

SANAYİDE ENERJİ YÖNETİMİ: POMPA VE FAN SİSTEMLERİNDE VERİMLİLİK ARTIRICI UYGULAMALAR

Hacer AKHAN^{ID}

Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ahmet Karadeniz Yerleşkesi, Edirne 22030, Türkiye

Makale Künye Bilgisi:

Akhan, H. (2022). Sanayide Enerji Yönetimi: Pompa ve Fan Sistemlerinde Verimlilik Artırıcı Uygulamalar, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 11-23.

Öne Çıkanlar

- Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar
- Pompa ve fan sistemlerinde frekans invertör kullanılarak %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır
- Pompa debisini büyük seçip pompayı düşük debide çalıştırmak veya çıkış vanasını kısmak enerji tasarrufu sağlamamaktadır.

Makale Bilgileri

Öz

Makale Tarihçesi:

Geliş:
21 Aralık 2022
Kabul:
21 Şubat 2022

Anahtar Kelimeler:

Enerji yönetimi;
Enerji verimliliği;
Verimlilik artırıcı
proje;
Frekans inverter;
Değişken hızlı
sürücü.

Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli ve tasarruflu kullanılmasını sağlamak üzere yürütülen eğitim, enerji etüdü, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama faaliyetlerini kapsamaktadır. Bu çalışmanın amacı, sanayide pompa ve fan sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve analiz etmektir. Deneylerde, hangi koşullarda pompa ve fanların verimli kullanılabileceğinin tespiti için çeşitli varyasyonlar yapılmıştır. Pompa debisini büyük seçip pompayı düşük debide çalıştırmak veya çıkış vanasını kısmak tasarruf sağlamamaktadır. Çalışmada ele alınan başlıca enerji verimliliği uygulamaları, kalite ve performansı düşürmeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesi için pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımınıdır. Analiz sonucunda enerji yönetimi ve enerji verimliliği uygulamaları ile, değişken debili fan ve pompa sistemlerinde frekans invertör kullanılarak %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Çalışmanın literatüre temel katkısı, frekans invertör kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltılmasının vurgulanmasıdır.

ENERGY MANAGEMENT IN INDUSTRY: EFFICIENCY IMPROVEMENT APPLICATIONS IN PUMP AND FAN SYSTEMS

Article Info

Abstract

Article Info:

Received:
December 21, 2022
Accepted:
February 21, 2022

Energy management includes training, energy audit, measurement, monitoring, planning, and implementation activities carried out to ensure efficient and economical use of energy resources and energy. The aim of this study is to demonstrate and analyze energy management practices to increase energy efficiency in pump and fan systems in industries. In the experiments, various variations were made to determine under which

Keywords:

Energy management;
Energy efficiency;
Energy efficiency
improvement project;
Frequency inverter;
Variable speed drive.

conditions pumps and fans could be used efficiently. Selecting the pump flow rate large and operating the pump at low flow rate or throttling the outlet valve does not save energy. The main energy efficiency applications discussed in the study are the use of frequency inverters in pumps and fans to minimize the amount of energy consumed without reducing quality and performance. As a result of this study, with energy management and energy efficiency applications, 60% energy savings were achieved by using frequency inverters in variable flow fan and pump systems. The main contribution of the study to the literature is to emphasize the reduction of energy waste, losses, and inefficiencies with the use of frequency inverters.

1. Giriş

Nüfus artışı, kentsel gelişim ve sanayileşme ile dünya birincil enerji tüketimi de giderek artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasına neden olan temel etkenlerin başında nüfus artışı gelmektedir. Yapılan projeksiyonlar 2040 yılında dünya nüfusunun 9 milyara yükseleceğini göstermektedir. Bu durum 1,9 milyar insan için artı enerji arzı sağlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Elektrik üretimi için kullanılan enerji miktarının 2040 yılına kadar yıllık ortalama %2 olmak üzere %70 oranında artacağı beklenmekte olup bu artış, küresel birincil enerji büyüme oranının %42'sine karşılık gelmektedir (AEO, 2018). Sanayide kullanılan birincil enerji tüketiminde %81 oranında artış öngörülmekte olup bu oran, dünya birincil enerji büyüme oranının %50'sini oluşturmaktadır. Bu noktada sanayide enerji yönetimi ile verimliliğin artışı ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli ve tasarruflu kullanılmasını sağlamak üzere yürütülen eğitim, enerji etüdü, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama faaliyetlerini kapsamaktadır. Enerji tasarrufu, yeni teknolojilerin kullanımı ile üretimi, kaliteyi ve performansı düşürmeden, sosyal refahı engellemeden enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının üretimden, iletim- dağıtım ve tüketime kadar tüm aşamalarda en yüksek etkinlikte değerlendirilmesidir. Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin,

endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerji verimliliğinin amacı, enerjinin etkin kullanılması, israfın önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasıdır. Temel hedef, birim milli gelir başına tüketilen enerjiyi azaltmaktır. Vizyonu, enerjinin tamamını faydaya dönüştüren bir ülke, kişi başına enerji tüketimi yüksek ve enerji yoğunluğu düşük ülkeler arasında yer almaktır.

Dünyada kullanılan enerjinin; %40'ı binalarda, %32'si ulaşımda ve %28'i sanayide harcanmaktadır (IEA, 2018). Bu noktada sanayide enerjinin verimli kullanılması ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Sanayide enerji tasarrufu makinaları kapatmakla prosesi engellemekle veya durdurmakla yapılamayacağına göre, asıl amacı üretim olan sanayi tesislerinde enerji yönetim sistemi oluşturulur. Çünkü enerji, en düşük tüketim ile son ürünü gerçekleştirmek için iyi şekilde yönetilmeyi bekler. Bir fabrikadaki üretim maliyetleri, ham madde, işçilik, işletme ve enerji maliyetlerinin toplamını içerir. Enerji maliyetleri sanayi sektörünün tipine, kullanılan proseslere, ham maddelere ve imal edilen son ürüne bağlı olarak toplam üretim maliyetlerinin %50' sinin üzerine çıkabilir (EYDN, 2021).

