



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**PNÖMATİK SİSTEMLERDE VERİM ARTTIRMA PARAMETRELERİNİN
ANALİZİ ve OTOMOTİV SANAYİNDE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAZIL DEMİRLER

DANIŞMAN: PROF.DR. FİKRET YÜKSEL

**YALOVA
TEMMUZ 2024**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

PNÖMATİK SİSTEMLERDE VERİM ARTTIRMA PARAMETRELERİNİN
ANALİZİ ve OTOMOTİV SANAYİNDE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAZIL DEMİRLER
228107010

DANIŞMAN: PROF.DR. FİKRET YÜKSEL

YALOVA
TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım “Pnömatik Sistemlerin Çalışma Şartlarının İyileştirilmesi ve Enerji Tüketiminin Minimalize Edilmesi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Fazıl DEMİRLER

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren Sayın Danışman Hocam Prof. Dr. Fikret YÜKSEL'e teşekkür ederim. Ders ve tez aşamasında desteklerini gördüğüm Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Öğretim üyelerine saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olduklarını hissettiren ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve iş arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederimi sunarım.

Temmuz – 2024

Fazıl DEMİRLER



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	iv
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Pnömatik Sistemlerin Çalışma Prensipleri	3
1.2. Pnömatik Sistemlerde Kompresör Kullanımı	5
1.3. Endüstriyel Enerji Sistemleri ile Karşılaştırılması	7
1.4. Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği Uygulamaları	8
1.5. Otomotiv Sektöründe Pnömatik Sistem Kullanım Alanları	9
2. MATERYAL VE METOT	11
2.1. Tesis Donanımı ve Değerlendirmelerde Kullanılan Ölçüm Cihazları	12
2.2. Tesis Kompresör Dairesi ve Kapasite Bilgileri	15
2.3. Çalışmada Kullanılan Metodik Yöntem	17
2.4. Enerji Tüketimleri ve Kayıp Hesaplamalarında Kullanılan Bağıntılar	18
3. OTOMOTİV SANAYİ PNÖMATİK SİSTEMLERDE VERİMLİLİK	211
3.1. Tesisin Hava Kullanım Oranı	233
3.2 Hava Debisi, Kaçak Seviyesi ve Basıncılı Hava Maliyetleri	244
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	29
4.1 Basınç Değerlerinin Ölçümleri ve Analizi	31
4.2 Boyahane Üretim Tesisi Basınç Ölçüm Değerleri ve Analizi	32
4.3 Montaj Üretim Tesisi Basınç Ölçüm Değerleri ve Analizi	33
4.4 Analizler Sırasında Tespit Edilen Bulgular	34
4.5 Üretimin Olmadığı Dönemlerde Zamana Bağlı Basınç Debi İlişkisi	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
KAYNAKÇA	44
ÖZGEÇMİŞ	46

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

E	: Enerji
μ	: Öğrenme katsayısı
α	: Tetikleme açısı
V	: Çözelti hacmi (ml)

KISALTMALAR

DSİ	: Devlet Su İşleri
HGK	: Hukuk Genel Kurulu
İİBK	: İş ve İşçi Bulma Kurumu
NaCl	: Sodyum Klorür
OECD	: Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü
TCK	: Türk Ceza Kanunu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TBMM	: Türkiye Büyük Millet Meclisi
OEM	: Original Equipment Manufacturer
YÖK	: Yüksek Öğretim Kurulu
CTQ	: Critical to Quality
S.I.P.O.C.	: Supplier – Input – Process – Output – Customer
NPP	: Non Production Period
SCA	: Screen Customer Assistant

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Tesis İçinde Kullanılan Kompresörlerin Teknik Veri Analizleri – 1	15
Tablo 2.2. Tesis İçinde Kullanılan Kompresörlerin Teknik Data Analizleri – 2	16
Tablo 2.3. Delik Çapı Hava Kaçak Miktarı ve Gerekli Güç Korelasyonu	20
Tablo 3.1. Tesiste yer alan kompresörlerin çıkış değerleri	22
Tablo 3.2. Tesis Genel Bilgiler	23
Tablo 3.3. Hava Akışı	24
Tablo 3.4. İş Yüğü Dağılımı	25
Tablo 3.5. Kaçak Seviyesi.....	26
Tablo 3.6. Basınçlı Hava Maliyetleri	27
Tablo 4.1. Farklı Üretim Alanlarında Debi Değerleri.....	31
Tablo 4.2. Yapılan Ölçümler Sonrası, Kazanç Tablosu.....	38
Tablo 4.3. Basınç Değerlerinde Ortalama Debi Hesabı	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Pnömatik Sistem Elemanları Şeması	3
Şekil 1.2. Pnömatik Sistem Devre Şeması	4
Şekil 1.3. Kompresör Tipleri ve Sembolleri	6
Şekil 2.1. Tesisin Enerji Maliyetleri Değerlendirmesi (TL / %)	11
Şekil 2.2. Kompresör Odası Şematik Görünümü ve Bağlantı Yapısı	12
Şekil 2.3. Kompresör Odası Basınç ve Debi Takibi Ekran Görünümü.....	13
Şekil 2.4. Kompresör Odası Görseller	13
Şekil 2.5. Pnömatik Sistemde Hava Aktarım Şeması	14
Şekil 4.1. Pnömatik Sistemlerde Sebep Sonuç İlişkisi (Ağaç Diyagramı).....	29
Şekil 4.2. Basınçlı Hava üretim-tüketim hattı S.I.P.O.C. Analizi	30
Şekil 4.3. Sebep Sonuç Önceliklendirme Matrisi	30
Şekil 4.4. Üretim Hattı (boya) Yapılan Basınç Ölçümleri ve Kayıp Değerleri	32
Şekil 4.5. Üretim Hattı (montaj) Yapılan Basınç Ölçümleri ve Kayıp Değerleri	33
Şekil 4.6. Boya Üretim Müdürlüğü Basınçlı Hava Tüketim Debisi	35
Şekil 4.7. Montaj Üretim Müdürlüğü Basınçlı Hava Tüketim Debisi	35
Şekil 4.8. Gövde Üretim Müdürlüğü Basınçlı Hava Tüketim Debisi	35
Şekil 4.9. Süspansiyon Üretim Müdürlüğü Basınçlı Hava Tüketim Debisi.....	36
Şekil 4.10. Farklı Basınç Değerlerinde Yapılan Debi Ölçüm Grafikleri	36
Şekil 4.11 Basınç Debi Değişim Grafikleri – Düzensizlik Analizi.....	37
Şekil 4.12. Basınçlı Hava Takibi SCA Ekran Görünümü	37
Şekil 4.13. Manual ve Oransal Vana Kullanımının Sistem Üzerindeki Görünüm	39
Şekil 4.14. Çap Düşümü ve Kelebek Vana Görselleri	40
Şekil 4.15. Filtre Görselleri	40

PNÖMATİK SİSTEMLERDE VERİM ARTIRMA PARAMETRELERİNİN ANALİZİ VE OTOMOTİV SANAYİNDE UYGULANMASI

ÖZET

Pnömatik sistemler, sanayinin pek çok alanında kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında; otomotiv sanayinde pnömatik sistemlerin uygulanabilir tasarruf yöntemleri araştırılmıştır. Bu amaçla, basınçlı hava hatlarında kaçakların verimlilik üzerine etkileri ile merkez kompresör dairesinden gelen basıncın minimum kayıp ile üretim hatlarına gitmesi ve üretimin olmadığı dönemlerde hava basıncının düşürülerek kayıpların azaltılması sonucu enerji verimliliği ve kazançlar değerlendirilmiştir. Analizlerin yapıldığı otomotiv tesisinde yapılan ölçümlere bağlı olarak somut iyileştirme değerleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda tesisin basınçlı hava hatlarında enerji etüdü yapılarak, kaçak oranlarının ve ihtiyaç dışı enerji tüketim değerlerinin tespit edilerek, alınması gerekli önlemler belirlenmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışmada metodik olarak hesaplamalarda ve tespit edilen uygunsuzluklarda altı sigma (ileri) problem çözme teknikleri ile ileri matematik modelleme metodu kullanılmıştır.

Sonuç olarak, kompresör çıkış basıncı 8.0 bar'dan 7,7 bar'a düşürülmüş, oransal vanaların eklenmesi ile hatlara giden hava basıncının ilgili üretim birimi bazlı düşürülerek basınçlı hava tüketim miktarında %20 düşüş sağlanmıştır. Tüketilen elektrik enerjisinde ise %16 oranında tasarruf sağlanarak enerji verimliliği artırılmıştır. Ek olarak bağlantı elemanlarında ve hava filtrelerinde yapılan iyileştirmeler ve ihtiyaç fazlası bağlantı elemanlarının sistemden çıkartılması, filtre tasarımlarının değiştirilmesi ve bakım periyotlarının güncellenmesi ile enerji verimliliğine katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik Sistemler, Enerji Verimliliği

IMPROVEMENT OF OPERATING CONDITIONS OF PNEUMATIC SYSTEMS AND MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION

ABSTRACT

Pneumatic systems are used in many areas of industry. This scope of work; Applicable saving methods of pneumatic systems in the automotive industry have been investigated. For this purpose, the effects of leaks in compressed air lines on efficiency, the pressure coming from the central compressor room to the production lines with minimum loss, and the energy efficiency and gains as a result of reducing losses by reducing air pressure in periods when there is no production, were evaluated. Concrete improvement values were determined based on the measurements made in the automotive facility where the analyzes were carried out. In this regard, an energy audit was conducted in the compressed air lines of the facility, leakage rates and unnecessary energy consumption values were determined, and the necessary precautions were determined.

In this experimental study, six sigma (advanced) problem solving techniques and advanced mathematical modeling method were used methodically in the calculations and detected nonconformities.

As a result, the compressor outlet pressure was reduced from 8.0 bar to 7.7 bar, and with the addition of proportional valves, the air pressure going to the lines was reduced on a relevant production unit basis, resulting in a 20% decrease in the amount of compressed air consumption. Energy efficiency was increased by saving 16% in consumed electrical energy. In addition, improvements in connection elements and air filters, removal of unnecessary connection elements from the system, changing filter designs and updating maintenance periods contributed to energy efficiency

.Keywords: Pneumatic Systems, Energy Efficiency

1.GİRİŞ

Pnömatik sistemler, sıkıştırılmış hava ile çalışan makinalar olarak tanımlanmaktadır. Sanayide pek çok alanda makine sistemlerinin tüm ekipmanlarının çalışabilmesi için basınçlı hava kullanılmaktadır. İlaç sanayisi, nükleer reaktörler, gıda sanayi, madencilik ve birçok endüstriyel alan örnek olarak verilebilir (Kılıçaslan, 1988). Otomasyon ve kontrol sistemlerinde kullanılan Pnömatik sistemler, bulundukları ortamın havasını mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir.

Pnömatik sistem, hava ile çalışan mekanik sistemlerdir. Ortamdaki havayı mekanik harekete çevirme prensibi ile çalışan bir makine sistemidir. Hava yerine nitrojen veya karbondioksit de kullanılabilir. Saf oksijen, yanmaya iştirak eden bir gaz türü olduğundan bu sistemlerde kullanılmamaktadır (McCloy ve ark., 1980).

Pnömatik sistemlerin kullanımı eski çağlara uzanmaktadır. Hava körükleri olarak bilinen sistemler M.Ö. 2500 yıllarında kullanılmaya başlanmış ilk pnömatik uygulamalar olarak bilinirler. Pnömatik rüzgâr veya nefes anlamına gelen eski Yunanca Pnuema kelimesinden türetilmiştir (Demirel, 2013).

Pnömatik sistemler üzerine endüstrinin bir dalı haline gelen pnömatik sektör, gaz basınçlı sistemlerin hareketini ve kontrolünü sağlayan sektör olarak ifade edilir. İlk pnömatik sektör uygulamaları 19. yüzyılın ortalarında başlasa da modern anlamda uygulamalar 20. yüzyılın sonlarında başlamıştır (Kutlu ve Büyüksavcı, 1999).

Türkiye'de 1960'lı yıllara kadar yedek parça temini ve tamiri olarak işlev gören pnömatik sektörü, 1970'li yıllardan sonra hidrolik ve pnömatik elemanların üretimine doğru gelişmeye başlamış ve günümüzde üretimin yanı sıra ağırlıklı olarak tasarım hizmetleri sunan bir yapıya dönüşmüştür (Akkaya ve ark., 2005). 1980'li yıllardan sonra yedek parça ithalatı başlamış, gelişen teknoloji ile birlikte makine imalat sektörlerinde pnömatik sistemler kurulmaya başlanmıştır. Daha sonraları projelendirme ve güç üniteleri gelişmiş; demir çelik, otomotiv gibi ağır sanayide hem hidrolik hem de pnömatik sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde çimento, kimya, tekstil ve cam gibi geniş yelpazesi bulunan birçok sanayi alanında kullanılmaktadır. İhtiyaca yönelik, farklı kapasitelerde pnömatik sistemler tasarlanabilir.

Pnömatik sistemlerde enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalarda, çeşitli araştırmacılar, mühendisler ve bilim insanları katkıda bulunmuştur. Bu çalışmalara katkıda bulunan bazı bilim insanları;

Profesör Ernst Ulrich von Weizsäcker: Alman bilim insanı Profesör Ernst Ulrich von Weizsäcker, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik konularında uzmanlaşmıştır. Pnömatik sistemlerin enerji verimliliği üzerine yaptığı çalışmalarla tanınmıştır.

Profesör Wolfgang Maass: Alman mühendis ve araştırmacı Profesör Wolfgang Maass, pnömatik sistemlerin enerji tüketimi üzerine kapsamlı çalışmalar yürütmüştür. Verimli aktüatörler, basınç düzenleme ve kaçak kontrolü gibi konularda araştırmaları bulunmaktadır.

Profesör Ahmet Selçuk: Türk bilim insanı Profesör Ahmet Selçuk, otomotiv mühendisliği ve enerji verimliliği alanlarında uzmanlaşmıştır. Pnömatik sistemlerin enerji tüketimi üzerine araştırmaları ve enerji tasarrufu sağlayan yöntemler konusunda çalışmaları mevcuttur.

