

Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Emisyon Azaltım Fırsatlarının İncelenmesi¹

Süleyman Sapmaz ^{*2}

Durmuş Kaya ³

ÖZ

Basınçlı hava üretimi için kullanılan elektrik enerjisinin büyük bölümü sıkıştırma işinde meydana gelen çeşitli tersinmezlikler nedeniyle kaybedilmektedir. Kompresör çıkışında elde edilen basınçlı hava, prosesteeki kayıplardan dolayı elektrikten daha pahalı bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada, mevcut bir basınçlı hava sisteminin enerji verimliliği değerlendirilmesi yapılırken incelenmesi gereken tüm yönler açıklanmaktadır. Bu yöntemler kompresör atık ısısından faydalanılması, basınçlı hava hatlarındaki sızıntıların önlenmesi, kompresör emiş havasının olabildiğince serin bir ortamdan alınması, kompresör motorunun daha verimli bir motor ile değiştirilmesi olarak tespit edilmiştir. Bu yöntemlere ilişkin hesap metotları kullanılarak incelenen tesislerde yıllık toplam enerji kazanımı ve yıllık mali tasarruf değerleri hesaplanmıştır. Doğalgaz ve elektrik enerjisi için uygun emisyon katsayıları kullanılarak emisyonlarda meydana gelecek yıllık toplam azaltım miktarı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık ısı geri kazanımı, basınçlı hava sistemi, emisyon, enerji verimliliği, kompresörler

Investigation of Energy Efficiency and Emission Reduction Opportunities in Compressed Air Systems

ABSTRACT

Majority of electrical energy used for compressed air production is lost because of irreversibility. Due to compression process loses, compressed air is more expensive than electricity as an energy source. In this study, all aspects required to evaluate compressed air system energy efficiency are represented. Determined energy efficiency increasing methods are; application of waste heat recovery, leakage prevention, reducing compressor inlet air temperature, compressor outlet pressure reduction and use of high efficiency motors. By using related calculation methods annual total energy and annual financial saving values are calculated. Total emission reduction is calculated using proper specific emission factors for natural gas and electricity.

Keywords: Waste heat recovery, compressed air system, emission, energy efficiency, compressor

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 01.02.2017

Kabul/Accepted : 16.05.2017

¹ Bu makalenin İngilizcesi "International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE 2017- Cappadocia)" etkinliğinde tam metin bildiri olarak sunulmuştur.

² Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, suleyman_sapmaz@hotmail.com

³ Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, durmuskaya@hotmail.com

1. GİRİŞ

Ortam havasının emilerek özel düzenekler içerisinde sıkıştırılmasıyla basınçlı hava elde edilir. İşletme karakteristikleri basınçlı havayı cazip bir enerji taşıyıcısı haline getirmektedir. Çünkü hava, atmosferden alınıp herhangi bir geri dönüş hattına ihtiyaç duyulmaksızın atmosfere atılabilmektedir. Ayrıca hava, kıvılcım ve açık ateşin oluşabileceği tehlikeli ortamlarda parlama ve yanma riski olmaksızın güvenle kullanılabilir [1].

Basınçlı hava, endüstriyel tesislerde üretimin çeşitli aşamalarında kullanılan önemli bir girdidir. Otomotiv sektöründe basınçlı hava; su, elektrik ve doğalgazın ardından imalat süreçlerini kolaylaştıran 4. önemli girdidir [2]. Basınçlı hava sistemi, birçok endüstriyel tesiste elektrik tüketiminde 3. sırada yer almaktadır [3]. Ayrıca basınçlı hava AB endüstriyel elektrik kullanımının %10'luk kısmını oluşturmaktadır [4]. Bu nedenle, enerji maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemli sistemlerdendir.

Endüstriyel ekipmanların enerji verimliliği değerlendirmesinde Özgül Enerji Tüketimi (ÖET) dikkate alınmaktadır. Bir kompresör için ÖET; nominal yüklenme durumunda, enerji tüketiminin (kWh) basınçlı hava üretim miktarına (m^3) oranlamasıyla tespit edilebilir. Tablo 1'de, bir kompresörün ÖET değerine bağlı olarak enerji verimliliği değerlendirilmesi verilmektedir.

Tablo 1. Kompresör ÖET Değerine Göre Enerji Verimliliği Değerlendirmesi [5]

Özgül Enerji Tüketimi (ÖET) kWh/Nm ³	Enerji Verimliliği Değerlendirmesi
0,085-0,11	Çok İyi
0,11-0,13	İyi
>0,13	Yüksek (Sistemde problem olabilir.)

Ekonomik etkisinin yanında basınçlı hava kayıplarının azaltılması çevre açısından da faydalıdır. Kayıpların azaltılması aynı zamanda enerji üretimine olan talebi azaltmakta ve böylece daha az CO₂ ve diğer zararlı bileşenin atmosfere salınmasını sağlamaktadır [6]. Bir kompresörün bir yıllık sürekli çalışma süresince elektrik enerjisi tüketimi genellikle bu ekipmanın ilk yatırım maliyetinden daha fazladır [7].