Endüstriyel işletmelerde; enerji etüt çalışması ile belirlenen önlemlerin uygulanması ve enerji tasarruf

potansiyelinin geri kazanılması için hazırlanan projeler Verimlilik Artırıcı Proje (VAP) olarak ifade edilmektedir. VAP endüstriyel işletmelerde enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin giderilmesi için gerekli önlemlerin uygulanması amacıyla hazırlanır. Endüstride enerji yönetimi uygulamaları ile enerjinin verimli kullanılmasını sağlayan başlıca uygulamalar: talep tarafı yönetimi, üretim, iletim, dağıtım tesislerinde ve açık alan aydınlatmalarında verimliliğin artırılması, termik santrallerin rehabilitasyonu ve atık ısısından yararlanılması, alternatif yakıt kullanımının özendirilmesi, enerji verimliliği için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, enerji yoğunluğunun azaltılması, yanma sonucu düşük CO₂ emisyonu çıkaran yakıtlara geçilmesi, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, enerji üretiminde kaynak çeşitliliğine gidilmesi, yakıt kalitesinin iyileştirilmesidir. Verimlilik artırıcı projeler yardımıyla enerji tüketimi azaltılır, enerji tüketiminin azaltılması ile enerjiden kaynaklanan masraflar kontrol altında tutulur ve azalır. Cihaz ve ekipman kullanımı kontrol altında tutulur ve enerji tüketiminin izlenmesi yoluyla performans hakkında bilgi edinilir, israftan kaynaklanan olumsuz çevre etkisi azaltılır, emisyon izleme ve raporlama için sistem hazırlanır ve uygulanır, enerji bilinci ile ilgili olarak toplum içinde saygınlığı artırır.

Enerji yönetimi kavramı ilk defa ikinci dünya savaşı sonrası bir İngiliz bilim adamı tarafından kullanılmıştır. Genelde binalar için kullanılmıştır. 1973 petrol krizinden sonra bu kavram sanayide de kullanılmaya başlamıştır (EYDN, 2021). Bunse ve ark. (2011) üretim alanındaki enerji yönetimini kontrol, izleme ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi gibi faaliyetler olarak tanımlamıştır. Her iki kavram arasında bir ilişkide bulunan Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2012) tanımı: "Enerji yönetimi, enerji kullanımının sistematik olarak izlenmesini, analizini ve planlanmasını içerir. Enerji yönetim sistemleri arasında enerji yönetimi faaliyetleri, uygulamaları ve süreçleri yer almaktadır". Thollander

ve Palm (2015) "Enerji yönetimi, bir şirketin enerji üzerinde stratejik olarak çalıştığı prosedürler olarak tanımlanabilirken, bir enerji yönetim sistemi bu prosedürleri uygulamak için bir araçtır" olarak tanımlamıştır. Literatür taramasında Schulze ve ark. (2016) enerji yönetiminin "strateji/planlama, uygulama/işletme, kontrol, organizasyon ve kültür"den oluştuğunu tanımlamıştır. Enerji yönetimi; planlama, koordinasyon ve kontrol gibi birbirinden bağımsız olduklarında etkisiz kalabilecek işlevlerin bir araya gelerek oluşturdukları bir bütündür. Sanayide Enerji Yönetimi ise; ürün kalitesinden, güvenlikten veya çevresel tüm koşullardan fedakarlık etmeksizin ve üretimi azaltmaksızın enerjinin verimli kullanımı doğrultusunda yapılandırılmış ve organize edilmiş disiplinli bir çalışmadır. Sanayinin enerjisi verimli kullanma gereksinimi üç zaman diliminde incelenebilir: 1973 Petrol Krizi Sonrası, 1980'lerde yaşanan teknolojik gelişmeler, 1990'larda gelişen enerji ve çevre bilinci.

Dünyanın farklı ülkeleri enerji verimliliği önlemlerinin yetersizliği sorununu ele alıp enerji yönetimi alanında çeşitli araştırmalar yapmıştır (Cagno ve ark., 2013; Lozano et al. 2018). Örneğin, Çin (Zhang ve ark., 2015), Amerika Birleşik Devletleri (Worrell ve ark., 2000), Etiyopya (Tesema ve Worrell, 2015), Tayland (Hasanbeigi ve ark., 2011) ve Türkiye'den (Ates ve Durakbasa, 2012) daha önce yapılan çalışmalar çimento endüstrisindeki enerji verimliliğinin potansiyelini farklı bir bakış açısıyla araştırdı. Hasan ve arkadaşları (2018, 2019), Bangladeş endüstrisinde enerji verimliliği üzerine daha önce yapılan iki araştırmayı araştırmıştır. Andersson ve Thollander (2010) İsveç kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde enerji ile ilgili temel performans göstergelerinin mevcut uygulama ve operasyonel hale getirme seviyesini incelemiştir. Backlund ve ark. (2012) yönetim faaliyetlerinden kaynaklanan enerji verimliliği potansiyelinin, enerji yoğun endüstriler için daha fazla

enerji verimli teknoloji uygulama potansiyelinden daha büyük olduğunu tahmin etmiştir.

Literatürde, kuruluşlarda enerji davranışı (Andrews ve Johnson, 2016) ve çevresel davranışlar (Cheng ve ark., 2019) üzerine çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalar kuruluşlardaki davranış kuramından ortaya çıkmaktadır. Bir organizasyon yapısında, şirketin operasyonlarına liderlik etmek için bir yönetim ekibi önemlidir (Tiller, 2012). Sola ve Mota (2020) endüstrilerde enerji yönetimini etkileyen faktörleri bu açılarından analiz etti. Martin ve ark. (2012) tarafından geliştirilen bir çalışma daha iyi enerji verimliliği ve üretkenliğinin yönetim uygulamalarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir. Neves ve ark. (2017) tarafından geliştirilen bir araştırmaya göre pazar, çevre yönetim sisteminin (ISO 14001) benimsenmesini de etkilememektedir. Rekabet avantajı, ISO 50001'i kuruluşlarda uygulamak için harici bir nedendir (Marimon ve Casadesús, 2017). Bir sanayi şirketi içindeki enerji yönetimi faaliyetleri, biri enerji son kullanımını kontrol eden çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır (Schulze, 2016). Enerji yönetiminin kontrol unsurları arasında veri toplama ve izleme, enerji performansını karşılaştırma ve performans değerlendirmesi yer almaktadır. Bazı üretim şirketleri için ISO 50001 standardına uygun bir enerji yönetim sistemi uygulamak doğal bir ilk adımdır.

