

Düşük Şarjlı Çoklu Kompresörlü Soğutma Sistemlerinin Farklı Soğutucu Akışkanlara Göre Termodinamik ve Çevresel Performanslarının Değerlendirilmesi

M. Ziya SÖĞÜT
Hüseyin BULGURCU
Enver YALÇIN

ÖZET

Dünyada market uygulamalarında farklı evaporatör sıcaklığına sahip soğutma sistemlerini tek merkezli beslemek için geliştirilen sistemler arasında düşük şarjlı çoklu kompresörlü soğutma sistemleri öne çıkmaktadır. Bu sistemler çoklu kontrol imkanının yanında düşük şarj miktarlarıyla daha az enerji ve daha az emisyon değerine sahiptir. Ancak bu sistemlerde de doğru soğutucu akışkan tercihi, sistemin enerji tüketimini, emisyon potansiyellerini doğrudan etkileyecektir. Bu çalışmada bir market uygulaması için düşük şarjlı çoklu kompresörlü soğutma sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri yapılarak performansları incelenmiştir. Çalışmada yaygın kullanılan R-404A gazı ve R-507 gazı ile birlikte alternatif olarak değerlendirilen R-407C ve R-152a soğutucu akışkanları referans alınmıştır. Ayrıca her akışkan için toplam eşdeğer ısınma etkisi (TEWI) referans alınarak emisyon etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük Şarj, Soğutkanlar, Toplam Eşdeğer Küresel Isınma, STK, Gaz Emisyonları

1. GİRİŞ

Dünyada soğutma uygulamaları arasında yaklaşık %17 gibi önemli bir paya sahip ticari soğutma uygulamaları; yüksek enerji tüketen ve büyük miktarda soğutucu akışkan kullanan uygulamalardır. Ticari soğutma uygulamalarından biri olan market soğutma sistemleri perakendecilik sektörü içinde, gıdaların korunması, muhafazası ve perakende satışları gibi pekçok hizmet uygulamasında yoğun olarak kullanılmaktadır. Market uygulamalarında maliyetler üzerinde önemli etkiye sahip olan bu sistemlerde enerji maliyetlerinin azaltılması, öncelikle sistem seçiminin doğru yapılmasına bağlıdır. Ayrıca, farklı soğutma alanlarına sahip market soğutmacılığında sistemlerin işletme maliyetleri üzerindeki etkileri, soğutucu akışkanların neden olduğu çevresel etkiler, bu sistemlerde enerjinin etkin kullanımı ile birlikte düşük emisyonu sahip akışkan tercihinin de öne çıkarmıştır [1].

Abstract:

Low-charged multi-compressor refrigeration systems stand out among cooling systems developed to feed a single center having different evaporator temperature in the world market applications. These systems have less energy and fever emission values with quantities of low charge alongside multiple control systems. However, the correct choice of refrigerant affects directly energy consumptions and emissions potentials also in these systems. In this study, first, the performances of the low charge multi-compressor cooling systems for a market applications are examined as dependent on energy and exergy analyses. In these analyses, R-404A and R-507 gasses used commonly together with R-407C and R-152a gasses considered alternative refrigerants are taken as reference. Besides, effects of CO₂ emissions are calculated separately for each refrigerant by the Total Equivalent Warming Impact (TEWI) taken reference.

Key Words:

Low Charge, Refrigerant, sTEWI, COP, Gas Emmisions

Makale

Market soğutma uygulamalarında çoğunlukla doğrudan sıkıştırılmalı (DX) sistemlerin ve soğutucu akışkan olarak da R404A gazının yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir. Bu sistemlerde yüksek enerji tüketimleri, hat kayıpları, yüksek miktarda soğutucu akışkan ihtiyaçları ve eski teknolojilere bağlı yüksek bakım onarım maliyetleri; ekonomik parametreleri ve çevresel koşulları olumsuz etkilemektedir.

Günümüzde bu tür sistemler yerine farklı teknolojiler geliştirmiştir. Bunlar arasında düşük şarjlı çoklu kompresörlü soğutma sistemleri de düşük akışkan şarjı ve yüksek verimleriyle dikkat çekmektedir [2].

