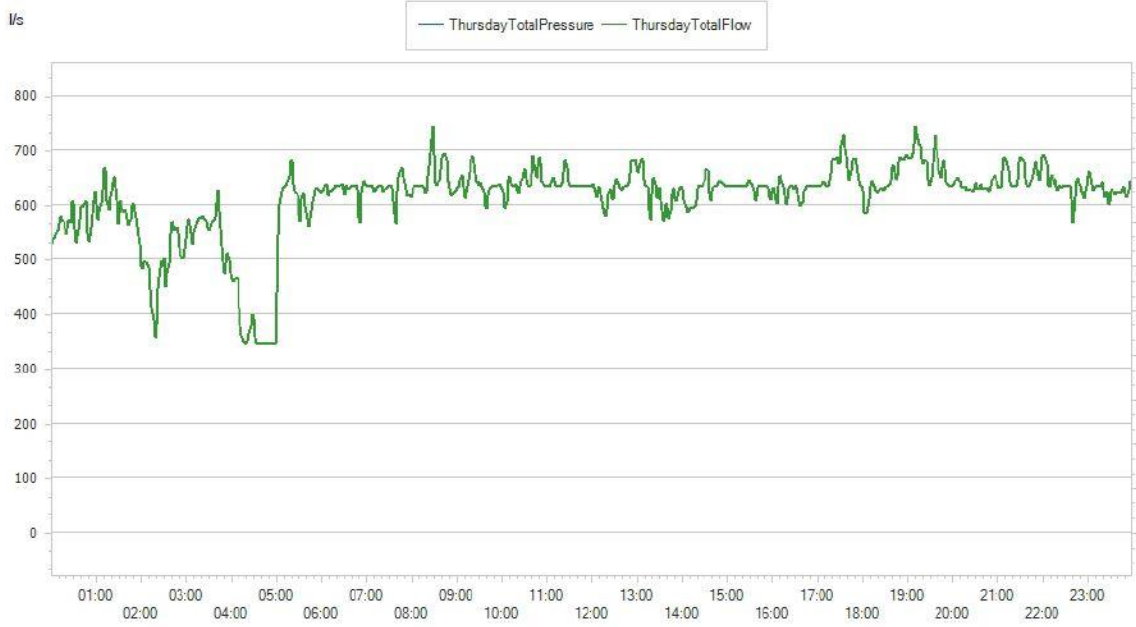
Şekil 5.5 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı

Current situation Wednesday 29.09.2021



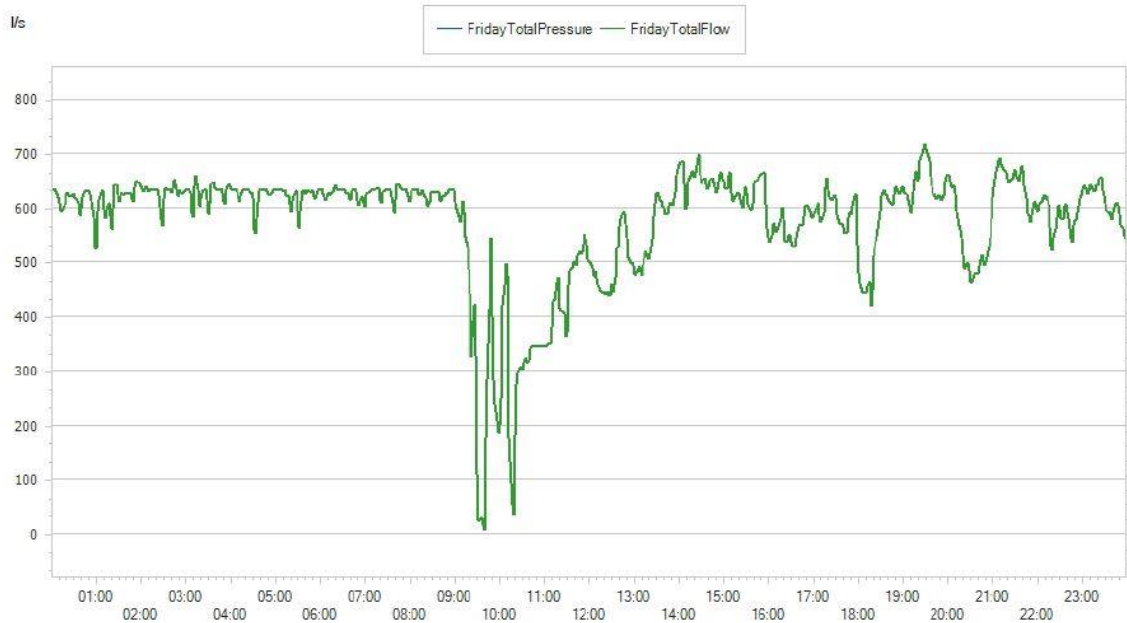
Şekil 5.6 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba

Current situation Thursday 30.09.2021



Şekil 5.7 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe

Current situation Friday 1.10.2021



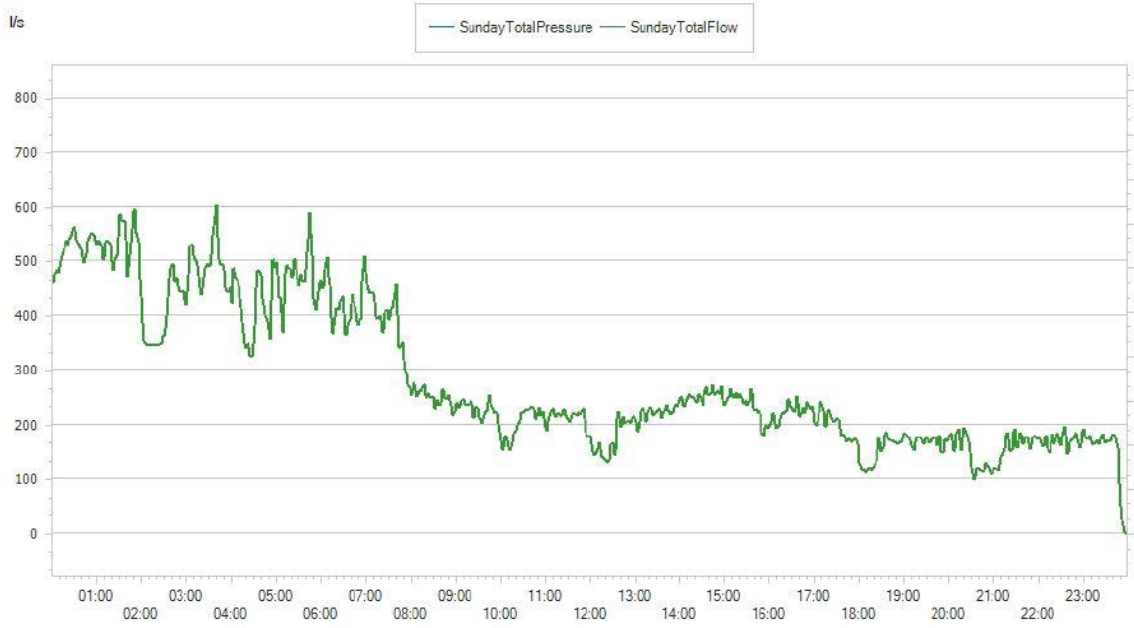
Şekil 5.8 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma

Current situation Saturday 2.10.2021



Şekil 5.9 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi

Current situation Sunday 3.10.2021



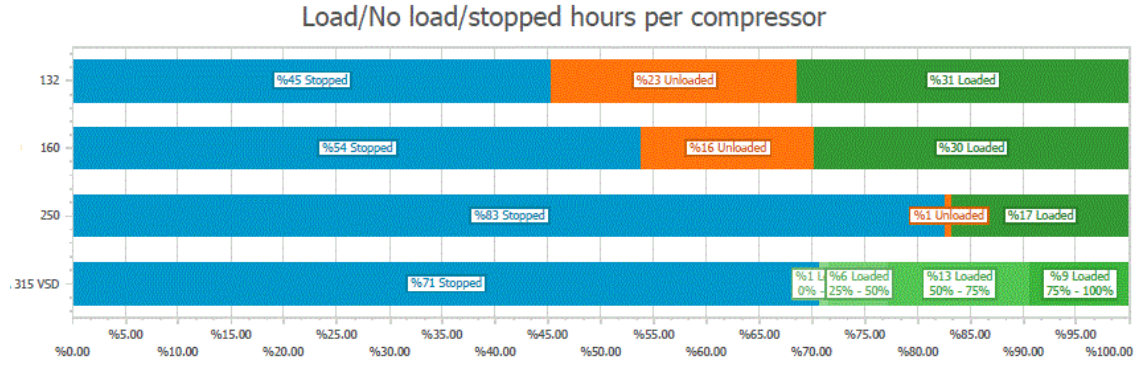
Şekil 5.10 1. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar

1 hafta boyunca sistemde maksimum basınçlı hava talebi 817 l/s, ortalama basınçlı hava talebi 513 l/s olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.4’de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta oldukları saatleri verilmiştir.

Tablo 5.4 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Mevcut Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
Kompresör 1 (160 kW)	50	28	90
Kompresör 2 (250 kW)	28	1	139
Kompresör 3 (315 kW VSD)	49	-	119
Kompresör 4 (132 kW)	53	39	76
Toplam	180	68	425



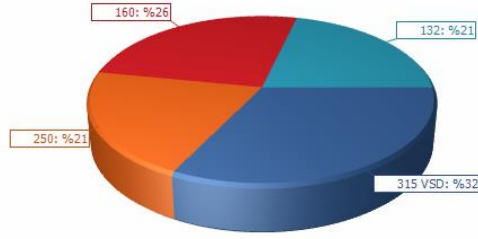
Şekil 5.11 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.5’de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşa ve duruşta ne kadar enerji tükettikleri ortaya konulmuştur.

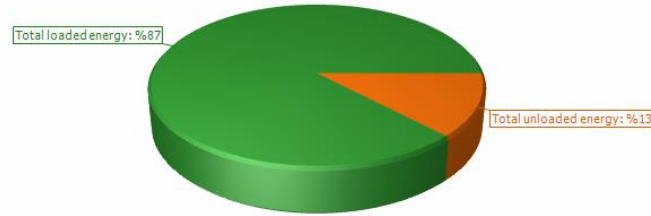
Tablo 5.5 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Mevcut Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşa Tüketilen Enerji (kWh)
Kompresör 1 (160 kW)	80.0	10,877.0	8,686.0	2,190.0
Kompresör 2 (250 kW)	63.8	7,509.0	7,346.0	164.0
Kompresör 3 (315 kW VSD)	100.6	11,048.0	11,048.0	-
Kompresör 4 (132 kW)	65.8	9,922.0	7,317.0	2,605.0
Toplam	310.0	39,356.0	34,397.0	4,959.0

Flow Distribution



Total Consumed Energy Load/No Load of All Compressors



Şekil 5.12 1. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’den de görülebileceği üzere kompresörler bir hafta boyunca toplam 68 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 4,959.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.12’de de görülebildiği gibi kompresör enerji tüketiminin yaklaşık %13’ü kompresörlerin boşta çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji tüketimi boyunca hiç basınçlı hava üretilemediği unutulmamalıdır.

Şekil 5.12 de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre mevcut durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %26’sı Kompresör 1 (160 kW), %21’i Kompresör 2 (250 kW), %32’si Kompresör 3 (315 kW VSD) ve %21’i Kompresör 4 (132 kW) tarafından karşılanmıştır.

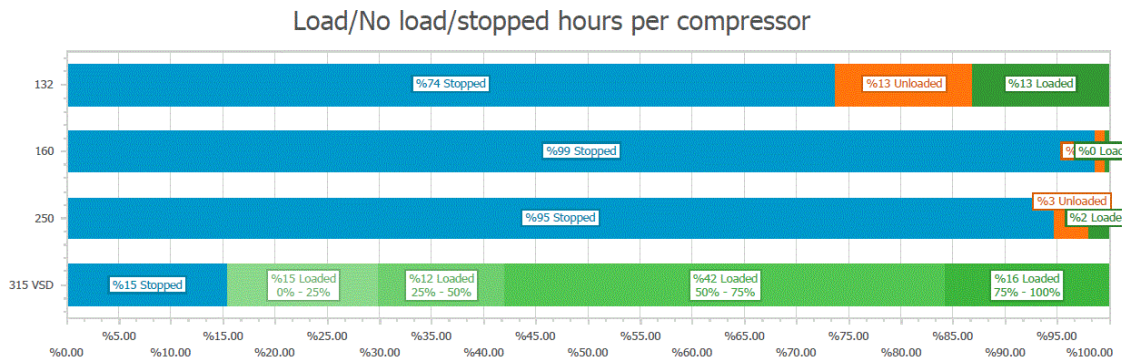
Mevcut durum ortaya konduktan sonra, Airchitect yazılımında Atlas Copco merkezi kontrolör cihazı sisteme entegre edilmiş olup, bir hafta boyunca aynı basınçlı hava talebi yeni duruma göre simülasyonu yapılmıştır. Yani 1 haftalık aynı

basıncı hava talebine karşılık, bu kompresörler merkezi kontrol cihazı ile kontrol edilseydi nasıl çalışırdı ve ne kadar enerji harcardı onu görmek için ilave simülasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 5.6'de yeni durumda mevcut kompresörlerin aynı basınçlı hava talebine karşılık yükte, boшта ve duruşta olacakları saatler belirtilmiştir.