Pompalarda uygulanan başlıca verimlilik artırıcı proje örnekleri: değişken hız sürücü DHS (frekans invertör) veya yumuşak yol verici (soft starter) uygulaması, yüksek verimli motor uygulaması, gereğinden fazla kapasitede seçilmiş pompalarda enerji verimliliğini artırıcı önlem olarak pompa çarklarının tornalanarak küçültülmesi çalışmaları, yüksek verimli pompa uygulamalarıdır. Fanlarda değişken hız sürücü (frekans invertör) uygulaması, yüksek verimli motor uygulaması, fan sisteminin modernizasyonu, uygun hava kontrol ve debi ayarlama sistemi çalışmaları,

fanlarda kayıp ve kaçakların önlenmesi çalışmaları ile verim artışı sağlanmaktadır.

Literatürde yer alan pompalarda verimliliği ve enerji tasarrufunu arttırmaya yönelik çalışmalar, daha çok frekans invertör uygulamalarını kapsamaktadır. Ahmed vd. (2022) çok pompalı bir sistemde iki gelişmiş değişken hız sürücüsü (frekans invertör) tekniği (çok pompalı tek sürücülü ve çok pompalı çok sürücülü) kullanarak enerji tasarrufunu incelemiştir. John vd. (2013) su pompası istasyonlarında çoklu pompa-motor sistemlerinde frekans invertör kullanarak enerji verimliliğini üst düzeye çıkartmak ve enerji tüketimini en aza indirerek enerji tasarrufu sağlamıştır. Bakmak vd. (2014) çoklu pompa istasyonlarında çalışan pompa sayısının bir model kontrol algoritmasına bağlı olarak seçimine dayalı çalışma yapmışlardır. Ayrıca Bakmak vd. (2015) diğer bir çalışmalarında enerji verimliliğe göre çalışan pompa sayısını belirlemişlerdir. Bakman ve Gevorkov (2015) paralel başlı pompa istasyonundaki verimliliği incelemiştir. Vodovozov vd. (2016), (2017) ve Vodovozov ve Raud (2017) çoklu pompa sistemlerinde değişken hız sürücüsü (frekans invertör) kullanımı üzerine çalışmalar yaptılar. Luna vd. (2019) su pompalama sisteminde verimliliğini artırmak için bir hibrit optimizasyon yöntemi üzerine çalışmışlardır. Gün boyunca pompalama programını optimize etmek için bir genetik algoritma kullanılmışlardır.

Literatürde yer alan fanlarda elektrik tüketimini azaltma yönelik çalışmalar, daha çok tasarımsal iyileştirmeleri kapsamaktadır. Sen (1997) aksel fanların aerodinamik, mekanik, elektriksel, yapısal ve operasyonel faktörlerinin, fan verimliliği ve minimum güç tüketimi üzerine etkisini incelemiştir. Hustrulid ve Bullock'a (2001) fanlarının çok düşük verimliliğinin ana nedenlerinin, %50'nin altında statik verim sağlayan temel nedenler olan zayıf aerodinamik tasarım, yanlış fan seçimi ve fan sahasındaki zayıf aerodinamikten kaynaklandığını belirtmiştir. Belle (2008), fan

verimliliğinde %10'luk bir artış ile elektrik tüketiminde %10'luk bir azalmanın, yılda 10.81 MW elektrik tasarrufu ile sonuçlanabileceğini bildirmiştir; bunun 10 yılda 16,08 milyon ABD Doları kazanç sağlayacağını belirtmiştir. Literatürde yer alan diğer çalışmalarda Mishra (2004); Panigrahi, Mishra, Divaker ve Sibal (2009), fan verimini arttırmak ve enerji tüketimini azaltmak için fan kanat tasarımı ve frekans invertör kullanımı konularında çalışmıştır. Panigrahi ve Mishra (2014) maden havalandırmasında kullanılan fan kanat profilini enerji verimliliği artıracak, havalandırmada enerji tasarrufu sağlayacak şekilde tasarlamıştır. Souza (2015) fan sistemlerinin performansını ve verimliliğini arttırmak için mühendislik tasarım ilkelerinin nasıl uygulanabileceği ve bunun sonucunun güç tüketimine, işletme maliyetine ve sera gazı emisyonlarına etkisi üzerine çalışmıştır. Okochi ve Yao (2016)' nun çalışmalarında fan sistemlerinin enerji tüketimini en aza indirmek için besleme havası sıcaklığı ve hava akış hızı optimizasyonu ana hedef olmuştur. Besleme havası sıcaklığını kontrol ederek fanların çalışma gücünün yanı sıra ısıtma ve soğutma enerjilerini en aza indirmek mümkündür (Wei, Claridge 2000). Shim vd. (2013) fan enerjisi, statik basınç kontrol stratejileri ile %5-30 oranında azaltılabileceğini belirtmiştir. Yee vd. (2002) fan hızı kontrolü ile enerji tasarrufu ve finansal faydalar sağlanabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına bağlı Enerji Verimliliği Test Laboratuvarındaki “enerji yöneticisi eğitimi” için tasarlanmış pompa ve fan deney düzeneklerinde yapılan, enerji verimliliğini artırıcı uygulamalardan, deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Uygulamalardaki deney koşulları belirlenirken sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma ile kastedilen, laboratuvar ortamında sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşullarının sağlandığı gerçek boyut ve kapasitelerdeki tesisatlarda yapılan kontrollü deneylerdir. Çalışmada, enerji yöneticisi eğitimi

dersleri esnasında yapılan kontrollü deneylerde ölçülen veriler kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen ölçüm verileri kullanarak, farklı çalışma koşullarındaki pompa ve fan sistemleri için verim ve enerji tasarrufu değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, endüstrilerde enerji verimliliğini arttırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve yapılan verimlilik artırıcı deneysel çalışmaların verilerini analiz ederek, pompa ve fan sistemlerinin enerji tasarruf değerlerini belirlemektir. Deneylerde, hangi koşullarda pompa ve fanların verimli kullanılabileceğinin tespiti için çeşitli varyasyonlar yapılmıştır. Çalışmada, pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımı ile gerçekleştirilebilecek enerji verimliliği artırıcı uygulamaları örnekleri ele alınmıştır. Yapılan deneylerde ölçülen veriler ile yapılan hesaplamalar sonucunda, frekans invertör kullanılarak değişken debili fan sistemlerinde ve pompa sistemlerinde %60 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