Soğutma uygulamalarında sistemlerin enerji verimlilik performansları, performans verimine (COP) bağlı olarak yapılmaktadır. Bu parametre sadece nicelik olarak enerji kullanımı ile ilgili değerlendirmeye imkân verirken, tersinmezliğin neden olduğu verimsizliğin ve sistemlerin neden olduğu çevresel etkilerin değerlendirilmesinde yeterli değildir. Oysa gerçek performanslar incelendiğinde, sistemlerin etiket değerlerinden farklı performanslar görülmekte, sistemlerde bunun nedenlerine ilişkin veriler bulunmamaktadır. Bu da enerji analizlerinin sistemlerdeki kayıplar veya tersinmezliklerin tanımlanmasında yetersizliğini göstermektedir. Termodinamik proseslerde enerji akışlarına bağlı tersinmezliklerin bir ölçüsü olarak exergy analizleri öne çıkmaktadır.

Referans alınan çevre koşullarında sistemde elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanan ekserji termodinamik süreçlerde kütle ve enerji akışında niteliğin bir ölçüsüdür [3, 4]. Termodinamik süreçlerde ekserji analizi; etkili bir konsepttir ve modern termodinamik yöntemlerde gelişmiş bir araç olarak kullanılır. Ekserji analizlerinin temel amacı ısı ve kimyasal sistemlerde ortaya çıkan kayıpların önemini nicel olarak tahmin etmek ve nedenlerini araştırmaktır. Ekserji analizleri, enerji, basınç, sıcaklık gibi farklı termodinamik faktörlerin önemini karşılaştırılması, bu termodinamik şartların süreç üzerinde etkilerinin iyi anlaşılması ve değerlendirilen sistemlerin tersinmezliklerinin tanımlanması, sistemlerin geliştirilmesinin en etkili yollarının tanımlanması

için yol gösterir [5]. Ekserjiyi doğru anlamak ve verimle sağlanabilecek bilgiler çevresel etki ve sürdürülebilir enerji sistemleri alanında çalışan bilim adamı ve mühendisler için gereklidir. Günümüzde termodinamik süreçlerde yol gösterici pek çok çalışma görülmektedir [6-10]. Benzer çalışmaların soğutma sistemleri ve uygulamaları için de yapıldığı görülmektedir [11-14].

Yaklaşık yıllık 60-70 milyon soğutma sisteminin üretildiği günümüzde yüz milyonlarca soğutucu ve iklimlendirme üniteleri çalışmaktadır. İklim değişikliklerinin etkisine de bağlı olarak da talebin sürekli artacağı görülmektedir. 90'ların başından itibaren, stratosferde ozon tüketiminin artması, sera gazlarının emisyon etkileri nedeniyle soğutma ve iklimlendirme teknolojilerinde enerji tüketiminin azaltılması, daha çevreci akışkanların tercihini öne çıkarmıştır [15]. Son yıllarda toplam eşdeğer ısınma etkisi (Total Equivalent Warming Impact-TEWI) soğutucu akışkanların emisyon etkilerinin tespitinde kullanılan en aktif yöntemdir. TEWI değeri bir soğutma sisteminin enerji tüketimine bağlı dolaylı emisyonlar ile, soğutucu akışkanın küresel ısınma potansiyeline (GWP) bağlı doğrudan emisyon etkilerinin oluşturduğu toplam emisyon etkisini tanımlamayan önemli kriterdir [16].

Süpermarket soğutmalarda enerjinin verimli kullanımı ve özellikle soğutma sistemlerinden kaynaklı emisyon etkilerinin azaltılması için başta düşük şarjlı çoklu kompresörlü soğutma sistemler gibi alternatif uygulamalar yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada düşük şarjlı çoklu kompresörlü bir soğutma sisteminin referans alınan R-404A, R-407C ve R-152a soğutucu akışkana ve birim soğutma kapasitesine bağlı olarak; COP ve ekserjetik performansları ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra her bir akışkan için sistemin TEWI değerine bağlı CO₂ emisyon etkileri de hesaplanmıştır.

2. SÜPERMARKET SOĞUTMA UYGULAMALARI

Süpermarket soğutmada gıda ürünlerinin muhafazasından depolanmasına kadar pek çok sıcaklık aralığında pek çok alt sistemin çalıştırıldığı kom-

pleks yapılara sahip farklı soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde tercih parametreleri, başta ürün olmak üzere, depolama hacimleri, soğutucu akışkan tipi ve soğutucu akışkan kapasiteleri olarak sayılabilir. Bir süpermarket için enerji tüketim noktaları, aydınlatma, yıllık enerji tüketimleri süpermarketler yaklaşık 2 milyon kWh civarında iken, grossmarket veya hipermarketlerde bu değer yaklaşık 3 milyon kW'i bulmaktadır. Bu tüketim potansiyelinde, soğutma uygulamaları bir marketin toplam enerjisinin yaklaşık %45-%60 aralığına sahiptir [17].

