EFFICIENCY PARAMETERS OF VARIABLE SPEED COMPRESSOR TECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL COOLERS

ENDÜSTRİYEL SOĞUTUCULAR İÇİN DEĞİŞKEN DEVİRLİ KOMPRESÖR TEKNOLOJİSİNİN VERİM PARAMETRELERİ

Meltem Koşan[1, *], İpek Çetinbaş[2], Mehmet Demirtaş[3], Süleyman Erten[4], Fatma Nur Erdoğmuş[5], Esra Demirci[6]

[1,5] Gazi University, Energy System Engineering, Turkey

[1] ORCID ID: 0000-0001-7311-9342, mltmkosan@gmail.com

[5] ORCID ID: 0000-0002-8887-6597, fatmanurerdogmus99@gmail.com

[2] Eskişehir Osmangazi University, Electrical-Electronics Engineering, Turkey

[2] ORCID ID: 0000-0002-5995-5050, ipekcetinbas@ogu.edu.tr

[3] Gazi University, Electrical-Electronics Engineering, Turkey

[3] ORCID ID: 0000-0002-2809-7559, mehmetd@gazi.edu.tr

[4, 6] Nurdil Technical Cooling, Turkey

[4] ORCID ID: 0000-0002-7811-6148, suleymanerten@nurdil.com.tr

[6]ORCID: 0000-0001-9467-4310, esrademrici@nurdil.com.tr

**** Corresponding Author***

Abstract

In terms of energy efficiency and environmental effects, it is important to keep the cooling performance at the maximum level and the energy consumption at the minimum level in industrial cooling systems. Compressors are the most important equipment that affects the cooling efficiency in industrial cooling systems operating according to the mechanical vapor compression cycle. Selecting the compressors in the most appropriate structure and managing them effectively will increase the efficiency of industrial cooling systems and greatly reduce energy consumption. Variable speed compressor technology provides high steady-state efficiency, high seasonal efficiency, and capacity modulation without too frequent on/off operation. The variable speed compressor adjusts its speed according to the frequency change in order to provide continuous constant cooling and works at low speeds for a longer time, thus preventing high energy consumption caused by on/off operation. As a result, cooling systems with variable speed compressors consume less energy than cooling systems with on/off control. In this study, the factors affecting energy consumption in cooling systems with variable speed compressors and on/off controlled cooling systems were investigated and compared. With this study, it is aimed to reveal the effects of compressor control technique on energy consumption in industrial coolers and to shed light on the designers of this information.

Keywords: *Industrial Cooling Systems, Fixed Speed Compressor, Variable Speed Compressor, Coefficient Of Performance.*

1. Giriş

Gıda sektöründe gıdaların etkin bir şekilde soğutulması, enerji verimliliği ve çevresel etkiler açısından büyük önem arz etmektedir. Soğuk muhafaza endüstriyel soğutucular ile sağlanmaktadır. Bu yüzden endüstriyel soğutucuların soğutma veriminin maksimum, enerji tüketiminin ise minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Kompresörler, endüstriyel soğutucularda enerjinin büyük bir kısmını tüketen, soğutma verimini önemli ölçüde etkileyen, gıdaların standartlar gereği sağlık koşullarına uygun soğuk muhafaza edilmesini sağlayan mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin ana elamanlarından biridir.

Genel yapıları ele alınarak sınıflandırıldığında kompresör çeşitleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [1].

- Pistonlu kompresörler, soğutma sektöründe en çok kullanılan kompresör çeşidi olup imalat kalitesi oldukça iyidir. Açık tip pistonlu kompresörler ve hermetik tip pistonlu kompresörler olarak ikiye ayrılırlar. Açık tip kompresörün sağladığı güç aralığı 3 kW ile 250 kW arasındadır. Bu kompresörler yarı hermetik ve tam hermetik olarak iki çeşittir.

- Vidalı kompresörler, yüksek verime sahip olup, titreşim ve gürültüsüz çalışan, sürekli gaz akışı sağlayan, parçalarında aşınma olmayan kompresörlerdir. Diğer kompresörlere göre daha fazla enerji tüketir ve motor kayıplarının kazanılması mümkün değildir.
- Scroll kompresörlerin geometrik yapısında birbiri üzerine geçmeli, iki adet spiral diskten oluşmaktadır. Scroll kompresörler, pistonlu kompresörler ile kıyaslandığında daha az hareketli parçaya sahiptirler. Bu yüzden daha sessiz çalışırlar.
- Santrifüj (turbo) kompresörler (buhar sıkıştırma çevrimiyle soğutma işlemi yapan), pistonlu rotatif veya helisel tip kompresörlerden farklı olarak pozitif sıkıştırma işlemi yerine santrifüj kuvvetlerden faydalanarak sıkıştırma işlemini yapmaktadır. Santrifüj kompresörlerle özgül hacmi yüksek olan akışkanların (daha geniş hacimlerin) kolayca hareket ettirilmesi mümkün olduğu için sık sık büyük kapasiteli derin soğutma (-100 ºC kadar) işlemlerinde uygulandığı görülür.
- Rotatif kompresörler, küçük soğutma tesislerinde kullanılmaktadır.

