

# PNÖMATİK SİSTEMLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFİ DOĞRULTUSUNDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ ETÜT ÇALIŞMASI

Fikret Kemal AKYÜZ

Ahmet Faruk FIRAT

## ÖZET

Pnömatik sistemler, endüstriyel süreçlerin vazgeçilmez bir parçası olarak enerji tüketiminde önemli bir yer tutmaktadır. Endüstrideki toplam enerji kullanımının yaklaşık %10'unu basınçlı hava sistemleri oluşturmaktadır. Bu sebeple endüstriyel tesislerde sürdürülebilirlik çalışmaları kapsamında pnömatik sistemler önemli bir yer tutmaktadır. Basınçlı hava üretimi yüksek enerji tüketimine neden olduğundan, bu sistemlerde sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği büyük önem taşımaktadır. Pnömatik sistemler, endüstriyel süreçlerin vazgeçilmez bir parçası olarak enerji tüketiminde önemli bir yer tutm Pnömatik sistemleri enerji verimliliği açısından, sürdürülebilirlik hedefi ile analiz edebilmek için, basınçlı hava sistemine bütünsel bir yaklaşım yapılmalıdır. Pnömatik sistemlerde bütünsel bir yaklaşım yapabilmek için; Kompresörler, kurutucular, basınçlı hava tesisatı, pnömatik hava kaçaqları, pnömatik yanlış kullanımlar, pnömatik ekipmanların verimsiz kullanılması ve enerji izleme sistemlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; pnömatik sistemlerde sürdürülebilirlik hedefi için, bütünsel bir yaklaşım uygulanmasıyla, pnömatik sistemlerde enerji verimliliğini arttırmaya yönelik bir etüt çalışması ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Pnömatik sistemler, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik, bütünsel yaklaşım, kompresörler, kurutucular, hava kaçaqları, tesisat, enerji izleme.

## ABSTRACT

Pneumatic systems account for a significant portion of energy consumption as an indispensable part of industrial processes. Compressed air systems account for approximately 10% of total energy consumption in industry. For this reason, pneumatic systems play an important role in sustainability efforts at industrial facilities. Since compressed air production results in high energy consumption, sustainability and energy efficiency are of great importance in these systems. To analyse pneumatic systems in terms of energy efficiency and sustainability goals, a holistic approach to the compressed air system must be adopted. To adopt a holistic approach in pneumatic systems, it is necessary to examine compressors, dryers, compressed air piping, pneumatic air leaks, pneumatic misuse, inefficient use of pneumatic equipment, and energy monitoring systems. In this study, a feasibility study aimed at increasing energy efficiency in pneumatic systems is addressed by applying a holistic approach for the sustainability goal in pneumatic systems.

**Key Words:** Pneumatic systems, energy efficiency, sustainability, holistic approach, compressors, dryers, air leaks, piping, energy monitoring.

## 1. GİRİŞ

Endüstride enerji tüketiminin azaltılması, günümüzün en kritik sürdürülebilirlik hedeflerinden biri durumuna gelmiştir. Bu hedef doğrultusunda, enerji tüketimi yüksek olan pnömatik sistemlerin verimli çalışması, sadece maliyetleri düşürmekle kalmayıp, çevresel etkilerin azaltılmasına da doğrudan katkı sağlamaktadır. Özellikle basınçlı hava sistemlerinin, endüstriyel tesislerde toplam enerji tüketiminin kayda değer bir kısmını oluşturması, bu alanda yapılacak verimlilik analizlerini daha da önemli kılmaktadır. Bu bildiride, toplamda 500 kW kompresör kurulu gücüne sahip olan bir işletme için, pnömatik sistemlerde bütünsel bir yaklaşım ile yürütülen enerji verimliliği etüt çalışması ele alınmakta; sistemin temel bileşenleri olan kompresörler, kurutucular, tesisat yapısı, hava kaçakları ve izleme sistemleri üzerinden sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik çözüm önerileri sunulmaktadır.

Rapor kapsamında gerçekleştirilen tasarruf

hesaplamalarında; Fabrika yılda 8.400 saat çalıştığı

Elektrik birim fiyatı 0,09 € / kWh

Bir birim basınçlı hava maliyeti (bakım maliyetleri dahil olmak üzere)

0,014 € /m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> emisyon katsayısı ise 479 gCO<sub>2</sub>/kWh olarak

kullanılmaktadır.

Pnömatik sistemlerde sürdürülebilir bir yaklaşım için, aşağıda yer alan konuların incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da aşağıda yer alan tüm maddeler incelenmiş olup, detaylar aşağıdaki sayfalarda yer almaktadır.