Dr. Peter Nachtwey: Alman mühendis Dr. Peter Nachtwey, pnömatik sistemlerin verimliliği üzerine çalışmalar yapmıştır. Özellikle basınç düzenleme, kaçak kontrolü ve enerji tasarrufu konularında çeşitli araştırmaları bulunmaktadır.

Profesör Michael Pecht: Amerikalı bilim insanı Profesör Michael Pecht, enerji yönetimi ve verimlilik konularında uzmanlaşmıştır. Pnömatik sistemlerde enerji tüketimi üzerine yapılan araştırmalarıyla tanınmaktadır.

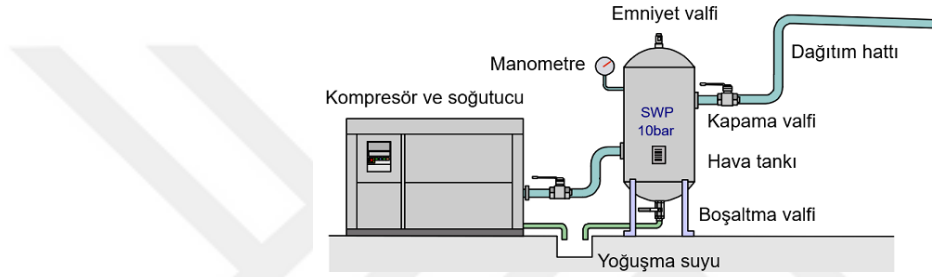
Belirtilen isimlere ek olarak pnömatik sistemlerin enerji tüketimini azaltmak ve sistem verimliliğini artırmak amacıyla dünya genelinde birçok araştırmacı çalışmalarını sürdürmektedir.

1.1. Pnömatik Sistemlerin Çalışma Prensipleri

Ortamda bulunan hava, sistem bileşenlerinin içine doldurulmakta ve havanın sıkıştırılması ile itme gücü yaratılmaktadır. Bu bağlamda mekanik hareketlilik elde edilir.

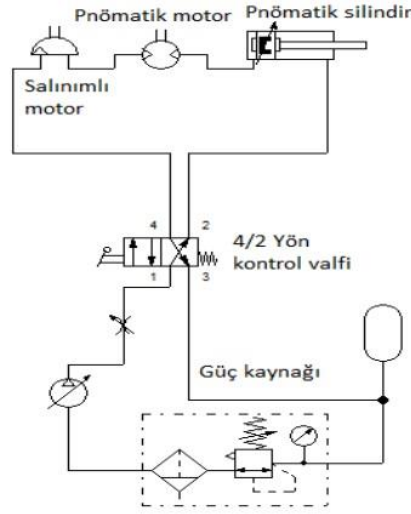
Bir pnömatik sistem örneği olarak; içerisinde sıkıştırılmış hava bulunan şişirilmiş bir balon serbest bırakıldığında hava harekete geçerek, enerjiye dönüşür. Açığa çıkan enerji, balonu harekete geçirmektedir. Mekanik hareketlilik sağlanmış olur.

Temel seviyede bir pnömatik sistem için gerekli olan bileşenler basınç kaynağı (kompresör), manometre, hava tankı ve dağıtım hattı olarak sıralanabilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Pnömatik Sistem Elemanları Şeması

Ortamdan alınan hava, kompresör aracılığı ile istenen basınç değerine getirildikten sonra hava tankında depolanmaktadır. Hava tankında manometre ile basınç değeri kontrol edilir, gerekli durumlarda emniyet ve boşaltma valfi ile hava tahliyesi yapılır, uygun basınç değerine getirilen hava, dağıtım hattı ile ilgili yerlere taşınır. Pnömatik sistem devre şeması Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Pnömatik Sistem Devre Şeması

Kompresör dairesinden oluşan bir güç kaynağı; kapatma, boşaltma ve emniyet valfleri gibi yön kontrol valfi; dağıtım hattı sonunda enerjinin mekanik hareketliliğe dönüştüğü salınlı/pnömatik motor veya pnömatik silindir şeklinde devre oluşturulabilir.

Basıncılı hava sistemi, arz tarafı ve talep tarafı bileşenlerinden oluşmaktadır. Arz tarafı, basıncılı havanın üretimi ve işlenmesi için gerekli ekipmanları içermektedir. Tipik olarak bunlar; kompresör, depolama amaçlı hava tankı, nemi gidermek için kurutucu ile yağ ve yağ partiküllerinin geçişini engelleyen filtrelerden oluşmaktadır. Bazı uygulamalarda ayrıca arz ve talep taraflarını ayıran bir basınç/akış regülatörü bulunmaktadır.

Sistemin talep tarafında, dağıtım sistemi (boru tesisatı), ek kullanım filtreleri ve araçları, basıncılı hava kullanan işlemler ve kontroller bulunmaktadır. Bir Pnömatik sistemin, düşük basınçta ve düşük debili hava kullanması için optimize edilmiş bir talep tarafı; düşük kW gücüyle hava sağlayan optimize edilmiş bir besleme tarafı bulunmalıdır. (Küçükyavaşlıoğlu, 2020).

1.2. Pnömatik Sistemlerde Kompresör Kullanımı

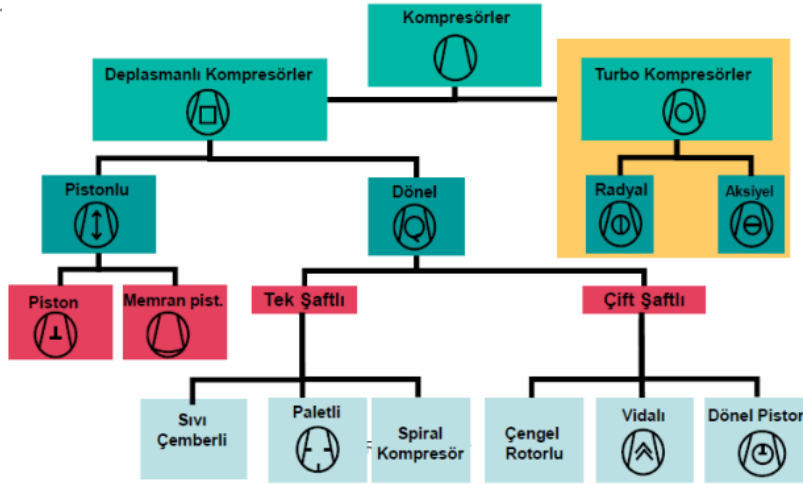
Pnömatik sistemlerin en önemli bileşeni kompresörlerdir. Kompresörler emiş borusundan çekilen havayı sıkıştırarak basıncını ve sıcaklığını yükseltmekte ve hava tankında depolamaktadır (Sapmaz, 2014).

Kompresörlerin sıkıştırdığı havanın basıncı arttıkça havaya aktarılan enerjinin büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu nedenle kompresör çıkışında sıcak ve basınçlı hava elde edilmektedir. Kompresörden çıkan ve kurutucudan geçen basınçlı havanın enerjisi, mil vasıtasıyla kompresöre aktarılan enerjinin çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak kompresörler düşük güçlü makineler olarak sınıflandırılmaktadır. Gazın yüksek basınçlara sıkıştırılması, kompresör tasarımında sorunlar yaratan yüksek sıcaklıklara neden olmaktadır.

Kompresör tipi fark etmeksizin tüm kompresör elemanları, tasarımlarını sınırlayan çalışma koşullarına sahiptirler. Böyle bir sınırlama ile karşı karşıya kalındığında sıkıştırma kademeli olarak yapılır, bu durumlarda kademeli kompresörler kullanılır. Kademeli sıkıştırmanın hacim üzerinde olumlu bir etkisi bulunmaktadır. Kademeli sıkıştırma yapabilen bir kompresörde, hacimsel verimi genellikle düşük basınçta sıkıştırmanın gerçekleştirildiği birinci kademe belirler. Bunun sebebi, ikinci kademedeki basınçlı hava hacminin birinci kademe tarafından belirlenmesidir (Sapmaz, 2014).

Pistonlu kompresörler, yağlı ve yağsız sıkıştırma yapmak için kullanılırlar. Temel olarak bir pistonlu kompresör karter, krank, biyel kolu, silindir, piston, emme ve basma valflerinden oluşur. Gürültülü çalışmaları ve bakım sıklığı nedeniyle pistonlu kompresörler çok tercih edilmez. En önemli tercih sebebi ekonomik ulaşılabilirliğidir, küçük ve orta büyüklükteki işletmelerde tercih edilir.

Turbo, pistonlu ve vidalı kompresör türleri havayı belirli oranlarda sıkıştırarak basınçlı hava üretir. Turbo kompresörler, genellikle yüksek debi gereken yerlerde kullanılır. Hava türbin kanatları arasından geçtikçe sıkıştırılmaktadır. Bu tip kompresörler tek kademeli yapılabileceği gibi çok kademeli olarak da yapılabilir. Kompresörlerin genel sınıflandırması Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Kompresör Tipleri ve Sembolleri

Turbo kompresörler, radyal ve aksiyel olmak üzere iki tipte değerlendirilebilir; pistonlu kompresörler deplasmanlı kompresörlere dahil iken vidalı kompresörler diğer bir deplasmanlı kompresör türü olan dönel kompresörlerin içerisinde değerlendirilmektedir. Tez kapsamında pistonlu kompresörler, turbo kompresörler ve vidalı kompresörler dikkate alınmıştır.

Basınçlı hava sistemlerinde hava deposu kullanılması sistemdeki havanın stabil ve verimli kullanılmasını sağlar. Hava tankının girişi ve çıkışı zıt yönlerde yapılarak havanın serbest dolaşımı ve sistemdeki suyun hatta gönderilmesi engellenmeye çalışılır (Küçükyazıcıoğlu, 2020). Kompresörün yüke girmesi ve boşa çalışması durumlarında oluşan ani basınç dalgalanmalarını azaltır. Sistemi beslemek için gerekli havayı depolar. Bu sayede kompresörün yüke-boşa durumundan kaynaklanan dalgalanmaların önüne geçilir.

Manometre ve emniyet valfi sayesinde basınçlı havanın kontrol altında tutulduğu hava tankı kompresörün hemen çıkışına yerleştirilir. Sistemin önemli ve iş sağlığı güvenliği açısından dikkat edilmesi gereken ögesi olarak bilinmektedir. Hava tanklarının altta en düşük seviyesine su tahliye sistemi yerleştirilerek, tankta oluşan yoğunlaşma suyunun tahliyesi sağlanır. Su tahliye sistemleri otomatik veya manuel olabilir. Bazı tahliye vanaları, suyu basınçlı havayla karıştırarak basınç düşüşüne neden olabilir. Bu da kompresörde hava ihtiyacına yol açar. Bu nedenle çıkış vanaları seçilirken, suyu havadan ayıran ve sadece suyu tahliye eden otomatik vanaların kullanılması tercih edilir (Sapmaz, 2014).

1.3. Endüstriyel Enerji Sistemleri ile Karşılaştırılması

Pnömatik sistemlerin endüstriyel kullanım alanı çok geniştir. Bir üretim yeri inşa edilirken projesinde ısıtma, soğutma, elektrik, havalandırma gibi tesisatların yanı sıra basınçlı hava sistemlerinin tesisatı da hazırlanmaktadır. Elektrik enerjisi gibi pnömatik enerji de işletmelerin ilk sırada planladıkları girdilerden birisi olarak bilinmektedir (Akyazı ve Çokrak, 2011).

Küçük kuvvetler ile büyük iş sonuçlarının sağlanabilmesi ve temiz havayı kullanması pnömatik sistemlerin enerji kullanımında tercih edilmesinde öne çıkan avantajlarıdır.

Pnömatik sistemlerin, endüstriyel alanda kullanılan enerji sistemleri üzerinde avantajları ve dezavantajları mevcuttur.

Pnömatik Sistemlerin Avantajları

- İçerisinde gaz olarak genelde hava dolaştığı için alev alma ve patlama riski yoktur.
- Sistem üzerinde kullanılan elemanlar ucuzdur ve yapı bakımından basittir.
- Bağlantı elemanlarının montajı kolaylıkla yapılabilir, taşınabilir sistemlerdir.
- Çok yüksek basınç olmadığı için bağlantı elemanları uzun süre dayanır.
- Geri dönüş hattına ihtiyaç yoktur. Kullanılan hava tekrar atmosfere karışır.
- Sistemde temiz hava dolaştığı için ekipmanlar uzun ömürlüdür.
- Diğer sistemlere göre çalışma hızından dolayı önemli bir zaman tasarrufu sağlar. Hız istenen yerlerde başarıyla uygulanır.
- Ortaya çıkan güç sürekli ayarlanabilir ve tekrarlanabilir.
- Sistemde hava kullanıldığı için akışkan maliyeti yoktur.
- Düşük bütçeli yatırımla büyük miktarda enerji depolanabilir ve taşınabilir.
- Elektrik kaçakları ve yüksek basınç risklerine karşı tercih edilebilir.

Pnömatik Sistemlerin Dezavantajları

- Kompresörlerin düşük verimli çalışması nedeniyle üretilen birim iş başına gereken enerji maliyeti yüksektir.
- Hidrolik sistemler kadar güç ve basınç elde edilemez.
- Bu sistemler 0-12 bar aralığında çalışır, 12 bar üzeri basınç gerektiren durumlarda yüksek maliyet sebebiyle tercih edilmemektedir.
- Havadaki nem ve tozlar için sürekli filtreleme ve kurutma gerekebilir. Hava kurutma ve depolama için elektrik enerjisine ihtiyaç vardır.
- Sabit hız, net kuvvet ve hassas konum elde etmek zordur.
- Kullanılan havanın çıkışı esnasında yüksek sese sebep olur.
- Kontrol edilmeyen hava kaçakları sistemin maliyetini artırır.

1.4. Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği Uygulamaları

Pnömatik sistemlerinde geçmiş yıllarda enerji verimliliğini artırmak adına odaklanılan uygulamalar aşağıda verilmiştir.

Basınç Azaltma: Pnömatik sistemlerde kullanılan basınç, genellikle işlem gereksinimlerine göre belirlenir ancak gereksinimlerin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi ve optimum basınç seviyesinin belirlenmesi, enerji tasarrufu sağlayabilir. Daha düşük basınç seviyeleri kullanmak, pnömatik sistemlerin enerji tüketimini azaltırken aynı zamanda aşınma ve yıpranmayı da azaltabilir.