Geleneksel uygulamalarda market soğutma için tercih edilen soğutma sistemlerinin başında çoklu kompresörleri ve doğrudan genleşmeli sistemler (Direct expansion systems-DX) olduğu görülmektedir. Marketin büyüklüğüne bağlı olarak kW başına ortalama 4-5 kW enerji tüketen bu sistemler; geleneksel buhar sıkıştırma çevrim esasına göre tercih edilen soğutucu akışkanın evaporatör kapasitesine bağlı bulunduğu ortamdan ısının alınması ve ısının dış ortama atılması prensibiyle çalışırlar. Bu sistemlerde market sergi alanlarındaki evaporatör özellikli kabinler veya soğuk odalardaki doğrudan genleşmeli hava soğutmalı serpantinler, yakın bir mahale yerleştirilmiştir. Bu sistemlerde kompresör, kondenser ve diğer elemanların bulunduğu bir makine dairesi vardır ve burdaki elemanlar ile evaporatör ünitelerini bağlantıları için büyük miktarda boru hatlarına ihtiyaç duyulur. DX sistemler için soğutucu akışkan ihtiyacı birim soğutma yükü başına yaklaşık 4 veya 5 kg'dır. DX sistemlerde uzun boru hatları ve bağlantı elemanlarının kullanılması, sistemlerde büyük miktarlarda soğutucu akışkan kayıplarının oluşmasına yol açar. Eski sistemlerde bu soğutucu akışkan kayıpları yıllık toplam miktarın yaklaşık %30'u kadarken yeni sistemlerde bu oran %15'leri bulmaktadır [1].

Küresel ısınma üzerinde soğutucu akışkanların etkileri, büyük alanlarda ve kompleks yapılarda uygulanan bu sistemlerde %30'lara varan sızıntı oranlarının olması, uygulamada ürün özelliğine bağlı farklı zon ihtiyacı duyulan yapılar için sistem kontrollerinde yaşanan sorunlar ile birlikte verimliliğin düşük oldu-

ğu bu DX uygulamalar yerine, daha etkin sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sistemler;

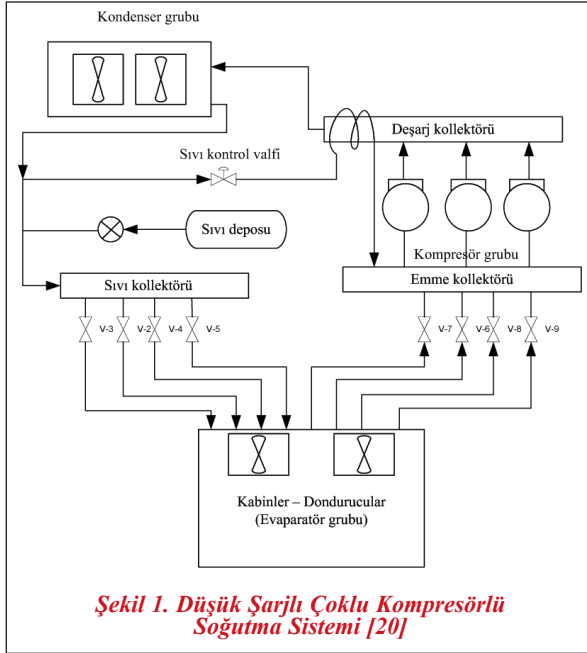
- İkincil kapalı devreli sistemler (secondary loop systems); Birincil devre dışında, merkezi chiller ile kabinler arasında ikincil bir devrenin çalıştığı sistemlerdir. İkincil akışkan chiller tarafından soğutulur ve bu etkiye bağlı olarak kabin soğutmaları gerçekleşir. Bu sistemlerde, genellikle düşük ve orta sıcaklıklar için iki ayrı devre kullanılır. Bu işlemde düşük sıcaklıkla donmuş gıdalar, orta sıcaklıkla soğutulmuş gıdaların soğutulması salamura ile sağlanır. Bu yaklaşımda iki zon kontrolü yapılabilirken, her bir zon farklı kompresör grubuyla kontrol edilmesi yatırım maliyetlerini olumsuz etkileyebilir. İkincil kapalı sistemlerde geliştirilen bir diğer yaklaşım; kademeli (cascade) soğutmadır. Bu tür sistemlerde yüksek sıcaklık bölümünde propan kullanılırken, düşük sıcaklık kademesinde CO₂ kullanılmaktadır. Kademeli uygulamada CO₂ özellikle donmuş gıda reyonlarında tercih edilen doğrudan genleşmeli evaporatörler ile ortamdan ısı çeker.
- Yaygın (dağıtılmış) kompresör grublu sistemler (distributed systems); çoklu kompresör gruplarının satış alanlarına yakın yerleştirildiği sistemlerdir. Bu sistemlerde yapı döşemesi altı, sergi yerleri çevreleri veya yakın çevre duvarı sonrasına yerleştirilen kompresör grupları küçük gruplar halinde besledikleri kabinlere yakın yerleştirilerek; sistem, makina odası ile satış reyonları arasında çok uzun borulamalardan kurtarılmıştır [18].