1. Kompresör odasının durumu
2. Kompresörlerin çalışma performansı
3. Kurutucuların analizi, basınçlı hava kalitesi
4. Fabrikanın basınç haritasının çıkartılması, basınç kayıplarının incelenmesi
5. Pnömatik sistemlerin verimli kullanılması
6. Basınçlı hava kaçakları, genel basınçlı hava kaçak miktarları
7. Basınçlı hava enerji izleme sisteminin incelenmesi

## 2. KOMPRESÖR ODASININ İNCELENMESİ

Fabrikada, kompresörler dış ortamda bulunmaktadır. Kompresörler sıcak ve tozlu bir hava girişine sahiptir. Kompresör taze hava giriş sıcaklığı, sistem enerji verimliliği ve performansı açısından kritik bir faktördür [1]. Taze hava giriş sıcaklığı arttıkça hava yoğunluğu azalır, bu da kompresörün her çevrimde daha az hava kütlesini sıkıştırmasına neden olur [1,2]. Sonuç olarak, kompresör aynı akış hızını elde etmek için daha fazla çevrim yapmak zorunda kalır ve enerji tüketimi artar [2]. Özellikle sıcaklık kontrolünün mümkün olmadığı bu çalışma ortamında olduğu gibi, yüksek giriş sıcaklıkları yalnızca kompresör verimliliğini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda aşınmayı hızlandırabilir ve ekipman ömrünü kısaltabilir [3].

Bu nedenle, giriş havasını soğutmak veya serin tutmak hem enerji tasarrufu hem de sürdürülebilir çalışma açısından basınçlı hava sistemlerinde önemli bir iyileştirme yöntemidir, çünkü soğuk havanın yoğunluğu artar ve kWh başına üretilen hava miktarı iyileşir [1].

Mevcut durumdaki kompresör odasının tavsiye edilen kompresör odasıyla değiştirilmesi ile

elde edilmesi beklenen tasarruf potansiyeli hesaplamaları aşağıda verilmektedir.

Güç Dönüşüm Faktörü:  $1 - ((\text{Dış ortam sıcaklığı} + 273) / (\text{İç ortam Sıcaklığı} + 273))$

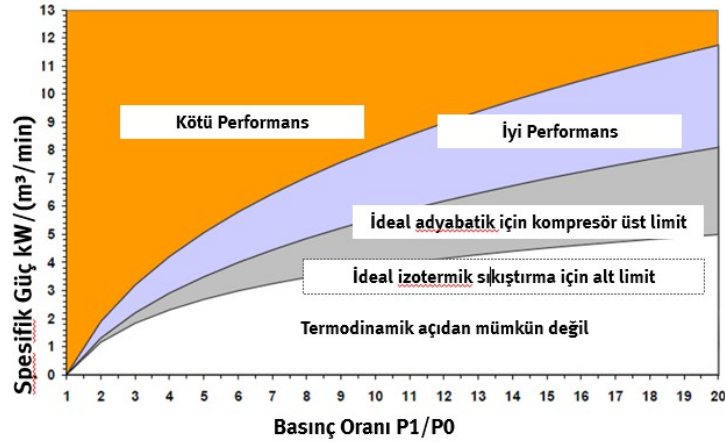
**Tablo 1:** Kompresör giriş havası değerine göre enerji tasarruf hesap tablosu

Aylar	Max Sıcaklık C	Ortalama Sıcaklık C	Min Sıcaklık C	Kompresör bulunduğu ortam(ortamdaki toz'da +10 C sıcaklık etkisi kabulü)	Yeni Kompresör Odası Ortam Sıcaklığı	Güç Düşüm Faktörü	Kompresörün Mevcut Tük. (kW)	Kompresörün Yeni Tük. (kW)	Tasarruf (kW)	Tasarruf (kWh/ay)
Aralık	13	9	6	16,0	15,0	0,3%	296	294,98	1,02	2.212,32
Ocak	7	3	0							
Şubat	11	6	3							
Mart	8	4	1	21,3	20,0	0,5%	296	294,66	1,34	2.896,31
Nisan	19	13	9							
Mayıs	23	17	12							
Haziran	26	21	17	33,0	25,0	2,6%	296	288,26	7,74	16.715,29
Temmuz	30	23	18							
Ağustos	31	25	20							
Eylül	27	21	16	26,0	23,0	1,0%	296	293,03	2,97	6.414,98
Ekim	19	15	12							
Kasım	16	12	9							

Toplam tasarruf değeri= 38.249,27 kWh/yıl olduğundan toplam elde edilen tasarruf potansiyeli ise, 3.442,43 euro/yıl ve 18.321,40 kgCO<sub>2</sub> 'dir.