Tablo 5.6 1. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Yeni Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
Kompresör 1 (160 kW)	0.8	1	166
Kompresör 2 (250 kW)	3.3	6	159
Kompresör 3 (315 kW VSD)	142.2	-	26
Kompresör 4 (132 kW)	22.2	22	124
Toplam	168.5	29	474



Şekil 5.13 1. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’den de görülebileceği üzere yeni durumda kompresörler bir hafta boyunca toplam 29 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 2,585.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.14’den de görülebildiği gibi yeni durumda kompresör enerji tüketiminin %7’si kompresörlerin boşta çalışmasından dolayı meydana gelen enerji tüketimidir.

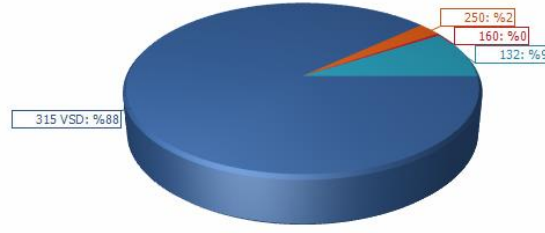
Şekil 5.14’de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre yeni durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %2’si Kompresör 2 (250 kW), %88’si Kompresör 3 (315 kW VSD) ve %9’u Kompresör 4 (132 kW) tarafından karşılanmıştır. Kompresör 1 (160 kW) yeni durumda neredeyse hiç çalıştırılmamıştır.

Tablo 5.7’de yeni durumda kompresörlerin aynı basınçlı hava talebine karşılık 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta ne kadar enerji tüketeceği ortaya konulmuştur.

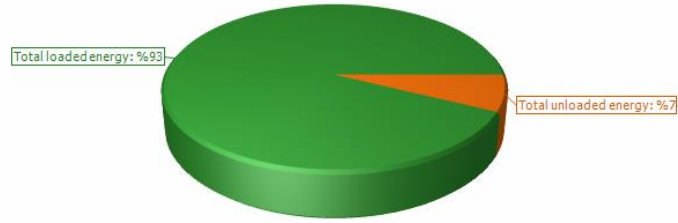
Tablo 5.7 1. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Yeni Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşta Tüketilen Enerji (kWh)
Kompresör 1 (160 kW)	1.2	245	129	115
Kompresör 2 (250 kW)	7.42	1,537	839	698
Kompresör 3 (315 kW VSD)	274	29,851	29,851	0
Kompresör 4 (132 kW)	27.3	4,792	3,021	1,772
Toplam	310	36,425	33,840	2,585

Flow Distribution



Total Consumed Energy Load/No Load of All Compressors



Şekil 5.14 1. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.4 ve Tablo 5.6'den de görülebileceği üzere aynı basınçlı hava talebine karşılık makine yükte çalışma saatleri ve boşta çalışma saatleri azaltılmıştır.

Tablo 5.5'de de görülebileceği üzere mevcut durumda 1 hafta boyunca kompresörler toplam 39,356 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Tablo 5.7'dan da görülebileceği üzere merkezi kontrol olması durumunda 1 hafta boyunca aynı basınçlı hava talebine 36,425 kWh enerji tüketerek karşılık vereceği simülasyon ile ortaya konulmuştur. 1 haftalık enerji tasarrufu 2,931 kWh, işletmenin 50 hafta çalışacağı düşünülürse 146,550 kWh yıllık enerji tasarruf potansiyeli olduğu ortaya konulmuştur. Yüzdesel olarak enerji tasarrufu %7.45 olarak ifade edilebilir.

Birim elektrik fiyatı 1.0474 TL/kWh olarak alındığında 153,496 TL yıllık parasal tasarruf potansiyeli barındırmaktadır. Böyle bir işin yaklaşık yatırım maliyeti 255,000 TL olarak alındığında basit geri ödeme süresi 1.66 yıl olarak hesaplanmıştır.

Türkiye elektrik enerji CO₂ faktörünü 0.481 kg/kWh olarak düşünürsek, CO₂ emisyon azaltma potansiyeli yıllık 70.49 ton olarak hesaplanmaktadır.

5.2.2 2. Örnek Çalışma

Merkezi kontrolör ile ne kadar enerji verimliliği sağlanabileceğini görebilmek adına ikinci bir işletmede 1 hafta boyunca enerji ölçümü alınmıştır. Sonrasında Atlas Copco Airchitect yazılımı kullanılarak simülasyon çalışması ile merkezi kontrolör cihazının etkileri analiz edilmiştir.

Ölçüm alınan 2. işletmenin makine parkuru Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8 2. örnek mevcut makine parkuru

Kompresör No	Kurulu Güç(kW)	Tip	Sürücü	FAD (l/s)
C1	90	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	203.2
C2	90	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	235.2
C3	90	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	257
C4	90	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	268
C5	90	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	268

Bu kompresörlerin her birinde 1’er haftalık enerji ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve kayıt altına alınmıştır. Alınan enerji ölçümleri Airchitect yazılımına yüklenerek mevcut durumda ilgili kompresörler kaç saat yükte veya boşta çalışmış ve bu süreçlerde ne kadar enerji tüketmiş bunlar ortaya konmuştur. Aynı zamanda ilgili kompresörlerin performans verileri yazılımda yüklü olduğu için kompresörlerin üreteceği debi değerleri yazılımından faydalanılarak dolaylı yoldan ortaya konulmuştur. 1 haftalık mevcut basınçlı hava talep trend grafikleri aşağıda paylaşılmıştır.

Current situation Monday 2.08.2021



Şekil 5.15 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi

Current situation Tuesday 3.08.2021



Şekil 5.16 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı

Current situation Wednesday 4.08.2021



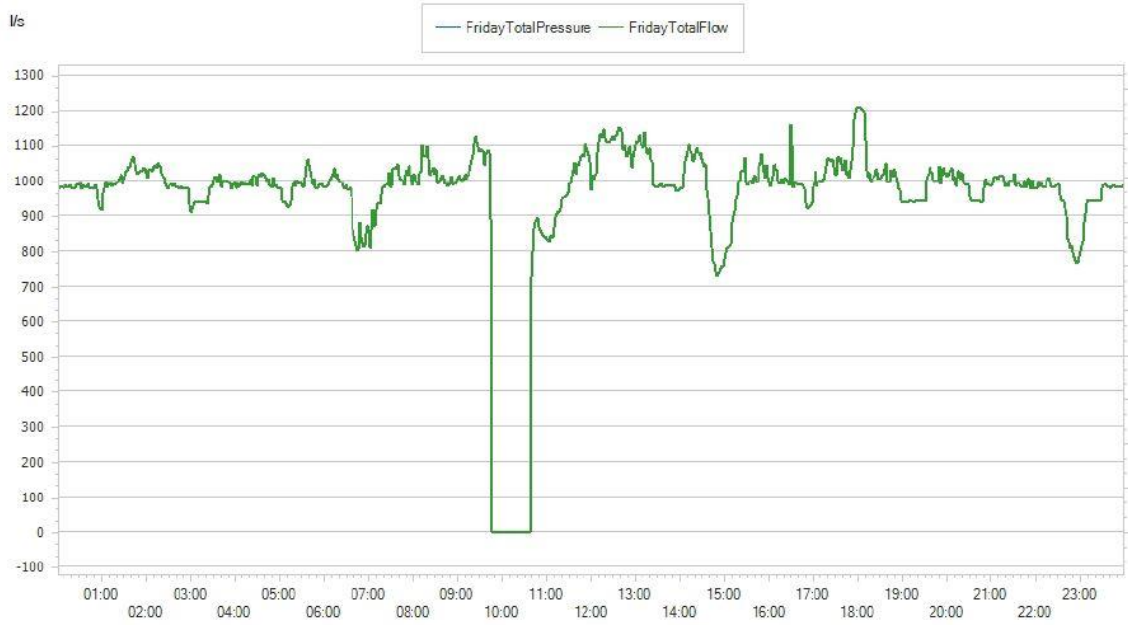
Şekil 5.17 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba

Current situation Thursday 5.08.2021



Şekil 5.18 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe

Current situation Friday 30.07.2021



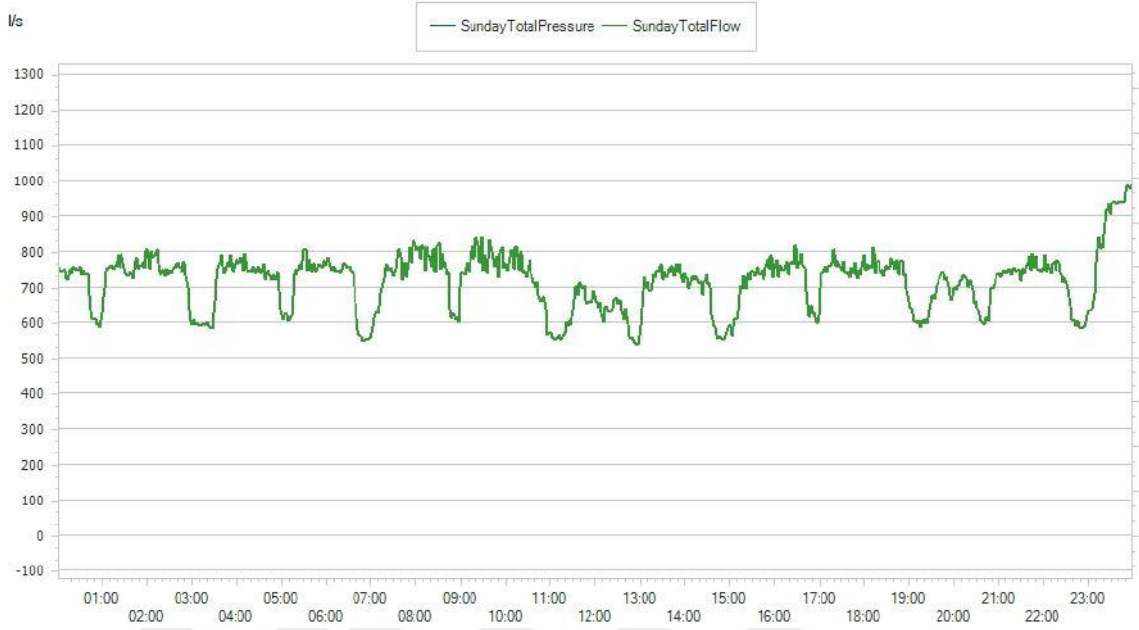
Şekil 5.19 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma

Current situation Saturday 31.07.2021



Şekil 5.20 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi

Current situation Sunday 1.08.2021



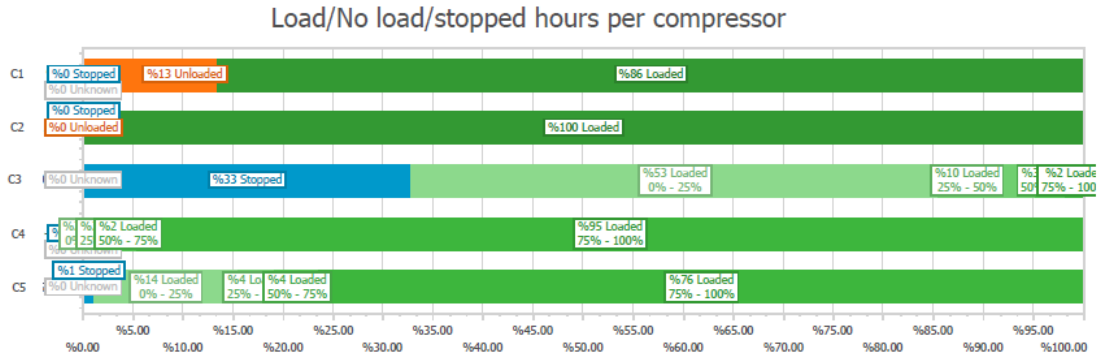
Şekil 5.21 2. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar

2. işletmenin 1 hafta boyunca basınçlı hava sisteminde maksimum basınçlı hava talebi 1,212 l/s, ortalama basınçlı hava talebi 914 l/s olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.9'de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta oldukları saatleri verilmiştir.