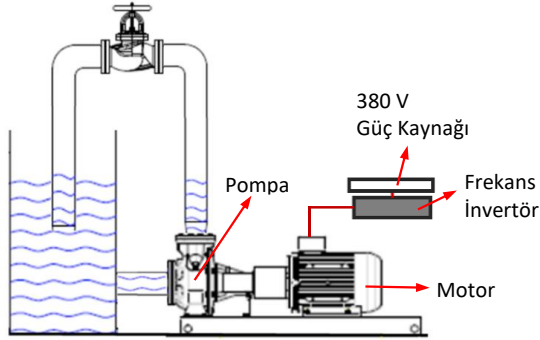
Bu çalışmanın literatüre katkısı, sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşullarının dikkate alınıp, laboratuvardaki deney tesisatlarında bu koşulların uygulanarak, pompa ve fanların hangi koşulda enerji verimliliğini üst düzeye çıkartılabileceğinin ve enerji tüketimini en aza indirilerek enerji tasarrufu sağlanabileceğinin vurgulanmasıdır. Fabrikalarda prosesin kalitesini bozmamak için sabit basınç gerektiğinden, bir sanayi kuruluşunda gerçek uygulamada bu derece değişken koşullarda deney yapmak sakıncalı olmaktadır. Yapılan farklı koşullardaki deney sonuçlarına göre pompa ve fan sistemlerinde değişken hız sürücüsü (frekans invertör) kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltılmasının sağlanmaktadır.

2. Yöntem

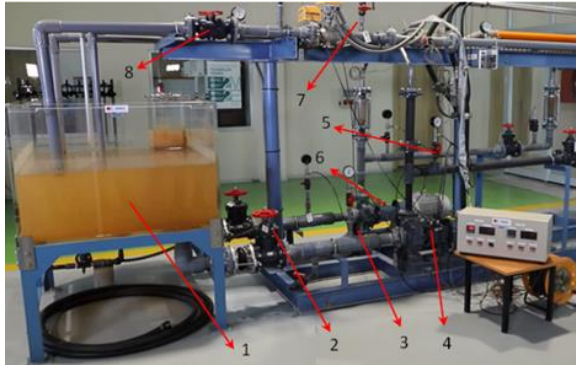
2.1. Deney Tesisatları

Pompa deney tesisatı

Şekil 2’de santrifüj pompa deney tesisatının şematik resmi ve Şekil 3’te fotoğrafı yer almaktadır. Deney tesisatı, pompa, elektrik motoru, su tankı, akış kanalları, vanalar ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır. Tablo 1’de pompa deney tesisatı sistem elemanları listelenmiştir. Sisteminde, pompa yardımıyla su tankından alınan su tekrar tanka pompalanmaktadır. Deneyde statik basma yüksekliği 1 m’dir.



Şekil 2. Pompa deney tesisatı şeması



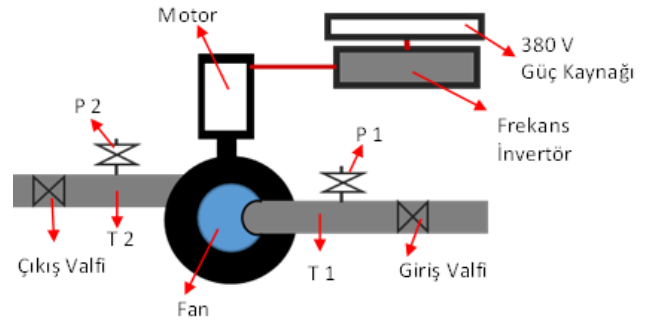
Şekil 3. Pompa deney tesisatı

Tablo 1. Pompa deney tesisatı sistem elemanları

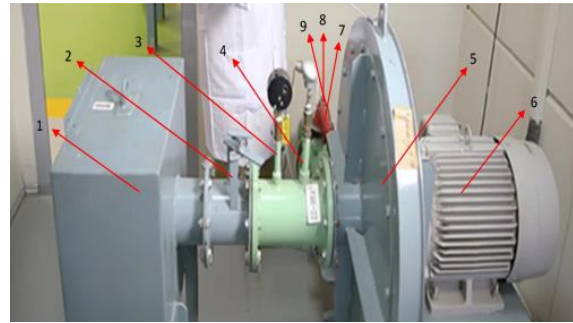
Numara	Sistem elemanı
1	Su tankı
2	Emiş vanası
3	Emiş basınç ölçümü manometre
4	Pompa – Elektrik motoru
5	Pompa çıkış basıncı ölçümü
6	Çıkış vanası
7	Hat sonu basınç ölçümü (kullanıcılar için)
8	Hat sonu vana (debi ayarı için) kullanıcı vanası

Fan deney tesisatı

Şekil 4’te şematik resmi, Şekil 5’te fotoğrafı görülen fan deney tesisatında, radyal tip santrifüj fan kullanılmıştır. Tablo 2’de fan deney tesisatının sistem elemanları yer almaktadır. Tablo 3’te fanın teknik özellikleri görülmektedir. Fan girişinde ve çıkışta damper, termokupl ve basınç ölçer vardır. K Tipi (Ni-Cr-Ni) termokupl ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Damperle mekanik yöntem ile debi kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 4. Fan deney tesisatı şeması



Şekil 5. Fan deney tesisatı

Tablo 2. Fan deney tesisatı sistem elemanları

Numara	Sistem elemanı
1	Emiş havzası
2	Giriş valfi
3	P1- Giriş Basınç ölçer
4	T1- Giriş termokupl
5	Radyant tip santrifüj fan
6	Elektrik motoru
7	Çıkış valfi
8	P2- Çıkış basınç ölçer
9	T2- Çıkış termokupl

Tablo 3. Fan teknik özellikleri

Özellikler	
Tip	Tek emişli
Kapasite	30m ³ /dk x 6.3 kPa x 2960 dk ⁻¹
Motor	11 kW, 380 V, 2P