Kompresörlerin performansını gösteren değer spesifik enerji tüketimidir (kW/m<sup>3</sup>/dk). Bu değer, kompresörün belirli bir hacimdeki havayı (m<sup>3</sup>/dk) üretmek için ne kadar enerji (kW) harcadığını gösterir [2]. Başka bir deyişle, enerji verimliliğinin bir ölçüsüdür. Düşük bir spesifik enerji tüketimi, kompresörün aynı miktarda havayı daha az enerji harcayarak üretebildiğini, yani daha verimli çalıştığını ifade eder. Bu durum hem işletme maliyetlerinin azaltılması hem de enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritiktir [2,4].

Aşağıdaki grafikte kompresörlerin spesifik enerji tüketim değerlerini yorumlayan grafik gösterilmektedir.



P1: Sistemin Basıncı  
P0: Atmosfer Basıncı

Şekil 1: Kompresör SET değerlerinin yorumlanması

Fabrikadaki kompresörlerin spesifik enerji tüketim  $6,6 \text{ (kW / m}^3\text{/dk)}$  /değerindedir. Bu değer kompresörler için ortalama bir değerdir. Kompresör odasının sıcaklık değeri optimize edildiğinde bu değer  $6,2\text{-}6,0 \text{ (kW/m}^3\text{/dk)}$  değerine düşmesi ön görülmektedir.

### 3. BASINÇLI HAVA KALİTE ANALİZİ

Pnömatik sistemlerin, sürdürülebilirliği açısından en önemli konu basınçlı havanın kalitesidir [5]. Pnömatik ekipmanların verimliliği, çalışma ömrü ve güvenilirliği açısından basınçlı hava kalitesi kritik öneme sahiptir [5]. Basınçlı hava içerisinde bulunan nem, partikül ve yağ buharı gibi kirlenmeler; valfler, silindireler ve regülatörler gibi hassas bileşenlerde aşınma, korozyon ve sızdırmazlık problemlerine yol açabilir. Bu durum hem sistem performansında düşüşe hem de plansız duruşlara neden olur [5,6].

Fabrikadaki toplam kurutucu kapasitesi  $90,0 \text{ m}^3\text{/dk}$  ve toplam kompresör kapasitesi  $81,0 \text{ m}^3\text{/dk}$ 'dir. Ancak, kurutucu kapasitesini hesaplariken, basınçlı hava kurutucusunun giriş sıcaklığı, basınçlı havanın basınç değeri ve kurutucunun bulunduğu ortam sıcaklığı gibi faktörler dikkate alınır [7]. Bu bilgileri dikkate alarak, toplam kurutucu kapasitesi ( $67,20 \text{ Nm}^3\text{/dk}$ ) olup, toplam kurutucu kapasitesi toplam kompresör kapasitesi için yetersizdir. Etüt kapsamında, fabrikada 2 noktada hava kalitesi değerleri ölçülmüştür.

İlk Ölçüm;

Ölçüm noktasındaki çiğlenme noktası sıcaklığı  $+14,2 \text{ }^\circ\text{C}$  ölçülmüştür. ISO 8573-1 uyarınca, test edilen basınçlı hava su içeriği sınıfı 6'dan büyük olarak nitelendirilmiştir [8]. Bu değer beklenen seviyenin oldukça üzerinde olup, pnömatik bileşenler için güvenli çalışma sınırlarının dışındadır. Gazlı kurutucu kullanımı durumunda beklenen değerler  $+3 / +7 \text{ }^\circ\text{C}$  (Sınıf 4 ve 5) aralığındadır [8].

Yağ kalitesi değeri  $0,1 \text{ mg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. ISO 8573-1 kapsamında 2. sınıfta yer almaktadır [8].

İkinci Ölçüm;

Ölçüm noktasındaki ciğlenme noktası sıcaklığı +12,8 °C ölçülmüştür. ISO 8573-1 uyarınca, test edilen basınçlı hava su içeriği sınıfı 6'dan büyük olarak nitelendirilmiştir [8]. Bu değer beklenen seviyenin oldukça üzerinde olup, pnömatik bileşenler için güvenli çalışma sınırlarının dışındadır. Gazlı kurutucu kullanımı durumunda beklenen değerler +3 / +7 °C (Sınıf 4 ve 5) aralığındadır [8].

Yağ kalitesi değeri 0,1 mg/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. ISO 8573-1 kapsamında 2. sınıfta yer almaktadır [8].