Tablo 5.9 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Mevcut Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
C1	144.6	22.6	0
C2	167.2	0	0
C3	112.4	-	55
C4	167	-	1
C5	165.6	-	1.7
Toplam	756.8	22.6	56.7



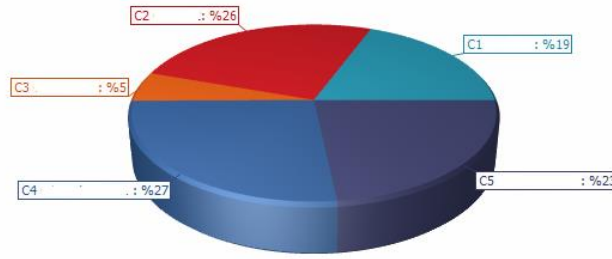
Şekil 5.22 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.10'da mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşa ve duruşta ne kadar enerji tükettikleri ortaya konulmuştur.

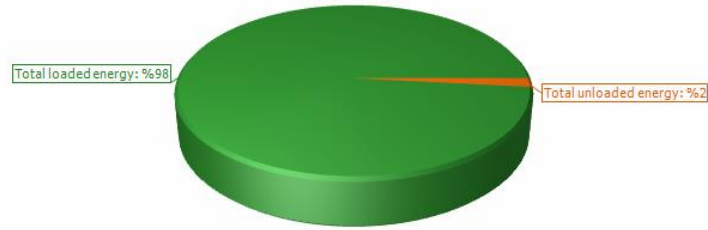
Tablo 5.10 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Mevcut Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşa Tüketilen Enerji (kWh)
C1	106.0	13,323.0	12,243.0	1,080.0
C2	141.9	16,073.0	16,073.0	0.0
C3	29.7	4,453.0	4,453.0	0.0
C4	147.3	16,776.0	16,776.0	0.0
C5	128.6	14,771.0	14,771.0	0.0
Toplam	553.5	65,396.0	64,316.0	1,080.0

Flow Distribution



Total Consumed Energy Load/No Load of All Compressors



Şekil 5.23 2. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'dan da görülebileceği üzere kompresörler mevcut durumda bir hafta boyunca toplam 22.6 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 1,080.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.23'de de görülebildiği gibi kompresör enerji tüketiminin yaklaşık %2'si kompresörlerin boşta çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji tüketimi boyunca hiç basınçlı hava üretilmediği unutulmamalıdır.

Şekil 5.23'de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre mevcut durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %19'u C1, %26'sı C2, %5'i C3, %27'si C4 ve %23'ü C5 no'lu kompresörler tarafından karşılanmıştır.

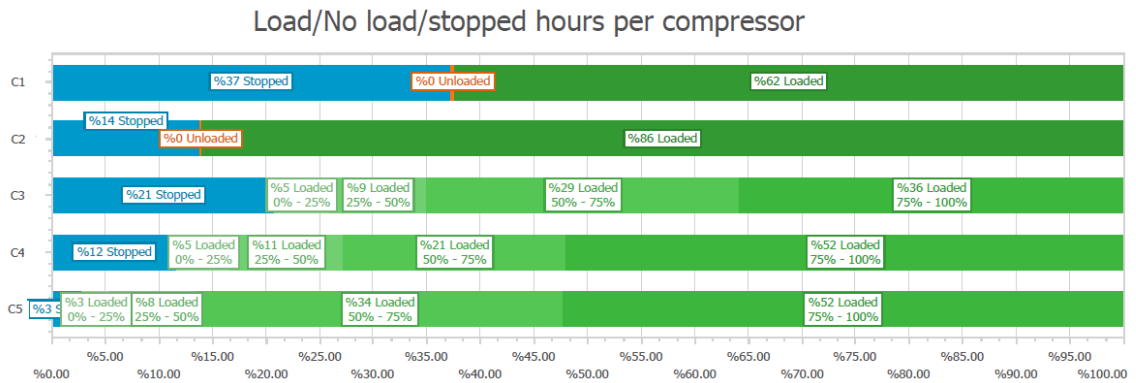
Mevcut durum ortaya konduktan sonra, Airchitect yazılımında Atlas Copco merkezi kontrolör cihazı sisteme entegre edilmiş olup, bir hafta boyunca aynı basınçlı hava talebi yeni duruma göre simülasyonu yapılmıştır. Yani 1 haftalık aynı

basıncı hava talebine karşılık, bu kompresörler merkezi kontrol cihazı ile kontrol edilseydi nasıl çalışırdı ve ne kadar enerji harcardı onu görmek için ilave simülasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 5.11’de yeni durumda mevcut kompresörlerin aynı basıncı hava talebine karşılık yükte, boшта ve duruşta olacakları saatler belirtilmiştir.

Tablo 5.11 2. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Yeni Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
C1	105	0.756	62.5
C2	144.4	0	23.5
C3	133	-	34.5
C4	148.5	-	19.8
C5	163.2	-	5
Toplam	694.1	0.756	145.3



Şekil 5.24 2. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.11 ve Tablo 5.12’den de görülebileceği üzere yeni durumda kompresörler bir hafta boyunca toplam 0.756 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 30.0 kWh

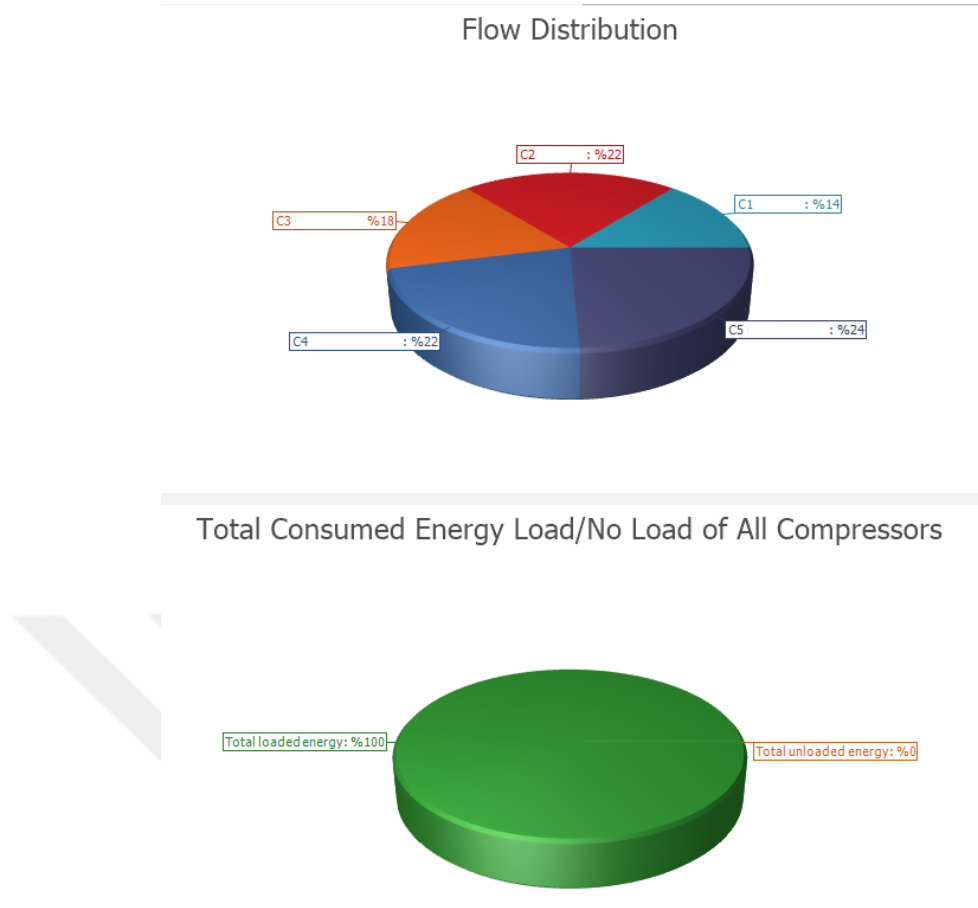
enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.25’den de görülebildiği gibi yeni durumda kompresör enerji tüketiminin tamamı yükte çalışmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.25’de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre yeni durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %14’ü C1, %22’si C2, %18’i C3, %22’si C4 ve %24’ü C5 no’lu kompresörler tarafından karşılanmıştır.

Tablo 5.12’de yeni durumda kompresörlerin aynı basınçlı hava talebine karşılık 1 hafta boyunca yükte, boştta ve duruşta ne kadar enerji tüketeceği ortaya konulmuştur.

Tablo 5.12 2. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Yeni Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşta Tüketilen Enerji (kWh)
C1	77	8,574.0	8,559.0	15.0
C2	122.7	13,527.0	13,512.0	15.0
C3	97.7	11,534.0	11,534.0	-
C4	121.8	13,349.0	13,349.0	-
C5	134.3	14,733.0	14,733.0	-
Toplam	553.5	61,717.0	61,687.0	30.0



Şekil 5.25 2. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.9 ve Tablo 5.11’den de görülebileceği üzere aynı basınçlı hava talebine karşılık makine yükte çalışma saatleri ve boşta çalışma saatleri azaltılmıştır.

Tablo 5.10’de de görülebileceği üzere mevcut durumda 1 hafta boyunca kompresörler toplam 65,396 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Tablo 5.12’den de görülebileceği üzere merkezi kontrol olması durumunda 1 hafta boyunca aynı basınçlı hava talebine 61,717 kWh enerji tüketerek karşılık vereceği simülasyon ile ortaya konulmuştur. 1 haftalık enerji tasarrufu 3,679 kWh, işletmenin 50 hafta çalışacağı düşünülürse 183,950 kWh yıllık enerji tasarruf potansiyeli olduğu ortaya konulmuştur. Yüzdesel olarak enerji tasarrufu %5.63 olarak ifade edilebilir.

Birim elektrik fiyatı 1.0474 TL/kWh olarak alındığında 192,669 TL yıllık parasal tasarruf potansiyeli barındırmaktadır. Böyle bir işin yaklaşık yatırım maliyeti

285,000 TL olarak alındığında basit geri ödeme süresi 1.48 yıl olarak hesaplanmıştır.

Türkiye elektrik enerji CO2 faktörünü 0.481 kg/kWh olarak düşünürsek, CO2 emisyon azaltma potansiyeli yıllık 88.48 ton olarak hesaplanmaktadır.

5.2.3 3. Örnek Çalışma

Merkezi kontrolör ile ne kadar enerji verimliliği sağlanabileceğini görebilmek adına üçüncü bir işletmede 1 hafta boyunca enerji ölçümü alınmıştır. Sonrasında Atlas Copco Airchitect yazılımı kullanılarak simülasyon çalışması ile merkezi kontrolör cihazının etkileri analiz edilmiştir.

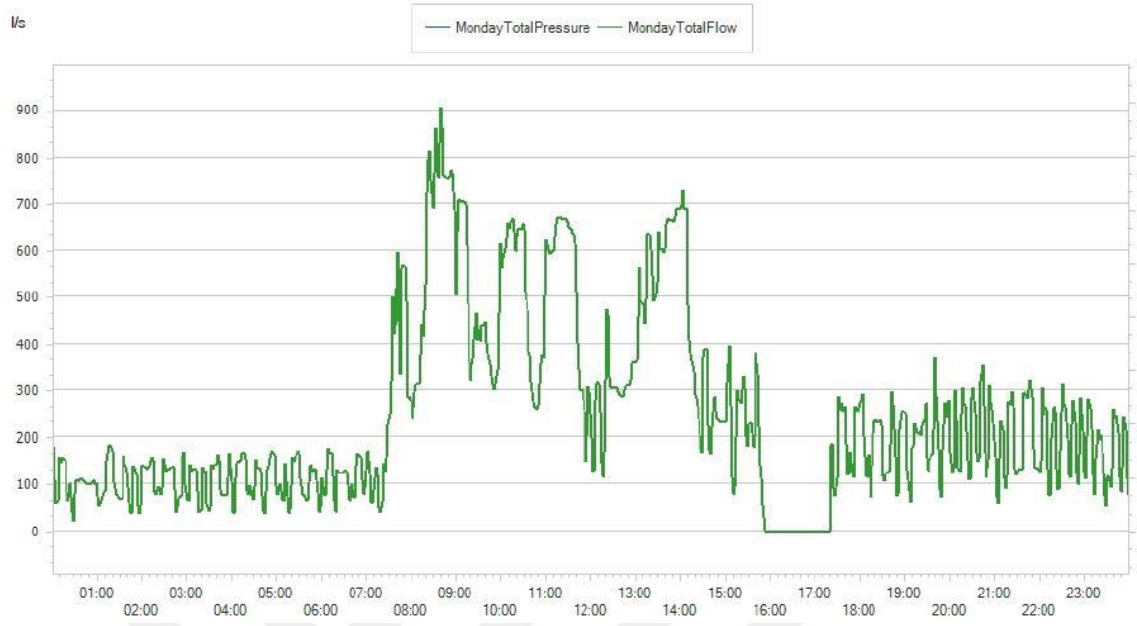
Ölçüm alınan 3. işletmenin makine parkuru Tablo 5.13’de verilmiştir.