Hem soğutma etkinliğine hem kompresör verimine etki eden önemli faktörlerden birisi de kompresör yağıdır. Soğutucu akışkan ile birlikte kompresörün içinde hareket eden yağın, soğutucu akışkan kompresörü terk ederken ayrışması gerekmektedir fakat yağlama yağı karışır ve kompresör sıkıştırdığı akışkan ile birlikte bir miktar yağ atar. Tesisatta dolaşım esnasındaki sıcaklık kompresörde 100°C ve üzerinde olduğunda soğutucu akışkan-yağ karışımı kimyasal reaksiyona girebilir. Bu reaksiyonlar sonucunda yağlarda yaşlanma sebebiyle organik asitler, soğutucu akışkanlarda ise mineral asitler meydana gelir. Bu asitler soğutma devresindeki malzemeye etki ederek korozyona sebep olur ve parçaların ömrünü kısaltabilir [1].

Kompresörlerin uygun seçilmesi ve doğru yönetilmesi endüstriyel soğutma sistemlerinin etkinliğini artıracak ve enerji tüketimini de büyük oranda azaltacaktır. Kompresörlerin yönetim şekillerini ikiye ayırabiliriz. Birinci yönetim şekli en yaygın kullanılan aç-kapa (sabit devirli) kompresörlerdir. Bu tip kompresörler sabit bir hızda çalışmakta ve sık sık açılıp kapanmaktadır. Kompresörün çalışmasının başında şebekeden nominal gücünden daha fazla akım geçmekte (demeraj akımı) ve bu durum endüstriyel soğutucunun enerji tüketimini artırmaktadır. Ayrıca kompresöre gereğinden fazla yüklenmesine dolayısıyla zorlanmasına neden olmaktadır. İkinci yönetim şekli ise değişken devirli (değişken hız kontrollü, invertörlü) kompresörlerdir. İnvertörlü kompresörler frekans değişimine göre çalışma hızını ayarlayıp, daha uzun süre düşük hızlarda çalışmaktadır. Bu şeklide fazladan çekilen demeraj akımları azaltılıp daha yumuşak kalkışlar elde edilebilir. Kompresörün düşük hızlarda çalışması demek daha düşük güçte çalışması demektir. Bu sayede enerji tasarrufu elde edilecektir.

Soğutma sistemlerinde enerji tasarrufu, daha uzun bir süre boyunca daha düşük bir soğutma yükü sağlayarak elde edilir, bu durum da kondenser ve evaporatörün ve ardından tüm sistemin performansının artmasına neden olur [2]. Soğutma devresine yüksek hızda akışkan gönderildiğinde sürtünmeler artmakta ve daha fazla basınç kaybı oluşmaktadır. Basınç kayıplarını azaltabilmenin yolu da kompresör devrini düşürüp devreye ihtiyacı olduğu kadar akışkan göndermektir. Kompresörün değişken devirli tercih edilmesi önemli bir parametredir, fakat doğru algoritma ile yönetilmesi de en az kompresör seçimi kadar önemlidir. Değişken hız kontrollü soğutma sisteminin dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması çalıştırılacak sistemin teknik verilerine göre karmaşık bir işlemdir [3]. Bu nedenle, değişken hız kontrollü soğutma sistemi için model belirsizliğine ve bozulmaya karşı kararlı bir kontrol yöntemi algoritması kaçınılmaz olarak gereklidir [4]. Literatürde sabit devirli ve değişken devirli kompresörlerin soğutma sistemlerine etkisi ve değişken devirli kompresörlerin yönetimi için farklı metotlar incelenmiştir.