Fabrika genelinde, basınçlı hava kalite sınıflarından, yağ kalitesi değerleri oldukça iyi değerlerdedir. Ancak basınçlı hava dew point değeri ise sınır değerlerin çok üstünde ve oldukça kötü bir değere sahiptir.

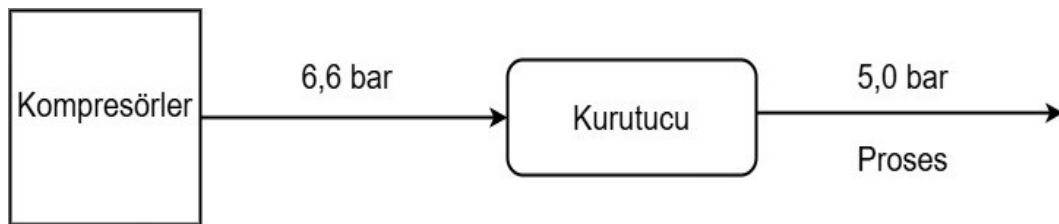
Kompresörler ve kurutucuların buldukların ortamın yenilenmesi gerekmektedir. Kompresör ve kurutucuların buldukların ortamın, oda sıcaklığında (hatta biraz daha serin 20 C gibi) bulunması tavsiye edilmektedir. Kompresör ve kurutucuların egzozlarının dış ortama egzoz edilmesi ve üretim içerisinde farklı bir konumda bulundurulması gerekmektedir.

Fabrikada yapılan diğer bir hata ise, pnömatik filtrelerin su ayırıcı ile aynı görevi gördüğüne inanıp, makine başlarında su ayırıcı kullanmamasıdır. Filtre ve su ayırıcı farklı iki ayrı ekipmandır. Pnömatik sistemlerde, önce su ayırıcı, arkasından filtre, regülatör vb. ekipmanların sıralanması gerekmektedir. Bu pnömatik ekipmanların arızalanmaması için ve sürdürülebilir bir sistem için önemlidir.

#### 4. FABRİKANIN BASINÇ HARİTASI

Fabrikanın basınç haritasını çıkartabilmek amacıyla farklı noktalardan eş zamanlı olarak basınç değerleri ölçülmüştür (saha verisi). Alınan ölçümler sonucunda fabrikanın basınç kayıpları kabul edilebilir seviyenin çok üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Basınçlı hava tesisatında izin verilen maksimum basınç kaybı 0,6 bar değerindedir [9]. Fabrikada ise basınç kaybı 1,7 bar olarak tespit edilmiştir. Oluşan bu basınç kaybının tamamı kompresör odası içerisinde gerçekleşmektedir. Kompresör odasında üretime gönderilen basınçlı havada herhangi bir basınç kaybı tespit edilmemiştir.

Fabrikadaki basınç düşümünün sebebi ise, kurutucudan veya kurutucudan önce ve sonra kullanılan filtrelerden kaynaklanmaktadır. Kompresör çıkışları 6,6-6,7 bar basınç değerinde çalışmaktadır. Kurutucudan önce alınan ölçümlerde basınç değeri 6,6 bar olarak tespit edilmiştir. Kurutucudan hemen sonra, kompresör odasından bulunan kuru hava tankından alınan ölçümlerde ise basınç değeri 5,0 bar olarak tespit edilmiştir. Bu değer izin verilen 0,6 bar'ın oldukça üzerindedir. Kompresör odasında bulunan boru tesisatı kontrol edilmiş olup, doğru boyutlandırma yapılmıştır. Boru tesisatında herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi basınç kaybının tek sebebi kurutucu veya kurutucudan önce ve sonra kullanılan filtrelerden kaynaklanmaktadır.



**Şekil 2:** Fabrika basınç kayıp noktaları

Mevcut durumda kompresörler 6,6 bar SET değeriyle çalışmaktadır. Ancak kompresör odasında kurutucu veya filtrelerden kaynaklı 1,6 bar değerinde basınç kaybı yaşanmaktadır. Etüt sırasında üretime giden basınç 5,0 bar değerindedir. Kompresör 6,6 bar çalışırken, üretimde 5,0 bar kullanılmaktadır. Bu durumda üretime 5 bar basınç yetiyor anlamına gelmektedir. Eğer basınç kayıplarının önüne geçilebilir ise kompresörler 5,5 bar değerinde çalıştırılabilir. Enerji verimliliği açısından da oldukça güzel bir uygulama yapılabilir.