3. Deneysel çalışmalar, sonuçlar ve tartışmalar

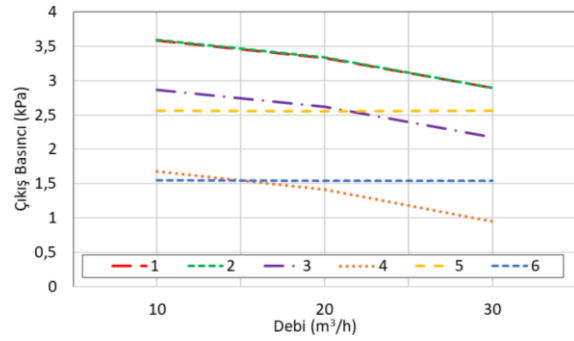
Pompa deneyi

Pompa deney tesisatında su debisi 10 m³/h -30 m³/h arası değerlerine ayarlanmıştır. Emiş basıncı, çıkış basıncı, hat sonu basıncı ve enerji analizöründen tüketilen güç ölçülmüştür. Deneylerde, pompaların hangi koşullarda verimli kullanılabildiğinin tespiti için 6 farklı varyasyonlar test edilmiştir. Tablo 4'te pompa deney koşulları listelenmiştir.

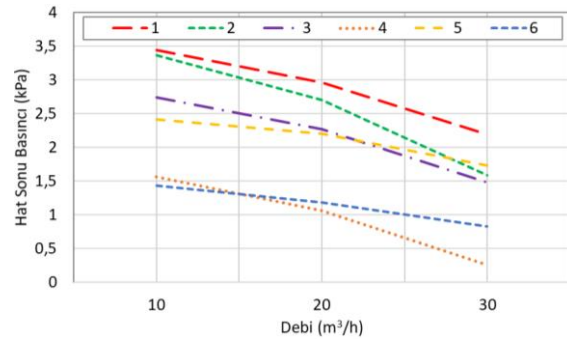
Tablo 4. Pompa deneyi koşulları

Deney no	Deney koşulları
1	Normal koşullar f=50 Hertz
2	Çıkış vanası %50 kısılırsa f=50 Hertz
3	Frekans invertör 45 Hertz
4	Frekans invertör 35 Hertz
5	Frekans invertör otomatik kumanda, P _{çıkış} =250 kPa sabitlendi set değeri
6	Frekans invertör otomatik kumanda, P _{çıkış} =150 kPa sabitlendi set değeri

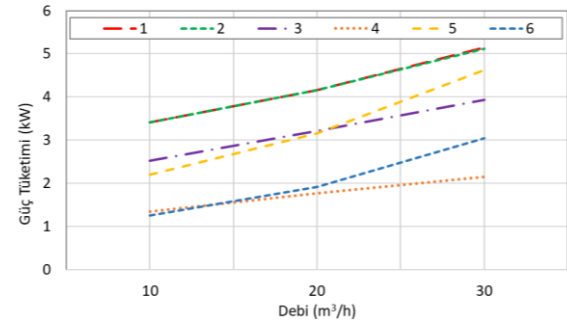
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 (Tablo 4'te belirtilen) 6 farklı deney koşulu için 10 m³/h - 30 m³/h pompa debilerindeki pompa çıkış basıncını, hat sonu basıncını ve pompa güç tüketimini göstermektedir. Şekil 9'da 5 farklı deney koşullarında normal koşula (1 numaralı deney koşuluna) göre sağlanan enerji tasarrufu görülmektedir.



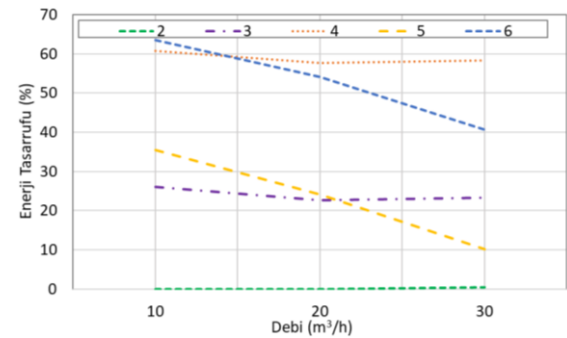
Şekil 6. 6 farklı deney koşulu için pompa çıkış basıncının farklı debilere göre değişimi



Şekil 7. 6 farklı deney koşulu için pompa hat sonu basıncının farklı debilere göre değişimi



Şekil 8. 6 farklı deney koşulu için pompa güç tüketiminin farklı debilere göre değişimi



Şekil 9. 5 farklı deney koşulu için pompa enerji tasarrufunun farklı debilere göre değişimi

1 numaralı deney, pompanın normal koşullarda, 50 Hertz frekansta çalışma durumudur. 2 numaralı deneyde, pompa 50 Hertz'te, çıkış vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. Sanayide değişken debi ile çalışan sistemlerde pompa debisi azaldığı zaman Şekil 6'da görüldüğü üzere çıkış basıncı çok yüksek değerlere ulaşmakta, bu da gerek tesisata zarar vermekte veya hattın sonunda ihtiyaç duyulan basınçtan daha yüksek bir basınç oluştuğundan sanayi ürünlerinde sıkıntı oluşturabilmekte ve üretimi kesintiye uğratabilmektedir. Bundan dolayı çıkış vanası kısılarak hattın içindeki basınç kaybı artırılır, çıkış basıncı değişmez ama Şekil 7'de görüldüğü gibi hattın sonundaki basınç değişir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, pompa debisi azaldığında çıkış basıncı artar. Yani dinamik basma yüksekliği artar. Debi arttıkça kayıplar artacağı için, çıkış basıncı ile hat sonu arasındaki basınç farkı artar. Debi arttıkça sürtünme kuvveti artar. Debi düşük olunca $P_{\text{çıkış}}$ ve $P_{\text{hat,sonu}}$ basıncı arasındaki fark daha az olur. Şekil 8'de görüldüğü gibi 1 ve 2 numaralı deneylerde çekilen güçler eşittir. Çıkış vanasını kısıldığında daha az güç harcanmamakta, sistem tasarruflu çalışmamaktadır. Ayrıca, pompa debisini büyük seçip, pompayı düşük debide çalıştırmak tasarruf sağlamamaktadır.