Saidur ve arkadaşları, basınçlı hava sisteminde enerji etüt yöntemini açıklayarak potansiyel tasarruf alanlarında yapılacak iyileştirme yöntemlerini vermişlerdir [4]. İnceleme sonuçlarına dayanarak elektrik motoru ile tahrik edilen bir kompresörde yüksek verimli motor ve hız ihtiyaçlarını karşılamak için DHS (Değişken Hız Sürücüsü) kullanımı ile oldukça önemli miktarda enerji tasarrufu sağladığı bulunmuştur.

Yang, kompresör sisteminde yapılan bir enerji etüdü ile Vietnam'da bulunan bir tesis



için elde edilecek kazançlarını hesaplamıştır [8]. Bu çalışmada, tesisin enerji kayıplarının kompresör sisteminin optimize edilmemiş olmasından ve sızıntılardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Çalışmada, kompresör sistemine yapılacak 84.000 \$ değerinde enerji verimliliği yatırımının geri ödeme süresi 6 ay olarak hesaplanmıştır.

Dindorf ise basınçlı hava hatlarındaki potansiyel enerji tasarruf kalemlerini ve hesap yöntemlerini vermiştir [5]. Uygulanabilir enerji tasarruf yöntemlerinin tespit edilebilmesi için basınçlı hava sistemi envanteri ve işletme parametrelerinin toplanması gerektiği belirtilmektedir. Elde edilen veriler ışığında kompresör sistemi performansına ait göstergeler: Özgül güç, yıllık enerji maliyeti, basınçlı hava maliyeti, hava sızıntıları, basınç düşüşü hesaplanabilir ya da tahmin edilebilir.

Kaya ve arkadaşları, basınçlı hava sisteminde bazı potansiyel tasarruf kalemlerine ait hesap yöntemlerini vermiş ve bir sanayi kuruluşunda elde edilebilecek kazanım miktarlarını hesaplamışlardır [7]. Bu çalışmada, mevcut basınçlı hava sistemlerinde bazı modifikasyonlarla enerji maliyetinin nasıl azaltılacağı da ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu kazançlara ilişkin yatırım maliyetleri ve geri ödeme süreleri de hesaplanmıştır.

Saidur, DHS kontrol sisteminin mevcut motorlarda getireceği enerji kazancını hesaplamış ve bu sistemin kompresörlerde kullanımı hakkında bilgi vermiştir [9]. Bu çalışmada, DHS sisteminin kullanımının enerji maliyetini %15-40 arasında azalttığı ve yumuşak duruş ve kalkışlarla ekipman ömrünü uzattığı belirtilmiştir. Buna rağmen, 200 hp bir motor için DHS uygulama maliyetinin 45.000 \$ civarında olduğu belirtilmiştir.

Sapmaz ve arkadaşları, 4 aktif ve 4 yedek kompresörden oluşan ve ortalama 12000 Nm³/h kapasiteyle çalışan bir basınçlı hava şebekesi için yağsız vidalı kompresörleri kullanılarak atık ısı geri kazanım uygulaması yapıldığı takdirde mali olarak 145\$/h eşdeğeri ısı enerji geri kazanılabileceğini ifade etmişlerdir. Kompresör sisteminin 20 yıl süre ile faaliyette kalması sağlandığında atık ısıdan 128239720 kWh termal enerji ve bunun karşılığı 20.000.000 \$ üzerinde bir mali kazancın sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır [10].

Yapılan literatür taramasında ulaşılan çalışmalar genellikle kompresör tasarımına ait geliştirmeler sunmaktadır. Pek az çalışmada ise kompresörlerde yapılabilecek enerji kazanımlarına ilişkin hesap yöntemleri açıklanmaktadır. Aşağıda basınçlı hava sistemlerinde potansiyel tasarruf imkânları başlıklar halinde incelenmiş ve gerekli hesaplama yöntemleri verilmiştir. Farklı tesislerde yapılan endüstriyel ölçümler ve bahsedilen hesap yöntemleri uygulanarak basınçlı hava sistemleri analiz edilmiştir. Hesaplama yöntemlerinin tutarlı cevaplar sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca, elde edilen enerji kazanımları ile meydana gelecek yıllık emisyon azaltım miktarı hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı; sanayi kuruluşlarında basınçlı hava kaynaklı enerji kayıplarını azaltmaya ve enerji tasarrufu sağlamaya yönelik çalışmalara rehberlik etmektir.