Mevcut durumdaki kurutucu veya filtrelerin bakımları önemle yapılmalı ve oluşan bu ciddi basınç kaybı minimum değere indirilmesi tavsiye edilmektedir. Basınç kayıplarının minimum değerlere indirilmesiyle kompresörlerin SET basınçlarını 6,6 bardan 5,5 bar değerine düşürülmesiyle yılda 38.561 € ve 153.744 kgCO<sub>2</sub> tasarruf elde edilebilir.

**Tablo 2 :** Kompresör çalışma basıncının düşürülmesiyle elde edilecek tasarruf potansiyeli

	Yıllık Elektrik Tüketimi (kWh)	Yıllık Hava Tüketimi (Nm <sup>3</sup> )	Yıllık CO <sub>2</sub> emisyon salımı (kgCO <sub>2</sub> e)	Yıllık Enerji Maliyeti (€)	Yıllık Toplam Enerji Maliyeti (€)
Mevcut Durum	4.863.158,0	40.807.728,0	2.329.453,0	437.684,0	<b>583.579,0</b>
Gelecek Durum	4.542.190,0	38.114.418,0	2.175.709,0	408.797,0	<b>545.063,0</b>
<b>Tasarruf</b>	<b>320.968,0</b>	<b>2.693.310,0</b>	<b>153.744,0</b>	<b>28.887,0</b>	<b>38.516,0</b>

## 5. PNÖMATİK SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Fabrika genelindeki üfleme uygulamaları sürekli üfleme şeklindedir. Bu uygulamalar yapılırken, ortalama olarak 800 lt/dk hava tüketimi gerçekleşmektedir. Bu üfleme uygulamalarını özel valfler ile 1 sn off 1 sn on ve debi değeri bir miktar azaltılarak gerçekleştirilebilir. Böylelikle üfleme 1 dakika boyunca sürekli üfleme yapmak yerine 1 dakika da toplam da 30 saniye üfleme uygulaması gerçekleştirilebilir. Ancak bu uygulamanın üretimi olumsuz etkilememesi gerekmektedir.

Üretime zarar vermeyecek şekilde fabrikada yapılan testler sonucunda, debi değerinin değiştirmeden, sadece üfleme zamanını değiştirerek 1 sn açık ve 1 sn kapalı olacak şekilde ayarlanarak, üfleme zamanı ve debi tüketimi değeri azaltılabilmektedir.

Fabrika içerisinde üretime zarar vermeden 2 adet üfleme sisteminde yapılan değişiklikler sonucunda, yılda 4.325 € ve 17.262 kg CO<sub>2</sub> tasarruf sağlanması mümkündür. Bu hesaplamalar sistemin günde 18 saat ve haftada 7 gün çalıştığı varsayımı ile gerçekleşmiştir.

**Tablo 3 : Üfleme uygulaması tasarruf hesap tablosu**

Mevcut Durum	Yeni Durum
Basınç (bar)	Basınç (bar)
5	5
Debi Değeri (l/dk)	Debi Değeri (l/dk)
800	800
Döngü süresi	Döngü süresi
60	30
Dakikadaki döngü adeti	Dakikadaki döngü adeti
1	1
Ürün Adet	Ürün Adet
2	2
Haftalık Çalışma günü	Haftalık Çalışma günü
7	7
Günlük Çalışma Saati	Günlük Çalışma Saati
18	18

	Mevcut Durum	Gelecek	Tasarruf
Debi Değeri (l/dk)	1.600,00	800,00	<b>800,00</b>
Yıllık Debi (m3)	604.800,00	302.400,00	<b>302.400,00</b>
Yıllık Enerji Maliyeti (€)	8.649,00	4.325,00	<b>4.324,00</b>

Fabrikada toplamda 60 adet basınçlı hava tabancası kullanılmaktadır. Kullanılan basınçlı hava tabancalarının basınç ve debi değerleri ölçülmüş olup, 3,5 bar basınç karşılığında debi tüketimleri 220 lt/dk'dır. Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü üzere, hava tabancaları, gelen basınç değerini düşürerek gereksiz hava tüketimi gerçekleştirmektedir. Ana hattaki basınç değeri 5 bar iken, mevcutta kullanılan hava tabancasının basınç değeri 3,5 bar değerindedir.