Tablo 4'te belirtilen 3 ve 4 numaralı deneylerde, daha düşük çıkış basıncına ihtiyaç duyulursa frekans azaltılır (Şekil 6). Böylece, Şekil 6, Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi çıkış basıncı azalır ve buna bağlı olarak güç azalır ve tasarruf yapılır. Diyagramdan görüldüğü gibi, frekans azaltılınca pompa çalışma eğrisi aşağıya doğru kayar. İntertörlü veya değişken frekanslı sürücü sistemleri, alternatif akımın frekansını ve dolayısı ile motorun dönüş hızını değiştirerek motorun gereğinden fazla yük çekmesini önler. İhtiyaç duyulan çıkış basıncı değeri yakalanıncaya kadar frekans azaltılır. Bu da aynı işin çok daha az enerji kullanarak yapılmasını sağlar. Değişken debili sistemlerde frekans invertör kullanılması tasarruf sağlar (Şekil 9). Debi sabit olan

yerlerde frekans invertör kullanımı fayda sağlamaz. Değişken debilerde en yüksek debide minimum basma yüksekliği ihtiyacı ve minimum çıkış basıncı ihtiyacını sağlayacak bir pompa satın alınır.

Tablo 4'te belirtilen 5 ve 6 numaralı deneylerde, frekans invertör, otomatik kumandada çıkış basıncı için sabitlendi. Frekans invertör sadece çıkış basıncına göre değil, farklı parametrelere göre de sabitlenerek ayarlanabilir. Böylece hedef parametreyi sağlayacak şekilde frekans değişimi sağlanır. Örneğin kalorifer tesisatında debi değişimine, ısınma ihtiyacına ve dış ortam sıcaklığına bağlı olarak, suyun giriş ve dönüş sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak frekans değiştirilebilir. Diyagramda sadece çıkış basıncına göre ayarlanmıştır.

Fan deneyi

Yapılan deneylerde fanın enerji tüketimini azaltma yöntemleri incelendi. Fan sistemlerinde önemli olan debi kontrolüdür. Ama günümüzde enerji fiyatlarının artmasıyla, maliyeti düşürmek amaç olmuştur. Fan ve pompalarda elektrik tüketimini azaltma yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Fan sisteminde kullanılan elektrik motorlarının devri, kullanılan frekansa bağlıdır. Değişken hız sürücü tek başına işe yaramaz, mutlaka geri besleme sinyali almak zorundadır. Yapılan deneylerde, fanın çıkışından değişken hız sürücüsüne sinyal gönderilmektedir. Değişken hız sürücüsü basınç sensörünün 3 kPa ve 4 kPa değerlerine göre ayarlanmıştır. Çünkü fabrikalarda prosesin kalitesini bozmamak için sabit basınç gereklidir.

Fan deney tesisatında hava debisi 500 m³/h - 1500 m³/h arası değerlerine ayarlanmıştır. Deneylerde, çıkış basıncı, statik basıncı farkı ve enerji analizöründen tüketilen güç ölçüldü ve enerji tasarrufu hesaplanmıştır. Deneylerde, fanın hangi koşullarda verimli kullanılabildiğinin tespiti için fan 7 farklı koşulda test edilmiştir. Tablo 5'te fan deneyi koşulları

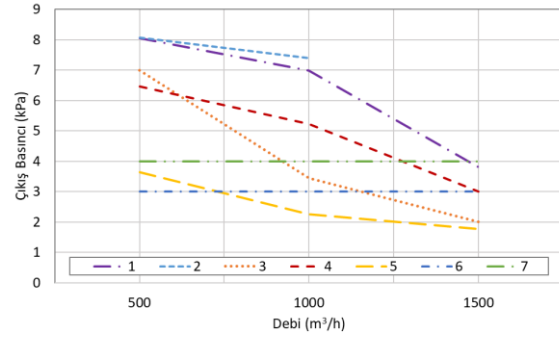
listelenmiştir. Deney koşulları belirlenirken sanayideki gerçek çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Sanayide vana kısılınca enerji tasarrufun artacağı düşüncesi yaygındır. Fakat deneysel veriler sonucu yapılan analiz bu düşüncüyü çürütmektedir.

Tablo 5. Fan deneyi koşulları

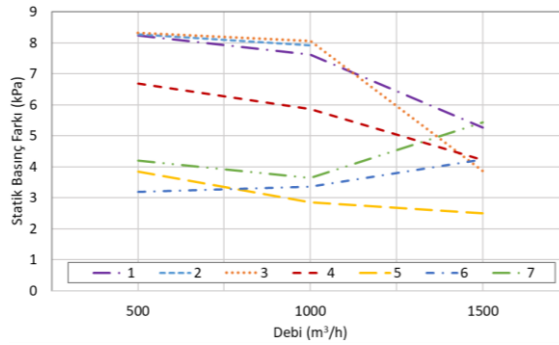
Deney No	Emiş Damperi	Çıkış Damperi	Frekans
1	%100	%100	50 Hertz
2	%100	%50	50 Hertz
3	%50	%100	50 Hertz
4	%100	%100	Frekans invertör 45 Hertz
5	%100	%100	Frekans invertör 35 Hertz
6	%100	%100	Frekans invertör otomatik kumanda, $P_{\text{çıkış}}=3$ kPa sabitlendi set değeri
7	%100	%100	Frekans invertör otomatik kumanda, $P_{\text{çıkış}}=4$ kPa sabitlendi set değeri

1 numaralı deney, fanın normal koşullarda, 50 Hertz frekansta çalışma durumudur. 2 numaralı deneyde, fan 50 Hertz 'te, çıkış vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. 3 numaralı deneylerde, fan 50 Hertz 'te, giriş vanası %50 kısılarak çalıştırılmıştır. 4 ve 5 numaralı deneylerde frekans invertör manuel olarak sırasıyla 45 Hz ve 35 Hz 'e ayarlandı. 6 ve 7 numaralı deneylerde, frekans invertör, otomatik kumanda çıkış basıncı için sırasıyla 3 kPa ve 4 kPa'a sabitlendi.

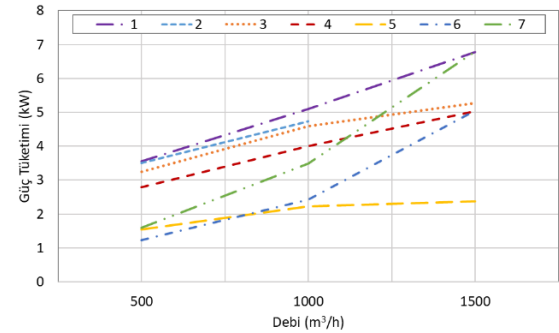
Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12, Tablo 5'te belirtilen 7 farklı deney koşulu için 500 m³/h - 1500 m³/h fan debilerindeki fan çıkış basıncını, statik basınç farkını ve fan güç tüketimini göstermektedir. Şekil 13'te 6 farklı deney koşullarında normal koşula (1 numaralı deney koşuluna) göre sağlanan enerji tasarrufu görülmektedir.