2. ENERJİ VERİMLİLİĞİ FIRSATLARI

2.1 Atık Isı Geri Kazanımı

Basınçlı hava elde etmek için kompresörlerde harcanan elektrik enerjisinin %80~93'ü ısı enerjisine dönüşmektedir [11]. Üretim veya proses aşamasında, ısıtma amaçlı elektrik, gaz veya sıvı yakıt kullanılıyorsa, bu yöntemlerden birinin kısmen ya da tamamen yerini kompresörden elde edilecek ısı enerjisine bırakma olasılığı vardır. Çeşitli sistemler kullanılarak kompresör yağ, soğutma suyu veya sıcak havadan çekilen ısı; konfor ısıtması, kazan yanma havası, besleme suyu ön ısıtması, proses ısıtması ve diğer amaçlar için kullanılabilir. Geri kazanılan ısı enerjisi kazancı belirlerken, elde edilecek sıcaklık seviyeleri, olası kullanım alanlarını belirler. Bir sıkıştırma sürecinde basınç artışına bağlı olarak hava sıcaklığında meydana gelecek artış Denklem 1'e göre hesaplanabilmektedir [12].

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1 \times \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

Hava ile soğutma yapılması durumunda kompresör kabininden 85-90 °C sıcaklıkta hava çıkışı olacaktır. Kompresör yüzeylerinden bulaşabilecek yağ ve toz parçacıklarının varlığı, kullanımda göz önünde bulundurulmalıdır. Sıcak havanın fırın ve kazanlara yakma havası olarak kullanılması uygundur.

Su soğutmalı kompresörlerde mevcut durumda kompresörlerin soğutma devrelerindeki ısı yükü; soğutma kulesi veya radyatörler kullanılarak atmosfere atılmaktadır. Bu ısı yükünü, uygun eşanjör kullanılarak ısı ihtiyacı olan farklı bir devreye aktarılması mümkündür. Ayrıca, kompresörden gelen bu kaynak, sıcaklığın yetersiz olduğu durumda ısı pompası yardımıyla daha yüksek sıcaklığa çıkarılabilir.

2.2 Kaçakların Önlenmesi

Pratikte basınçlı hava; filtrelerde, borularda, valflerde, bağlantı noktalarında sürtünme ya da kaçaklar ile basıncını kaybeder. Verimli çalışan bir sistemde basınç kaybı, sistemin kompresöre en uzak noktasında, en fazla %10 civarında olmalıdır [13].

Basınçlı hava sistemlerinde meydana gelen basınç kayıpları 3 ana grupta toplanabilir: sızıntılarla oluşan hava kaybı, sanal talep ve gereksiz kullanım [14]. Sızıntı, pnömatik sistemlerde enerji kayıplarının en büyük kaynaklarından biri ve enerji verimliliğini artırmak konusunda en basit ve ucuz araçtır. Aktif sızıntı tespiti ve yeterli bakım işlemi ile sızıntı miktarı toplam basınçlı hava üretiminin %10'undan daha aşağı çekilebilir [14].



Sızıntıların tespiti, ölçülmesi ve tamir edilmesi, kompresör çalışma süresinin azaltılması ve bu sayede kompresör ömrünün uzatılmasına, gereksiz kompresör kapasitesinin azaltılmasına, basınçlı hava ile çalışan cihazların verimini ve çalışma kalitesini düşüren, potansiyel olarak duruşlara neden olan basınç dalgalanmalarının engellenmesine, fazla bakım sürelerinin ortadan kaldırılmasına katkı sağlamaktadır [5].

Gürültülü fabrika ortamında, kokusu ve rengi olmayan havanın, sızıntı durumunda fark edilmesi imkânsızdır. Bu durumda sızıntı tespiti için ultrasonik sızıntı ölçüm cihazları kullanılabilir. Bu cihazlar yardımıyla sızıntıların şiddeti (db) ölçümü alınabilir. Farklı hat basınçları için ölçülen db değerlerine karşılık gelen yaklaşık hava debileri tablolar yardımıyla hesaplanabilir. Basınçlı hava hattından sızan hava debisi tespit edildiğinde, kompresörün birim havayı sıkıştırmak için harcayacağı enerjiden yola çıkılarak Denklem 2'ye göre kaçak havanın sıkıştırılması için harcanmış olan güç miktarı hesaplanabilir [7]. Sızıntı nedeniyle oluşan Güç Kaybının (GK) hesaplanması için kullanılan denklem; hat basıncı, çevre basıncı, motor verimi ve kompresör izentropik verimine de bağlıdır.

$$GK = \frac{P_i \times C \times V_f \times N \times \frac{k-1}{k} \times \left[\left(\frac{P_0}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k \times N}} - 1 \right]}{\eta_a \times \eta_m} \quad (2)$$

2.3 Emiş Havası Sıcaklığı

Yer değiştirmeli kompresörlerin verimliliği sıkıştırılan havanın sıcaklığı ile ters orantılıdır. Bu nedenle, yaz aylarında kompresör emiş havasının kanallarla dışarıdan alınması enerji verimini arttıracaktır [15]. Ülkemiz coğrafi konumu dikkate alınarak, yaz aylarında dışarıdan alınacak havanın mümkün ise doğrudan güneş ışınımına maruz kalmayan kuzey cepheden alınması önerilmektedir.