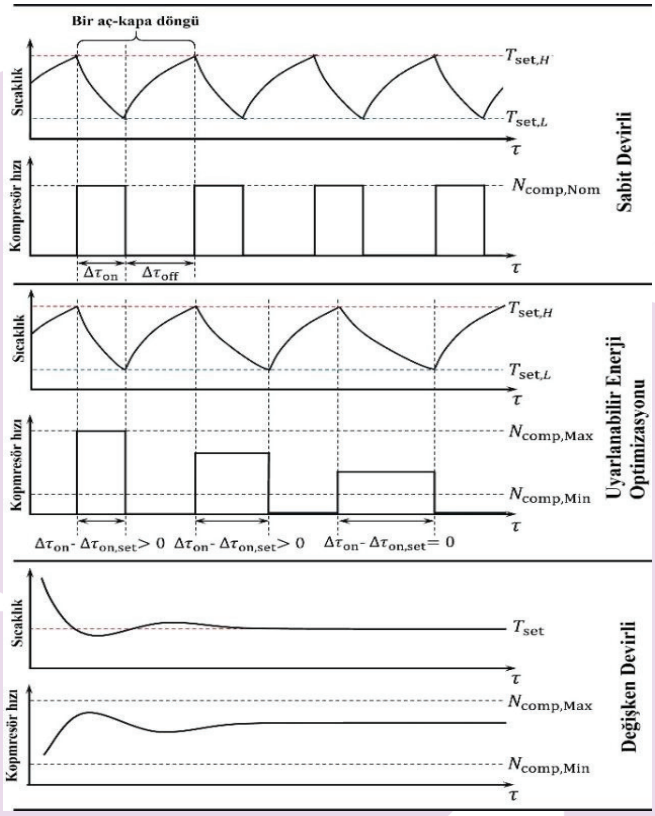
Mastrullo R. ve ark. (2015), CO_2 soğutucu akışkanı kullanılan hafif ticari şişe soğutucu için simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu simülasyon model için geri basınç valfi kullanıp, kompresör ve ısı değiştirici fanlarını değişken devirli olarak çalıştırmışlardır. Kompresör nominal hızının %70-100 arasında çalıştırılmış ve kontrol sisteminin iyileştirilmesiyle güç tüketiminde %12–60 oranında azalmalar ve ortam sıcaklığına bağlı olarak etkinlik katsayısında (COP) %120'ye varan oranda artışlar elde edilmiştir [5].

Sabry ve Ker (2020), en önemli ev yüklerinden biri olarak henüz analiz edilmemiş bir inverter tahrikli Değişken Hız Kontrol Cihazı (VSC tabanlı) buzdolabının güç tüketimi profilini araştırmışlardır. Bu çalışma güç tüketimini iki senaryoda karşılaştırmıştır; birinci senaryo VSC tabanlı bir buzdolabı için üç besleme yapılandırması kullanarak, bir batarya çevirici yükü, batarya yükü ve şebeke yükü ve ikinci senaryo ise VSC tabanlı bir buzdolabı ve aynı boyutta geleneksel bir buzdolabını beslemek için aynı AC güç kaynağının kullanılmasıdır. Bu senaryolar için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ölçümler sonucunda, AC güç kaynağı üzerinden DC kullanımında daha iyi bir performans olduğunu ve tüketilen güç oranının, nominal güce yaklaşıncaya kadar başlangıç zamanında düzgün bir modele sahip olduğunu göstermiştir. Batarya-Yük topolojisinin ölçülen verimliliği, yaklaşık %78,5 olan batarya-invertör-yük topolojisininki ile karşılaştırıldığında %99'a yaklaşmaktadır. Ayrıca, batarya-yük topolojisine sahip test edilen buzdolabının günlük 1.850 kWh enerji tükettiği, batarya-invertör yük topolojisinde ise aynı çalışma koşullarında günlük 2.466 kWh tükettiği bulunmuştur. Bu sonuçlar, motorlarını çalıştırmak için hız kontrol teknolojisini benimseyen buzdolaplarının ve diğer cihazların modellenmesi için bir model görevi görebileceği bulunmuştur [6].

Kasera ve ark. (2020), R290 soğutucu akışkanı kullanılan bir buzdolabında değişken hızlı bir DC kompresörün enerji verimliliği incelemişlerdir. Deneylerde maksimum hız ve değişken hız için sistem çalıştırılmıştır. Sistem maksimum hızda 210,87 W enerji tüketirken, değişken hızda ise 162,45 W güç tüketmiştir [7]. Yapılan deneyler sonucunda değişken hızlı kompresör kullanılan sistemin daha az enerji tükettiği görülmektedir.

Liu ve ark. (2004), sabit devirli ve değişken devirli kompresör soğutucu veya dondurucularda kapı açmanın performansa etkisini araştırmışlardır. Yapılan testlere göre kapı açılmasının bölme sıcaklıklarına etkisi sabit devirli sistemde 14,5°C değişken devirli sistemde 6°C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kapı açma esnasında sabit devirli sistem kapı açılamadan önceki teste göre %4,12, değişken devirli sistem ise kapı açmadan önceki teste göre %0,39 daha fazla enerji tüketmiştir [8].

Jensen ve ark., değişken hızlı hermetik kompresörler için yenilikçi kompresör kontrol stratejileri üzerinde çalışmışlardır. Değişken hızlı sürücüler, uyarlanabilir enerji optimizasyonu ve aç - kapa çalışma stratejilerine odaklanmışlardır. Değişken hızlı sürücüler ve uyarlanabilir enerji optimizasyonunun güç tüketimini azaltması ve sıcaklık stabilitesini arttırması ve enerji etiketinin iyileştirilmesi konusunu araştırmışlardır. Soğutmalı sayaç için yapılan bu araştırmada, kondenser, evaporatör ve kabinde iyileştirmeler yapılmış ve kullanılan değişken hızlı sürücü ve uyarlanabilir enerji optimizasyonu stratejisinin uygulandığı yedi farklı hermetik kompresör modeli aç-kapa çalışma ile karşılaştırılmıştır. Hermetik kompresörün güç tüketimi aç-kapa kompresöre göre önemli oranda azalmıştır. Ayrıca bu iki strateji ürün sıcaklığının durumuna göre de değerlendirilmiştir. Daha sabit ürün sıcaklığı değişken hızlı sürücü (Şekil 1.) ile elde edilirken, uyarlanabilir enerji optimizasyonunda ürün sıcaklığında dalgalanmalar oluşmuştur [2].