Enerji verimliliği hava tabancaları ise ana hattan gelen basınçlı havanın basınç değerini korurken buna karşılık daha az debi tüketimi gerçekleştirmektedir. Tavsiye edilen hava tabancası ise mevcut sistemde, 4,98 bar basınç karşılığında 98 lt/dk hava tüketimi gerçekleştirmektedir. Mevcut 60 adet hava tabancasının değiştirilmesi ile yılda 2.198 € parasal tasarruf ve 8.775 kgCO<sub>2</sub> tasarrufu sağlanması mümkündür. Bu hesaplamalar basınçlı hava tabancasının günde 1 saat ve haftada 7 gün çalıştığı varsayımı ile gerçekleşmiştir.

**Tablo 4 : Basınçlı hava tabancası tasarruf hesap tablosu**

Mevcut Durum	Yeni Durum
Basınç (bar)	Basınç (bar)
3,5	4,98
Debi Değeri (l/dk)	Debi Değeri (l/dk)
220	98
Döngü süresi	Döngü süresi
60	60
Dakikadaki döngü adeti	Dakikadaki döngü adeti
1	1
Ürün Adet	Ürün Adet
60	60
Günlük Çalışma Saati	Günlük Çalışma Saati
1	1
Haftalık Çalışma Günü	Günlük Çalışma Saati
7	7

	Mevcut Durum	Gelecek	Tasarruf
Debi Değeri (l/dk)	13.200,00	5.880,00	<b>7.320,00</b>
Yıllık Debi (m3)	277.200,00	123.480,00	<b>153.720,00</b>
Yıllık Enerji Maliyeti (€)	3.964,00	1.766,00	<b>2.198,00</b>

## 6. BASINÇLI HAVA KAÇAKLARI

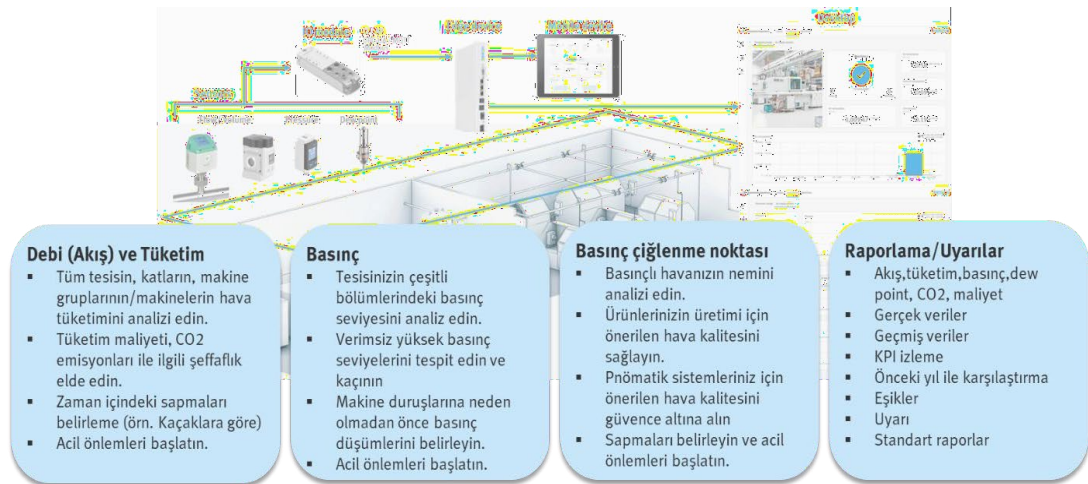
Fabrikada yapılan kaçak tespit çalışmasında 54 adet basınçlı hava kaçağı tespit edilmiştir. Bu hava kaçakların, işletmeye toplam maliyeti yılda 7.670 € ve 30.616 kgCO<sub>2</sub>' dir. Ayrıca işletme içerisinde 9 adet uygun olmayan pnömatik kullanım tespit edilmiştir. ISO 11011 kapsamında, basınçlı hava kaçakları önem derecesine göre sınıflandırılmıştır. Fabrika içerisinde, fanları soğutma amacı ile basınçlı hava kullanılmaktadır. Bu durum büyük basınçlı hava kaçaklarına sebep olmaktadır.



Şekil 3: Basıncı hava kaçaqları örnek görseller

## 7. BASINÇLI HAVA ENERJİ İZLEME SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Fabrikada basıncı hava sistemi izleme sistemi bulunmamaktadır. Ölçmediğim bir değeri bilemezsin ve bilmediğin bir şeyi yönetemezsin kuralı önemli ve gerçekçi bir kuraldır. Yukarıda bahsettiğimiz tasarruf hesaplamalarının tamamı ölçülerek yapılan hesaplamalardır. Basıncı hava sistemlerinde genel olarak izlenmesi gereken noktalar ve amaçlar aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4: Basıncı hava sistemlerinde izlenmesi gereken parametreler

Basıncılı hava sisteminin verimli kullanılabilmesi ve sürdürülebilir olabilmesi için, mutlaka sistemin ölçülmesi, değerlendirilmesi ve aksiyon alınması gerekmektedir [10]. Kompresörlerin spesifik enerji tüketimlerinin, kurutucuların performanslarının, basınç kayıplarının, basınçlı hava kaçaklarının ve pnömatik ekipman performanslarının takip edilmesi, yapılan iyileştirmelerin etkilerinin tespit edilmesi için ölçüm zorunludur [10].