Tablo 5.13 3. örnek mevcut makine parkuru

Kompresör No	Kurulu Güç(kW)	Tip	Sürücü	FAD (l/s)
C1	75	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	191
C2	75	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	215.4
C3	110	Yağlı Vidalı	Hız Sürücülü	332
C4	110	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	340.3

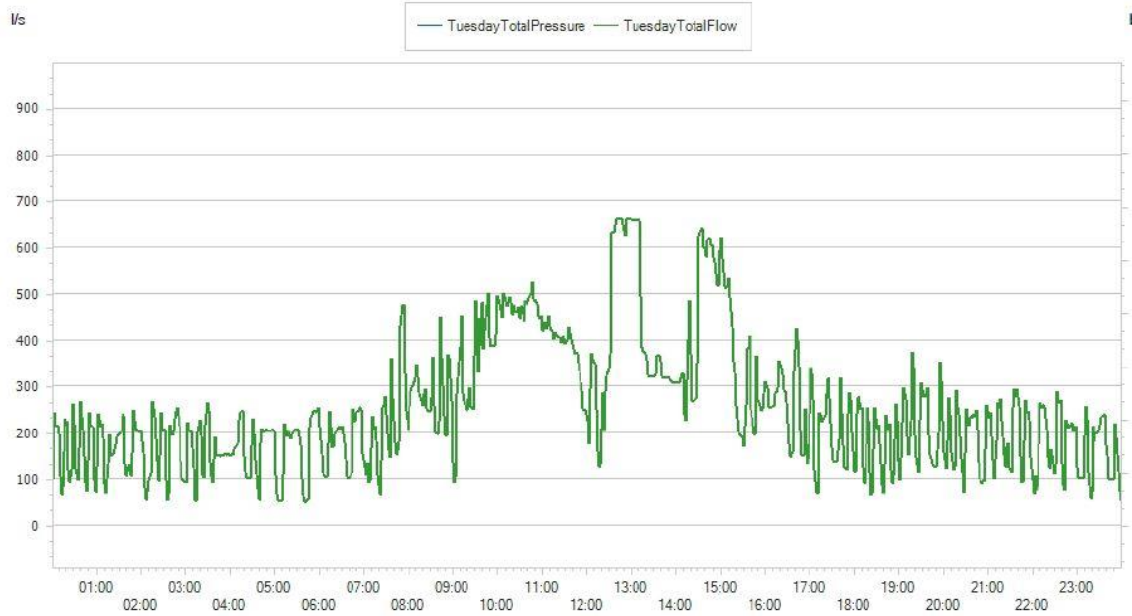
Bu kompresörlerin her birinde 1’er haftalık enerji ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve kayıt altına alınmıştır. Alınan enerji ölçümleri Airchitect yazılımına yüklenerek mevcut durumda ilgili kompresörler kaç saat yükte veya boşta çalışmış ve bu süreçlerde ne kadar enerji tüketmiş bunlar ortaya konmuştur. Aynı zamanda ilgili kompresörlerin performans verileri yazılımda yüklü olduğu için kompresörlerin üreteceği debi değerleri yazılımından faydalanılarak dolaylı yoldan ortaya konulmuştur. 1 haftalık mevcut basınçlı hava talep trend grafikleri aşağıda paylaşılmıştır.

Current situation Monday 11.10.2021



Şekil 5.26 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi

Current situation Tuesday 12.10.2021



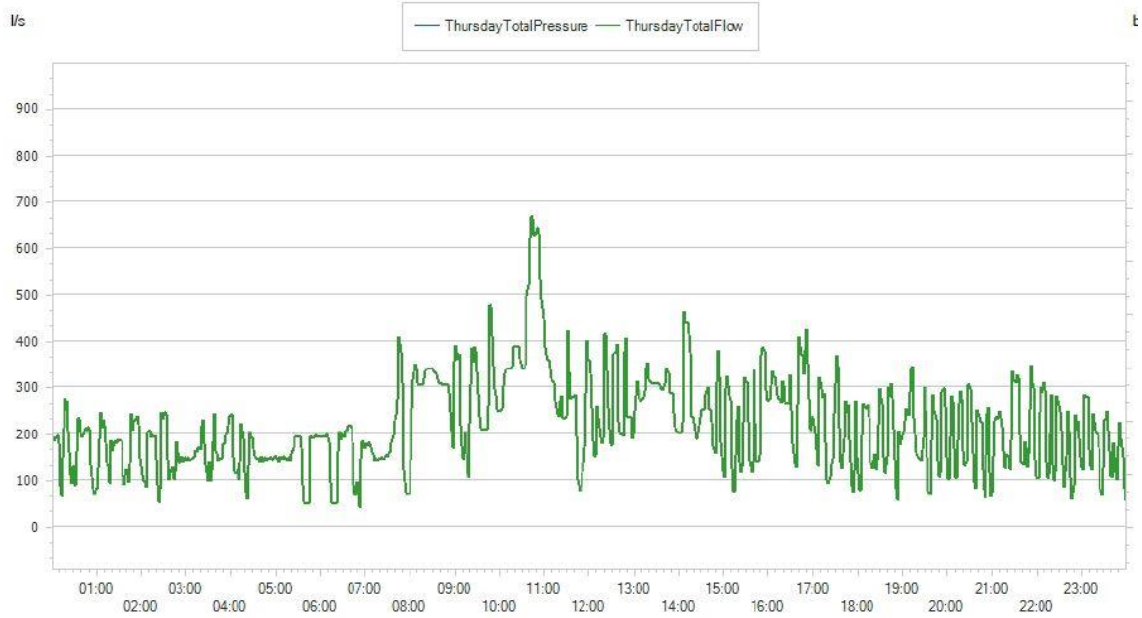
Şekil 5.27 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı

Current situation Wednesday 13.10.2021



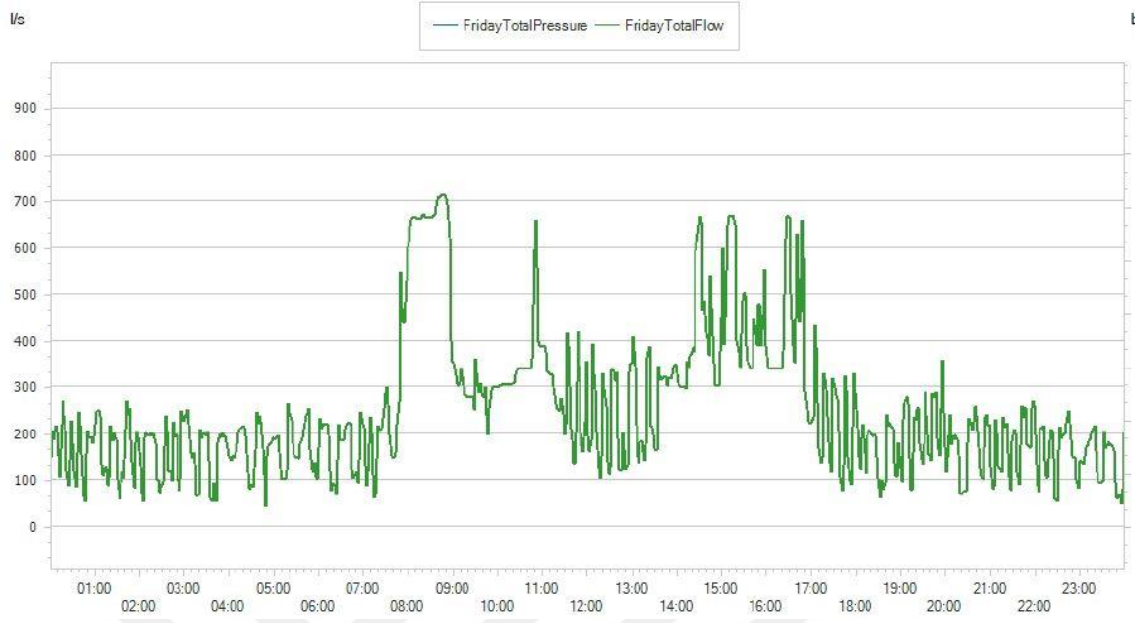
Şekil 5.28 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba

Current situation Thursday 14.10.2021



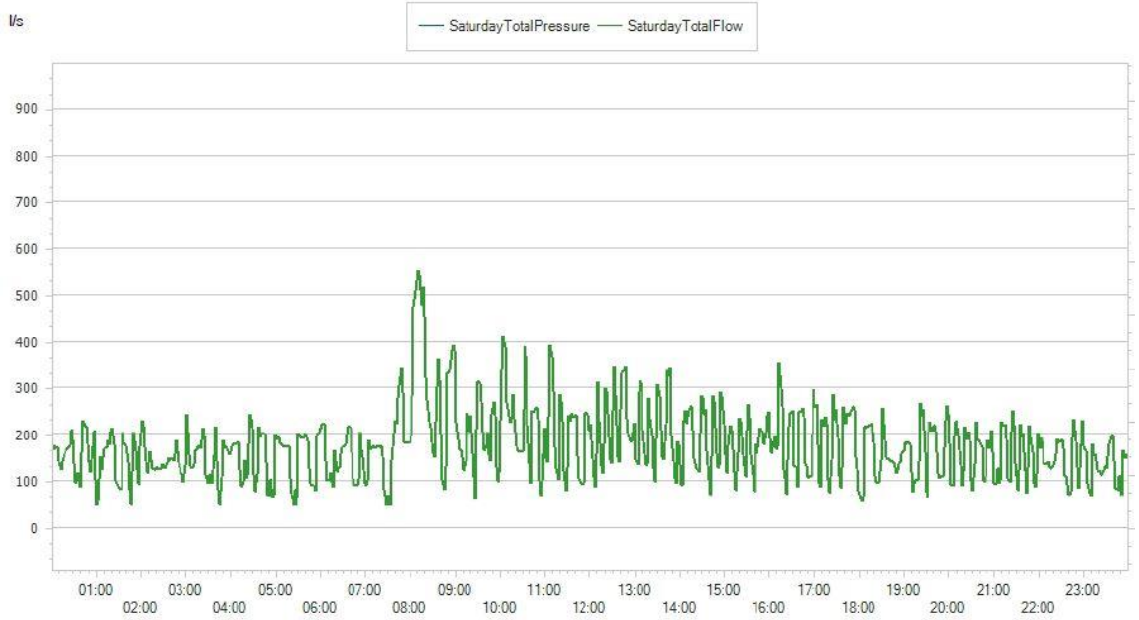
Şekil 5.29 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe

Current situation Friday 15.10.2021



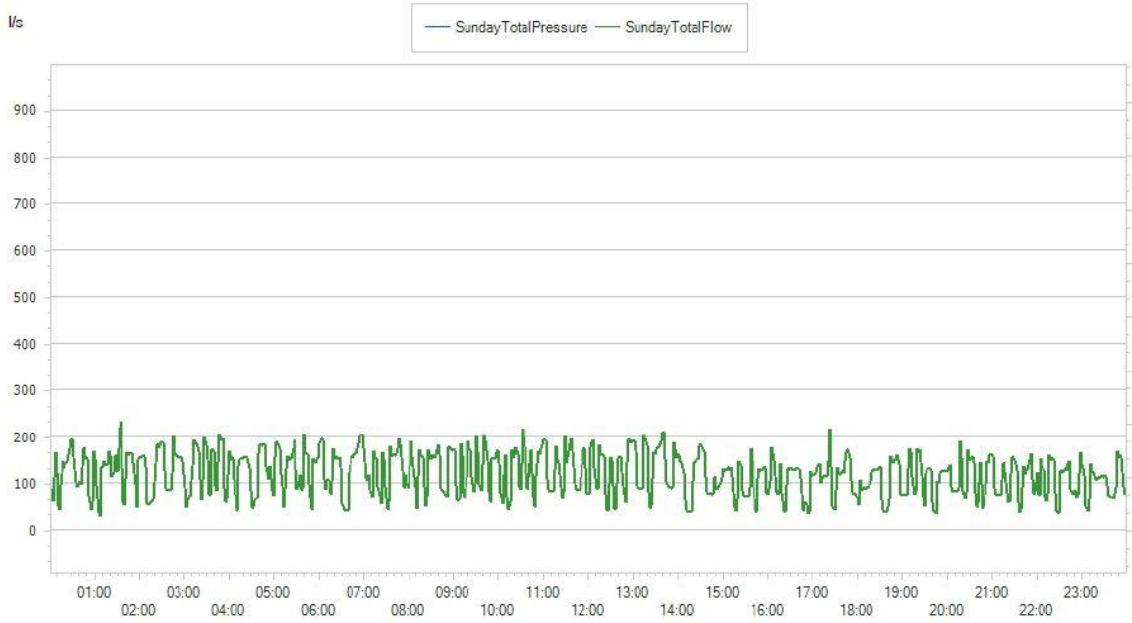
Şekil 5.30 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cuma