2.1 Düşük Şarjlı Çoklu Kompresör Grubu Soğutma Sistemi

Düşük şarjlı çoklu kompresörlü soğutma sistemleri kontrol vanaları ve ekipmanlarla sistemlerde soğutucu akışkan şarjını kritik değerlerde tutarak düşük akışkanla sistemlerin çalıştırıldığı sistemlerdir. Düşük soğutucu akışkan kullanımına bağlı olarak sistemlerde düşük enerji kullanımını da sağlamaktadır. Bu sistemlerde bir diğer özellik ise kompresör gruplarının bulunduğu alanla evaporatör ünitelerin bulunduğu sergi alanları arasında boru mesafesinin

Makale

etkilerinde azaltılmasıdır. Bu sistemlerde uzun boru mesfelerinin önemi yoktur. Şekil 1’de düşük şarjlı bir soğutma sisteminin çevrim şeması verilmiştir [19, 20].

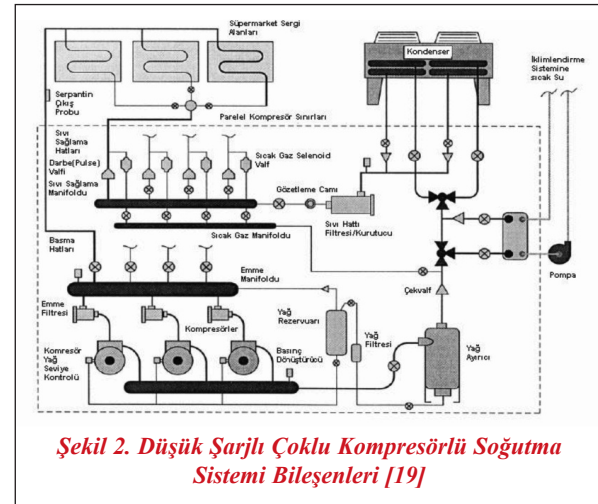


Şekil 1. Düşük Şarjlı Çoklu Kompresörlü Soğutma Sistemi [20]

Düşük şarjlı sistemlerde soğutucu akışkanın şarjının sınırlama işlevi, normal sıvı depolama tankında toplanan akışkanın çalışma parametrelerine bağlı kontrollü şarjına bağlıdır. Bu kontrol yardımıyla toplam soğutucu akışkan şarjında yaklaşık 1/3 oranında tasarruf sağlanmış olur. Bu şarj kontrol yaklaşımı, sistemde düşük akışkan kullanımına bağlı olarak çevrimin düşük sıcaklıklarda performanslı çalışmasını sağlar. Bu durum sistemde dolaylı olarak enerji tasarrufu sağlar. Bu sistemde yoğunlaşarak kondenserden çıkan soğutucu akışkan sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasında sabit bir farkın korunmasını sağlamak için sistemde kontrol valfi ve çevre sıcaklık sensörü kullanılır. Kontrol valfinden sıvı fazdaki soğutucu akışkan geçerken, deşarj kolektöründe ısı değişimi sonucu buharlaşır. Bu sistemlerde önerilen minimum yoğuşma sıcaklık değeri düşük ve orta sıcaklıklı soğutmalarda sırasıyla 4,5 °C ve 15 °C’dir [18].