Kompresör motorları ve vidalı kompresörlerde sıkıştırma elemanı proses gereği ısı yaymaktadır. Bu nedenle, kompresör odasında yeterli havalandırma sağlanmamış ise kompresör dairesi dış ortama oranla daha sıcak olacaktır. Özellikle yaz aylarında iç-dış ortam sıcaklık farkı çok artmakla birlikte bu değer kış aylarında dahi havalandırma yapılmayan kompresör dairelerinde 10-15 °C'ye ulaşmaktadır. Emiş havasının daha soğuk olması durumunda elde edilebilecek Oransal İş Kazancı (Wr) Denklem 3'e göre hesaplanabilmektedir. Elde edilen iş kazancı Denklem 4'e göre Yıllık Enerji Kazancına (YEK) çevrilebilir ve Denklem 5 kullanılarak Yıllık Mali Kazanç (YMK) hesaplanabilir [4]. Denklem 5, bu makale içerisinde gerçekleştirilen tüm enerji kazanımlarının, mali kazanımlara dönüştürülmesi için kullanılacaktır. Denklemde kazan-

cın yapıldığı enerji türü -elektrik, buhar, doğalgaz vb.-dikkate alınarak uygun Enerji Fiyatı (EF) kullanılmalıdır.

$$W_r = \frac{(W_1 - W_0)}{W_1} = \frac{(T_1 - T_0)}{T_1} \quad (3)$$

$$YEK_i = \frac{P \times YF \times H \times W_r}{n_{motor}} \quad (4)$$

$$YMK = YEK \times EF \quad (5)$$

2.4 Çıkış Basıncının Düşürülmesi

Düşük basınç gerektiren bir uygulamada orta/yüksek basınçta havanın kullanılması da havanın yanlış kullanımına bir örnektir. Bu durumun önüne geçmek için ihtiyaç duyulan hava basıncı tespit edilmeli ve kompresör bu değerlere uygun şekilde seçilmelidir. Kompresörün daha düşük basınçta çalışmasıyla meydana gelecek oransal iş kazancının hesaplama yöntemi Denklem 6'da verilmiştir [16]. Oransal iş kazancının toplam enerji kazancına dönüştürülmesi için Denklem 7 kullanılmaktadır.

Bazı durumlarda müstakil donanımlar yüksek basınç gerektirmektedir. Bu donanımların yeniden tasarlanması ya da yüksek basınçlı cihazların hava talebinin karşılanması için ikinci bir kompresör kullanılması ekonomik olmaktadır [9].

$$FR_i = \frac{\left(\frac{(P_{dp} + P_0)}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k \times N}} - 1}{\left(\frac{(P_{dp} + P_i)}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k \times N}} - 1} \quad (6)$$

$$YEK_j = \frac{P \times YF \times H \times (1 - FR_i)}{n_{motor}} \quad (7)$$

2.5 Yüksek Verimli Motor Kullanımı

Elektrik tahrikli bir kompresörün enerji tüketimi temel olarak elektrik motorunun enerji tüketimidir. Mevcut kompresör sistemlerinin elektrik motorlarının verim değerleri hesaplanarak değerlerin uygunluğu incelenmelidir. Elektrik motorunun daha verimli bir motor ile değiştirilmesi durumunda elde edilecek kazanç hesaplamaları Denklem 8'e göre yapılabilmektedir [4].



$$YEK_k = P \times YF \times H \times \left(\frac{1}{n_{std}} - \frac{1}{n_{ev}} \right) \quad (8)$$

2.6 DHS Kullanımı

Geleneksel elektrik motorları kompresörlerde %50 ve daha aşağısında yükleme değerlerinde dahi nominal gücün %60-80'i oranında enerji tüketmektedirler [4]. Hava kompresörlerinin deplasmanı ve krank mili dönme hızı yaklaşık olarak doğru orantılıdır; hava yer değiştirmesi kompresörü tahrik eden motorun dönme hızı ayarlanarak değiştirilebilir. Hava kompresörünün birim hava debisi; motor dönme hızı inverter yardımıyla kontrol edilebilir ve bu sayede hat basıncı kontrol edilebilir [17].

3. EMİSYON AZALTIMI

Yukarıda önerilen ve basınçlı hava sistemlerinin enerji verimli olarak kullanılmasını sağlayacak olan yöntemlerin enerji tüketiminde sağladığı kazanç, emisyonlarda meydana gelecek doğrudan kazanç (azaltım) anlamına gelmektedir. Her bir yakıt için emisyon değerlerinin hesaplanmasında yakıtta özgü emisyon faktörü (EMF) ve yakıt tüketimi kullanılır [18]. Elektrik üretimi açısından emisyon değeri ülke enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıtların emisyon faktörleri ve toplam elektrik üretimindeki payları ile hesaplanmaktadır. Birim elektrik enerjisi başına CO₂ emisyonu 0,462 kg CO₂/kWh olarak kullanılmıştır. Doğalgaz emisyon faktörü ise 0,2028 kg CO₂/kWh ısı (56100 kg CO₂/TJ ısı) olarak doğalgaz olarak ifade edilmektedir [19]. Literatürde enerji üretiminden kaynaklı emisyon miktarları için hesaplamalar verilmektedir. Bu çalışmada amaçlanan ise önlenen emisyon miktarının hesaplanmasıdır. Önerilen her bir çözüm yöntemiyle tasarruf edilecek kaynak türünün (elektrik, doğalgaz) miktarı ve özel emisyon faktörünün çarpımı ile emisyon azaltımı hesaplanabilmektedir. Denklem 9'da EMF, yukarıda değerleri verilen emisyon faktörlerini ve YEK ise Denklem 4, 7 ve 8 yardımıyla hesaplanan yıllık enerji kazancını ifade etmektedir. Bu değerler bilindiğinde Yıllık Emisyon Azaltımı (YEA) hesaplanabilmektedir.