Basınç Kontrolü: Pnömatik sistemlerde, basınç regülatörleri kullanılarak sistemdeki basınç seviyesi ayarlanabilir. Geçmişte enerji tasarrufu sağlamak için bu regülatörler daha verimli bir şekilde kullanılmış ve basınç seviyeleri optimize edilmiştir.

Hava Kaçağı Kontrolü: Pnömatik sistemlerdeki hava kaçakları, enerji kaybına neden olabilir. Kaçaklar, vanalar, bağlantı noktaları ve hortumlar gibi bileşenlerde meydana gelebilir. Kaçakların tespit edilmesi için özel test cihazları kullanılır ve kaçakların düzeltilmesi için gerekli önlemler alınabilir. Bu çalışmalar, enerji verimliliğini artırmak ve kayıpları en aza indirmek için önemli bir adımdır.

Yüksek Verimli Aktüatörler: Yüksek verimli aktüatörlerin kullanılması, enerji tüketimini azaltabilir ve sistem performansını iyileştirebilir.

Valf ve Vanaların Optimize Edilmesi: Pnömatik sistemlerdeki valf ve vanaların optimize edilmesi, enerji verimliliğini artırmak için önemli bir adımdır. Valf ve vanaların daha az enerji tüketen modelleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır.

Otomatik Kapanma Sistemleri: Pnömatik sistemlerde, enerji tasarrufu sağlamak için otomatik kapanma sistemleri kullanılır. Bu sistemler, belirli bir süre boyunca kullanılmayan pnömatik ekipmanları otomatik olarak kapatır, böylece gereksiz enerji tüketimi ve olası kayıpların önüne geçer.

Bu uygulamalar otomotiv sanayisinde pnömatik sistemlerin enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir ancak otomotiv endüstrisi sürekli olarak gelişmekte olup yeni teknolojiler ve yenilikçi yaklaşımlar enerji verimliliği konusunda daha fazla ilerleme sağlamaktadır. Klasik yönetimlerin ile birlikte dijital çözümler de önem arz etmektedir.

1.5. Otomotiv Sektöründe Pnömatik Sistem Kullanım Alanları

Otomotiv sektöründe enerji tüketiminde büyük paya sahip olan basınçlı hava üreticisi kompresörler, girişlerindeki gücün sadece %10'luk kısmını işe aktarabildiklerinden düşük verimle çalışan yüksek maliyetli sistemlerdir.

Kompresörlerin çalışma prensiplerinden kaynaklı emilen havanın sıkıştırılması ile giriş gücünün yaklaşık %90'ı atık ısı oluşturmaktadır. Açığa çıkan bu ısı ekonomizer yardımıyla eşanjörlerden geçirilerek suyun veya başka bir mahal alanın ısıtılması için kullanılabilir.

Hava kaçakları, verimsiz motor kullanımı, kompresör hava basıncının sistem ihtiyacına göre yüksek olması, kompresör odalarının sıcak ve emiş havasının yeterince soğuk olmaması gibi etkenler basınçlı hava sistemlerinde verimliliği düşüren faktörlerin başında gelmektedir. Bu tür enerji sarfiyatlarının önlemesi için; hava kaçaklarının belirli sürelerde ultrasonik cihazlarla ölçülerek kontrolünün yapılması, sistemin hava basıncının ihtiyaçları belirlenerek kompresör basıncının düşürülmesi, kompresörlerde verim sınıfı yüksek motorların tercih edilmesi, kompresör odalarının kuzey cephelere konumlandırılmasıyla veya emiş havasının soğutulmasıyla verim artışının sağlanması gibi iyileştirme çalışmaları yapılabilmektedir. (Kılınç,2019)

Otomotiv ana sanayi üreticileri gerek ülke ekonomisi gerekse işletmeler için önemli oranda maliyet azalımı sağladığı için bu sektörde enerji verimliliği çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Ancak otomotiv sanayi, birçok üretim alt yapısının birleşiminden oluştuğu için tüm alanlarda enerji verimliliği konusu değerlidir. Enerji iyileştirme çalışmasının yürütüleceği alanlar ve başlayacağı bölgeler ile ilgili olarak yapılan etüt çalışmaları sonucunda öncelikler belirlenir. Bu önceliklere göre şirketler atak stratejisi ve maliyet hesapları ile birlikte çalışacak ekipleri ve bütçelerini belirler.

Pnömatik enerji verimliliği projeleri açısından önemli örnekler aşağıda verilmiştir.

Volkswagen XL1: Volkswagen tarafından geliştirilen XL1, pnömatik enerji verimliliği konusunda önemli bir proje olarak öne çıkmaktadır. Bu hibrit araç, hafif yapı ve aerodinamik tasarımıyla yakıt tasarrufu sağlamak üzere optimize edilmiştir. Ayrıca, enerji geri kazanım sistemleri ve düşük sürtünme katsayılı lastikler gibi yenilikçi özellikler içermektedir.

Pnömatik Hibrid Sistemler: Pnömatik enerji depolama ve geri kazanım sistemlerinin otomobillerde kullanımı, enerji verimliliği açısından araştırılan bir konudur. Bu sistemlerde frenleme esnasında oluşan enerji, pnömatik sistemlerde depolanabilir ve tekrar kullanılabilir. Bu şekilde, yakıt tüketimi azaltılır ve enerji verimliliği artırılır.

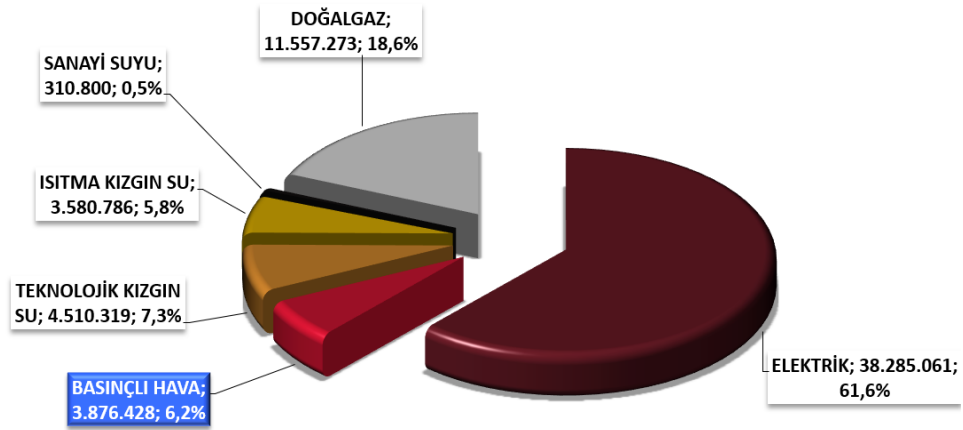
Formula 1 Hybrid Güç Üniteleri: Formula 1 yarışlarında kullanılan hybrid güç üniteleri, pnömatik enerji verimliliği açısından da önemli adımlar atmıştır. Bu sistemlerde, frenleme sırasında oluşan kinetik enerji geri kazanılarak depolanır ve daha sonra kullanılabilir. Böylece, araçların performansı artırılırken enerji tekrar kullanımı sağlanır.

Bu projeler, otomotiv sektöründe pnömatik enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalardan sadece bazı örneklerdir. Otomotiv endüstrisi sürekli olarak yeni teknolojiler geliştirmekte ve enerji verimliliği konusunda daha fazla ilerleme sağlamaktadır. Bu alandaki çalışmalar, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu hedeflerine yönelik olarak devam etmektedir.

2.MATERYAL VE METOT

Pnömatik sistemler Otomotiv Sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanayinin gelişmiş olduğu ülkelere bakıldığında ekonominin lokomotifinin otomotiv sanayisi olduğu görülür. Türkiye’de otomotiv sanayi 1960’lı yıllardan itibaren önemli gelişmeler kaydederek 1990’lı yıllarda ihracata yönelik rekabetçi bir nitelik kazanmıştır. Dünyanın önde gelen otomotiv üreticileri (OEM’ler) Türk İşbirlikçileri ile kurdukları tesislerle Türkiye’yi yabancı otomotiv firmalarının ihracat merkezi haline getirmişlerdir.

Enerji iyileştirme çalışması için göz önüne alınan otomotiv sanayinde enerji maliyetleri değerlendirmesi Şekil 2.1’te verilmiştir. Değerler TL ve % dağılım olarak tanımlanmıştır.



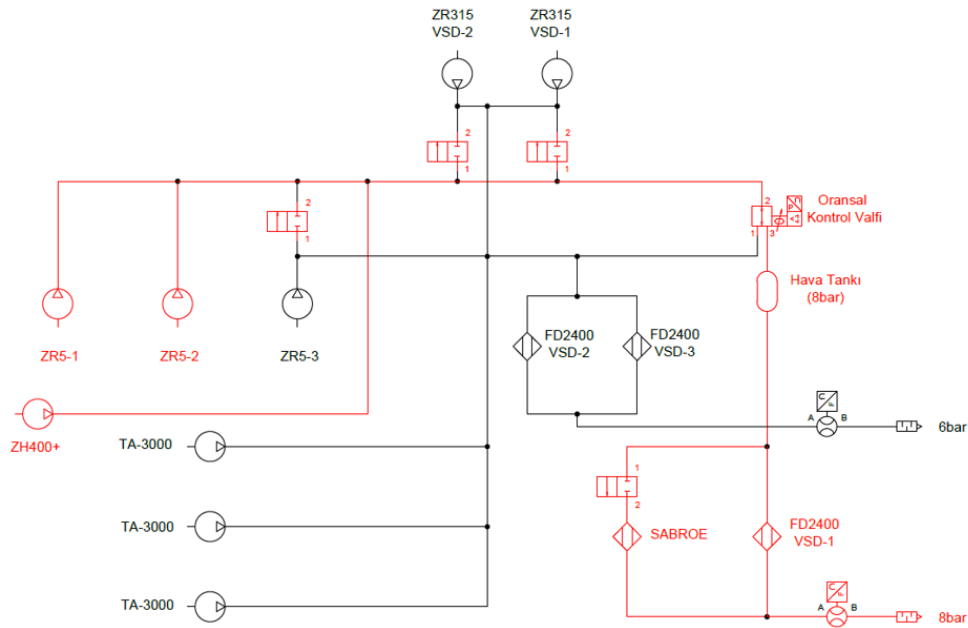
Şekil 2.1. Tesisin Enerji Maliyetleri Değerlendirmesi (TL / %)

Şekil 2.1’te belirtildiği üzere tesisin basınçlı hava kaçaklarında harcamış olduğu enerjinin %6,2 olduğu görülmektedir. Fabrika geneli enerji maliyet analizi yapıldığında, enerji maliyetlerinin %6,2 sini basınçlı hava hatlarında kullanılan enerji olduğu görülmektedir. Basınçlı hava sistemleri üzerinde yapılacak olan verimlilik çalışmaları ile burada harcanan maliyetlerin minimize edileceği ön görülmüştür. Öncelikle mevcut durum analizi ve ölçümler yapılacak olup sonrasında kaçak noktaları tespit edilerek aksiyonlar alınacaktır.

Otomotiv sektöründe enerji tüketiminde büyük paya sahip olan basınçlı hava üretici olan kompresörler, girişlerindeki gücün sadece %10'luk kısmını işe aktarabildiklerinden dolayı enerji verimliliği yönünden verimsiz ve bir o kadar da pahalı sistemlerdir.

2.1. Tesis Donanımı ve Değerlendirmelerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

Çalışmanın yapıldığı alanda toplam 2 hat ve 9 kompresör (turbo + yağsız vidalı) bulunmaktadır. Kompresör odası düzenli, temiz ve havalandırması ISO şartnamelerine göre belirlenerek tasarlanmıştır. Periyodik bakım ve temizlikleri, tanımlı personeller tarafından yapılmaktadır. Debi ve basınç değerleri PLC sistemleri tarafından izlenmekte ve kayıt altında tutulmaktadır (Şekil 2.2,2.3,2.4). İzlenebilirlik bilgilerinin kayıt altında tutulması ve takip edilmesi sağlanmaktadır. Özel bir yazılım programı ile basınç – debi korelasyonu takip edilmektedir.



Şekil 2.2. Kompresör Odası Şematik Görünümü ve Bağlantı Yapısı

Şekil 5'te görüldüğü gibi kompresör odasında 2 farklı hat ve 9 farklı kompresörün yer almaktadır. Bağlantı şekilleri ve diğer ekipmanlar ile irtibatı Şekil 2.2'te verildiği gibidir. PLC destekli program üzerinden, kompresör dairesindeki basınç ve debi takibi yapılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Kompresör Odası Basınç ve Debi Takibi Ekran Görünümü

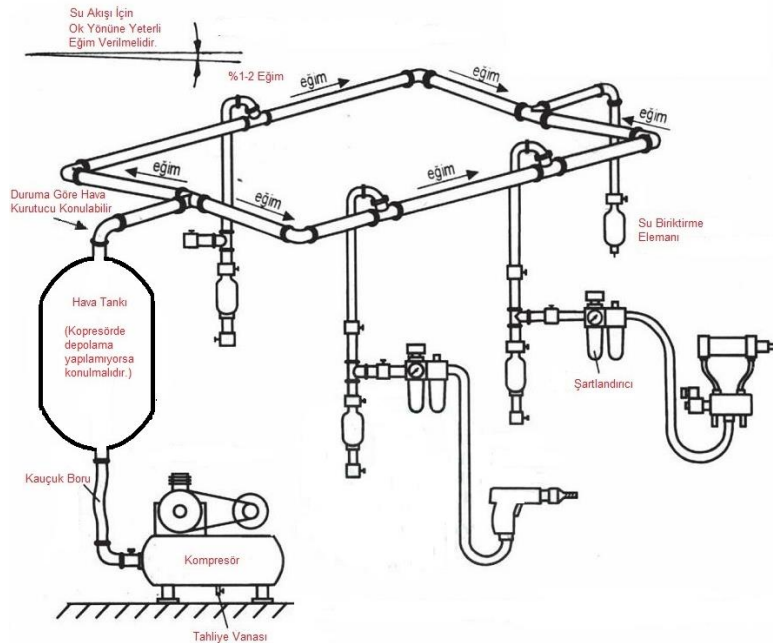


Şekil 2.4. Kompresör Odası Görseller

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi pnömatik sistemler gaz basıncını kullanarak mekanik hareketi oluşturan sistemleri kapsar. Faydalı bir iş yapabilmek için havayı depolayan, sıkıştıran ve bu enerjiyi kullanan sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan başlıca alt ekipmanlar aşağıda listelenmiştir.