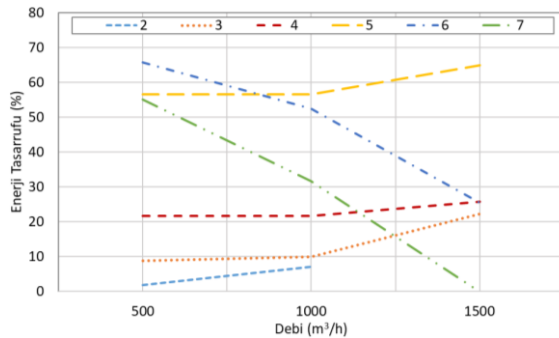
Şekil 10. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan çıkış basıncı



Şekil 11. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki statik basınç farkı



Şekil 12. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan güç tüketimi



Şekil 13. 7 farklı deney koşulu için farklı debilerdeki fan enerji tasarrufu

Tablo 5’te belirtilen 4 ve 5 numaralı deneylerde, daha düşük çıkış basıncına ihtiyaç duyulursa frekans azaltılır (Şekil 10). Böylece, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13’te görüldüğü gibi çıkış basıncı, statik basınç farkı azalır ve buna bağlı olarak güç azalır ve tasarruf yapılır.

Fanlarda damper kullanılarak debi azaltıldığında, basma yüksekliği artmakta, Şekil 13’te görüldüğü gibi güç tüketiminde düşük oranda bir azalma gözlenmektedir. Aynı debi için değişken hız sürücüsü kullandığımızda, frekans azaldığı için devir azalacak, basma yüksekliği azalacak ve dolayısıyla güç tüketimi azalacaktır. Şekil 12’de görüldüğü gibi fan sistemlerinde debi ayarı giriş ve çıkış damperlerinin kısılmasıyla yapılırsa, güçteki azalma maksimum %10 mertebesinde olmaktadır. Şekil 13’te görüldüğü gibi fan sistemlerinde debi ayarı fan devri değiştirilerek yapılırsa %60’lara varan bir güç tasarrufu yapılmaktadır. İşletmede fan sistemlerinde çıkış basıncının sabit değerinde olması istenmesi durumunda frekans invertörün otomatik basınç kontrolü sistemle çalıştırılması uygun olmaktadır.

4. Sonuç

Endüstriyel tesislerde uygulanabilecek enerji tasarrufu yöntemleri, bilimsel olarak gerçekliği tamamen ortaya konmuş uygulamalardır. Enerji yönetimi sayesinde daha az fosil yakıt yakılması sonucu istenmeyen emisyonlar azalacak ve karbon emisyonunun neden olduğu küresel ısınma etkileri azalacaktır. Ayrıca, enerji tasarrufu ve verimliliği ülkelerin yapması gereken ve çok yüksek yatırım gerektiren yeni enerji yatırımlarının getireceği yükü azaltacaktır. Bu noktada sanayide enerji yönetimi ile verimliliğin artışı ve enerji tasarrufu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Çalışmada ele alınan sanayideki enerji verimliliği uygulamaları, kalite ve performansı düşürmeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesi için

pompalarda ve fanlarda frekans invertör kullanımınıdır. Çalışmada, frekans invertör kullanımı ile enerji atıklarının, kayıpların ve verimsizliklerin azaltıldığı vurgulanmıştır. Deney koşulları belirlenirken gerçek sanayideki çalışma ve işletme koşulları dikkate alınmıştır. Sanayide vana kılınca enerji tasarrufun artacağı düşüncesi yaygındır. Fakat deneysel veriler sonucu yapılan analiz bu düşüncüyü çürütmektedir. Pompalarda çıkış vanasını kısıldığında daha az güç harcanmamakta, sistem tasarruflu çalışmamaktadır. Fan sistemlerinde debi ayarı giriş ve çıkış damperlerinin kısılmasıyla yapılırsa, güçteki azalma maksimum %10 mertebesinde olmaktadır. Frekans invertör sistemleri, alternatif akımın frekansını ve dolayısı ile motorun dönüş hızını değiştirerek pompa ve fan motorunun gereğinden fazla yük çekmesini önlemektedir. Değişken debili pompa ve fan sistemlerinde debi ayarı devri değiştirilerek yapılırsa %60’lara varan bir güç tasarrufu yapılmıştır. Sanayide enerji yönetimi konusunda yapılması planlanan çalışmalar, faaliyet gösteren bir fabrikada enerji etüt çalışması yapıp, mevcut durumu belirledikten sonra, verimlilik artırıcı proje uygulamaları ile fabrikadaki enerji tasarrufunu artırıp, iyileştirmeler yapmaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına bağlı Enerji Verimliliği Test Laboratuvarında yapılmış olan deney verileri kullanılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

AEO. Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf> [accessed July 29, 2018].