Düşük şarjlı sistemlerde evaporatörlerin ihtiyaç duyduğu minimum akışkan şarjına bağlı çalıştırılan bir

diğer yaklaşım, prensip şeması Şekil 2’de verilen ikincil şarj kontrolü yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda şarj miktarı azaltılarak, evaporatörlerin kullanıldığı sergi reyonlarıyla depolama hacimlerine doymuş sıvı buhar karışımı soğutucu akışkan gönderilir. Bu sırada denge ve kontrol valfleriyle kompresöre soğutucu akışkan girişi de kontrol edilir. Böylece evaporatör ve kompresörlerde soğutucu akışkan akışı kontrol altına alınır. Bu durum DX sistemlerle karşılaştırıldığında %30’lara varan bir tasarrufu yaratır. Ayrıca sistemlerde by-pass kontrol vana kullanımı kompresörlerin düşük basınçta çalışma imkânı sağlar ki bu durum da sistemlerde enerji tasarrufunu sağlar. Soğutmada kompresörler kadar kondenser fanlarında kompresör tüketimine yakın enerji tüketirler. Bu durumda fan kontrol stratejisinin geliştirilmesi de önemlidir. Bunun için değişken hızlı kondenser fanlarının kullanımı öne çıkmıştır. Ayrıca, bu sistemlerin bazı uygulamalarında kondenserdeki yoğuşma kontrol edilirken kullanılan ısı değiştiricileri yardımıyla elde edilen sıcak su iklimlendirme sistemleri gibi farklı amaçlar için kullanılabilme imkânı sağlar [19, 20].



Şekil 2. Düşük Şarjlı Çoklu Kompresörlü Soğutma Sistemi Bileşenleri [19]

Düşük şarjlı sistemlerde soğutucu akışkan olarak çoğunlukla R-404A gazı kullanılırken bazı uygulamalarda R-507 gazının da kullanıldığı görülmektedir. Bu sistemlerde şarj miktarı; evaporatörler tarafından şarjın minimum miktarlarda kullanıldığı sistemlerde ortalama %30, sıvı depolu sistemlerde ise bu oran %66’lara kadar çıkmaktadır [IEA 2003,

Baxter 2003]. Bu durum bu sistemlerde ortalama %25 daha az emisyon salınımına yol açmaktadır. Oak Ridge National Laboratuvarın (ORNL) çalışmalarına göre, düşük şarjlı sistemler, geleneksel doğrudan genleşmeli DX sistemlere göre ortalama %11,6 daha düşük emisyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir [1].

3. EKSERJİ KAVRAMI

Soğutma sistemlerinde makinelerin çalışma verimlerinin bir ölçüsü olarak etkinlik katsayısı (COP) tanımlanmıştır. COP, çekilen ısı miktarının kompresöre verilen enerji miktarına oranı olarak tanımlanır. Bir soğutma makinası için (COP);

$$COP = \frac{Q_L}{W_{net}} \quad (1)$$

dir [21]. Burada Q_L soğutulan ortamdan çekilen ısıyı, W_{net} kompresöre verilen net işi ifade eder. Soğutma makinaları bir çevrim esasına göre çalışan sistemlerdir ve çevrim için elde edilecek net iş;

$$W_{net} = Q_H - Q_L \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Q_H makinanın bulunduğu dış ortama verilen ısıdır. Soğutma makinalarında COP birinci yasa verimi olarak ifade edilir. Bir soğutma makinasının gerçekte iş yapabilme kabiliyeti termodinamiğin ikinci yasasıyla göre ekserji kavramı ile tanımlanır. Soğutma sistemlerinde ekserji verimi gerçek COP'nin aynı çalışma parametrelerinde tersinir bir makinanın COP_{tr} 'ye oranıdır. Bir soğutma makinasında COP_{tr} ;

$$COP_{tr} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (3)$$

dir [22]. Burada T_H dış ortam sıcaklığını, T_L ısı çekilen ortam sıcaklığını ifade eder. Bu durumda soğutma makinalarının ekserji verimi;

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{tr}} \quad (4)$$

dir. Denklem (1) ve Denklem (3) birleştirilirse;

$$\eta_{II} = \frac{Q_L \frac{T_H}{T_L} - Q_L}{W_{net}} \quad (5)$$

dir [7].