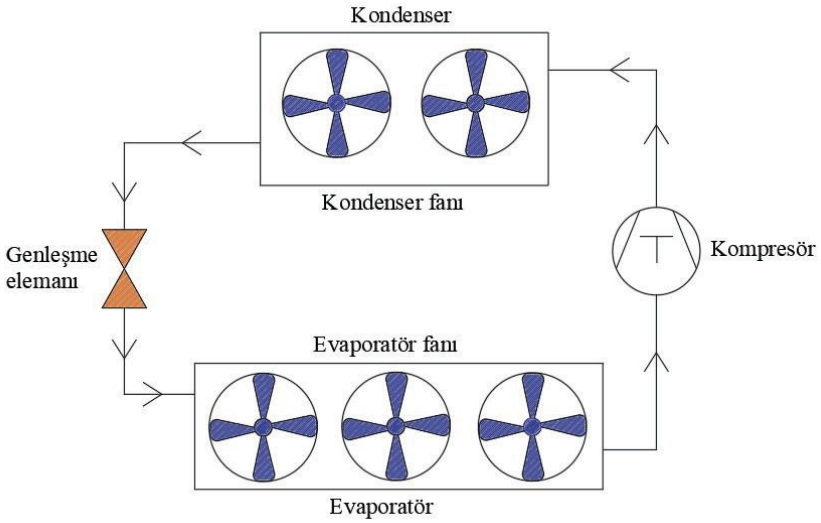
Şekil 1. İncelenen üç kompresör kontrol stratejisi olan sabit devirli, uyarlanabilir enerji optimizasyonu ve değişken devir için hava sıcaklığının ve kompresör hızının geçici evriminin temel taslağı

Ekren ve ark. (2010), değişken devirli kompresör ve elektronik genleşme valfi için farklı kontrolleri karşılaştırmıştır. Proportional–Integral–Derivative (PID), Artificial Neural Network (YSA) ve Fuzzy denetleyiciler ile çalıştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda YSA denetleyicinin, sırasıyla PID denetleyicilerinden %8,1 ve Fuzzy denetleyicilerinden ise %6,6 daha az güç tükettiğini belirlenmiştir [9].

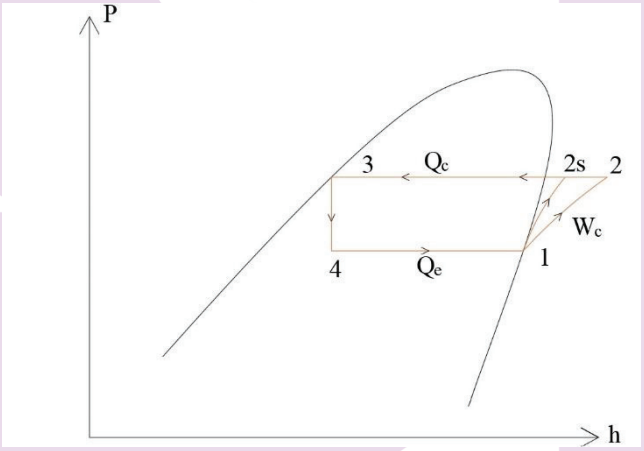
Bu çalışmanın amacı; endüstriyel soğutuculardaki kompresör kontrol tekniğinin enerji tüketimine etkilerini ortaya çıkartmaktır. İnvertörlü kompresör teknolojisi ev tipi buzdolabı ve split klimalarda kullanılmaktadır. Ancak endüstriyel soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Yapılan çalışmada sabit devirli kompresör ve değişken devirli kompresörler yapıları ve kontrol teknikleri araştırılmıştır. Teşhir tipi soğutucular için değişken devirli kompresörün verim parametreleri ve bu parametrelerin enerji tüketimine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların endüstriyel soğutucu tasarımcılarına ve okuyuculara ışık tutması amaçlanmaktadır. Belirtilen bu amaca yönelik olarak çalışmada değişken devirli kompresörler için verim parametreleri incelenmiş ve bu parametrelere etki eden unsurlar teorik analiz kısmında eşitlikler ile açıklanmıştır.

2. Teorik Analiz

Endüstriyel soğutma sistemleri mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine göre çalışmaktadır. Aşağıda çevrimin teknik resmi ve LogP-h diyagramı (Şekil 2 ve 3) verilmiştir.



Şekil 2. Mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine ait log P-h diyagramı



Şekil 3. Mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine ait LogP-h diyagramı

Mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrim elamanlarının (Şekil 2) evaporatör gücü, kondenser gücü, kompresör gücü aşağıdaki eşitlikler ile verilmiştir [1].