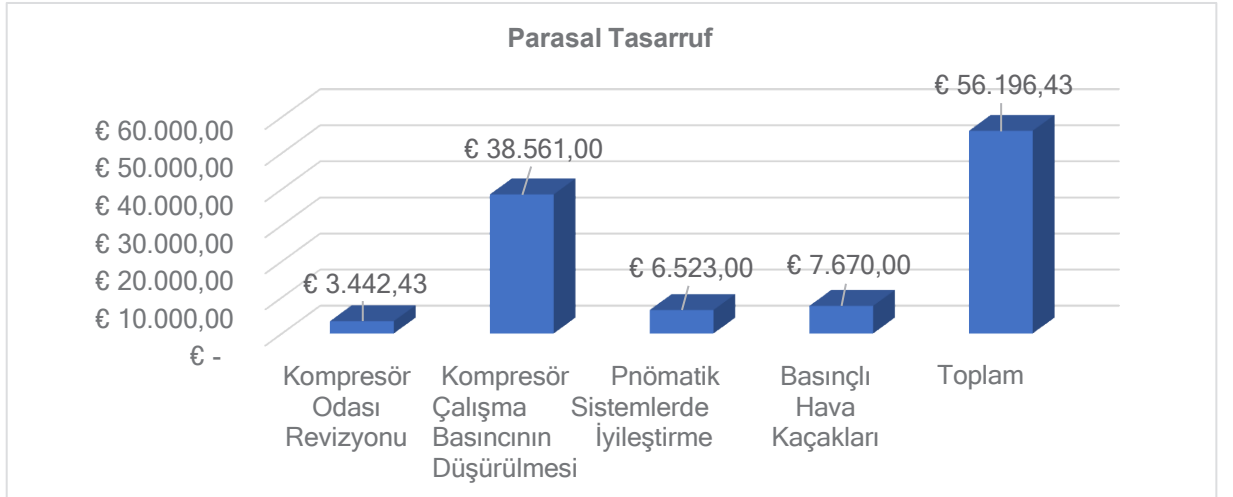
Fabrikada, kompresör çıkışlarına debimetrelerin, elektrik ölçümleri için enerji analizörlerinin, ana hatta çiğlenme noktası sensörünün, üretim dışı zamanlarda hava kaçaklarını algılayarak basıncı düşürebilen akıllı kontrol sistemlerinin, kurutucu öncesi ve sonrası için fark basınç sensörlerinin ve üretim içerisindeki kritik noktalara basınç sensörlerinin yerleştirilmesi tavsiye edilmektedir [11]. Bu ölçümlerin tamamının merkezi bir izleme ekranından takip edilmesi, sistemin güvenilirliği ve enerji verimliliği açısından önemlidir [11].

## SONUÇ

Bu çalışma, pnömatik sistemlerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda nasıl daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilebileceğini bütünsel bir yaklaşımla ortaya koymuştur. Kompresör odası koşullarının iyileştirilmesi, kurutucu kapasitesinin yetersizliğinin giderilmesi, basınçlı hava kalitesinin artırılması ve basınç kayıplarının minimize edilmesi gibi çeşitli teknik müdahalelerle, sistem genelinde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir. Basıncılı hava içerisindeki nem oranının çok yüksek olması pnömatik ekipmanlarda sürdürülebilirliği mümkün kılmamaktadır. Pnömatik sistemlerde sürdürülebilirlik ve kestirici bakım çalışmaları için dew point değerinin iyileştirilmesi çok önemlidir. Akıllı debimetreler ile üretim olmadığı durumlarda, basınçlı hava kaçaklarının tespit edilmesi ve kendiliğinden aksiyon alabilen cihazların kullanılması tavsiye edilmektedir. Aşağıdaki tabloda, önerilen iyileştirme önlemlerinin uygulanması durumunda elde edilmesi öngörülen enerji tasarrufu potansiyeli ile buna karşılık gelen parasal kazançlar grafiksel olarak sunulmuştur.