- Kompresörler
- Pistonlar (silindirler)
- Kontrol ve elektro valfler
- Gaz tankları
- Hava tabancaları
- Barometre – pnömatik basınç göstergeleri
- Regülatörler ve şartlandırıcılar
- Bağlantı elemanları, borular
- Sayaçlar

Pnömatik sistemlerde çıkış basıncını verimli kullanabilmek için tasarruflu nozul tipi tabancalar enerji tasarrufu açısından tercih edilmektedir. Pnömatik sistemlerde hava aktarımı ve hava tabancasının sistem bağlantısı Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Pnömatik Sistemde Hava Aktarım Şeması

2.2. Tesis Kompresör Dairesi ve Kapasite Bilgileri

Tesis genelinde kullanılan çeşitli kompresörlerin teknik bilgilerini Tablo 2.1 'de sunmaktadır. Her kompresör modeli için çalışma basıncı, kompresör tipi ve kontrol tipi gibi üç ana özellik verilmiştir.

Tablo 2.1. Tesis İçinde Kullanılan Kompresörlerin Teknik Veri Analizleri – 1

Model / Seri Numarası	Çalışma Basıncı	Kompresör Tipi	Kontrol Tipi
ZR5-1	8 bar	Vidalı	Yükle/Boşalt
ZR5-2	8 bar	Vidalı	Yükle/Boşalt
ZR5-3	6 bar	Vidalı	Yükle/Boşalt
ZR315VSD-2	6 bar	Vidalı	Değişken Hız
ZR315VSD-1	6 bar	Vidalı	Değişken Hız
ZH+400-8	8 bar	Turbolu	Yükle/Boşalt
TA 3000	6 bar	Turbolu	Yükle/Boşalt
TA 3000	6 bar	Turbolu	Yükle/Boşalt
TA 3000	6 bar	Turbolu	Yükle/Boşalt

"Çalışma Basıncı": Bu, her kompresörün normal işleyiş sırasında ulaştığı basınç seviyesidir. Bu tabloda, ZR5-1 ve ZR5-2 modellerinin çalışma basıncı 8 bar iken, ZR5-3, ZR315VSD-2, ZR315VSD-1 ve TA 3000 modellerinin çalışma basıncı 6 bar'dır. ZH+400-8 modelinin çalışma basıncı ise 8 bar'dır.

"Kompresör Tipi": Bu, her kompresörün genel tasarımını veya yapısını ifade eder. Bu tabloda, ZR5-1, ZR5-2, ZR5-3, ZR315VSD-2 ve ZR315VSD-1 modelleri vidalı kompresör tipindeyken, ZH+400-8 ve TA 3000 modelleri turbolu kompresör tipindedir.

"Kontrol Tipi": Bu, her kompresörün operasyonunun nasıl kontrol edildiğini ifade eder. Bu tabloda, ZR5-1, ZR5-2, ZR5-3, ZH+400-8 ve TA 3000 modelleri yükle/boşalt kontrol tipi kullanırken, ZR315VSD-2 ve ZR315VSD-1 modelleri değişken hız kontrol tipini kullanmaktadır.

Genel olarak Tablo 2.1, tesisin hava besleme ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan kompresörlerin çeşitliliğini ve bunların farklı çalışma basınçlarına, farklı kompresör tasarımlarına ve farklı kontrol türlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu çeşitlilik, tesisin farklı çalışma şartlarına yönelik gereksinimlerine daha iyi hizmet etmeye yardımcı olmaktadır.

Tablo 1.2 Tesis İçinde Kullanılan Kompresörlerin Teknik Data Analizleri – 2

Model / Seri Numarası	Nominal (Real-Saha) Gücü (kW)	Kompresör (kapasite) Debisi Free air delivery	Nominal (kapasite) kompresör basıncı (bar)	Kompresör çıkışındaki ayar noktası (işletme – real çalışma) basıncı
ZR5-1	400 kW	55,00 m ³ /dk	9,0 bar	8,0 bar
ZR5-2	400 kW	55,00 m ³ /dk	8,0 bar	8,1 bar
ZR5-3	400 kW	55,00 m ³ /dk	7,0 bar	6,8 bar
ZR315VSD-2	303 kW	50,20 m ³ /dk	7,0 bar	6,6 bar
ZR315VSD-1	255 kW	46,50 m ³ /dk	7,0 bar	6,5 bar
ZH+400-8	400 kW	76,32 m ³ /dk	8,0 bar	8,0 bar
TA 3000	522 kW	100,00 m ³ /dk	7,0 bar	6,8 bar
TA 3000	522 kW	100,00 m ³ /dk	7,0 bar	6,8 bar
TA 3000	522 kW	100,00 m ³ /dk	7,0 bar	6,8 bar

Tablo 2.2, tesis içinde kullanılan kompresörlerin daha ayrıntılı teknik özelliklerini sunmaktadır. Bu özellikler nominal (gerçek-saha) güç, kompresör (kapasite) debisi, nominal (kapasite) kompresör basıncı ve kompresör çıkışındaki ayar noktası (işletme – real çalışma) basıncını içermektedir.

"Nominal (Real-Saha) Gücü (kW)": Bu, her kompresörün nominal enerji tüketimini temsil etmektedir. Kompresörün enerji tüketimini ifade eden bir ölçüttür ve genellikle kilowatt (kW) cinsinden belirtilmektedir. Tablo 2.3., ZR5-1, ZR5-2, ZR5-3 ve ZH+400-8 modellerinin nominal güçleri 400 kW, ZR315VSD-2 modelinin nominal gücü 303 kW, ZR315VSD-1 modelinin nominal gücü 255 kW ve TA 3000 modellerinin nominal gücü 522 kW olarak belirtilmiştir.

Tablo 2.2, çeşitli kompresör modellerinin teknik özelliklerini ve işletme parametrelerini sunarak, her birinin belirli bir işlem veya uygulama için uygunluğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler, özellikle enerji verimliliği ve işletme maliyetleri gibi faktörlerin değerlendirilmesinde önemli bulunmaktadır.

2.3. Çalışmada Kullanılan Metodik Yöntem

Pnömatik akış hareketinin olduğu, kompresör dairesinden çıkış ile ana gereksinim duyulan noktaya kadar yaşanan mevcut kayıpların araştırılması ve ölçülmesi sonrasında bu ölçüm değerlerinin alt sigma ileri problem çözme teknikleri kullanılarak, minitab matematik modelleme metodu ile analizler değerlendirilmiş ve yorumlamalar bu modelleme sonuçları göz önüne alınarak yapılmıştır.

Pnömatik sistemlerdeki uygulamalar ve çalışmalarda öne çıkan beş temel başlık üzerinde durulmuştur. Bunlar;

- Basınç azaltma, kompresör dairesinden ilk çıkış basıncının ihtiyaca yönelik optimize edilmesi en kritik enerji tasarruflarında biridir. Aksi aksi halde gereksiz fazla basıncın hatta yollanması ek bir enerji maliyeti ve kaybı oluşturur.
- Basınçların regülatörler ile kontrol edilmesi ve ölçüm değerlerinin kayıt altına alınıp takip edilmesi.
- Hava kaçaklarının kontrolleri ve buradaki vanalar bağlantı elemanları, fitting malzemelerin hangi noktalarda nasıl kullanıldığının analizlerinin yapılması. Olası gereksiz bağlantı elemanı kullanılmasının tespiti.
- Kolektörler üzerinde kullanılan vanaların optimizasyonu
- Otomatik kapanma sistemlerinin değerlendirilmesi (enerji tüketiminin önlenmesi için kritik bir sistem)

Farklı üretim birimlerinde (montaj, boyahane gibi) hava akış (debi) ve basınç ölçümleri yapılmıştır. Hava kaçaklarının giderilmesi ve uygunsuzlukların tespiti için yapılan ölçümlerden nasıl bir çıktı elde edebiliriz kısmını değerlendirmek için optimum basınç ve debi korelasyonu ile enerji verimliliğinin artırılması yolları ve metotları araştırılmıştır. Buradaki temel yaklaşım akademik taraftan gelen metotların kullanılmasıyla birlikte sanayide sıklıkla kullanılan, ileri problem çözme tekniği olarak tanımlanan altı sigma problem çözme teknikleri ile minitab kullanılarak matematik modellemenin yapılmasıdır.

2.4. Enerji Tüketimleri ve Kayıp Hesaplamalarında Kullanılan Bağıntılar

Spesifik Güç Tüketimi; Verilen 1 birim havayı dağıtmak için kompresör tarafından harcanan güç olarak tanımlanır. Birimi kW(lt/sn) ya da kW(m³/dk)

$$SET = \frac{L}{Q} \quad (2.1)$$

Burada; L = Kompresör tarafından çekilen güç [kW]

Q = Kompresör tarafından sağlanan debi [lt/s – m³/dk]

Kompresörlerde kullanılan elektrik motorlarının güç tüketim değerleri güç analizörleri kullanılarak değerlendirilir. Debimetre ile akış ortamındaki hava debisi ölçülmektedir. Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu yetkili birimlerce yapılmış olmalıdır. Kurlum aşamasında aynı basınç ve debi değerinde daha spesifik güç tüketimine sahip, kompresörün seçilmesi enerji tüketim değerini ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde düşürecektir.

Yıllık Basınçlı Hava Maliyeti Hesaplaması;

$$M = \frac{a \times k}{b} \quad (2.2)$$

Bağıntısı ile hesaplanır. Burada;

M: Yıllık Basınçlı Hava Maliyeti (Euro)

a: Yıllık Tüketim (kWh)

k: Birim Başlı Maliyet (Euro/Nm³)

b: Ortalama Hava Akışı (Nm³/dk)

Basınç Kaybı Hesaplamaları

$$\text{Basınç Kaybı (bar)} = \frac{K \times L \times Q^2}{R \times d^{5,3}} \quad (2.3)$$

$$K = 800$$

$$L = \text{Eşdeğer boru uzunluğu (m)}$$

$$Q = \text{Serbest hava hacmi (dm}^3/\text{s)}$$

$$R = \text{Boru öncesindeki sıkıştırma oranı}$$

$$D = \text{Boru iç çapı (mm)}$$

Basınç kayıpları etkileyen önemli hususlardan birisi de havanın kuruluşunu sağlamak amacıyla sistemlerden ve çalışma şartlarından kaynaklanan sıvı ve yağ partiküllerinin sistemden uzaklaştırılmasıdır. Bu amaçla;

- Basınçlı havanın içindeki su ve yağ zerreciklerinin dağıtım hatlarından kolayca drene edilebilmesi için borulara akış yönünde %1 eğim verilmeli ve her 30 metrede bir drenaj noktası konmalıdır.
- Sabit boru şebekelerinde kompresörden çıkan basınçlı havanın hattın sonuna kadar toplam basınç düşümü 0.3 bar' dan fazla olmamalıdır.
- Uzun hava hatlarında hıza göre yapılan çap tayininde oluşacak basınç kaybı istenilen değerden daha büyük olabilir. Bu nedenle basınç kaybının kontrol edilmesinde fayda vardır. Hat sonunda istenen ideal basınç düşümü maksimum 300 mbar düzeyinde olmalıdır.

Hava Kaçakları Hesaplaması

Basınçlı hava sistemindeki kaçaklar çoğunlukla emniyet valfleri, boru ve hortum bağlantı yerleri, kesici valfler, yol verme kaplinleri ve pnömatik aletlerde meydana gelir. Pek çok durumda kaçaklar yetersiz bakımdan kaynaklanmaktadır.

Hava kaçaklarını incelediğimizde kaçağın olduğu delik çapı büyüdükçe kaçak miktarının (lt/sn) ve sıkıştırmak için gerekli gücün arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 2.3' da 4 farklı kaçak miktarı için ilgili değerleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Delik Çapı Hava Kaçak Miktarı ve Gerekli Güç Korelasyonu

Delik Çapı	Hava Kaçağı (6 bar basınçta)	Sıkıştırma için gerekli güç
mm	(lt/sn)	kW
1	1	0,3
3	10	3,1
5	27	8,3
10	105	33

- Hava kaçaklarının tespit etmek için; hava ile çalışan bütün ekipmanlar kapatılır, sistem çalışmaya hazır durumda bekletilir ve kompresör çalıştırılır.
- Kompresörün yüksüz hale geçtiği an kaydedilir. Kaçaklar sebebiyle sistem basıncı düşecektir. Kompresörün tekrar çalışmaya başladığı an kaydedilir ve aradaki zaman farkından süre tespit edilir.

Aşağıdaki verilen formül ile kaçak miktarı bulunabilir

$$L = \frac{Q \times T}{(T+t)} \quad (2.4)$$

T = Yükte çalışma süresi (sn)

t = Yükte çalışma süresi (sn)

Q = Kompresör kapasitesi (lt/sn)

L = Toplam kaçak miktarı (lt/sn)

Pnömatik sistemlerde birim basınç artışı için tüketilen enerji miktarı dikkate alınarak, değerlendirmeler yapılmaktadır.

Ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının yapılmış olması, ölçüm aralığı ve ölçüm hassasiyeti de dikkate alınması gereken hususlardır.

3.OTOMOTİV SANAYİ PNÖMATİK SİSTEMLERDE VERİMLİLİK

Otomotiv sanayinde pnömatik sistemlerde verimlilik çalışmaları bu başlık altında incelenmiştir. Pnömatik sistemlerinde enerji verimliliği değerlendirmesi yapılan tesiste yer alan kompresörler, basınç hatları ve kullanım noktası değerleri verimlilik değerlendirmelerinde esas alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan tanımlara değinildikten sonra diğer kısımlara geçilmesi uygun görülmüştür. Bu tanımlar;

Kompresör (kapasite) Debisi: Her bir kompresörün hava debisi kapasitesini gösteren değerdir. Birimi (m^3/dk) cinsinden verilmektedir. Bir kompresörün dakikada ne kadar hava sağlayabildiğini göstermektedir.