Current situation Saturday 16.10.2021



Şekil 5.31 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi

Current situation Sunday 17.10.2021



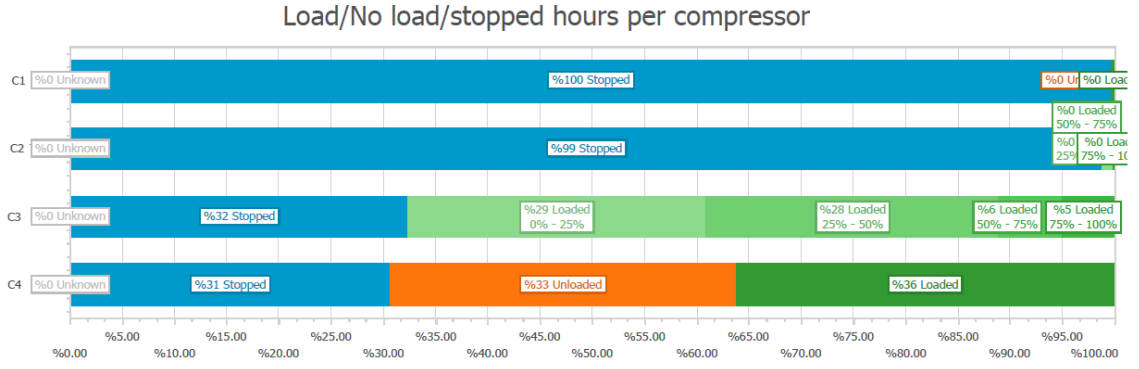
Şekil 5.32 3. örnek mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar

3. işletmenin 1 hafta boyunca basınçlı hava sisteminde maksimum basınçlı hava talebi 937 l/s, ortalama basınçlı hava talebi 216.6 l/s olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.14'de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta oldukları saatleri verilmiştir.

Tablo 5.14 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Mevcut Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
C1	0.5	0	166
C2	1.9	-	165
C3	112.8	-	54
C4	60.5	55.4	51
Toplam	175.78	55.4	436



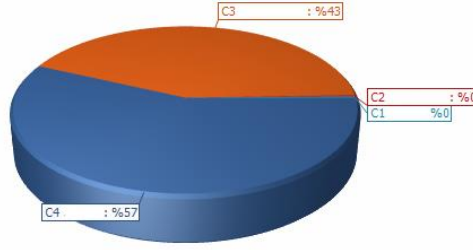
Şekil 5.33 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.15’de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta ne kadar enerji tükettikleri ortaya konulmuştur.

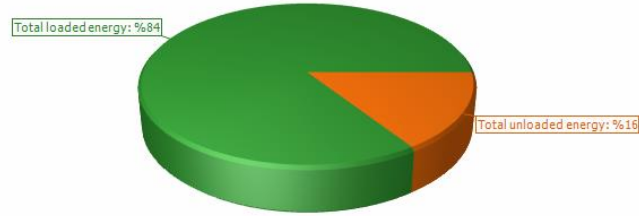
Tablo 5.15 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Mevcut Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşta Tüketilen Enerji (kWh)
C1	0.4	42.0	39.0	3.0
C2	0.3	36.0	36.0	0.0
C3	55.9	5,836.0	5,836.0	0.0
C4	74.3	10,156.0	7,656.0	2,500.0
Toplam	130.9	16,070.0	13,567.0	2,503.0

Flow Distribution



Total Consumed Energy Load/No Load of All Compressors



Şekil 5.34 3. örnek mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.14 ve Tablo 5.15’den de görülebileceği üzere kompresörler mevcut durumda bir hafta boyunca toplam 55.4 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 2,503.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.34’den de görülebildiği gibi kompresör enerji tüketiminin yaklaşık %16’sı kompresörlerin boşta çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji tüketimi boyunca hiç basınçlı hava üretilemediği unutulmamalıdır.

Şekil 5.34’de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre mevcut durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %43’ü C3, ve %57’si C5 no’lu kompresörler tarafından karşılanmıştır. C1 ve C2 no’lu kompresörler neredeyse hiç devreye girmemiştir.

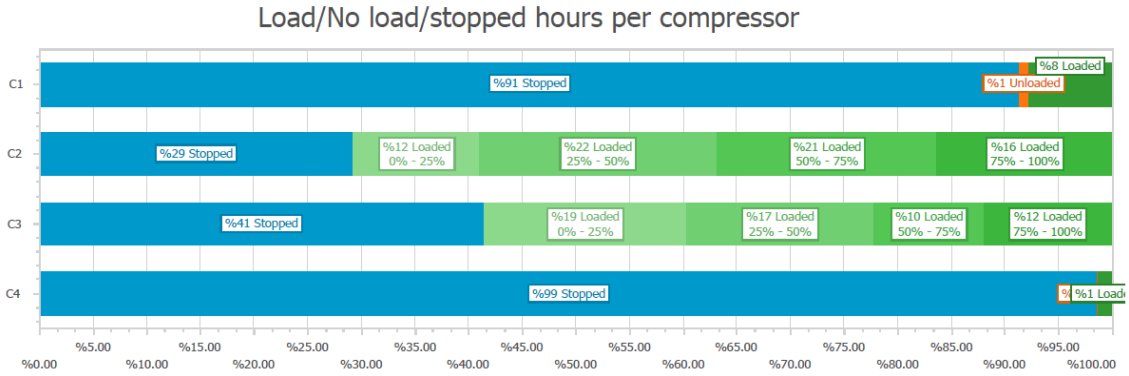
Mevcut durum ortaya konduktan sonra, Airchitect yazılımında Atlas Copco merkezi kontrolör cihazı sisteme entegre edilmiş olup, bir hafta boyunca aynı basınçlı hava talebi yeni duruma göre simülasyonu yapılmıştır. Yani 1 haftalık aynı basınçlı hava talebine karşılık, bu kompresörler merkezi kontrol cihazı ile kontrol

edilseydi nasıl çalışırdı ve ne kadar enerji harcardı onu görmek için ilave simülasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 5.16’de yeni durumda mevcut kompresörlerin aynı basınçlı hava talebine karşılık yükte, boşta ve duruşta olacakları saatler belirtilmiştir.

Tablo 5.16 3. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Yeni Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
C1	13.1	1.5	153.5
C2	118.8	-	49.5
C3	98.3	-	69.5
C4	2.2	0	165.5
Toplam	232.4	1.5	438



Şekil 5.35 3. örnek yeni durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.16 ve Tablo 5.17’den de görülebileceği üzere yeni durumda kompresörler bir hafta boyunca toplam 1.5 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 60.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle Şekil 5.36’dan da görülebildiği

gibi yeni durumda kompresör enerji tüketiminin neredeyse tamamı yükte çalışmasından kaynaklanmaktadır.

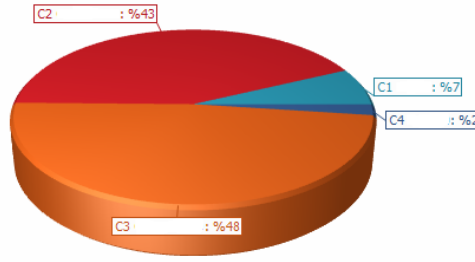
Şekil 5.36’da belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre yeni durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %7’si C1, %43’si C2, %48’i C3 ve %2’si C4 no’lu kompresörler tarafından karşılanmıştır.

Tablo 5.17’da yeni durumda kompresörlerin aynı basınçlı hava talebine karşılık 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta ne kadar enerji tüketeceği ortaya konulmuştur.

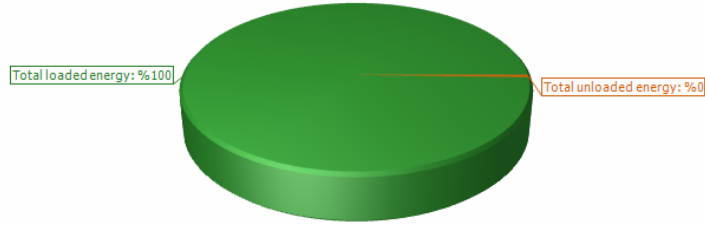
Tablo 5.17 3. örnek yeni durumda simülasyon sonucu kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Yeni Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşta Tüketilen Enerji (kWh)
C1	9.0	964.0	916.0	49.0
C2	56.1	5,635.0	5,635.0	-
C3	63.2	6,399.0	6,399.0	-
C4	2.6	272.0	261.0	11.0
Toplam	130.9	13,270.0	13,211.0	60.0

Flow Distribution



Total Consumed Energy Load/No Load of All Compressors



Şekil 5.36 3. örnek yeni durumda kompresörlerin yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.14 ve Tablo 5.16'dan da görülebileceği üzere aynı basınçlı hava talebine karşılık makine yükte çalışma saatleri ve boşa çalışma saatleri azaltılmıştır.

Tablo 5.15'den de görülebileceği üzere mevcut durumda 1 hafta boyunca kompresörler toplam 16,070 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Tablo 5.17'den de görülebileceği üzere merkezi kontrol olması durumunda 1 hafta boyunca aynı basınçlı hava talebine 13,270 kWh enerji tüketerek karşılık vereceği simülasyon ile ortaya konulmuştur. 1 haftalık enerji tasarrufu 2,800 kWh, işletmenin 50 hafta çalışacağı düşünülürse 140,000 kWh yıllık enerji tasarruf potansiyeli olduğu ortaya konulmuştur. Yüzdesel olarak enerji tasarrufu %17.42 olarak ifade edilebilir.

Birim elektrik fiyatı 1.0474 TL/kWh olarak alındığında 146,636 TL yıllık parasal tasarruf potansiyeli barındırmaktadır. Böyle bir işin yaklaşık yatırım maliyeti

255,000 TL olarak alındığında basit geri ödeme süresi 1.74 yıl olarak hesaplanmıştır.

Türkiye elektrik enerji CO2 faktörünü 0.481 kg/kWh olarak düşünürsek, CO2 emisyon azaltma potansiyeli yıllık 67.34 ton olarak hesaplanmaktadır.

5.3 Isı Geri Kazanım Uygulama Örneği

Isı geri kazanım uygulama örneği olarak, endüstride en sık kullanılan kompresör tiplerinden biri hava soğutmalı yağlı vidalı tip basınçlı hava kompresörü seçilmiştir. Bu kompresörlerde nominal elektrik tüketiminin yaklaşık %75 kadarı yağa ısı enerji olarak aktarıldığına daha önce değinilmiştir.

200 kW nominal elektrik tüketimine sahip basınçlı hava kompresörü olan bir işletmede yağdan ısı geri kazanım yapılarak şebeke suyu ön ısıtma yapılması düşünülmüştür. Isıtma potansiyeli 150 kW olarak hesaplanmıştır.

Yağ-su ısı geri kazanım ısı değiştiricisinden tersinmezliklerden kaynaklı suya aktarılamayacak olan ısı %5 olarak kabul edilmiştir. Dolayısı ile suya aktarılacak atık ısı 142.5 kW olacaktır. Şebeke suyu atık ısı geri kazanım ısı değiştiricisine 20°C ve 2 kg/s olduğu düşünülürse, suyun çıkış şartları aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (4.4)$$

Burada Q (kW) ısı gücü, m (kg/s) suyun kütleli debisini, c (kJ/kg°C) suyun özgül ısısını ΔT (°C) ise suyun sıcaklık değişimini temsil etmektedir.

$$142,5 \text{ kW} = 2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times \Delta T \quad (4.5)$$

Buradan sıcaklık farkı (ΔT) 17.05°C olarak hesaplanır. Girişte suyun 20°C olduğu hesaba katıldığında, suyun çıkış sıcaklığı 37.05°C olarak hesaplanabilir.

Burada su atık ısı ile ısıtılmasaydı, bu ısıtma için sıcak su kazanı kullanılması gerekecektir. Mevcutta %95 verimde doğalgazlı bir sıcak su kazanı olduğunu varsaydığımızda, doğalgaz tüketimi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$Q = V \times H \times \eta \quad (4.6)$$

Burada Q (kcal/h) ısı gücü, V (Nm³/h) doğalgazın hacimsel debisini, H (kcal/Nm³) doğalgazın alt ısı değerini η sıcak su kazanının verimini temsil etmektedir. Isıl güç kcal/h biriminde (1 kW = 859.85 kcal/h) 122,528.6 kcal/h'tır.

$$122,528.6 \frac{kcal}{h} = V \times 8,250 \frac{kcal}{Nm^3} \times 0.95 \quad (4.7)$$

Buradan doğalgaz debisi (V) 15.63 Nm³/h olarak hesaplanmıştır. Yıllık 8,000 saat çalıştığı düşünüldüğünde 125,040 Nm³ doğalgaz tüketiminin önüne geçilebilecektir. Doğalgaz birim maliyeti 2.5 TL/Nm³ alındığında yıllık parasal tasarruf potansiyeli 312,600 TL olarak hesaplanmıştır. Böyle bir işin yaklaşık yatırım maliyeti 200,000 TL olduğu hesaba katıldığında basit geri ödeme süresi 0.64 yıl olarak hesaplanmıştır.