$$YEA = EMF \times YEK \quad (9)$$

4. SAHA ÇALIŞMALARI

Basınçlı hava sistemlerinde yukarıda belirtilen tasarruf ölçüm ve hesapları 3 farklı tesiste 6 aylık dönem içerisinde uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar firma yönetimlerine raporlanarak sunulmuştur.

4.1 Atık Isı Geri Kazanımı

Atık ısı uygulaması yapılan bir tesiste 5 adet aktif kompresörün 4'ünün enerji geri ka-

zanım sistemine uyumlu olduğu görülmüştür. Kompresörlerin yük faktörü %95 olduğu ve sürekli çalıştıkları gözlenmiştir. Kompresör soğutma sistemi soğutma kulesine bağlı olup, ölçüm alınacak uygun bağlantı noktaları ve hat üstü cihazlar bulunmadığı için kompresöre giren elektrik enerjisinin sadece %75'inin geri kazanılabildiği kabul edilmiştir. Kompresör soğutma suyunun şarj ısıtmasında kullanılmasıyla sağlanacak enerji tasarrufu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Atık Isıdan Faydalanılması ile Potansiyel Enerji Kazancı

	Motor Gücü (kW)	kW	kWh/YIL	Doğalgaz (Sm ³ /Yıl)	TL/ Yıl
TOPLAM	1200	900	7.200.000	609.022	509.289

Atık ısıdan faydalanılması ile doğalgaz yakıtlı kazanın kullanımı azalacaktır. Bu uygulama ile sağlanacak emisyon azaltımı, doğalgaza ait emisyon faktörü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$YEA=0,2028 \times 7.200.000=1.460.160 \text{ kg CO}_2$$

Enerji kazancı çevresel ve ekonomik kazancın göstergesidir. Fakat soyut bir kavram olan enerji miktarının somut bir gösterge olan doğalgaz miktarına ya da anlaşılması basit olan mali kazanca çevrilmesi farkındalık sağlamaktadır.

Atık ısı uygulaması yapıldığı takdirde yıllık 500.000 TL üzerinde bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Atık ısı uygulaması için tesisat üzerinde uygun boyutta ısı değiştirici konulması ve ısının nakledilmesi için borulama yapılması gerekmektedir.

4.2 Kaçakların Önlenmesi

Basıncılı hava sızıntı miktarını tespit etmek üzere bir endüstriyel tesisteki 700 kPa

Tablo 3. Sızıntıların Enerji ve Mali Eşdeğerleri

Sıra No	Fotoğraf No	dB	Güç Kaybı (kW)	Vf (l/s)	Enerji Kaybı (kWh/yıl)	Enerji Maliyeti (TL/yıl)
1	5149	75	0,43	2,45	3782	727
2	5150	50	0,24	1,41	2177	418
3	5153	55	0,27	1,55	2393	460
...
20	5167	80	0,60	3,43	5296	1018
21	5168	50	0,24	1,41	2177	418
22	5169	58	0,29	1,64	2532	487
	Toplam		7,02	39,72	61341	11797



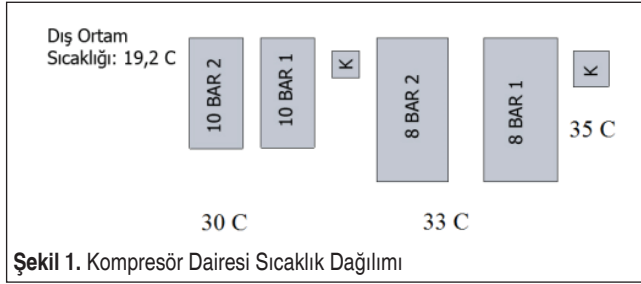
basıncılı hava hattında, ultrasonik sızıntı ölçüm cihazı ile yapılan çalışmada 22 farklı noktada sızıntı kaçağı tespit edilmiştir. Bu noktalarda oluşan sızıntı miktarı cihazın ölçtüğü ses şiddeti desibel (db) değeri ve tablolar kullanılarak hesaplanmıştır. Tespit edilen 22 farklı noktada meydana gelen sızıntı kayıpları Tablo 3'te görülmektedir. Güç kaybı hesaplamasında tesisin yılda 8000 saat çalıştığı kabul edilmiştir.