Nominal (kapasite) kompresör basıncı (bar): Her bir kompresörün nominal basınç kapasitesini ifade eder. Bu değerin, kompresörün işletme basınç değerini aşmaması gerekir.

Kompresör çıkışındaki ayar noktası (işletme – real çalışma) basıncı: Her bir kompresörün gerçek çalışma şartlarında ürettiği basınç seviyesini ifade eder. Bu değer genellikle nominal basınç kapasitesinden daha düşük tutulur. Kompresörlerin sürekli ve verimli çalışmasını sağlamak için gereklilik olarak değerlendirilir.

Tablo 3.1 Tesiste yer alan kompresörlerin çıkış değerleri

Model / Seri Numarası	Efektif Güç değeri (kW)	Çalışma basıncında Kompresör Debisi
ZR5-1	463 kW	53,47 Nm ³ /dk
ZR5-2	463 kW	53,13 Nm ³ /dk
ZR5-3	463 kW	53,22 Nm ³ /dk
ZR315VSD-2	351 kW	49,46 Nm ³ /dk
ZR315VSD-1	295 kW	46,04 Nm ³ /dk
ZH+400-8	463 kW	74,76 Nm ³ /dk
TA 3000	604 kW	96,75 Nm ³ /dk
TA 3000	604 kW	96,75 Nm ³ /dk
TA 3000	604 kW	96,75 Nm ³ /dk

Tablo 3.1, farklı modeller ve seri numaralarına sahip kompresörlerin çıkış değerlerini sunmaktadır. Her model için iki ana özellik verilmiştir: Efektif Güç (kW) ve Çalışma Basıncında Kompresör Debisi.

Efektif Güç (kW): Kompresörün etkin enerji tüketim değeridir. Birim olarak kilowatt (kW) cinsi kullanılmaktadır. Bir kompresörün verimliliği genellikle bu güç değerine göre değerlendirilmektedir. Tablo 4'te verilen değerlere göre TA 3000 modeli en yüksek debi değerinde 604 kW, ZR315VSD-1 modeli ise en düşük debide 295 kW enerji tükettiği görülmektedir.

3.1. Tesisin Hava Kullanım Oranı

İlgili alanda kullanılan havanın genel yüzde dağılımı ve tesis çalışma gün ve saat kısıtlımları Tablo 3.2’de verilmiştir. Ek olarak sıcaklık ve nem ölçüm değerleri öngörü olarak verilmiştir.

Tablo 3.2. Tesis Genel Bilgiler

Basınçlı hava %’si olarak kullanım	
Pnömatik Aletler	30%
Pnömatik Makinalar	70%
Bakım periyotlarının yapılma sıklığı	Yılda 1 kez – planlı bakım kapsamında
Tesis çalışma Saatleri	Pazartesi – Cuma → 21 h Haftalık → 105 h Yıllık → 5250 h
Çalışma Koşulları	
Sıcaklık (°C)	4 mevsim için ortalama 23 (°C)
Nem (%)	4 mevsim için ortalama %50
Enerji Maliyeti	0,08 €/kWh

Basınçlı hava yüzde kullanım: Tesiste kullanılan basınçlı havanın %30'unun Pnömatik aletler için ve %70'inin ise Pnömatik makineler için kullanıldığını ifade etmektedir.

Bakım periyotlarının yapılma sıklığı: Tesisin düzgün çalışması ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için bakımın planlı yılda bir kez olması değerlendirilmiştir.

Tesis çalışma Saatleri: Tesisin hafta içi her gün 21 saat, haftada toplam 105 saat, yılda ise 5250 saat çalıştığı belirtilmiştir. Tesisin genel enerji tüketimi ve bakım ihtiyaçlarının belirlenmesinde söz konusu bilgiler kullanılmaktadır.

Çalışma Koşulları: Yıl boyunca ortalama 23°C sıcaklık ve %50 nem oranında çalışıldığı değerlendirilmiştir. Bu değerler, çeşitli ekipmanların performansının ve bakım ihtiyaçlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Enerji Maliyeti: Tesisin enerji maliyeti kWh başına 0,08 Euro olarak belirtilmiştir. Bu, enerji maliyetlerinin yönetimi ve tesisin genel işletme maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

3.2 Hava Debisi, Kaçak Seviyesi ve Basınçlı Hava Maliyetleri

Tablo 3.3, her kompresörün farklı zamanlarda ne kadar aktif olduğunu ve belirli bir zaman diliminde ne kadar hava akışı sağladığını göstermektedir. Bu bilgi, tesisin genel hava tüketimini ve enerji maliyetlerini yönetmek ve ayrıca tesisin operasyonel gerekliliklerini karşılamak için hangi kompresörlerin en uygun olduğunu belirlemek açısından önemli bulunmaktadır.

"İş Yüğü" her bir kompresörün belirli bir gün veya zaman dilimindeki hava debisinin kapasitesini belirtmektedir. Yüzdelik değerler ise, her bir kompresörün toplam kapasitesine göre iş yükünün yüzdesini göstermektedir. Örneğin Pazartesi-Cuma arasında ZR5-2 kompresörünün iş yükü %50 ile 26,56 Nm³/dk olduğu görülmektedir. Benzer şekilde diğer kompresörlerin, çalışma şartlarına bağlı olarak belirlenen iş yükleri ve debi değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Çalışmanın yapıldığı zamanda iş yerinin basınçlı hava ihtiyacı göz önüne alınarak ZR5-1, ZR315VSD-1 ve TA 3000 modelinin iki tanesi çalıştırılmadığından söz konusu kompresörlere değer girişleri yapılmamıştır. Yine iş yerinin çalışma şartlarına bağlı olarak Cumartesi ve Pazar günleri, tüm kompresörlerin iş yükünün 0,00 Nm³/dk olduğu ve çalıştırılmadıkları görülmektedir.

Tablo 3.3 Hava Akışı

Model / Seri Numarası	İş Yüğü Pazartesi-Cuma	İş Yüğü Cumartesi-Pazar
ZR5-1	0,00 Nm ³ /dk	0,00 Nm ³ /dk
ZR5-2	26,56 Nm ³ /dk → %50	0,00 Nm ³ /dk
ZR5-3	15,97 Nm ³ /dk → %30	0,00 Nm ³ /dk
ZR315VSD-2	14,84 Nm ³ /dk → %30	0,00 Nm ³ /dk
ZR315VSD-1	0,00 Nm ³ /dk	0,00 Nm ³ /dk
ZH+400-8	59,01 Nm ³ /dk → %80	0,00 Nm ³ /dk
TA 3000	77,40 Nm ³ /dk → %80	0,00 Nm ³ /dk
TA 3000	0,00 Nm ³ /dk	0,00 Nm ³ /dk
TA 3000	0,00 Nm ³ /dk	0,00 Nm ³ /dk

Statik Enerji Tüketimi, Kompresörün basınçlı hava üretimi yapmadığı durumlarda enerji tüketimini olmasını karakterize eder. Kompresörlerde soğutma ve yağlama amacıyla kullanılan sistemlerin, basınçlı hava üretilmemesi halinde de çalışma zorunluluğu olması halinde söz konusudur.

Tablo 3.4. İş Yüğü Dağılımı

Çalışma Basıncı	İş Yüğü Pazartesi-Cuma	İş Yüğü Cumartesi- Pazar	Statik Tüketim	Ort.Hava Akışı
8 Bar				
Hava Akışı	85,6 Nm ³ /dk	0 Nm ³ /dk	24,0 Nm ³ /dk	62,5 Nm ³ /dk
Rezerve	94,8 Nm ³ /dk	180,4 Nm ³ /dk		
İş Yüğü	47%	0		35%
6 Bar				
Hava Akışı	108,2 Nm ³ /dk	0 Nm ³ /dk	30,3 Nm ³ /dk	79,0 Nm ³ /dk
Rezerve	330,8 Nm ³ /dk	439,0 Nm ³ /dk		
İş Yüğü	25%	0		18%
TOTAL				
Hava Akışı	193,8 Nm³/dk	0 Nm³/dk	54,3 Nm³/dk	141,5 Nm³/dk
Rezerve	425,5 Nm ³ /dk	619,3 Nm ³ /dk		
İş Yüğü	31%			23%

Tablo 3.4’da kompresörlerin iş yükleri ve hava akışları, çalışma basınçlarına (8 Bar ve 6 Bar) göre verilmiştir.

Hava Akışı: Bu, belirli bir basınç altında belirli bir zaman aralığında kompresörlerin sağladığı hava akışının toplamını ifade etmektedir. Örneğin, 8 Bar basınç altında Pazartesi-Cuma arası hava akışı 85,6 Nm³/dk iken, 6 bar altında 108,2 Nm³/dk'dır. Cumartesi- Pazar günleri, her iki basınç altında da hava akışı 0 Nm³/dk’dır.

Rezerve: Belirli bir basınç altında kullanılabilir maksimum hava akış miktarını temsil etmektedir. 8 bar altında, Pazartesi-Cuma rezervi 94,8 Nm³/dk, Cumartesi-Pazar rezervi ise 180,4 Nm³/dk. 6 bar altında, bu değerler sırasıyla 330,8 Nm³/dk ve 439,0 Nm³/dk'dır.

"İş Yüğü": Bu, belirli bir basınç altında kompresörlerin toplam hava akış kapasitesine kıyasla mevcut hava akış miktarının yüzdesini ifade eder. 8 bar altında Pazartesi-Cuma iş yüğü %47 iken, 6 bar altında bu oran %25'tir. Cumartesi-Pazar günleri iş yüğü her iki basınç altında da %0'dır.

"Statik Tüketim": Bu, kompresörlerin enerji tüketimini belirtirken, makine işlem görmese bile tüketilen minimum enerjiyi ifade etmektedir. 8 bar altında statik tüketim 24,0 Nm³/dk, 6 bar altında ise 30,3 Nm³/dk'dır.

"Ort.Hava Akışı": Bu, belirli bir basınç altında ve belirli bir zaman aralığında kompresörlerin sağladığı hava akışının ortalama miktarını ifade etmektedir. 8 Bar altında ortalama hava akışı 62,5 Nm³/dk, 6 Bar altında ise 79,0 Nm³/dk'dır.

Tablo 3.4, kompresörlerin farklı basınçlarda ve farklı günlerde ne kadar verimli çalıştığını göstermektedir. Bu bilgi, tesisin genel hava tüketimini ve enerji maliyetlerini yönetmek ve ayrıca tesisin operasyonel gerekliliklerini karşılamak için hangi kompresörlerin ve hangi basınç seviyelerinin en uygun olduğunu belirlemek açısından önemli olduğunu göstermektedir

Tablo 3.5. Kaçak Seviyesi

	Ortalama Hava Akışı	Statik Tüketim	Tespit Edilebilir Kaçak
Kaçak Seviyesi	141,5 Nm ³ /dk → %100	53,7 Nm ³ /dk → %38	26,9 Nm ³ /dk → %19

Tablo 3.5, tesisin hava kaçak seviyesini detaylandırmaktadır.

"Ortalama Hava Akışı": Bu, kompresörlerin sağladığı hava akışının ortalama miktarını ifade etmekte ve burada 141,5 Nm³/dk'dır. Bu değer, tesisin toplam hava akışının %100'ünü temsil etmektedir.

"Statik Tüketim": Kompresörlerin enerji tüketimini belirtirken, makine işlem görmese bile tüketilen minimum enerjiyi ifade etmektedir. Statik tüketim 54,3 Nm³/dk'dır ve bu, ortalama hava akışının %38'ini oluşturmaktadır.

"Tespit Edilebilir Kaçak": Bu, tesis içinde tespit edilebilen hava kaçak miktarını temsil etmekte ve 27,1 Nm³/dk'dır. Bu miktar, ortalama hava akışının yaklaşık %19'una karşılık gelmektedir.

Tablo 3.5, tesis içindeki kaçak seviyesini ve bu kaçağın toplam hava akışına ve statik tüketim üzerindeki etkisini göstermektedir. Hava kaçaklarının düşük tutulması, enerji maliyetlerini düşürmeye ve tesisin genel verimliliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Bu sebeple, tesislerde düzenli olarak hava kaçaklarını tespit etmek ve düzeltmek için bakım ve denetimler yapılmaktadır. %19'luk bir kaçak seviyesi, tesisin hava sisteminde iyileştirmeler yapılması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 3.6. Basınçlı Hava Maliyetleri

	Enerji (genel hava tüketimi)	Basınçlı Hava Tüketimi
Birim Başına Maliyet	0,008 €/Nm ³	0,010 €/Nm³
Yıllık Tüketim	9,785,510 kWh	71,293,708 Nm ³
Yıllık Basınçlı Hava Maliyeti	553,24 €	712,937 €

Tablo 3.6, tesisin basınçlı hava maliyetlerini incelemektedir. Enerji (genel hava tüketimi) ve Basınçlı Hava Tüketimi olarak iki ana kategori üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Enerji (genel hava tüketimi) için birim başına maliyet 0,008 €/Nm³ olarak belirlenmiştir. Yıllık tüketim 9,785,510 kWh'dir. Bu verilere dayanarak, yıllık basınçlı hava maliyeti 560,92 € olarak hesaplanmıştır [Başlık 2,4 Enerji Tüketimleri ve Kayıp Hesaplamalarında Kullanılan Bağıntılar kısmında (2) numaralı bağıntı kullanılmıştır]

Basınçlı Hava Tüketimi için birim başına maliyet 0,010 €/Nm³ olarak belirlenmiştir. Yıllık tüketim 71,293,708 Nm³'tür. Bu verilere göre, yıllık basınçlı hava maliyeti 747,89 € olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.6, basınçlı hava sisteminin maliyetlerini detaylı bir şekilde göstermekte olup, genel enerji maliyetleri ile basınçlı hava tüketiminin maliyetlerini karşılaştırarak, hangi alanda daha fazla maliyet olduğunu ve nerede tasarruf sağlanabileceğini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu tür analizler, bir tesisin enerji verimliliğini artırma ve operasyon maliyetlerini azaltma stratejilerini belirlemesine yardımcı olmaktadır.

Ek olarak, metodik ve deneysel hesaplamaların tamamında, Merkez Bankası 2023 yılı kur ortalama değeri olarak 1 Euro = 26,025 TL şeklinde alınmıştır. Hesaplamalar bu kur oranı üzerinden yapılmıştır. Bazı hesaplamalar için kabuller yapılmış olup şirket içi gizlilik kararı nedeniyle hesaplama detayları paylaşılmamıştır.