- Ahmed, B. A. Moharam, E. E. Rashad , (2022), Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points, *Computers and Electrical Engineering*, 97, 107607
- Andrews, R., Johnson, E., Energy use, behavioural change, and business organizations: reviewing recent findings and proposing a future research agenda. *Energy Res. Social Sci.*, 2016;11:195-208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.09.001>
- Ates SA, Durakbasa NM. Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, 2012;45:81-
- Backlund S., S. Broberg, M. Ottosson, P. Thollander, Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms (5-055-12), *ECEEE Ind. Summer Study*, 2012; 669–677
- Bakman I, Gevorkov L, Vodovozov V., 2014, Predictive control of a variable-speed multi-pump motor drive. *IEEE 23rd Int. Symp. on Ind. Electronics*, Istanbul, Turkey,.
- Bakman I, Gevorkov L, Vodovozov V., 2015, Efficiency control for adjustment of number of working pumps in multi-pump system'. 9th Int. Conf. on Compatibility and Power Electronics. Portugal
- Bakman I, Gevorkov L., 2015, Speed control strategy selection for multi pump systems. 56th Int. Scientific Conf. on Power. Riga, Latvia: Electrical Engineering of Riga Technical University;
- Belle, B.K., 2008, Energy savings on mine ventilation fans using “Quick-Win” Hermit Crab Technology- A perspective. In Jr. K.G. Wallace (Ed.), 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium (pp. 427–433). Reno: The University of Nevada.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schonsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F.O., Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. *J. Clean. Prod.*, 2011;19:667-679. <http://doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Cagno E, Worrell E, Trianni A, Pugliese G. A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2013;19:290-308.
- Cheng, H., Hu, X., Zhou, R., How firms select environmental behaviours in China: the framework of environmental motivations and performance. *J. Clean. Off. Prod.*, 2019;208(20):132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.096>
- Elias Andersson, Patrik Thollander, Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry, *Energy Strategy Reviews*, 2019;24:229-235.
- Enerji Yöneticisi Ders Notları, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığına, 2021.
- Hasanbeigi A, Menke C, Therdyothin A. Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, 2011;4:93-113
- Hasan AM, Hoq MT, Thollander P. Energy management practices in Bangladesh's iron and steel industries. *Energy strategy reviews*, 2018;22:230-236
- Hasan A, Rokonuzzaman M, Tuhin RA, Salimullah SM, Ullah M, Sakib TH, et al. Drivers and barriers to industrial energy efficiency in textile industries of Bangladesh. *Energies*, 2019; 12:1775

- Hossain S. R., Istiak Ahmed, Ferdous S. Azad, A S M Monjurul Hasan, Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh, *Energy*, 2020;212:118741
- Hustrulid, W.A., & Bullock, R.L., 2001, *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- IEA- International Energy Agency, 2012. *Energy Management Programmes for Industry*. OECD/IEA, Paris, France and The Institute for Industrial Productivity, Washington, USA.
- IEA - International Energy Agency, 2018. *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlook to 2040*. in: Market Report Series. IEA/OECD
- John N, Rajappan SC. Energy saving mechanism using variable frequency drives. *Int. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* March 2013.
- Lozano FJ, Lozano R, Freire P, Jimenez-Gonzalez C, Sakao T, Ortiz MG, et al. New perspectives for green and sustainable chemistry and engineering: approaches from sustainable resource and energy use, management, and transformation. *J Clean Prod.*, 2018;172:227-232
- Luna T., Ribau J., Figueiredo D., Alves R., 2019, Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization, *Journal of Cleaner Production*, 213, 342-356
- Marimon, F., Casadesús, M., 2017. Reasons to adopt ISO 50001 energy management system. *Sustain. Times* 9 (1740). <https://doi.org/10.3390/su9101740>
- Martin, R., Muûls, M., de Preux, L.B., Wagner, U.J., Anatomy of a paradox: management practices, organizational structure and energy efficiency. *Environ. Econ. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2011.08.003>, 2012;63:208-223
- Mishra, D.P., 2004, *A Study of Energy Consumption Profile of Main Mine Ventilation Fans and Development of a Technique to Reduce the Energy Requirement in Such Systems*. Dissertation. Dhanbad: Indian School of Mines.
- Neves, F.O., Salgado, E.G., Beijo, L.A., 2017, Analysis of the environmental management system based on ISO 14001 on the American continent. *J. Environ. Manag.*, 199, 251-262 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.049>
- Okochi G.S., Yao Y., 2016, A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59, 784–817.
- Panigrahi, D.C., Mishra, D.P., Divaker, C., & Sibal, S.J., 2009, Application of fibreglass reinforced plastic blades in main mine ventilation fans: an innovative concept of energy saving. In D.C. Panigrahi (Ed.), *Mine Ventilation* (pp. 709–715). New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.
- Panigrahi D. C., Mishra D. P., 2014, CFD Simulations For The Selection Of An Appropriate Blade Profile For Improving Energy Efficiency In Axial Flow Mine Ventilation Fans, *Journal of Sustainable Mining* e-ISSN 2300-3960 | p-ISSN 2300-1364
- Sen, P.K., 1997, Reducing power consumption for axial flow mine ventilation fans. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 45(9–10), 301–303.
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., Energy management in industry e a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *J. Clean. Prod.*,

- 2016;112:3692-3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>
- Shim G., Song L., Wang G., 2013, Comparison of different fan control strategies on a variable air volume systems through simulations and experiments, *Build. Environ.* 72, 212–222.
- Sola A.V.H., Mota C.M.M., Influencing factors on energy management in industries, *Journal of Cleaner Production*, 2020;248:119-263
- Souza E. D., 2015, Improving the energy efficiency of mine fan assemblages, *Applied Thermal Engineering*, 90, 1092-1097
- Tesema G, Worrell E. Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy* 2015; 93:2042-2052
- Thollander, P., Palm, J., Industrial energy management decision making for improved energy efficiency e strategic system perspectives and situated action in combination. *Energies*, 2015;8:5694-5703. <https://doi.org/10.3390/en8065694>
- Tiller, S.R., Organizational structure and management systems. *Leadersh. Manag. Eng.*, 2012;2 (1):20-23.
- Wei G., Liu M., Claridge D.E., 2020, Optimize the supply air temperature reset schedule for a single-duct VAV system, in: *Proceedings of the 12th Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, 2000, San Antonio, TX, 15–17 May, 2154–2157.
- Vodovozov V, Lehtla T, Bakman I, Raud Z, Gevorkov L. 'Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations'. 15th Biennial Baltic Elect. Conf. Oct. 3-5, 2016 Tallinn, Estonia.
- Vodovozov V, Raud Z. , 2017, Predictive control of multi-pump stations with variable-speed drives. *IET Electr. Power Appl.*;11(5):911–7. Iss.
- Vodovozov V, Lehtla T, Bakman I, Raud Z, Gevorkov L., 2016, Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations. *Int. Conf. on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)* 29-31 Aug. Tallinn, Estonia.
- Yee K.F., Yik F.W.H., Chan C.W.H., Chan H.Y.T., 2002, A study on the energy saving of converting a VAV system from inlet guide vane to variable fan speed control, *Trans. Hong Kong Inst. Eng.* 9 (2), 18–24.
- Zhang S, Worrell E, Crijns-Graus W. Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Appl Energy*, 2015;147:192-213