4. TOPLAM EŞDEĞER ISINMA ETKİSİ (TEWI) KAVRAMI

Soğutucu akışkanların neden olduğu emisyon etkileiri özellikle çevresel tehditin artmasıyla birlikte pek çok yönüyle tartışılmaya başlanmıştır. İlk değerlendirmelerin yapıldığı Montreal Protokolü sürecinde, atmosfer üzerinde sentetik soğutucu akışkanların sera gazı emisyonları ve küresel ısınma potansiyellerinin etkileri pek çok yönleriyle tartışılmıştır. Daha sonra 1990'da Londra Konferansı'nda, Sistemlerde COP'lerin etkisine bağlı olarak soğutucu akışkanların küresel ısınma etkilerinin azaltılması için ozon tüketim özelliğine sahip maddelerle, küresel ısınma potansiyeli düşük akışkanların yer değiştirmesini amaçlayan bir prosedür tartışılmış ve soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanların küresel ısınma potansiyelleri sorgulanmıştır. Bu toplantıyı izleyen Kopenhag toplantısında ise soğutma sistemlerinin neden olduğu toplam küresel ısınma potansiyelinin değerlendirildiği bir konsept sunulmuştur. Bu konseptte soğutma sistemi için fosil yakıtlı güç sistemlerinden sağlanan enerjinin CO_2 emisyon etkisi ile soğutucu akışkanın küresel ısınma potansiyeline bağlı CO_2 emisyon etkisi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme daha sonra Oak Ridge National Laboratuvarı tarafından geliştirilen Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi (Total Equivalent Warming Impact-TEWI) olarak tanımlanmıştır [2].

TEWI konsepti bir sistemin yaşam sürecinde kullandığı enerji nedeniyle atmosfere saldırdığı CO_2 emisyonunun küresel ısınma etkisiyle (indirect effect) soğutucu akışkan emisyonlarından ortaya çıkan etkilerin toplamı olarak geliştirilmiştir. Soğutma sistemlerinin üretim sürecinde neden oldukları sera gazı emisyonları ve sistemlerin üretimi için harcanan enerjiden kaynaklanan emisyonları içeren yaşam döngüsü iklim performansının (Life Cycle Climate Performance-LCCP) aksine TEWI sisteminin çalışma sürecindeki emisyonları içerir [16].

EN 378:2000'de tanımlanmış olan TEWI değeri herhangi bir soğutucu akışkanın emisyon potansiyelinin değerlendirildiği bir yaklaşım yöntemidir. Bu parameter farklı sistemlerin bağıl etkilerini doğrudan

Makale

karşılaştırmak için kullanılabilen uluslararası bir yöntem ve eşitliktir. TEWI, yaşam sürecinde sistemlerin enerji tüketimleri ile küresel ısınma potansiyellerine bağlı çevresel etkileri kapsar. TEWI değerinin yüksekliği, çevresel etki yönüyle sisteminin zayıflığını gösterir. TEWI değeri;

$$TEWI = [GWP \cdot L \cdot n] + [GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha_{\text{recovery}})] + [n \cdot E_{\text{annual}} \cdot \beta]$$

Leakage Losses
Recovery Losses
Energy Consumption
Direct GWP
Indirect GWP
(kgCO₂)
(6)

olarak hesaplanır. Burada TEWI toplam eşdeğer ısınma etkisi, GWP küresel ısınma potansiyeli, L sızıntı oranı, n sistemin çalışma süresi, m akışkan şarj miktarı, α_{recovery} geri dönüşüm faktörü, E_{annual} yıllık enerji tüketimi, β ise güç sisteminde üretilen CO₂ emisyonudur [23].

Farklı maddelerin küresel ısınma etkileri GWP veya küresel ısınma potansiyelleri olarak bilinen ve CO₂ emisyonu için kullanılan bir indeksle karşılaştırılır. Bir maddenin küresel ısınma potansiyeli (GWP) Maddenin 1 kg'ının 1 kg CO₂'in küresel ısınma potansiyeline bölünmesiyle bulunur. Bu etkiler 100 yıllık bir süre veya 500 yıllık bir süre için değerlendirilebilir [24].

Soğutma prosesleri tarafından oluşan iklimsel etkilerin bütünü doğrudan veya dolaylı sera gazı emisyonlarının toplamıdır. Doğrudan etki, ömür sürecinde kayıplar, bakım onarım ve sızıntı etkileri nedeniyle oluşan soğutucu akışkanların emisyonlarını içerir. Dolaylı etki ise güç sistemlerden sistemi çalıştırmak için gerekli elektrik enerjisine bağlı CO₂ emisyon etkilerini içerir. Ancak enerjiye bağlı bu dolaylı emisyonlar ile atık yok etme dikkate alınmıştır [25].