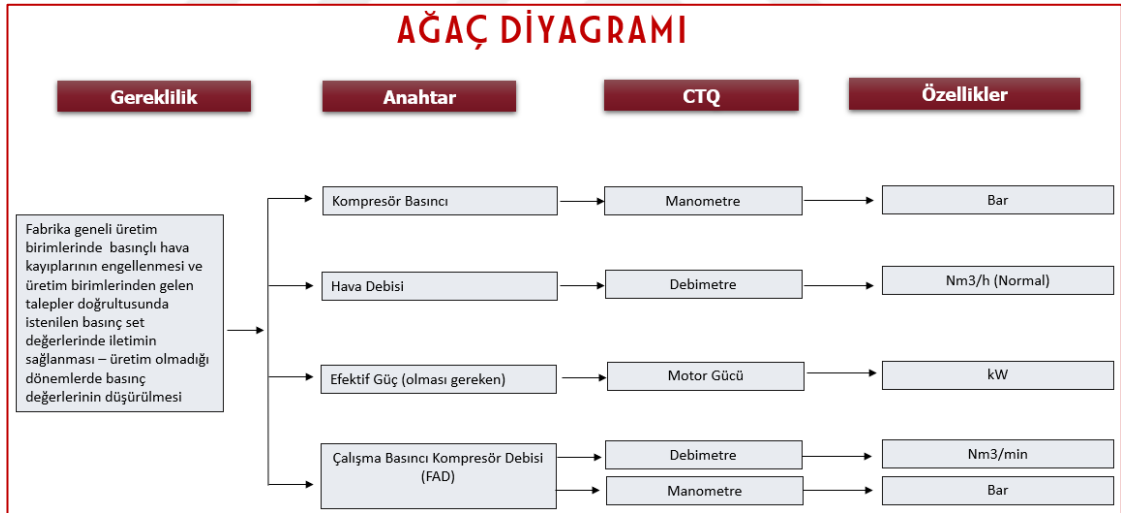


4.DENEYSEL ÇALIŞMA

Problem tanımı olarak baktığımızda, farklı üretim alanlarında farklı basınç ve hava akış debisi gerekliliği nedeniyle öncelikle sistemde bulunan kaçakların ve uygunsuzlukların tespiti planlanmıştır. Sonrasında kaçakların iyileştirilerek sistemde kullanılan basınç debi korelasyonu ile enerji verimliliğinin optimum seviyelere getirilmesi hedeflenmiştir.

Materyal ve metot kısmında bahsedildiği gibi deneysel çalışma Marmara Bölgesi sınırlarında bulunan otomotiv sanayinde öncü ana sanayi kuruluşunda gerçekleştirilmiş ve tesiste yapılan ölçümlerinden elde edilen veri değerleri üzerinden hesaplanmıştır.

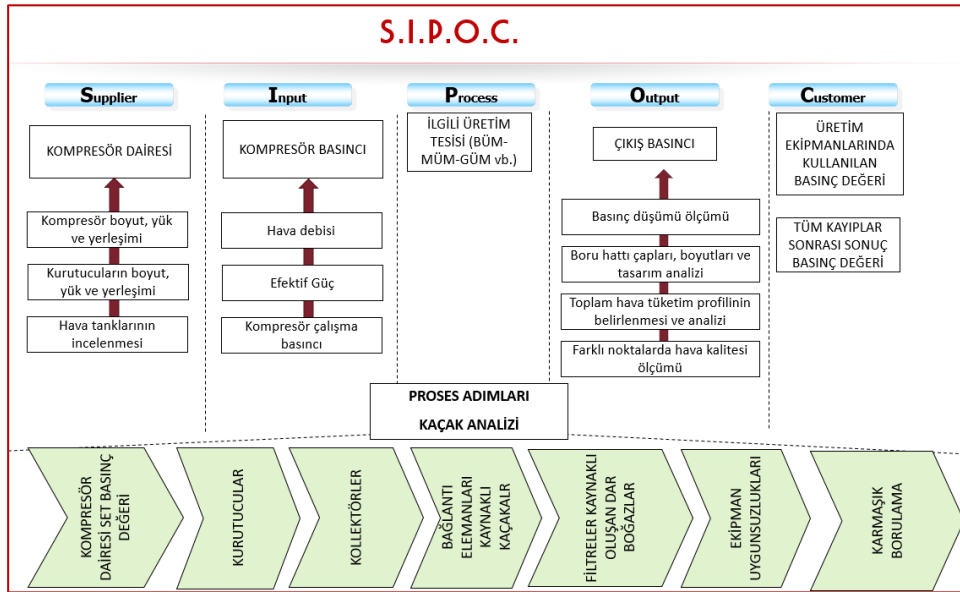
Deneysel çalışmaya başlamadan önce ilk olarak gereklilikler, anahtar ölçüm noktaları, kritik kalite değerleri (CTQ) ve kritik kalite değerlerinin birimleri ağaç diyagramı ile ele alınarak şematize edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Pnömatik Sistemlerde Sebep Sonuç İlişkisi (Ağaç Diyagramı)

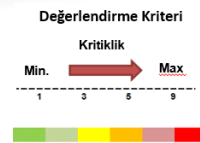
Ağaç diyagramı, gereklilikler ve deneysel çalışmada kullanılacak parametrelerin tanımlandığı ve grupların oluşturulduğu tablodur.

Çalışma kapsamında öncelikle proses adımları girdiler ve çıktılar SIPOC analizi ile tanımlanmıştır. SIPOC (Supplier – Input – Process- Output – Customer) analizi Şekil 10’da verilmiştir. SIPOC analizinin çıktıları göz önüne alınarak sebep sonuç matrisi kurulmuş ve çalışılması gereken parametreler önceliklendirme matrisi ile belirlenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Basıncılı Hava üretim-tüketim hattı S.I.P.O.C. Analizi

SEBEP-SONUÇ MATRİSİ					
No	Süreç Adımı	Girdiler	Müşteri İçin Önem Derecesi		TOPLAM
			10	8	
			Ölçümlerde Kullanılma Durumu	Ondülasyon Boyutu	
1	Üretim Tesisi Kullanım Debisi	Hava Debisi	10	9	90
2	Kompresör Dairesi Kurutucu Çıkış	Kompresör dairesi set basınç değeri	10	8	80
3	Kompresör Dairesi Kompresör Çıkış	Efektif Güç (olması gereken)	8	8	64
4	Kompresör Dairesi Kolektör Çıkış	Çalışma Basıncı Kompresör Debisi (FAD)	8	8	64
5	Kompresör Dairesi Kurutucu Çıkış	Kompresör Kapasitesi (debi)	5	4	60
6	Üretim Tesisi Kullanım Debisi	Nominal Kompresör Basıncı (bar)	5	3	15



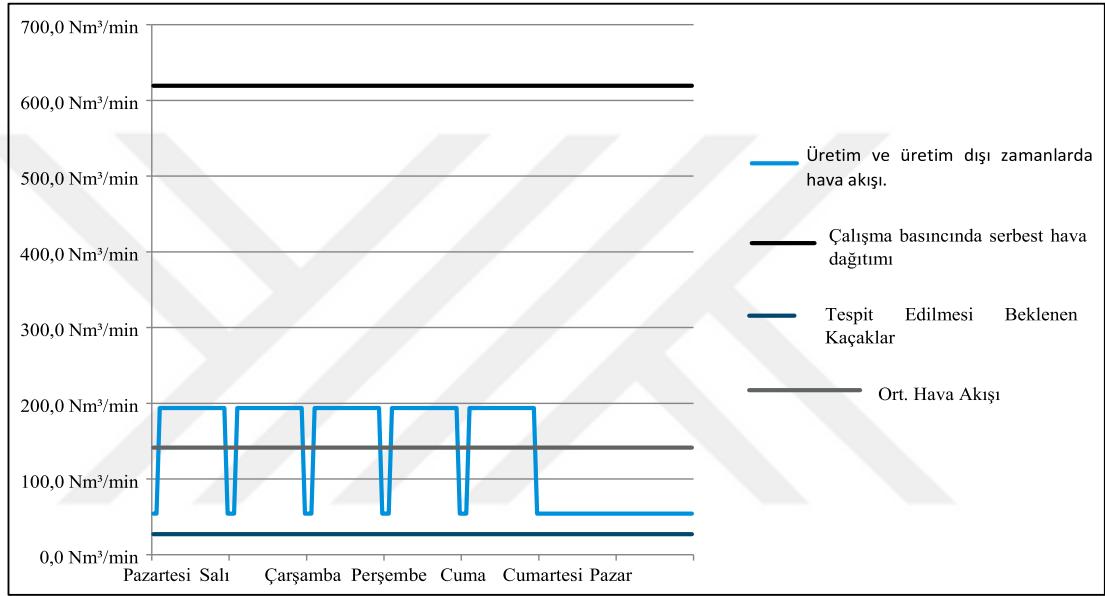
Şekil 4.3. Sebep Sonuç Önceliklendirme Matrisi

Proses akışı ve sebep sonuç matrisi kullanılarak veri toplama ve verileri analiz çalışmasına geçilmiştir (Şekil 4.3).

4.1 Basınç Değerlerinin Ölçümleri ve Analizi

Tesiste iki farklı üretim alanında (boyahane ve montaj) basınç değerleri ölçümü yapılmış ve kayıplar hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda kayıpların görüldüğü noktalarda iyileştirme faaliyetleri organize edilerek ve enerji kayıpları çalışma kapsamında minimize edilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı Üretim Alanlarında Debi Değerleri



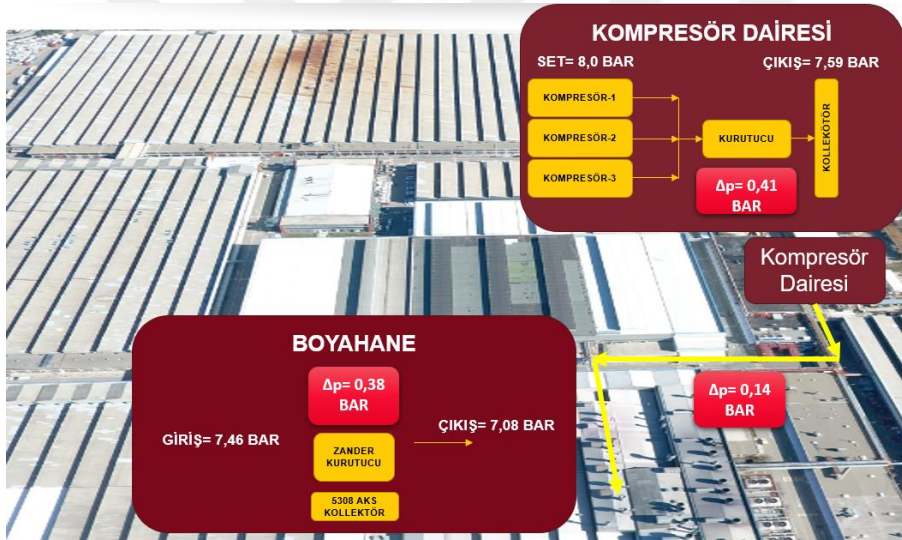
Kompresör dairesinden çıkan ve üretim hatlarına gelene kadar basınç kayıpları farklı bölgelerde ölçümler yapılarak hesaplanmıştır. Debi değerleri 40 Nm³/dk ve 195 Nm³/dk aralığında değişmektedir (Tablo 4.1).

4.2 Boyahane Üretim Tesisi Basınç Ölçüm Değerleri ve Analizi

Kompresör dairesi çıkışındaki ayar (set) basınç değeri 8,0 bar'dır. Kurutucu ve filtrelerden geçtikten sonra basınç değeri 7,59 bar'a düşer (kayıp 0,41 bar.). Boyahane üretim tesisi girişinde tekrar ölçüm yapılır ve basınç değeri 7,46 bar ölçülür (kayıp 0,14 bar). Boyahane içindeki kurutucu ve filtrelerden geçtikten sonra üretim için kullanılacak basınç değeri tekrar ölçülmüş ve 7,08 bar okunmuştur (kayıp 0,38 bar).

Kompresör dairesinde 8,0 bar set basıncı ile çıkış yapan hava üretim hattında 7,08 bar olarak kullanılmaktadır. Söz konusu hatta toplam kayıp 0,92 bar olarak belirlenmiştir.

Kompresör dairesi ile boyahane üretim hattı arasında yapılan basınç ölçümleri ve kayıp değerleri Şekil 4.4 da hava akışı yönü doğrultusunda verilmiştir.



Şekil 4.4. Üretim Hattı (boya) Yapılan Basınç Ölçümleri ve Kayıp Değerleri

4.3 Montaj Üretim Tesisi Basınç Ölçüm Değerleri ve Analizi

Kompresör dairesi çıkışındaki ayar (set) basınç değeri 8,0 bar olarak ölçülmüştür. Kurutucu ve filtrelerden geçtikten sonra basınç değerinin 7,59 bar'a düştüğü görülmektedir (kayıp 0,41 bar.). Montaj lastik şişirme tesisi girişinde tekrar ölçüm yapılmış ve basınç değerinin 7,53 bara düştüğü gözlenmiştir (kayıp 0,06 bar). Boyahane içindeki kurutucu ve filtrelerden geçtikten sonra üretim için kullanılacak havanın basınç değeri 7,28 bar okunmuştur (kayıp 0,25 bar).

Sonuç olarak, kompresör dairesinde 8,0 bar (set basıncı) ile çıkış yapan hava, üretim hattında 7,28 bar olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Söz konusu hatta toplam kaybın 0,72 bar olduğu belirlenmiştir.