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{kon} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2)$$

$$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3)$$

Sistemin soğutma performans katsayısı aşağıdaki eşitlikten faydalanarak hesaplanmıştır:

$$COP_S = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_k} \quad (4)$$

Kompresör izantropik verimi aşağıdaki eşitlikler ile verilmiştir [1]:

$$\eta_i = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \quad (5)$$

$$\eta_i = \frac{Tersinir\ Adyabatik\ Kompresör\ Gücü}{Adyabatik\ Kompresör\ Gücü} = \frac{W_{ki}}{W_k} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

$$\eta_i = 1 - 0.05\frac{P_y}{P_b} \quad (7)$$

Kompresör iç verimi arttıkça gerekli soğutma kapasitesine daha az elektrik tüketilerek ulaşılır. Gerçek kompresör gücü ve kompresörü tahrik eden elektrik motorunun gücü aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır [1]:

$$W_k = \frac{\dot{m}(h_{2s} - h_1)}{\eta_{ik} x \eta_{mk} x \eta_{kk} x \eta_{em}} \quad (8)$$

$$W_{em} = (1.3 - 1.5)W_k \quad (9)$$

Kontrol ediciye giren hata bilgisi bazı matematiksel denklemlerde kullanılarak çıkış değişkeni hesaplanır [10]:

$$\theta_0 = k_1\theta_e + k_2 \int_0^1 \theta_e dt + k_3 \frac{d\theta_e}{dt} \quad (10)$$

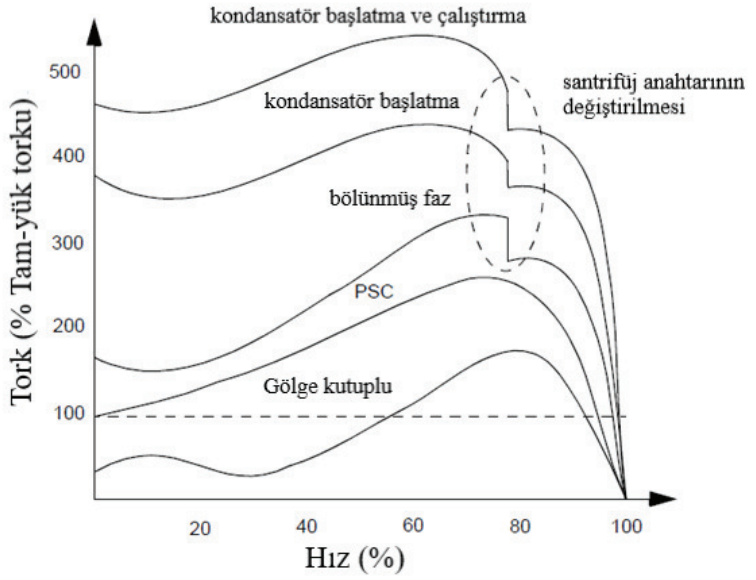
Kontrol edicide üç farklı terim olabilir. Bir terim, iki veya üç terim olarak; P, PI, PD, PID olabilir. Oransal kontrol (P), integral kontrol (I) ve türevsel kontrol (D) denklemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir [10]:

$$\theta_0 = k_1\theta_e \quad (11)$$

$$\theta_0 = k_2 \int_0^1 \theta_e dt \quad (12)$$

$$\theta_0 = k_3 \frac{d\theta_e}{dt} \quad (13)$$

Soğutma sistemlerinde kullanılan bir fazlı yardımcı sargılı motor yapıları incelenecek olursa, bu motorlar kompresör sistemlerinde verimlerine ve çalışma yapılarına göre gölge kutuplu, sabit kondansatörlü, tek fazlı gölge kutuplu, kondansatör başlatmalı ve kapasitör başlatmalı kapasitör çalıştırmalı (KBKÇ) motor olarak tanımlanmaktadır. Zaman içerisinde soğutma sistemlerinde yüksek kalkış torku ve yüksek basınç ihtiyacı artması nedeniyle KBKÇ motorlar uygulamada daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Soğutma sistemlerinde kullanılan bir fazlı motorların başlatma tork değerlerini ve santifiruj anahtarın devreden çıktığı durumdaki tork değerlerini gösteren grafik Şekil 4'te verilmiştir [11]. Grafikte de görüldüğü gibi KBKÇ motorlar diğer bir fazlı motor yapılarına göre tam yükte yüksek kalkış torkuna sahiptirler.



Şekil 4. Farklı 1 fazlı motor yapılarının tam yük tork değerleri

KBKÇ motorlar yüksek tork üretimi özellikleri nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Ancak bu tip motorların diğer bir fazlı motorlarda olduğu gibi aç-kapa stratejisi ile çalıştırılması her kalkış durumunda yüksek başlatma akımları ve durdurma olayı yaşandığında ise soğutucu sistemin daha fazla enerji kaybetmesine neden olmaktadır.