Doğalgaz CO₂ emisyon faktörü 56.1 tCO₂/TJ olarak belirtilmiştir [27]. Bu faktör baz alınarak yıllık CO₂ emisyon azaltma potansiyeli 242.24 ton olarak hesaplanmaktadır.

5.4 İşletme Basıncının Düşürülmesi

İşletme basıncının enerji tüketimine direkt etkisinden ve basınç kayıplarının oluşturduğu enerji kayıplarından daha önce değinilmiştir. Bu bölümde piyasada sıkça kullanılan yağlı vidalı tip kompresörlerin teknik föylerinde belirtilen Spesifik Enerji Tüketim (SET) değerleri çeşitli çalışma basınçlarında incelenmiştir. SET değeri ilgili ayar basıncı ve çevresel şartlarda birim basınçlı hava üretmek için harcanan enerji miktarını temsil eder (J/l). Yani SET değeri ne kadar az olursa birim basınçlı hava üretmek için o denli az enerji harcandığı anlamına gelmektedir.

İncelenen teknik föylerde belirtilen SET değerleri ISO 1217 standardına göre ilgili üretici firmalar tarafından belirtilen değerlerdir. Makine kurulu gücü 15 kW'tan

315 kW'a kadar 17 adet yağlı vidalı hava soğutmalı basınçlı hava kompresörünün teknik verileri incelenmiştir.

Tablo 5.18'de basınçlı hava kompresörlerinin 7 bar ayar basıncında SET değerleri verilmiştir.

Tablo 5.18 Kompresörlerin SET (J/l) değerleri @7bar

Kompresör No	Kurulu Gücü (kW)	Spesifik Enerji Tüketimi (SET) J/l @7bar
Kompresör-1	15	380
Kompresör-2	18	404
Kompresör-3	22	428
Kompresör-4	26	434
Kompresör-5	30	363
Kompresör-6	37	366
Kompresör-7	45	373
Kompresör-8	55	369
Kompresör-9	75	385
Kompresör-10	90	367
Kompresör-11	110	314.7
Kompresör-12	132	320.3
Kompresör-13	160	326.4
Kompresör-14	180	316.5
Kompresör-15	200	315.3
Kompresör-16	250	318.2
Kompresör-17	315	321.9

Tablo 5.19’da basınçlı hava kompresörlerinin 6 bar ayar basıncında SET değerleri verilmiştir.

Tablo 5.19 Kompresörlerin SET (J/l) değerleri @6bar

Kompresör No	Kurulu Gücü (kW)	Spesifik Enerji Tüketimi (SET) J/l @6bar
Kompresör-1	15	356
Kompresör-2	18	382
Kompresör-3	22	405
Kompresör-4	26	411
Kompresör-5	30	339
Kompresör-6	37	343
Kompresör-7	45	351
Kompresör-8	55	338
Kompresör-9	75	347
Kompresör-10	90	346
Kompresör-11	110	295.4
Kompresör-12	132	301.4
Kompresör-13	160	307.7
Kompresör-14	180	292.5
Kompresör-15	200	292.4
Kompresör-16	250	296.3
Kompresör-17	315	300.4

Tablo 5.20’de ise aynı kompresörlerin ayar basınçlarının 7 bardan 6 bara çekilmesi ile SET değerlerinde meydana gelen azalma yüzdeleri belirtilmiştir.

Tablo 5.20 Kompresörlerin basınç ayarlarının 7 bardan 6 bara düşürülmesi ile SET değeri değişimi

Kompresör No	Kurulu Gücü (kW)	SET Değerinde Azalma Yüzdesi (%)
Kompresör-1	15	6.32%
Kompresör-2	18	5.45%
Kompresör-3	22	5.37%
Kompresör-4	26	5.30%
Kompresör-5	30	6.61%
Kompresör-6	37	6.28%
Kompresör-7	45	5.90%
Kompresör-8	55	8.40%
Kompresör-9	75	9.87%
Kompresör-10	90	5.72%
Kompresör-11	110	6.13%
Kompresör-12	132	5.90%
Kompresör-13	160	5.73%
Kompresör-14	180	7.58%
Kompresör-15	200	7.26%
Kompresör-16	250	6.88%
Kompresör-17	315	6.68%
Ortalama		6.55%

Tablo 5.20’den de görülebileceği gibi kompresör ayar basınçlarını 7 bardan 6 bara indirmek ortalama olarak %6.55 daha az enerji tüketeceği belirtilmektedir.

Buradan da görülebileceği gibi basınç kayıplarını en aza indirmek, üretim ve tüketim noktaları arasında basınç farkını mümkün mertebe en az miktarda tutmak enerji tüketimi için ciddi önem arz etmektedir.

5.5 Eski Sabit Devirli Kompresörlerin Yeni Hız Sürücülü Kompresör İle Değişimi

Hız sürücülü kompresörlerin enerji verimliliği açısından olası olumlu etkilerini görebilmek adına 2 adet sabit devirli kompresör ile basınçlı hava talebine karşılık veren bir işletmede 1 hafta boyunca enerji ölçümü alınmıştır. Sonrasında yine Atlas Copco Airchitect yazılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışması ile aynı basınçlı hava talebine 1 adet yeni hız sürücülü kompresör ile karşılık verilmesi durumunda enerji tüketimlerinin nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

İşletmenin mevcut makine parkuru Tablo 5.21’de verilmiştir.

Tablo 5.21 Mevcut makine parkuru

Kompresör No	Kurulu Güç(kW)	Tip	Sürücü	FAD (l/s)
C1	37	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	118
C2	90	Yağlı Vidalı	Sabit Devirli	270

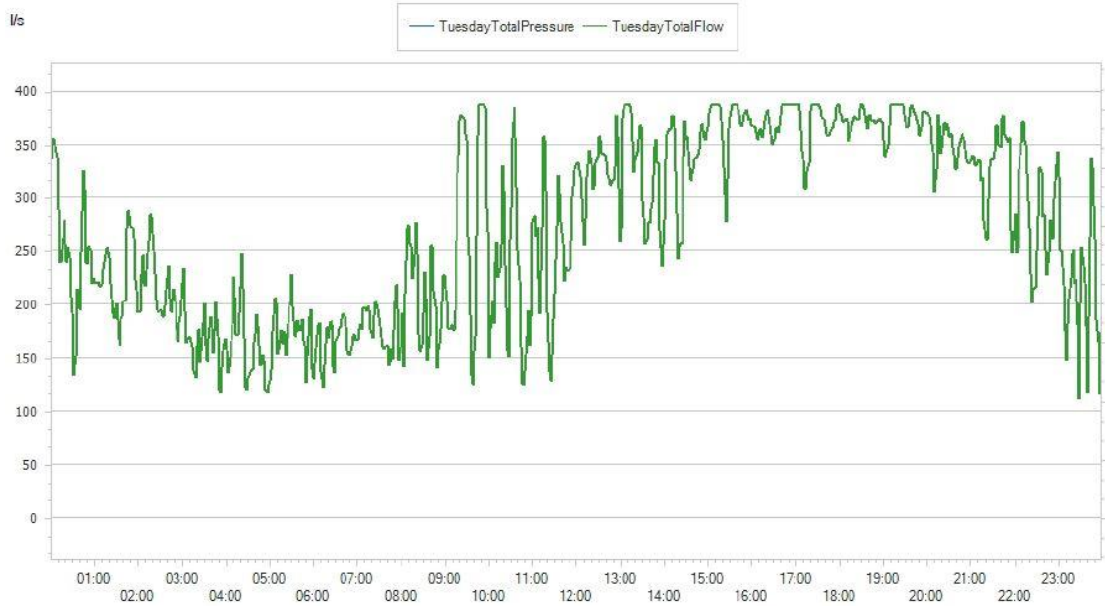
Bu kompresörlerin her birinde 1’er haftalık enerji ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve kayıt altına alınmıştır. Alınan enerji ölçümleri Airchitect yazılımına yüklenerek mevcut durumda ilgili kompresörler kaç saat yükte veya boşta çalışmış ve bu süreçlerde ne kadar enerji tüketmiş bunlar ortaya konmuştur. Aynı zamanda ilgili kompresörlerin performans verileri yazılımda yüklü olduğu için kompresörlerin üreteceği debi değerleri yazılımından faydalanılarak dolaylı yoldan ortaya konulmuştur. 1 haftalık mevcut basınçlı hava talep trend grafikleri aşağıda paylaşılmıştır.

Current situation Monday 4.10.2021



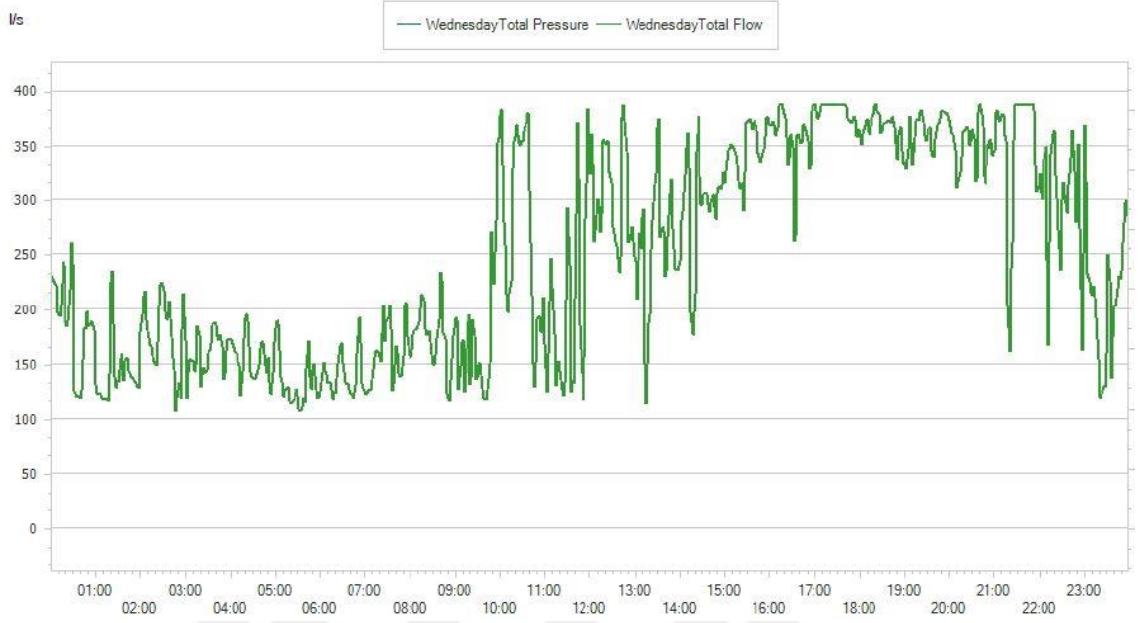
Şekil 5.37 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazartesi

Current situation Tuesday 5.10.2021



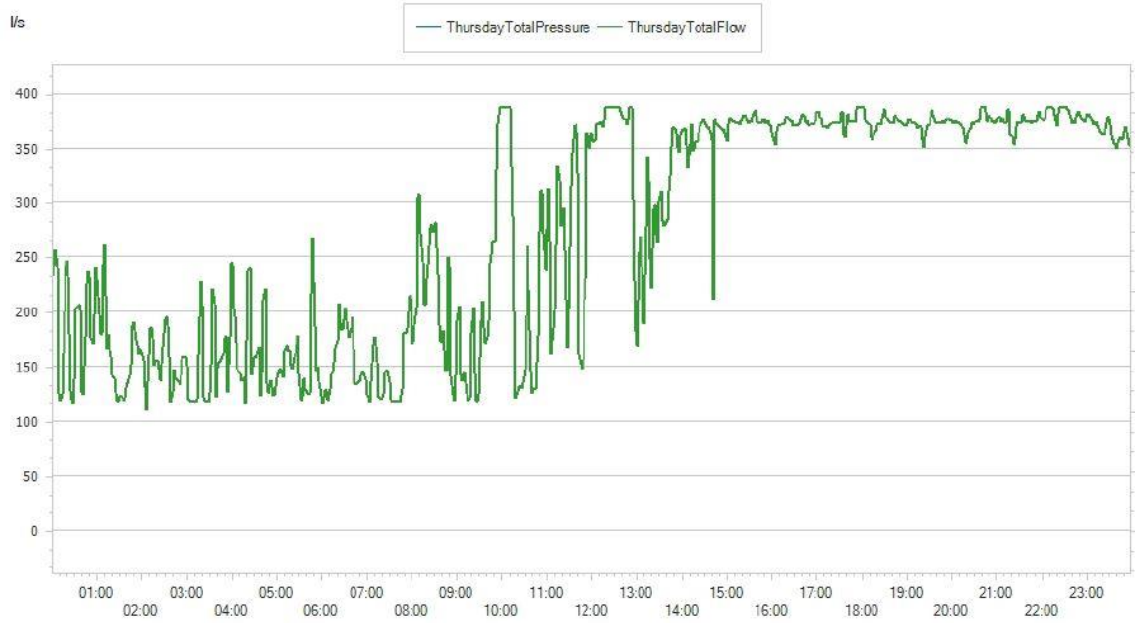
Şekil 5.38 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-salı