**Tablo 5:** Toplam tasarruf potansiyelleri

Tasarruf Potansiyelleri	Parasal Tasarruf	Kg CO <sub>2</sub> tasarruf
Kompresör Odası Revizyonu	€ 3.442,43	18.321,40
Kompresör Çalışma Basıncının Düşürülmesi	€ 38.561,00	153.744,00
Pnömatik Sistemlerde İyileştirme	€ 6.523,00	26.037,00
Basıncılı Hava Kaçakları	€ 7.670,00	30.616,00
<b>Toplam</b>	<b>€ 56.196,43</b>	<b>228.718,40</b>



**Şekil 5:** Parasal tasarruf grafiği

Sonuç olarak, pnömatik sistemlerde enerji verimliliğinin sürdürülebilir bir şekilde sağlanması için yalnızca donanımsal iyileştirmeler değil, aynı zamanda izleme ve kontrol mekanizmalarının da entegre edilmesi kritik önemdedir. Bu bağlamda, basınçlı hava sistemlerinin sürekli izlenmesini sağlayacak bir enerji izleme altyapısının kurulması, sürdürülebilir bir üretim yaklaşımı açısından vazgeçilmezdir.

## KAYNAKLAR

- [1]Kaeser Kompressoren. (2021). Energy saving in compressed air systems [Technical paper]. Kaeser Kompressoren.
- [2]International Organization for Standardization. (2013). ISO 11011:2013 – Compressed air — Energy efficiency — Assessment. ISO.
- [3]Atlas Copco. (2021). Air compressor guide. Atlas Copco.
- [4]International Energy Agency. (2022). Energy efficiency in industry. IEA
- [5]Compressed Air and Gas Institute (CAGI). (2020). Compressed air system best practices manual. CAGI.
- [6]Parker Hannifin. (2019). Contaminants in compressed air systems [White paper]. Parker Hannifin.
- [7]BEKO Technologies. (n.d.). Sizing and selection of compressed air dryers. BEKO Technologies.
- [8]International Organization for Standardization. (2010). ISO 8573-1:2010 – Compressed air — Contaminants and purity classes. ISO.
- [9]United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2018). Compressed air system optimization guidelines. UNIDO
- [10]U.S. Department of Energy. (2019). Improving compressed air system performance: A sourcebook for industry. DOE
- [11] Atlas Copco. (2022). Compressed air monitoring and control solutions [Application guide]. Atlas Copco.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Fikret Kemal AKYÜZ**

22.04.1968 yılında Edirne’de doğdu. İlk-orta-lise eğitimini burada tamamladı. Endüstri Meslek Lisesi eğitiminden sonra 1985 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine bölümünde lisans eğitimine başladı ve 1989’da tamamladı. Lisans sonrası 1990 yılında master yapmaya başladı. Buna paralel olarak öğretmen olarak iş hayatına başladı. 2 yıl çalıştıktan sonra Almanya’nın Baden- Württemberg eyaletinden aldığı burs ile 1 yıl Almanya’da çeşitli teknik eğitimler aldı. Festo, Siemens, Herion firmalarında hidrolik, pnömatik, PLC, otomasyon konularında eğitimler alıp, tekrar Türkiye’ye döndü. Döndükten sonra master eğitimini tamamladı. Bu süre zarfında plastik enjeksiyon makinesi üreticilerine yarı zamanlı olarak otomasyon konusunda destek oldu. 1997 yılında Festo A.Ş. ’de SW developer çalışmaya başladı ve şu anda Teknoloji Yönetim Müdürü olarak çalışmaya devam etmektedir. İngilizce ve Almanca bilmektedir.

### **Ahmet Faruk FIRAT**

1994 Eskişehir doğumludur. 2013 yılında Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği mezunudur. 2024 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi ileri enerji teknolojileri bölümünde yüksek lisansa başlamış olup, yüksek lisans eğitimi devam etmektedir. 2018 yılında başladığı meslek hayatına enerji verimliliği alanında devam etmektedir. 2022 yılında FESTO San. ve Tic. AŞ.’de Teknoloji Yönetim bölümünde enerji verimliliği proje mühendisi olarak göreve başlamış, 2024 yılından itibaren ise aynı bölümde enerji verimliliği kıdemli proje mühendisi olarak görevini sürdürmektedir. 2022 yılında Almanya’da TÜV SÜD Industry Service tarafından onaylanan ISO 11011 sertifikasını (Compressed Air – Energy Efficiency According to DIN EN ISO 11011) almıştır. 2023 yılında ise T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından verilen Enerji Yöneticisi Sertifikası ile Sanayi Etüt ve Proje sertifikasını almıştır.