Bir fazlı motorlarda milden elde edilen tork ve verim ifadesi arasındaki ifadeler aşağıda verilmiştir [12]:

Giriş akımı:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{giriş}} \quad (14)$$

Motorun giriş gücü:

$$P_{giriş} = V_1 I_1 cos\varphi \tag{15}$$

Mekanik enerjiye dönüştürülen güç:

$$P_{conv} = (1 - S_f)\,(P_{agf} - P_{agb}) = [(1 - S_f)\,I_1^2/\,2]\,(R_f - R_b) \tag{16}$$

Mil çıkış gücü:

$$P_{çıkış} = P_{dönüş} - P_{rot} \tag{17}$$

Tork motoru:

$$T_{mil} = \frac{P_{çıkış} x60}{2\pi Ns} \tag{18}$$

Yüzde olarak motor verimi:

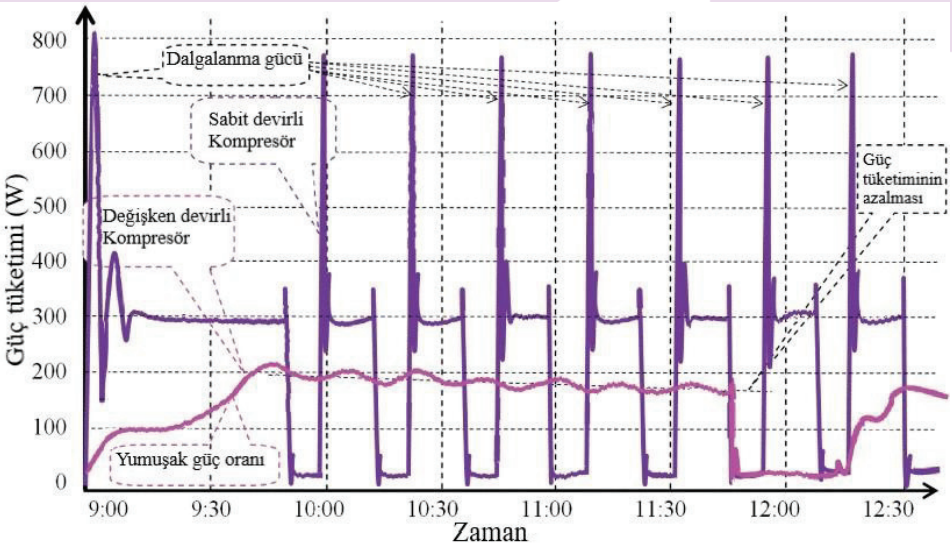
$$Verim = \frac{P_{giriş}}{P_{çıkış}} x100 \tag{19}$$

Bir fazlı motorlarda, başlatma anında stator döner alanında oluşan manyetik akının rotoru harekete geçirebilmesi ve sabit bir hıza ulaştırabilmesi için stator devreden yüksek bir başlatma akımı çeker, bu akım normal çalışma akımının 5-6 katına kadar ulaşabilir. Aç-kapa mantığıyla çalışan kompresör motorlarında bu yüksek kalkınma akımının yüksek güç tüketimine neden olmaktadır. Bir fazlı motorları yüksek tork değerleri ile kaldırma için sisteme eklenen kapasitörlerde enerji tüketiminin artmasına katkı sağlamaktadır.

Değişken devirli kompresör motor olarak adlandırılan fırçasız doğru akım makineleri (FDAM) ise bir fazlı motorlara göre tamamen farklı bir çalışma yapısına sahiptirler. Aslında FDAM motorlar fırçalı DC motorlardaki fırça ve komütasyon kayıplarını azaltmak amacıyla ortaya çıkmış olsalar da. FDAM motorların çalıştırılma ve yol verme yapılarındaki elektronik yapılar bu tip motorların daha verimli motorlar olmasını sağlamaktadır. Bu tip motorların doğrusal moment-hız ilişkisi, yüksek moment-hacim oranı ve daha yüksek verim gibi avantajları vardır [13].

FDAM motorlarda kullanılan temel sürme yapıları motorun çalışması sırasında daha az kalkınma akımı çekmesini sağlamaktadır. Burada üç fazlı yarım dalga ve üç fazlı tam dalga motor sürücüleri gibi yapılar kullanılmaktadır. FDAM motor sürücüsü 3 fazlı bir sürme stratejisi kullanması ve hall-effect (pozisyon) sensörlerinden gelen bilgi ile motoru kontrol etmesi sayesinde motorun değişken hızlarda kontrolü mümkün olmaktadır.

FDAM motoru sabit ve düşük devirlerde çalıştırmanın mümkün olması yüksek kalkış akımlarını ve güç tüketimini engellemektedir. Aç-kapa mantığı ile çalışan motorlara göre inverterli tip motorlar sabit güç tüketimi ve daha verimli çalışma yapısı sağlamaktadır. Uygulamada aç-kapa mantığı ile çalışan bir fazlı KBKÇ motor ile sabit ve düşük devirde çalıştırılan FDAM motorlu sistemin çalışmaları sırasındaki çektikleri akım değerleri referans alınarak oluşturulan karşılaştırmalı güç tüketim grafiği Şekil 5'te verilmiştir [6]. Şekilde görüldüğü gibi aç-kapa kontrol motor yapısı her başlatma ve durdurma döngüsünde daha fazla güç tüketimine neden olmaktadır. İnverterli kompresör yapısının ise sabit hızda sürekli olarak devrede kalması daha az güç tüketimi yapmasını sağlamaktadır.