Tüm sızıntıların önlenmesi ile yıllık 61341 kWh enerji tasarrufu yapılabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan bir ise güç kaybı sütunudur. Tesiste kullanılan kompresörün 7 kW güç değerini sızıntılara harcamaktadır. Toplam sızıntı miktarı ise 39 l/s değerine ulaşmaktadır. Sızıntıların önlenmesi ile sağlanabilecek yıllık emisyon azaltımı aşağıda hesaplanmıştır.

$$YEA=0.462 \times 61.341 = 28.339 \text{ kg CO}_2$$

4.3 Emiş Havası Sıcaklığı

Uygulama yapılan tesisin kompresör dairesinde 800 ve 1000 kPa basınçlarda çalışan 2 aktif ve 2 yedek kompresör ile 2 adet kurutucu bulunmaktadır. Kompresör dairesinde hava kanalları mevcut olup cebri iklimlendirme yapılmamıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, kompresör dairesinde yapılan ölçümlerde dış ortam sıcaklığının 19 °C olduğu bir günde kompresör dairesindeki ortalama sıcaklık 30 °C olarak ölçülmüştür.



Kompresör hava emiş kanallarının dışarıya alınması ile emiş sıcaklığı yaklaşık 10 C azaltılabilmektedir. Bu durumda elde edilebilecek kazanç 800 ve 1000 kPa için 1'er kompresörün yıllık 8.000 saat çalıştığı ve yük faktörünün %80 olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$W_r = \frac{(303-293)}{303} = 0,033$$

Bu durumda kompresör %3,3 daha az çalışarak normal işletmesini sürdürecektir. 800 kPa ve 1000 kPa kompresörleri için elde edilecek kazançlar aşağıda hesaplanmıştır. 315 kW motor gücünde olan 800 kPa kompresörü için;

$$YEK_i = \frac{315 \times 0,8 \times 8000 \times 0,033}{0,91} = 73.107 \text{ kWh}$$

$$YMK = 73107 \times 0,191325 = 13.987 \text{ TL}$$

132 kW motor gücünde olan 1000 kPa kompresörü için;

$$YEK_i = \frac{132 \times 0,8 \times 8000 \times 0,033}{0,91} = 30.635 \text{ kWh}$$

$$YMK = 30.635 \times 0,191325 = 5861 \text{ TL}$$

Toplam Kazanç

$$\text{Toplam YEK} = 73.107 + 30.635 = 103.742 \text{ kWh}$$

$$\text{Toplam YMK} = 13.987 + 5861 = 19.848 \text{ TL}$$

$$YEA = 0.462 \times 103.742 = 47.928 \text{ kg CO}_2$$

4.4 Çıkış Basıncının Düşürülmesi

Yoğun Faz Pnömatik Taşıma (YFPT) sistemi kullanılan bir tesiste taşıma sistemine 700 kPa olarak gelen basınçlı hava regülatörle 350 kPa basınca düşürülerek kullanılmaktadır. Bu işlem için yeterli basınç 350 kPa olmasına rağmen, 700 kPa basınçta hava kullanılması maliyeti arttırmaktadır. Bahsedilen hattın 6 aylık ortalama hava tüketimi 1500 m³/h'tir. Aynı dönemde tüm sistemin ortalama hava debisi ise 14.657 m³/h'tir. Bu değerler incelendiğinde, 700 kPa olarak üretilen havanın 1/10'u 350 kPa' a düşürülerek kullanılmaktadır. Tesislerin birincil hava kompresörleri toplam etiket gücü 2627 kW'tır. Bu enerjinin %10'luk kısmı olan 262,7 kW enerji YFPT hattında kullanılacak olan havanın sıkıştırılmasında kullanılmaktadır.

Bu hattın 700 kPa yerine 350 kPa ile beslenmesi enerji maliyeti açısından en ekonomik çözüm olacaktır. Piyasada ihtiyaç duyulan kapasitede bulunan en düşük basınç 500 kPa olduğu görülmüştür. Bu nedenle, 500 kPa basınçta çalışabilen kompresör için hesaplama yapılmıştır.

$$FR_i = \frac{\left(\frac{(500+101,3)}{101,3} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4 \times 1}} - 1}{\left(\frac{(700+101,3)}{101,3} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4 \times 1}} - 1} = 0,82$$

$$YEK_j = \frac{262,7 \times 0,8 \times 8000 \times (1-0,82)}{0,92} = 328.946 \text{ kWh}$$



$$YMK=328.946 \times 0,191325=62.935 \text{ TL}$$

$$YEA=0.462 \times 328.946=151.973 \text{ kg CO}_2$$

4.5 Yüksek Verimli Motor Kullanımı

Yapılan endüstriyel uygulamalarda 50 kW gücünde bir kompresör motorunun verim değeri %83,48 olarak hesaplanmıştır. Bu kompresörün motorunun %95 verimle çalışan yeni bir motorla değiştirilmesi durumunda elde edilecek kazanç Denklem 8'e göre hesaplanmıştır.