Current situation Wednesday 6.10.2021



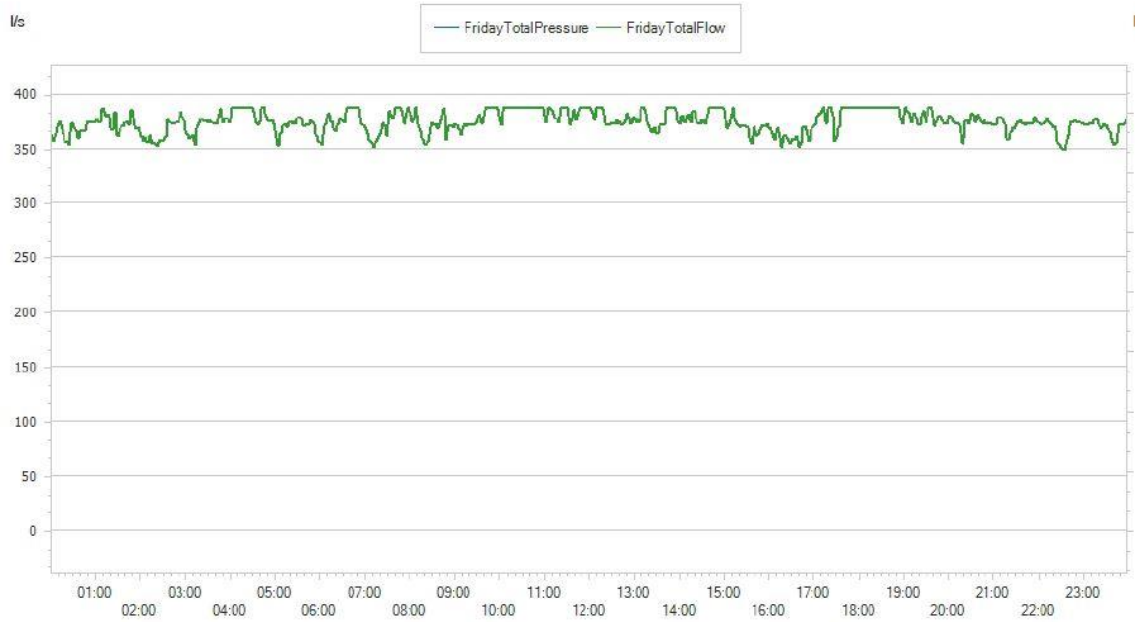
Şekil 5.39 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-çarşamba

Current situation Thursday 30.09.2021



Şekil 5.40 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-perşembe

Current situation Friday 1.10.2021



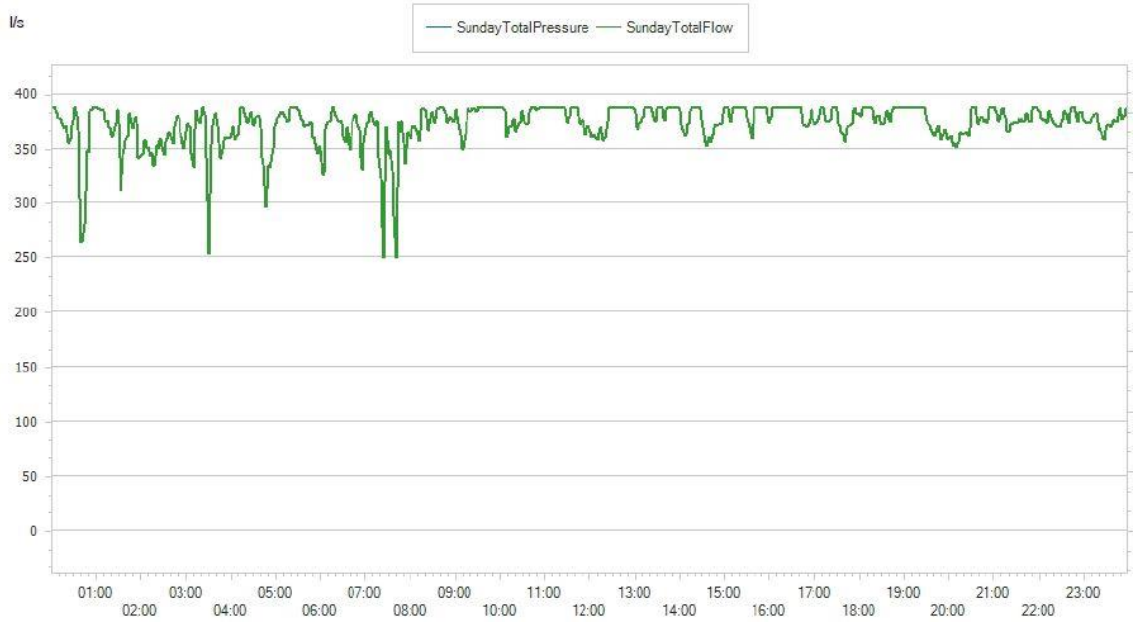
Şekil 5.41 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-Cuma

Current situation Saturday 2.10.2021



Şekil 5.42 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-cumartesi

Current situation Sunday 3.10.2021



Şekil 5.43 Mevcut durumda basınçlı hava talep trendi-pazar

İşletmenin 1 hafta boyunca basınçlı hava sisteminde maksimum basınçlı hava talebi 388 l/s, ortalama basınçlı hava talebi 320 l/s olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.22’de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta oldukları saatleri verilmiştir.

Tablo 5.22 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saatleri

Mevcut Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
C1	151.7	16	0
C2	133.0	35	0
Toplam	284.7	51	0

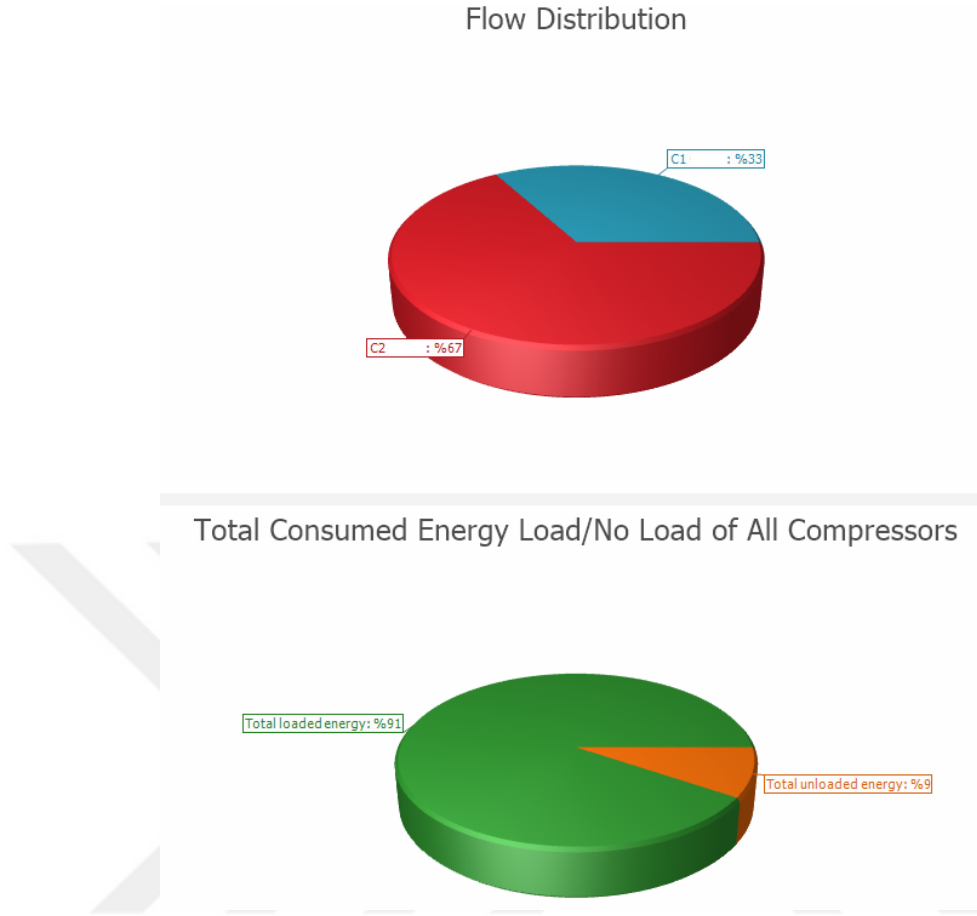


Şekil 5.44 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

Tablo 5.23’de mevcut durumda kompresörlerin 1 hafta boyunca yükte, boşta ve duruşta ne kadar enerji tükettikleri ortaya konulmuştur.

Tablo 5.23 Mevcut durumda kompresörlerin 1 haftalık enerji tüketimleri

Mevcut Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşta Tüketilen Enerji (kWh)
C1	64.5	7,266.0	6,777.0	490.0
C2	129.3	15,071.0	13,502.0	1,569.0
Toplam	193.8	22,337.0	20,279.0	2,059.0



Şekil 5.45 Mevcut durumda kompresörlerin yükte ve boşta enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.22 ve Tablo 5.23’den de görülebileceği üzere kompresörler mevcut durumda bir hafta boyunca toplam 51 saat boşta çalışmış ve bu süreç boyunca 2,059.0 kWh enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle kompresör enerji tüketiminin yaklaşık %9’u kompresörlerin boşta çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji tüketimi boyunca hiç basınçlı hava üretilemediği unutulmamalıdır. Mevcut basınçlı hava talep trendi çok daha dalgalı olabilirdi. Böyle bir durumda mevcut kompresörler daha çok yüke ve boşta geçecek bu hem kompresörlerin boşta çalışırken harcadığı enerji tüketimini arttıracaktı hem de makinenin ekonomik ömrünü olumsuz etkileyecekti.

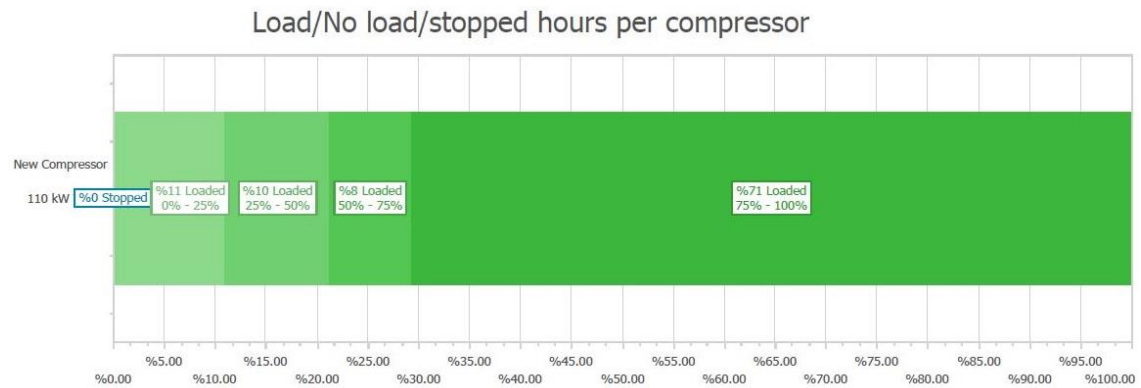
Şekil 5.45’de belirtildiği gibi, basınçlı hava talebine göre mevcut durumda üretilen basınçlı havanın yaklaşık %37’si C1, ve %67’si C2 numaralı kompresörler tarafından karşılanmıştır.

Mevcut durum ortaya konduktan sonra, Airchitect yazılımında eski 2 sabit devirli kompresör yerine sisteme yeni aynı talebe cevap verebilecek kapasiteye sahip hız sürücülü kompresör entegre edilmiş olup, bir hafta boyunca aynı basınçlı hava talebi yeni duruma göre simülasyonu yapılmıştır. Yani 1 haftalık aynı basınçlı hava talebine karşılık, yeni hız sürücülü kompresör çalışsaydı ne kadar enerji harcardı onu görmek için ilave simülasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 5.24’de yeni kompresörün aynı basınçlı hava talebine karşılık yükte, boşta ve duruşta olacakları saatler belirtilmiştir.