Şekil 5. Sabit (aç-kapa) kompresör ile değişken devirli kompresörün güç tüketimlerinin karşılaştırılması

Şekil 5'te verilen grafikte sabit devirli kompresör kullanılan sistemdeki enerji tüketimleri ilk kalkış anında pik yapmış olup nominal gücünün yaklaşık 2 katı enerji tüketmiştir. Değişken devirli kompresör kullanılan sistemde ise kalkışlar daha yumuşak yapılmış ve tam kapasite çalıştırılmadığı için tüketilen enerji de sabit devirli kompresöre göre daha az olmuştur.

3. Değerlendirme

Bu çalışmada aç-kapa ve değişken devirli kompresörün kullanıldığı soğutma proseslerinde enerji tasarrufu açısından değerlendirme yapılmıştır. Değişken devirli kompresör teknolojisi ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Değişken devirli kompresör teknolojisi ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar

Kaynak	Yazar	Kullanım alanı	Kontrol sistemi	Kontrol mekanizması	Sonuç
[14]	Min ve ark (2017)	Buzdolabı	İnverterli	Sezgisel algoritma	Enerji tüketiminde %11,27 tasarruf
[15]	Hamad ve ark. (2018)	Split klima	Aç kapa ve İnverterli	-	Enerji tüketiminde %18 tasarruf
[16]	Pattana ve ark. (2019)	Gömme soğutucu	Aç kapa ve İnverterli	-	Enerji tüketiminde %20 tasarruf
[17]	Henry ve ark. (2014)	Buzdolabı	İnverterli	PLC ve termostat	PLC kontrol, termostat kontrollü buzdolabına göre %4,45 ile %6,79 daha az enerji tüketimi
[18]	Velásquez ve ark. (2014)	Buzdolabı	Aç kapa ve İnverterli	Dijital kontrol	Enerji tüketiminde %15 tasarruf
[19]	Ekren ve ark. (2013)	Buzdolabı	Aç kapa ve İnverterli	-	Ekserji veriminde %4'ten ve COP' de %7'den fazla iyileşme
[20]	Silveira ve ark. (2021)	Soğutma sistemi	Aç kapa ve İnverterli	En düşük güç noktası takibi kontrolü	Enerji tüketiminde %16 tasarruf

Literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere değişken devirli kompresör teknolojisi kullanımı ile enerji tüketiminde %20 'ye kadar azalma sağlanmaktadır. Yapılan teorik analizler neticesinde bu azalmayı sağlayan ana unsurlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Enerji tüketiminde azalmayı sağlayan unsurlar

Parametre	Açıklama
İzantropik verim artışı	Denklem 5, 6 ve 7'de görülen Py/Pd oranının azaltılması ile izantropik verim artar, bu da kompresörün tükettiği enerjiyi azaltır.
Çok sık aç-kapa döngüsü	Sık sık aç-kapa döngüsü soğutma sistemlerinde basınç dalgalanmalarına neden olur, basıncın dengelenmesine kadar daha yüksek akım çekilir, sürtünme kayıpları artar, bu yüzden daha fazla enerji tüketimi gerçekleşir.
Kararlılık, hassas ve doğru otomatik kontrol	PID kontrol denklemleri ile kompresörün basınç ve sıcaklık değerlerine göre etkin yöntemler ile kontrolü, kararlılığı ve soğutma performans katsayısı yükselir. Böylece enerji tüketimi azalır.
Değişken yüklere cevap vermesi	Soğutma proseslerinde soğutma yükünün değişmesi ile kompresörün yüke göre devrini ayarlaması verimliliği yükseltir.

Çizelge 2'de verilen bu ana parametreler verimlilik artışı yönünde geliştirilerek daha etkin soğutma sistemleri tasarlanabilir.

4. Sonuç

Mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerinde kompresörler enerji tüketiminin büyük bir kısmını üstlenirler. Bu çalışmada, kompresör tekniği ve kontrol yöntemleri araştırılarak, kontrol süreçlerinde dikkat edilmesi gereken unsurlar ile ilgili literatürdeki çalışmalar irdelenmiştir. Çalışma kapsamında kompresörlerin çalışma sürecinde aç-kapa ve değişken hız döngüsünde enerji tüketiminde azalmayı sağlayan unsurlar tespit edilmiştir. Kompresörün etkin yönetimi, değişken yüklere cevap verebilmesi ve kompresördeki izantropik verim artışı ana unsurlar olarak karşımıza çıkmıştır.