$$YEK_k=50 \times 0,8 \times 8000 \times \left(\frac{1}{0,83} - \frac{1}{0,95} \right) = 87.660 \text{ kWh}$$

$$YMK=87.660 \times 0,191325=16.771 \text{ TL}$$

$$YEA=0.462 \times 87.660=40.498 \text{ kg CO}_2$$

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 3 farklı sanayi tesisinin basınçlı hava sistemleri enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Çalışma ile enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı sağlanan başlıca uygulamalar; kompresör atık ısısından faydalanılması, basınçlı hava hatlarındaki sızıntıların önlenmesi, kompresör emiş havasının olabildiğince serin bir ortamdan alınması, kompresör motorunun daha verimli bir motor ile değiştirilmesidir. Yapılan çalışma ile 3 farklı tesisin basınçlı hava sistemlerinde önerilen metotlar kullanılarak 7.781.689 kWh/yıl enerji tasarrufu potansiyeli tespit edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Önerilen Uygulamalar ile Gerçekleştirilebilecek Enerji ve Mali Tasarruf ile Önlenecek Emisyon Miktarları

Tesis No	Uygulama	Enerji Kazanımı kWh/Yıl	Maddi Kazanım TL/Yıl	Önlenen Emisyon kg CO ₂ /Yıl
Tesis 1	Atık Isı Geri Kazanımı	7.200.000	509.289	1.460.160
Tesis 2	Sızıntıların Tamiri	61.341	1.1797	28.339
	Kompresör Hava Giriş Sıcaklığının Düşürülmesi	103.742	1.9848	33.775
Tesis 3	Kompresör Çıkış Basıncının Düşürülmesi	328.946	62.935	151.973
	Yüksek Verimli Motor Kullanımı	87.660	17.770	40.498
Toplam		7.781.689	621.639	1.714.745

Atık ısı kaynağının doğalgaz yakıtlı sıcak su kazanını ikame eden/destekleyen kullanımını ile 7.200.000 kWh/yıl ısılı enerji tüketimi ve 1.460.160 kg CO₂ emisyonu önlenmiştir. Enerji tasarrufu 609.000 Sm³ doğalgaz tüketimine eşdeğerdir.

Tesiste ultrasonik debimetre ile 22 farklı noktada, farklı çaplarda deliklerden sızıntılar gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sızıntıların giderilmesi ile 61.341 kWh/yıl elektrik enerjisi tasarrufu ve 11.797 TL/yıl mali tasarruf potansiyeli tespit edilmiştir.

Kompresör dairesi içerisinde sıcaklığın dış ortam sıcaklığından yaklaşık 10 °C daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Kompresör emiş kanalları kompresör dairesi dışına çıkarılarak emiş hava sıcaklığı düşürülebilecektir. Bu uygulama ile 103.742 kWh/yıl elektrik enerjisi ve 19.848 TL/yıl mali tasarruf potansiyeli tespit edilmiştir.

Kompresör çıkış basıncına bağlı olarak özgül sıkıştırma işi artmaktadır. Uygulama çalışmasında 700 kPa havanın 350 kPa basınca regülatörle düşürülerek kullanıldığı görülmüştür. Bu sistemde 500 kPa basınçta çalışacak yeni bir kompresör kullanılarak 350 kPa basınç ihtiyacının bu kompresör ile sağlanması halinde, 328.946 kWh/yıl elektrik enerji ve 62.935 TL/yıl mali tasarruf potansiyeli tespit edilmiştir.

Sanayi tesislerinde yıpranan motorlar tekrar sarım yapılarak toplam kullanım ömrü arttırılmaktadır. Fakat tekrar sarım işlemi yapılan motorlarda verim değeri düşmektedir. Uygulama çalışması ile verimi %83 olarak ölçülen bir elektrik motorunun %95 verimli yeni bir motor ile değiştirilmesi sonucu, 87.660 kWh/yıl 17.770 TL/yıl mali tasarruf potansiyeli tespit edilmiştir.

Emisyonlarda meydana gelecek azaltım değerlerine ilişkin hesaplamalara göre, atık ısı geri kazanımı ile 1.460.160 kg CO₂/yıl emisyon azaltımı gerçekleştirilebilecektir. Diğer uygulamalarda; sızıntıların önlenmesi ile 28.339 kg CO₂/yıl, emiş havasının dış ortamdaki alınması ile 33.775 kg CO₂/yıl, düşük basınçlı kompresör çalıştırılması ile 151.973 kg CO₂/yıl, yüksek verimli motor kullanımı ile 40.498 kg CO₂/yıl salımı önlenecektir.