Tablo 5.24 Yeni kompresörün simülasyon sonucu 1 haftalık çalışma saatleri

Yeni Durum	Yükte Çalışma Saati	Boşta Çalışma Saati	Duruş Saati
Yeni Kompresör	168	0	0
Toplam	168	0	0



Şekil 5.46 Yeni kompresörün 1 haftalık çalışma saati yüzdesel dağılımı

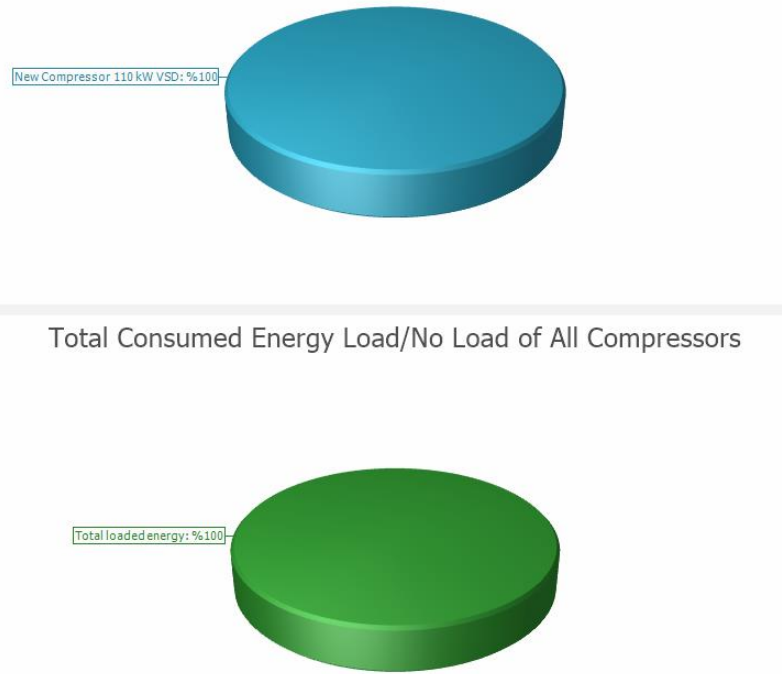
Tablo 5.24 ve Tablo 5.25’den de görülebileceği üzere yeni kompresör hiç boşa çalışmamıştır. Enerji tüketiminin tamamı yükte çalışmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.25’te yeni kompresörün aynı basınçlı hava talebine karşılık 1 hafta boyunca yükte, boşa ve duruşta ne kadar enerji tüketeceği ortaya konulmuştur.

Tablo 5.25 Yeni kompresörün simülasyon sonucu 1 haftalık enerji tüketimleri

Yeni Durum	Toplam Debi m ³ (x1000)	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Yükte Tüketilen Enerji (kWh)	Boşa Tüketilen Enerji (kWh)
Yeni Kompresör	193.8	18,311.0	18,311.0	-
Toplam	193.8	18,311.0	18,311.0	-

Flow Distribution



Şekil 5.47 Yeni kompresörün yükte ve boşa enerji tüketimlerinin ve üretilen basınçlı havanın yüzdesel dağılımı

Tablo 5.22 ve Tablo 5.24'den de görülebileceği üzere boşa çalışma saati sıfırlanmıştır.

Tablo 5.23'den de görülebileceği üzere mevcut durumda 1 hafta boyunca kompresörler toplam 22,337 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Tablo 5.25'den de görülebileceği üzere yeni kompresör 1 hafta boyunca aynı basınçlı hava talebine 18,311 kWh enerji tüketerek karşılık vereceği simülasyon ile ortaya konulmuştur. 1 haftalık enerji tasarrufu 4,026 kWh, işletmenin 50 hafta çalışacağı düşünülürse 201,300 kWh yıllık enerji tasarruf potansiyeli olduğu ortaya konulmuştur. Yüzdesel olarak enerji tasarrufu %18.02 olarak ifade edilebilir.

Birim elektrik fiyatı 1.0474 TL/kWh olarak alındığında 210,842 TL yıllık parasal tasarruf potansiyeli barındırmaktadır. Böyle bir işin yaklaşık yatırım maliyeti 300,000 TL olarak alındığında basit geri ödeme süresi 1.42 yıl olarak hesaplanmıştır.

Türkiye elektrik enerji CO₂ faktörünü 0.481 kg/kWh olarak düşünürsek, CO₂ emisyon azaltma potansiyeli yıllık 96.83 ton olarak hesaplanmaktadır.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Basınçlı hava kompresörleri enerji tüketiminin yüksek olduğu ve endüstride yoğun bir şekilde kullanılan bir ekipmandır. Bu nedenle, basınçlı hava kompresörleri ve hatlarında yapılacak enerji verimliliği çalışmalarının etkisi çok yüksek olacaktır. Bu tez çalışmasında, kompresörler ve basınçlı hava hatları için yapılabilecek verimlilik artırıcı uygulamalar incelenerek teknik, ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirilmiştir.

Basınçlı hava hatlarındaki kaçaklar basınçlı hava sistemleri için önemli bir husustur. Basınçlı hava kaçaklarının tespiti ve onarımı hem çok kolay hem de ciddi enerji tasarrufu imkânı olduğu yapılan çalışmalar ile saptanmıştır. Kaçakların tespiti ve onarımı için işletmelerin sürekli planı olması önerilmektedir. Ortalama bir basınçlı hava kaçağının yıllık enerji maliyeti 3,146.4 TL olarak hesaplanmıştır.

Birden fazla kompresörü olan işletmelerde merkezi kontrol cihazı, hem kompresörlerin boştaki çalışma süresini düşürdüğü hem de ortalama çalışma basıncını azalttığı için ciddi enerji tasarruf potansiyeli bulunmaktadır. Dolayısıyla birden fazla kompresörü olan işletmelere merkezi kontrol cihazı ile kompresörlerin kontrol edilmesi önerilmektedir. 3 farklı kompresör dairesinde tamamlanan çalışma sonrasında kompresör dairelerinin merkezi kontrol cihazı ile kontrol edilmesi sonucunda; sırasıyla %7.45, %5.63 ve %17.42 enerji tasarruf potansiyeli olduğu saptanmıştır.

Basınçlı hava kompresörlerinde ısı geri kazanım ile ciddi enerji tasarrufu imkanı bulunmaktadır. Hem basınçlı hava egzozundaki atık ısı hem de yağdaki atık ısıdan kullanım noktası bulunması durumunda faydalanmak mümkündür. Basınçlı hava kompresörü kullanan profesyonellerin buralardaki mevcut atık ısıyı kullanma konusunda gerekli özeni göstermeleri önerilmektedir. 200 kW nominal elektrik tüketimine sahip bir basınçlı hava kompresöründe ısı geri kazanım uygulaması ile yıllık 242.24 ton CO₂ emisyonu azaltılabileceği hesaplanmıştır.

Basınçlı hava üretim ve tüketim noktaları arasındaki basınç kaybından dolayı ciddi enerji kayıpları olduğuna daha önceki bölümlerde değinilmiştir. Basınçlı hava sistemindeki basınç kayıpları mümkün mertebe en azda tutulmalı, kompresörler olabildiğince düşük basınçta çalıştırılmalıdır. Kompresörleri bir bar daha düşük ayar basıncında çalıştırarak, ortalama %6.55 daha az enerji tüketilebileceği görülmüştür.

Değişken basınçlı hava talebi olan işletmelerin, bu değişken taleplere karşılık en verimli bir şekilde basınçlı hava sağlaması için hız sürücülü kompresör kullanılması önerilmektedir. Böylelikle sabit devirli kompresörlerin sürekli yüke ve boşa girmesinin neden olduğu mekanik streslerden kaynaklı kompresörlerin ekonomik ömründeki azalma önlenebileceği gibi kompresörlerin boşa çalışmasından kaynaklı enerji tüketimi önlenabilir. Yapılan örnek çalışması sonucunda hız sürücülü kompresör uygulaması ile sabit devirli kompresörlere kıyasla %18.02 enerji tasarruf potansiyeli olduğu saptanmıştır.

Hem enerji tüketimlerini hem de ilgili ekipmanların ekonomik ömürlerini olumlu etkilediğinden, basınçlı hava ekipmanlarının düzenli ve uygun bakımlarının yapılması önerilmektedir. Basınçlı hava kompresörleri ve hatları için yapılacak verimlilik artırıcı çalışmalar ile endüstriyel tesislerin verimlerinin artırılmasına önemli bir katkı sağlanmış olacaktır.

- [1] “International Energy Agency.” <https://www.iea.org/>.
- [2] “Türkiye Elektrik İletim A.Ş.” <https://www.teias.gov.tr/>.
- [3] S. Mousavi, S. Kara, and B. Kornfeld, “Energy efficiency of compressed air systems,” *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 313–318, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.026.
- [4] *Enerji Verimliliği Kanunu*. 2007, pp. 1–9.
- [5] TSKB, “Türkiye Enerji görünümü 2020,” pp. 1–94, 2020, [Online]. Available: <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>.
- [6] *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı*. 2017, p. 96.
- [7] “Enerji Performans Sözleşmeleri Eğitim Sunumları.” <https://enerji.gov.tr/enerji-verimliliği-ve-cevre-dairesi-baskanligi-sunumlar>.
- [8] “Ölçme ve Doğrulama Eğitim Sunumları.” <https://enerji.gov.tr/enerji-verimliliği-ve-cevre-dairesi-baskanligi-sunumlar>.
- [9] Efficiency Valuation Organization, “IPMVP Core Concepts 2016,” no. October, 2016, [Online]. Available: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp>.
- [10] Ümit Çiftçi, Ed., *Basınçlı Hava Sistemleri*. İstanbul: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2017.
- [11] Atlas Copco Airpower NV, *Atlas Copco Compressed Air Manual*, 8th editio. Atlas Copco Airpower NV Boomsesteenweg 957 B-2610 Wilrijk Belgium, 2015.
- [12] “Atlas Copco Energy Recovery External Sales Presentation.” 2017.
- [13] D. Kaya, P. Phelan, D. Chau, and H. I. Sarac, “Energy conservation in compressed-air systems,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 26, no. 9, pp. 837–849, 2002, doi: 10.1002/er.823.
- [14] DOE, “Improving Compressed Air System Performance,” *Compress. Air Chall.*, 2003.
- [15] “Pressurized Air Leakage Detector - Acoustic Camera.” <https://www.theengineer.co.uk/supplier-network/product/atlas-copco-offers-enhanced-compressed-air-leak-detection-service-with-a-winter-guarantee/>.
- [16] “Atlas Copco Airscan - Level 1 training - What Airscan is.” 2021.
- [17] “Central Controler.” <https://www.atlascopco.com/tr->

tr/compressors/digitalbrochures/optimizer-4-0.

- [18] “10 Step Guide to a Greener and More Efficient Production.” <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/customer-offers/download-our-ten-steps-to-green-production-guide>.
- [19] R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “A review on compressed-air energy use and energy savings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 1135–1153, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.013.
- [20] H. Hernandez-Herrera *et al.*, “Energy savings measures in compressed air systems,” *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 3, pp. 414–422, 2020, doi: 10.32479/ijeep.9059.
- [21] A. ZAİM and H. ARAS, “Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği,” *Mühendis ve Makina*, vol. 61, no. 698, pp. 31–45, 2020, doi: 10.46399/muhendismakina.750613.
- [22] Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilâtı (UNIDO), “Endüstriyel Sistemlerde Optimizasyon Basınçlı Hava Sistemleri,” 2016.
- [23] F. Oliveira and A. Ukil, “Comparative Performance Analysis of Induction and Synchronous Reluctance Motors in Chiller Systems for Energy Efficient Buildings,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4384–4393, 2019, doi: 10.1109/tii.2018.2890270.
- [24] D. D. Šešlija, I. M. Milenković, S. P. Dudić, and J. I. Šulc, “Improving energy efficiency in compressed air systems practical experiences,” *Therm. Sci.*, vol. 20, no. January, pp. S355–S370, 2016, doi: 10.2298/TSCI151110022S.
- [25] “Enerji Atlası - Güncel Elektrik Birim Fiyatları.” <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-fiyatlari/>.
- [26] “COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS,” 2020. https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_09_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v14.pdf.
- [27] H. DULKADİROĞLU, “Türkiye’de Elektrik Üretimi’nin Sera Gazı Emisyonları Açısından İncelenmesi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–74, 2018, doi: 10.28948/ngumuh.369948.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Şaban PUSAT, Sefa ŞAHİN (2022). “Endüstriyel Tesislerde Basınçlı Hava Kaçaklarının Tespiti ve Enerji Verimliliği Potansiyelinin Belirlenmesi” 2. ISPEC Ulusal Bilimsel Araştırmalar Kongresi