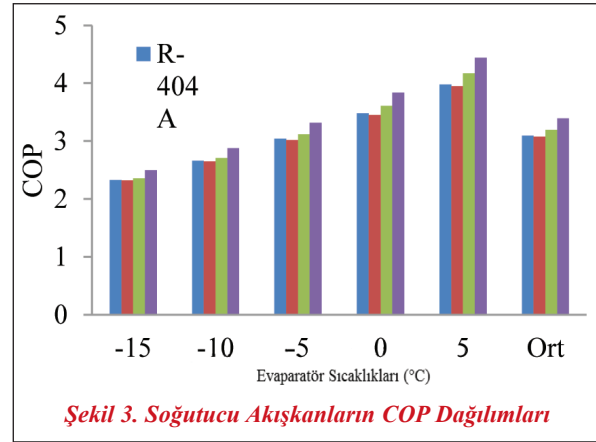
TEWI analizlerinde, üretilen enerjinin birim başına emisyonu dolaylı TEWI etkisinin hesaplanmasında dikkate alınan bir parametredir. Elektrik üretiminin CO₂ emisyonu güç santrallerinde enerji taşımının karışımına bağlıdır. Yeryüzünde seragazi etkilerinin iklimsel sonuçları küresel bir problem olarak karşımıza çıkar. Dolaylı etkide birim güç başına CO₂ emisyon etkisinin değeri dünyada farklı değerlendirmelerde kabul edilir. Bu çalışmada Avrupa'da,

Japonya'da, Kuzey Amerika'da kabul edilen 0.47 kg CO₂/kWh değeri CO₂ emisyon değeri olarak kabul edilmiştir [15].

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

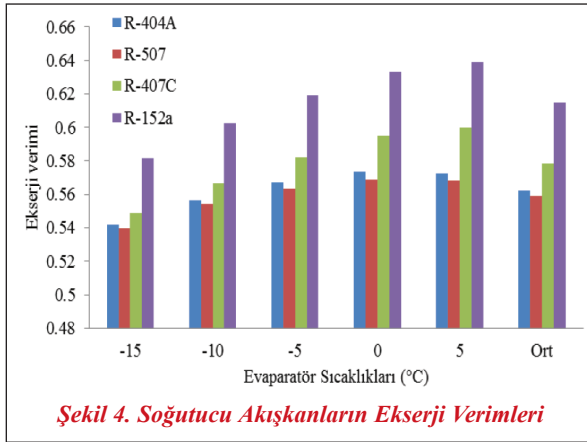
Düşük şarjlı uygulamaların örnekleri incelendiğinde yaklaşık 100 kW'lara ulaşan bir soğutma kapasitesi ve 40 kg'lara ulaşan bir şarj miktarı görülmektedir. Bu sistemlerde birim soğutma gücü için ortalama 2,77 kg/kW şarj miktarı kullanılmaktadır.

Çalışmada bu değer referans kabul edilmiş ve birim soğutma kapasitesi için analizler yapılmıştır. Ayrıca sistemlerde tercih edilen R-404A ve R-507 soğutucu akışkan ile alternatif olarak incelenen R-152a ile R-407C soğutucu akışkanların -15/46 °C sınır sıcaklık değerleri için adyabatik koşullarda (1-5) eşitlikleri kullanılarak COP ve ekserjetik analizleri yapılmıştır. Evaporatör değişim sıcaklıklarının market ürün muhafaza koşulları değerlendirilerek -15 °C ile 5 °C aralığı arasındaki COP ve ekserjetik performansları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 3'de bu soğutucu akışkanların COP dağılımları verilmiştir.



Şekil 3. Soğutucu Akışkanların COP Dağılımları

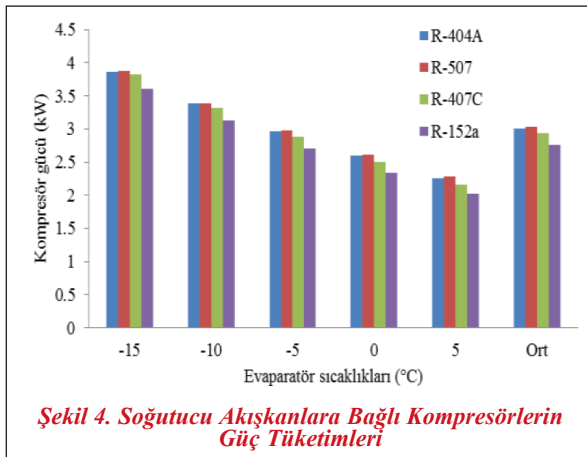
Bu analizlerde en yaygın kullanılan R-404A gazının ortalama COP değeri 3,098 iken alternatif akışkanlar R-407C ve R-152a için bu değerler sırasıyla ortalama 3,194 ve 3,396 olarak bulunmuştur. Bu sistemler için R-404A gazı yerine alternatif akışkanların performans artışları sırasıyla ortalama %3.1 ile %9.62 arasında değişmektedir. Düşük şarjlı bu sistemler için benzer değerlendirme ekserji analizleriyle de yapılmış elde edilen sonuçlar Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Soğutucu Akışkanların Ekserji Verimleri