Kompresör dairesi ile montaj üretim hattı arasında yapılan basınç ölçümleri ve kayıp değerleri Şekil 4.5'da gösterildiği gibi hava akışı yönü doğrultusunda belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Üretim Hattı (montaj) Yapılan Basınç Ölçümleri ve Kayıp Değerleri

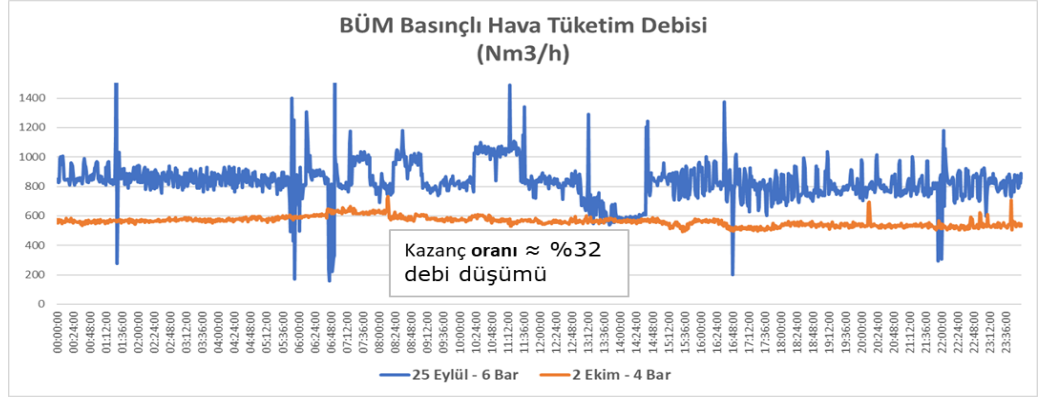
4.4 Analizler Sırasında Tespit Edilen Bulgular

- Yapılan ölçüm ve analizlerde ZR5-1 kompresörün basınçlı hava çıkış devrelerindeki bağlantı elemanları (vana, debimetre vs.) kompresör dairesi ile boyahane arasında basınç düşüşüne neden olmaktadır.
- Kompresör dairesi içindeki kompleks boru bağlantıları basınç kaybının artmasına neden olmaktadır.
- 6 bar hava hattının çiğleşme noktası sıcaklığı +3 dereceye sabitlenmiş olmasına karşın +10 derece olarak tespit edilmiştir. Kompresör dairesinin yeterince soğutulamaması sonucu açığa çıkan yüksek atık ısı sebebiyle verimsizliğe yol açtığı değerlendirilmiştir.
- Tesis geneli 6 bar hava hatlarında su kaçakları tespit edilmiştir.
- 8 bar ve 6 bar hava hatlarının nem sensörlerinden alınan bilgiler manuel işlenmektedir, PLC (Programlanabilir Kontrol Cihazı) yönetimi olmayan sistemlerde verinin doğruluğunda manuel kayıtlardan dolayı farklılıklar olabilir.
- Tasarruflu olmayan vakum jeneratörleri kullanılmaktadır. Sistem verimliliği için uygun tip jeneratör kullanımı önemlidir.

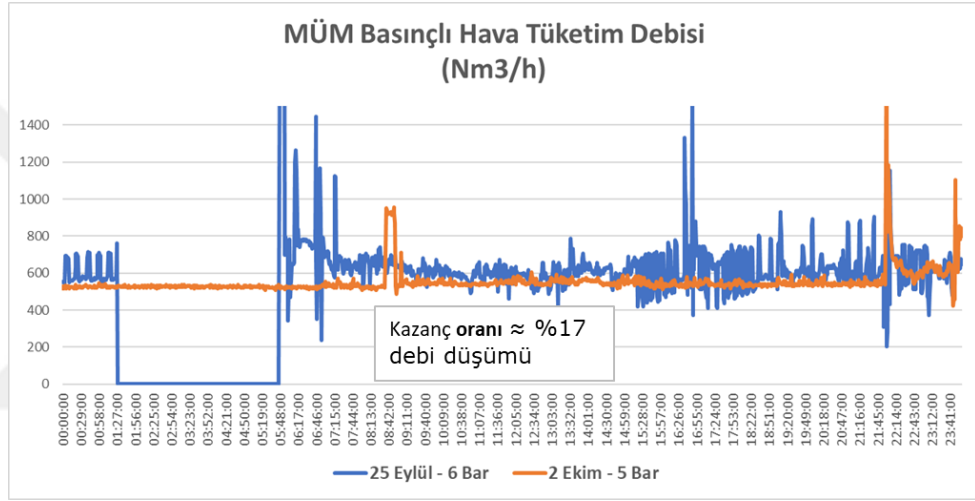
4.5 Üretimin Olmadığı Dönemlerde Zamana Bağlı Basınç Debi İlişkisi

Gövde-süspansiyon-montaj ve boya üretim birimlerinde ihtiyaç dışı basınçlı hava enerjisi kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu birimlerin toplamında yılda 188.474 kWh elektrik tüketimi yapılmaktadır, sayısal değer ölçümleri yapılmış genel tesis bakımlar biriminden alınmıştır. Amaç, üretimin olmadığı dönemlerde otomatik oransal valfler sayesinde üretim birimlerinde hava basıncını düşürerek basınçlı hava tüketim miktarını düşürmek ve kaçakların azaltılmasını sağlamaktır.

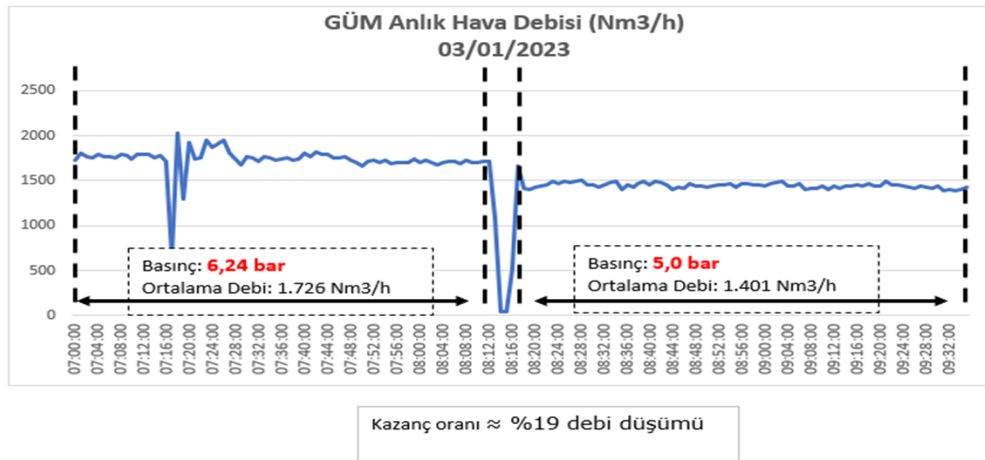
Dört farklı üretim müdürlüğünde kullanılan farklı basınç değerleri için hava tüketim debileri ölçülmüş ve basınç düştüğünde sağlanan debi düşüm kazançları hesaplanmıştır.



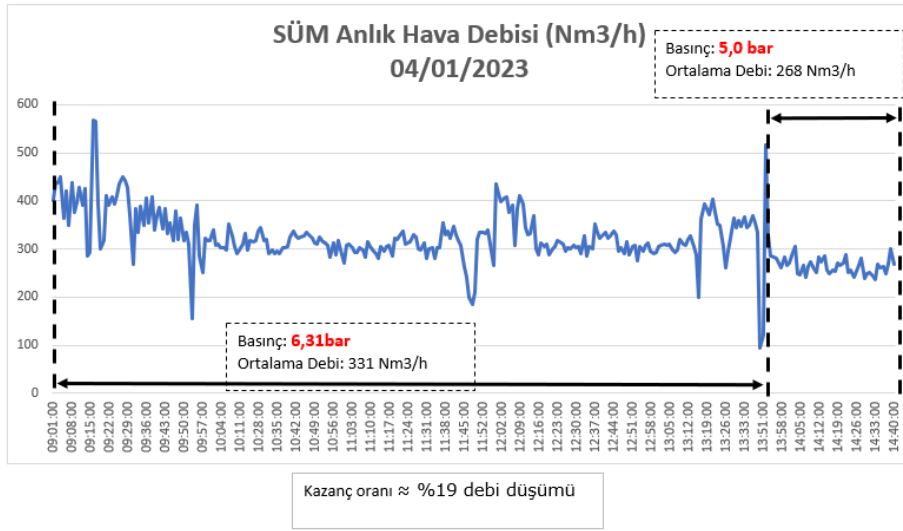
Şekil 4.6. Boya Üretim Müdürlüğü Basıncı Hava Tüketim Debisi



Şekil 4.7. Montaj Üretim Müdürlüğü Basıncı Hava Tüketim Debisi

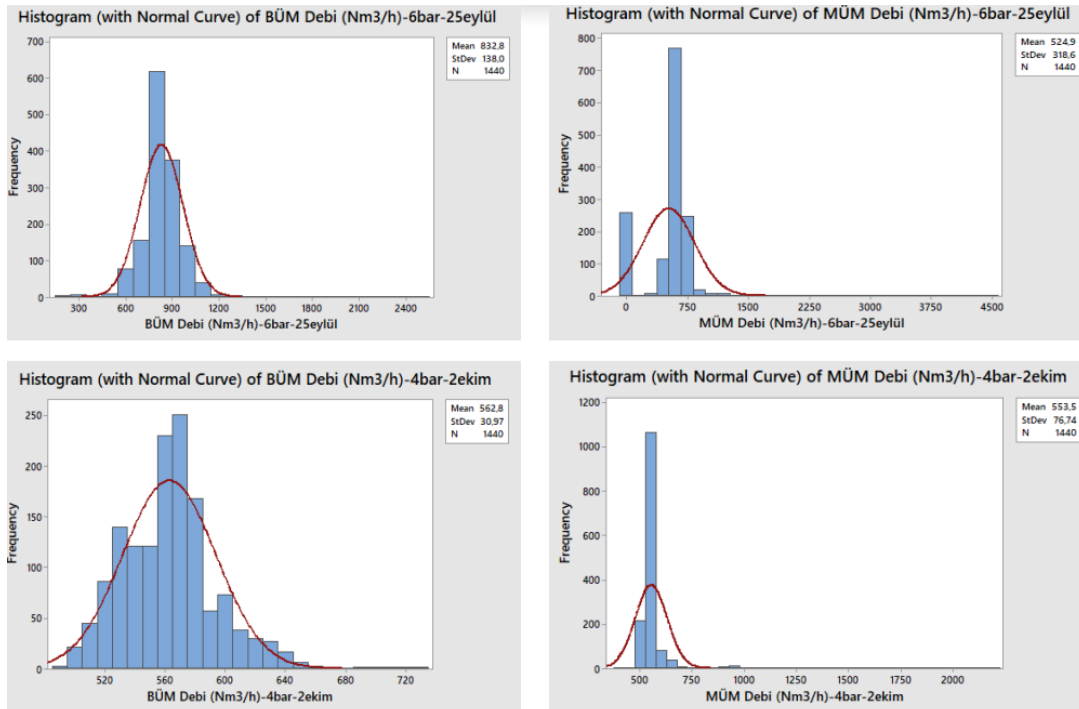


Şekil 4.8. Gövde Üretim Müdürlüğü Basıncı Hava Tüketim Debisi



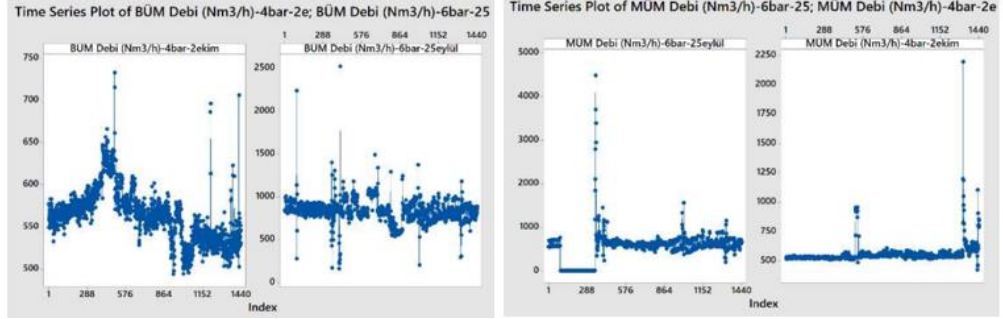
Şekil 4.9. Süspansiyon Üretim Müdürlüğü Basınçlı Hava Tüketim Debisi

Boyahane – montaj – gövde ve süspansiyon üretim müdürlüklerinde yapılan basınç düşümü sonra sağlanan debi düşüm kazançları hesaplanmıştır. Her bir üretim müdürlüğü için minitab programı kullanılarak 1440 veri üzerinden ortalama ve standart sapma değerleri hesaplatılmıştır.



Şekil 4.10. Farklı Basınç Değerlerinde Yapılan Debi Ölçüm Grafikleri

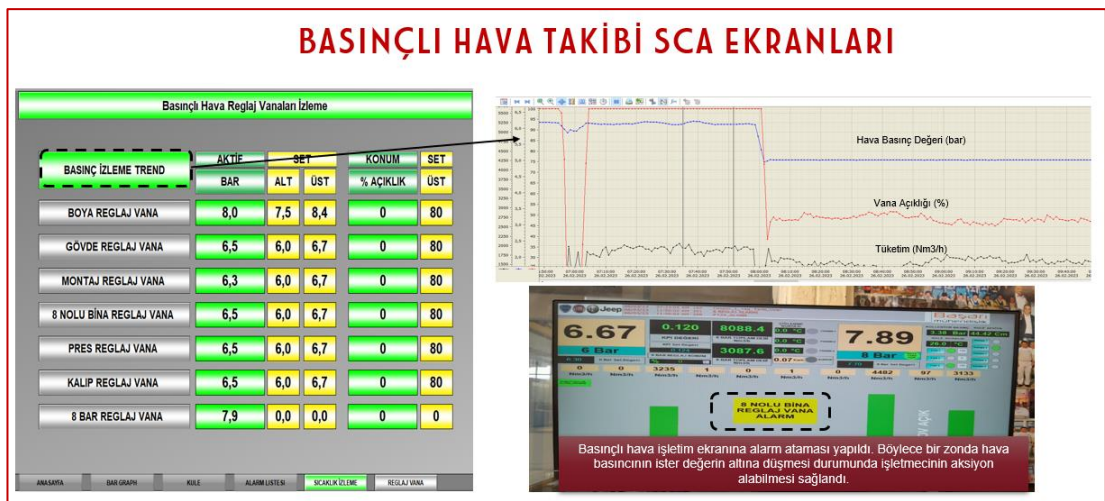
Basınç arttıkça debi ölçümlerindeki standart sapma oranı artmaktadır ve beraberinde ölçüm kararsızlığı meydana gelmektedir (Şekil 4.11). Normalite grafikleri düzensizdir.