Değişken hızlı motorlarla çalıştırılan sistemlerde ise enerji verimliliği sağlanmakla birlikte sistem maliyetleri hem kullanılan sensör ve elektronik sürücülerden dolayı artmaktadır. Kullanılacak kontrol algoritmalarının yapay sinir ağları ve diğer zeki algoritmalar ile oluşturulması, sistem girdilerinin daha verimli takip edilmesi ve kararlılığın sağlanması açısından faydalı olacaktır.

Değişken devirli kompresöre sahip soğutma sistemi tasarımı yapılırken, kompresörün kendi içinde kontrol algoritmalarına dikkat edilmesi önemli bir parametredir. Bu çalışmada elde edilen bilgiler ve oluşturulan literatürün ileride bu konuda çalışacak endüstriyel soğutucu tasarımcılarına ve okuyuculara ışık tutması beklenmektedir. Bunun yanında verimi arttıran unsurların uygulanması, çevresel olumsuz etkenleri de azaltacaktır.

5. Kaynakça

[1] Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Coşkun, S., Yamankaradeniz, N. (2017). *Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları*, Dora Yayıncılık, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 690 s.

[2] Jensen J. K., Kærn M.R., Pedersen P. H. ve Markussen W. B. (2021). Comparison of compressor control strategies for energy efficient refrigerated counters. *International Journal of Refrigeration*, Volume 126, Pages 1-11.

[3] Kim J. G., Han C. H. ve Jeong S. K. (2020). Disturbance observer-based robust control against model uncertainty and disturbance for a variable speed refrigeration system. *International Journal of Refrigeration,* Volume 116, Pages 49-58.

[4] Jeong S. K., Han Ç. H., Hua L. ve Wibowo W. K. (2018). Systematic design of membership functions for fuzzy logic control of variable speed refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, Volume 142, Pages 303-310.

[5] Mastrullo R., Mauro A. W. ve Perrone A. (2015). A model and simulations to investigate the effects of compressor and fans speeds on the performance of CO_2 light commercial refrigerator. Applied Thermal Engineering, Volume 84, Pages 158-169.

[6] Sabry A. H. Ve Ker P. J. (2020). DC environment for a refrigerator with variable speed compressor; power consumption profile and performance comparison. *IEEE Access*, Volume 8.

[7] S. Kasera, R. Nayak and S. C. Bhaduri (2020). Energy efficiency analysis of variable speed DC compressor using R290. *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE).*

[8] Liu D. Y., Chang W. R. ve Lin J. Y. (2004). Performance comparison with effect of door opening on variable and fixed frequency refrigerators/freezers. *Applied Thermal Engineering,* volume 24, Issues 14–15, Pages 2281-2292.

[9] Ekren O., Şahin S. ve İşler Y. (2010). Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve. *International Journal of Refrigeration*, volume 33, Issue 6, Pages 1161-1168.

[10] https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/70149/mod_resource/content/0/GDM404_10.pdf

[11] https://isccompanies.com/parts-distribution/motors/ac-motors/

[12] Anthessh R., Subrahmanya B., and Rajkiran B. (2021). Performance investigation of single-phase capacitor start –capacitor run induction motor drive. *Materials Science and Engineering*, Vol 1065.

[13] Güngör Bal (2011). *Özel elektrik Makinaları*, Seçkin Yayınevi, shf:128-153.

[14] Min, S. G., Kim, H. J., Lee, J. K., Hwang, J. H., ve Lee, S. (2017). Heuristic algorithm for performance improvement of non-communication inverter type refrigerator. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(2), 133–138.

[15] Hamad A. J., Khalifa A. H. N. ve Khalaf D. Z. (2018). The effect of compressor speed variation and vapor injection on the performance of modified refrigeration system. *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.)*, Vol. 12, N. 3 ISSN 1970- 8734.

[16] Pattana S., Tantakitti C. ve Wiratkasem K. (2019). Energy saving in six doors walk-in cooler. *Energy Reports*, Volume 6, Supplement 2, Pages 510-515.

[17] Henry, N., Munan, W. G., Azhar, A. A., Sumeru, K., & Zulkarnain, A. L. (2014). Energy analysis and compressor performance of refrigerator system using programmable logic control (PLC). *Applied Mechanics and Materials*, 554, 469–473.

[18] Velásquez C. A. P., Velásquez H. J. C. ve Botero M. A. G. (2014). Identification and digital control of a household refrigeration system with a variable speed compressor. *International Journal of Refrigeration*, volume 48, Pages 178-187.

[19] Ekren O., Çelik S., Noble B. ve Krauss R. (2013). Performance evaluation of a variable speed DC compressor. *International Journal of Refrigeration*, volume 36, Pages 745-757.

[20] Silveira A. S., Marcelo DC de Oliveira, Neto A.T. and Hermes C. JL (2021). Least power point tracking (LPPT) control for refrigeration systems running with variable-speed compressors. *International Journal of Refrigeration*, Volume 125, Pages 132-137.