SEMBOLLER

C	Çevrim sabiti (3600s/1h)
EF	Enerji birim fiyatı
EMF	Emisyon faktörü
FR ₁	Oransal güç kazancı
GK	Güç kaybı
H	Kompresör yıllık çalışma saati
K	Özgül ısılar oranı (C _p /C _v) hava için 1,4



N	Kompresör kademe sayısı
n_a	Kompresör adyabatik verim
n_{ev}	Enerji verimliliği yüksek motorun verim değeri
n_m	Motor verimi
n_{std}	Standart motor verimi
ÖET	Özgül enerji tüketimi
P	Motor etiket gücü
P_{dp}	Düzeltilmiş kompresör basıncı
P_i	Hat basıncı/Mevcut kompresör basıncı
P_o	Ortam basıncı
P_1	Kompresör emme ortam basıncı
P_2	Kompresör çıkış basıncı
T_o	Düzeltilmiş kompresör emme havası sıcaklığı
T_1	Kompresör emme ortamındaki hava sıcaklığı
T_2	Kompresör çıkışı hava sıcaklığı
V_f	Sızıntı hava debisi
W_0	Düşük hava giriş sıcaklığı için gerekli sıkıştırma gücü
W_1	Yüksek hava giriş sıcaklığı için gerekli sıkıştırma gücü
YEA	Yıllık emisyon azaltımı
YEK	Yıllık enerji kazancı
YF	Kompresör yük faktörü
YMK	Yıllık mali kazanç

KAYNAKÇA

1. **Sullivan, J. A.** 1989. Fluid Power-Theory and Applications, A Reston Book Prentice Hall, USA.
2. **Yuan, C., Zhang, T., Rangarajan, A., Dornfeld, D., Ziemba, B., Whitbeck, R.** 2006. "A Decision-Based Analysis of Compressed Air Usage Patterns in Automotive Manufacturing," Journal of Manufacturing Systems, vol. 25, p. 293-300.
3. **Güleç, M.** 1999. "Pnömatik Sistemlerde Tasarruf Önlemleri ve Yöntemleri," MMO I. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, 3-5 Aralık 1999, İzmir-Türkiye.
4. **Saidur, R., Rahim, N., Hasanuzzaman, M.** 2010. "A Review on Compressed-Air Energy Use and Energy Savings," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, p. 1135-1153.

5. **Dindorf, R.** 2012. "Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems," *Procedia Engineering*, vol. 39, p. 204-211.
6. **Dudić, S., Ignjatović, I., Šešlija, D., Blagojević, V., Stojiljković, M.** 2012. "Leakage Quantification of Compressed Air Using Ultrasound and Infrared Thermography," *Measurement*, vol. 45, p. 1689-1694.
7. **Kaya, D., Phelan, P., Chau, D., Sarac, H. I.** 2002 "Energy Conservation in Compressed-Air Systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 26, p. 837-849.
8. **Yang, M.** 2009. "Air Compressor Efficiency in a Vietnamese Enterprise," *Energy Policy*, vol. 37 (6), p. 2327-2337.
9. **Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari A., Mohammed, H. A.** 2012. "Applications of Variable Speed Drive (VSD) in Electrical Motors Energy Savings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 543-550.
10. **Sapmaz, S., Taylan, O., Coban, V., Cagman, S., Kilicaslan, I., Kaya, D.** 2015. "Selection of Compressors for Petrochemical Industry in Terms of Reliability, Energy Consumption and Maintenance Costs Examining Different Scenarios," *Energy Exploration and Exploitation*, vol. 33 (1), p. 43-62.
11. **Saidur, R., Mekhilef, S.** 2010. "Energy Use, Energy Savings and Emission Analysis in the Malaysian Rubber Producing Industries," *Applied Energy*, vol. 87, p. 2746-2758.
12. **Rabie, M. G.** 2009. *Fluid Power Engineering*, Mc Graw-Hill, New York, USA.
13. British Compressed Air Society. 1992. Basınçlı Hava Servislerinin Seçim ve Tesis Etme Kılavuzu, Çev. Erdoğan Tan, <https://documents.tips/documents/basincli-hava-kilavuzu.html>, son erişim tarihi: 10.01.2017.
14. **Dudić, S., Ignjatović, I., Šešlija, D., Blagojević, V., Stojiljković, M.** 2012. "Leakage Quantification of Compressed Air on Pipes Using Thermovision," *Thermal Science*, vol. 16, p. 621-632.
15. **Talbott, E. M.** 1993. *Compressed Air Systems: A Guidebook on Energy and Cost Savings*, The Fairmont Press, Georgia, USA.
16. **Sapmaz, S.** 2014. "Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Tasarrufu Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
17. **Liang, H., Li, X.** 2011. "Applications of Frequency Conversion Technology in Air-Compressor Units Control System," *Procedia Engineering*, vol. 15, p. 944-948.
18. **Ari, I., Koksal, M. A.** 2011. "Carbon Dioxide Emission from the Turkish Electricity Sector and its Mitigation Options," *Energy Policy*, vol. 39, p. 6120-6135.
19. **Aslanoglu, S. Y., Koksal, M. A.** 2012. "Elektrik Üretimine Bağlı Karbondioksit Emisyonunun Bölgesel Olarak Belirlenmesi ve Uzun Dönem Tahmini," *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, sayı 1, s. 19-29.