Şekil 4.11. Basınç Debi Değişim Grafikleri – Düzensizlik Analizi

Bu analizden anlaşılmaktadır ki; basınç artışı düzensizliklerin artmasına bu durum da paralelinde enerji tüketiminin artışına sebep olmaktadır. Enerji optimizasyonu için uygun basınç parametrelerinde çalışılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Basınç düşümü yapılan birimlerde trend takip ekranı tasarlanmış ve önerilmiştir. Önerilen takip sistemi geçmiş verilerin analiz edilmesini aksayan noktalara müdahale edebilme fırsatını sağlayacaktır. Böylelikle hava basınç değeri, reglaj vana açıklığı ve basınçlı hava tüketim (kullanım) miktarı takip edilebilmektedir. Şekil 4.12 de SCA çalışma ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.12. Basınçlı Hava Takibi SCA Ekran Görünümü

Takip sisteminin kullanılmasıyla, işletmede bulunan her bir birimde basınçların düşürülebileceği zaman oranı ve bu orana bağlı olarak toplam enerji kazanç değerlerinin ne olabileceği hesaplanmış ve Tablo 4.2’de verilmiştir. Tablo 4.2, tesisin farklı üretim birimlerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen kazançları göstermektedir. Her bir üretim birimi için kazanç oranı, Üretimin olmadığı zaman aralığı (NPP) basınçlı hava kullanımı (kWh) SCA çalışma ekranlarından alınmıştır, basınçların düşürülebileceği zaman oranı, toplam kazanç (kWh), 2023 Ocak ayı elektrik birim fiyatı (€) ve toplam kazanç (€) bilgisi sunulmuştur.

Süspansiyon biriminde, kazanç oranı %19 olarak belirlenmiştir. İlgili birim yıllık ortalama 469.269 kWh basınçlı hava enerjisi kullanmaktadır. Basınçların düşürülebileceği zaman oranı %50 olarak belirlenmiştir, bu oran ve kazanç oranı dikkate alındığında toplam kazancın 44.581 kWh olacağı görülür. 2023 yılı Ocak ayında elektrik birim fiyatı baz alınır (0,176 €/kWh) birimden toplam 7.846 € kazanç olabileceği görülür.

Aynı analiz yöntemi diğer birimler için de yapılabilir. Birimler için yapılan değerlendirmelere göre en yüksek kazanç oranı %32 ile Boyahane gerçekleşmektedir. Bu birim için toplam kazancın 16.440 € olabileceği hesaplanmıştır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Yapılan Ölçümler Sonrası, Kazanç Tablosu

No	Birim	Kazanç Oranı	NPP Zaman Basınçlı Hava Kullanımı (kWh)	Basınçların Düşürülebil eceği Zaman Oranı	Toplam Kazanç (kWh)	2023 Ocak Elektrik Birim Fiyat (€)	Toplam Kazanç (€)
1	Süspansiyon	19%	469.269	50%	44.581	0,176	7.846
2	Boyahane	32%	583.796	50%	93.407	0,176	16.440
3	Montaj	17%	475.401	50%	39.221	0,176	6.903
4	Gövde	19%	613.783	50%	58.309	0,176	10.262
5	Pres	18%	234.717	50%	21.320	0,176	3.752
							Euro 45.203

Tablo 4.2’den de görüleceği gibi işletme genelinde, üretim dışı zamanlarda, basınçlı hava sistemlerinin kapalı tutulması ile yılda 45.203 € tasarruf sağlanabilir. Kazanç oranı üretimin olmadığı dönemlerde zamana bağlı basınç debi ilişkisi grafiklerinden alınmıştır. Bu hesaplama ilgili üretim biriminin grafikleri üzerinde verilmiştir

NPP Zaman Basınçlı Hava Kullanım değerleri SCA ekranları üzerinden çalışma saatleri arasında ilgili üretim birimleri için alınmıştır (sistem üzerinde kayıtlı veriler).

Toplam kazanç; basınçlı hava kullanım değerinin kazanç oranı ile çarpımı ve sonrasında %50’sinin alınması ile hesaplanmıştır. Finansal kazanç miktarı ise; toplam kazanç miktarının birim elektrik fiyatıyla çarpılması hesaplanmıştır. Önemli olarak değerlendirilebilecek bu kazanç durumu, oransal vana kullanımına bağlı olarak kazanılabilir. Şekil 4.13’de oransal vana kullanım öncesi ve sonrası kollektör yapısının sistem üzerindeki görünümü verilmiştir. Oransal vananın kullanılmasıyla, ilgili üretim biriminin ihtiyacı kadar basınçlı hava hatlara gönderilmektedir. Böylelikle gereğinden yüksek ve gereksiz basınçlı havanın önlenmesi kadar tasarruf edilmiş olur.



Şekil 4.13. Manual ve Oransal Vana Kullanımının sistem üzerindeki görünümü

- Enerji merkezi (kompresör dairesi) ile boyahane arasında yer alan bağlantı hattı üzerinde gereksiz çap değişimi yapıldığı ve yine gerek olmadığı halde fittings (bağlantı malzemeleri) kullanıldığı görülmüştür. Örnek olarak seçilen çap düşümü ve vana görünümü Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Gereksiz olarak yapılmış ve kullanılmakta olan çap düşürülmesi ve bağlantı elemanlarının (fittings malzemeler) uygun şekilde sistemden kaldırılması ile yılda 4.849 € kazanç sağlanabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.14. Çap Düşümü ve Kelebek Vana Görselleri

- Enerji merkezi (kompresör dairesi) ile montaj lastik şişirme tesisi hava hattı üzerindeki basınç kayıplarının iyileştirilmesi ile de tasarruf sağlanabileceği belirlenmiştir. Schenk tesisi girişindeki basınçlı hava filtresinin (Şekil 4.15) önemli miktarda basınç kaybı oluşturduğu, filtre tasarımının yeniden değerlendirilmesinin uygun olacağı, Filtrelerin kirlilik durumlarının kontrol sürelerinin kısaltılması, temizliklerinin usulüne uygun yapılmasının da verim artışı sağlayacağı belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Filtre Görselleri

- Sistem üzerinde belirlenen noktalardaki basınç kayıplarının giderilmesi ve kompresör dairesi çıkışındaki sabit hava basıncının 8,0 bardan 7,7 bar a düşürülmesi tasarruf sağlanabileceği değerlendirilmiştir. Oransal vanaların eklenmesi sonucunda, üretimin farklı bölümlerine giden hatlara düşük basınçta hava gönderilmesi dolaylı olarak hava tüketim miktarını da düşürecektir (Tablo 4.3).

Tablo 4.3. Basınç Değerlerinde Ortalama Debi Hesabı

Toplam Süre	17 h	17 h
Hava Basınç Değeri	>5,95 bar	<5,95 bar
Hat Basıncı	6,28 bar	5,07 bar
Ortalama Hava Tüketimi (Nm³/h)	1,539	1,237
Hava Debi Değişim Oranı	%20 İyileşme	
Ortalama Elektrik Tüketimi (kW)	246	206
Elektrik Tüketim Değişimi (kWh)	%16 İyileşme	

Tablo 4.3 incelendiğinde hat basıncının 6,28 bar’dan 5,07 bar’a düşürülmesi ile %20 iyileşme sağlanabileceği, bu durumun da tüketilen elektrik enerjisinde %16 gibi bir tasarrufa sebep olacağı görülmektedir.

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üretim tesislerinde pnömatik sistemlerin kullanılması, otomasyona bağlı olarak kayıplarının önlenmesini ve üretim de karlılığı artıracaktır. Ancak sistemlerin efektiflik ve enerji verimliliği bağlamında değerlendirilmesi de gerekmektedir. Daha uygun sistemin seçilmesi ve uygun şartlarda çalıştırılması da önemlidir. Bu çalışma kapsamında kurulu bir sistem üzerinde verimliliği ve tasarrufu artırmak amacıyla bir takım iyileştirme faaliyetleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar çerçevesinde;

Öncelikle ölçüm ve takip sistematığının PLC programından çıkartılıp otomasyon ve dijitalizasyon programı olan SCA üzerinden ölçülmesi uygun görülmüş ve uygulanmıştır. Basınçlı hava izleme programı SCA’da reglaj vana (oransal vana) izleme ekranı oluşturulmuş, böylece anlık takip ve alarm sistemi devreye alınmıştır. Aktif hat basınç sistemi ile; alt-üst alarm limiti, aktif vana açıklık oranı ve üst alarm limiti anlık olarak takip edilmekte, olumsuzluk durumunda müdahale kolaylığı sağlamaktadır.

Basınç düşümü uygun görülen birimlerde trend takip ekranı tasarlanmış ve önerilmiştir. Böylece geçmiş veriler analiz edilerek, aksayan noktalara müdahale edebilme ve yeni fırsatlar oluşturma (pozitif yönde) kabiliyeti kazandırılmıştır.

İşletmede bulunan her bir birimde basınçların düşürülebileceği zaman oranı ve bu orana bağlı olarak toplam enerji kazanç değerleri belirlenmiştir. Süspansiyon biriminde, kazanç oranının %19 olarak gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Aynı analiz yöntemi diğer birimler için de kullanılmıştır. Birimlerin değerlendirilmesinde en yüksek kazanç oranının %32 ile Boyahane biriminde olacağı görülmüştür. Söz konusu tablodan hareketle, işletme genelinde, üretim dışı zamanlarda, basınçlı hava sistemlerinin kapalı tutulması halinde yıllık tasarrufun daha da yüksek olacağı görülmüştür.

El ile kumandalı vana yerine oransal vana kullanılarak, birimin ihtiyaç duyduğu kadar basınçlı havanın hatlara verilmesi tasarrufuna katkı sağlamaktadır.

Enerji merkezi (kompresör dairesi) ile boya üretim müdürlüğü arasında bulunan bağlantı hattında ihtiyaç fazlası olarak yer alan bağlantı malzemelerinin (fittings

malzemeler) iyileştirilmesi ile enerji tasarrufunun yıllık 4.849 € kadar olabileceği belirlenmiştir.

Enerji merkezi (kompresör dairesi) ile montaj lastik şişirme tesisi hava hattı arasında yer alan basınç kayıp noktalarının iyileştirilmesi ile yılda 2.259 € tasarruf sağlanabileceği belirlenmiştir.

Basınç kayıp noktalarının giderilmesi ve kompresör dairesi çıkışında sabit hava basıncının 8,0 bardan 7,7 bar a düşürülmesi ile yılda 10.291 € tasarruf sağlanabileceği görülmektedir.

Oransal vanaların eklenmesi ile üretimin farklı bölümlerinde hatlara giden hava basıncının düşürülerek basınçlı hava tüketim miktarının düşmesi (%20 iyileşme) sağlanabilir. Bu durumun tüketilen elektrik enerjisinde de %16 gibi bir tasarruf sağlaması mümkündür.

Enerji tasarrufu; maliyeti düşürme stratejilerini belirlemede önemli bir rol oynar. Her bir üretim birimi için potansiyel enerji tasarrufu ve maliyet azaltma fırsatları belirlenmelidir. Belirlenen bu veriler, operasyonel verimliliği artırmak ve enerji maliyetlerini azaltmak için stratejik kararlar almada kullanılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Akkaya, A. V., Sevilgen, S. H., Erdem, H. H., & Çetin, B. (2005). Simulink kullanarak bir pnömatik sistemin simülasyonu. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6(2), 155-162.
- Akkuş, N. (1986). Pnömatik temel ve uygulamaları (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Akyazı, Ö., & Çokrak, D. (2011). Pnömatik ve hidrolik sistem uygulamaları. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 142-147.
- Demirel, K. 2013. Hidrolik Pnömatik, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Dindorf, R. (2012). Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering*, 39, 204-211.
- Dolaş, S., 2018, Basınçlı hava sistemleri, SQM Akademi Enerji Yöneticisi Eğitimi Ders Notları, İstanbul.
- Erol, O. (1991). Genel Klimatoloji. Ankara: Gazi Büro Kitabevi.
- GÜLEÇ, M. (1999). Pnömatik Sistemlerde Tasarruf Önlemleri ve Yöntemleri. *MMO I. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 3(5).
- Kaya, M. (2012). Sanayide Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Basınçlı Hava Sistemlerinde Verimlilik (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).
- Kılıçaslan, E. (1988). Pnömatik sistem elemanları (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Kutlu, K., & Büyüksavcı, M. (1999). Hidrolik bir servo sistemin kayan rejimli konum kontrolü. *Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 335-340.
- Küçükyazıcıoğlu, G. (2020). Bir otomotiv yan sanayi tesisinin basınçlı hava sisteminde enerji tasarrufu uygulaması (Master's thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Mccloy, D., Martin, H. (1980) Akışkan gücünün kontrolü, analizi ve tasarımı, Ellis Horwood Limited

Mousavi, S., Kara, S., & Kornfeld, B. (2014). Energy efficiency of compressed air systems. *Procedia Cirp*, 15, 313-318.

Sapmaz, S. (2014). Basınçlı hava sistemlerinde enerji tasarrufu uygulaması (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). 11, 223.

Taheri, K., & Gadow, R. (2017). Industrial compressed air system analysis: Exergy and thermoeconomic analysis. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, 10-17.

Vittorini, D., & Cipollone, R. (2016). Energy saving potential in existing industrial compressors. *Energy*, 102, 502-515.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Bursa'nın Orhangazi ilçesinde tamamladım. 2010 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldum.

2012 yılından bu yana otomotiv sektöründe çalışmaktayım. Ayrıca, otomotiv sektöründe enerji iyileştirme çalışmalarında aktif proje liderliği görevi yürütmekteyim. Yenilenebilir enerji ve enerji optimizasyonu çalışmalarında görev almaktayım.

2022 yılında Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans programına dahil oldum.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Yüksel,F. & Demirler,F. (2023). Pnömatik sistemlerde verim artırma parametrelerinin analizi ve otomotiv sanayinde uygulanması. Tam Metin 3rd International Black Sea Modern Scientific Research Congress - March 23-24, 2023 Samsun, Türkiye - ISBN - 978-625-367-025-2