Ekserji verimi bu tür termal prosesler açısından tersinmezliklerin tanınması ve sistemlerde geliştirme potansiyellerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Analizlerde diğer sistemlere nazaran daha düşük şarj oranı ile kullanılan bu sistemlerde akışkan tercihlerinin de sistemlerde performansı etkilediği görülmüştür. Nitekim en yaygın kullanılan R-404A soğutucu akışkan için %56,23 iken, alternatif olarak önerilen R-407C ve R-152a soğutucu akışkanları için bu oran sırasıyla ortalama %57,85 ve %61,50 olarak tespit edilmiştir. Bu gazların mevcut gazlara göre mukayese edildiğinde R-404A'ya göre sırasıyla %2,88 ve %9,37, R-507 gazına göre %3,53 ve %10,05 daha iyi performanslara sahiptir. Bu performanslar sistemin enerji tüketimiyle de ilişkilidir. Çalışmada soğutucu akışkanlara bağlı enerji performanslarındaki değişim Şekil 6'da verilmiştir.

Soğutucu akışkan tercihinin en önemli etkisi prosesin güç tüketimiyle değerlendirilir. En yaygın kulla-



Şekil 4. Soğutucu Akışkanlara Bağlı Kompresörlerin Güç Tüketimleri

nılan R-404A gazının kullanılması, bu sistemlerde enerji tüketim değerleri yönüyle kötü bir tercih olduğunu göstermektedir. Mevcut gazlar arasında R-404A gazını kullanmak daha doğru bir tercih olarak görülebilir. Bu gazın ortalama güç tüketimi birim soğutma başına 3,01 kW iken, alternatif akışkan kullanımında R-407C için birim tüketim 2,94 kW, R-152a için 2,76 kW'tır.

90'lı yılların başında iklimlendirme ve soğutma uygulamalarında kullanılan soğutucu akışkanların ozon tüketim etkileri ve küresel ısınma potansiyelleri nedeniyle küresel ısınma etkilerinin oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu etkinin azaltılmasına yönelik olarak öncelikle, Montreal Protokolü ve Avrupa Konseyi Direktifi (3093/94) ile 1930'larda soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan amonyak gibi soğutucu akışkanların yerine güvenli akışkanlar olarak kullanılan hidroclorofluorocarbons (HCFCs) ve clorofluorocarbons gazlarının kullanımını ve satışlarını sınırlandırmıştır [2].

Bunların alternatifi olarak hidrofluorocarbons (HFCs) akışkanlar ve onların karışımları olan R-134a, R-404A, R-507, R-407C ve R-410A gazları market uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu gazların ozon tabakasını inceltme potansiyellerinin düşük olmasına (ODP) karşın, küresel ısınma potansiyellerinin yüksek olması (GWP) çevresel etki yönüyle önemli bir problem olarak göze çarpmaktadır [3]. Düşük şarjlı sistemlerde kullanılan akışkanlar ile önerilen alternatif akışkanların çevresel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

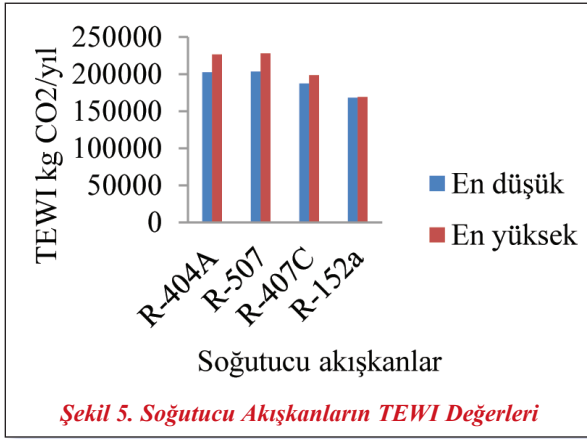
Tablo 1. Soğutucu Akışkanların Çevresel Özellikleri

Soğutucu Akışkanlar	R-404A	R-507	R-407C	R-152a
Ozon Tüketimi (ODP)	0	0	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	3900	4000	1530	140
Atmosferde yaşam ömrü (yıl)	16		29	29

Çevresel parametreler için geri dönüşüm faktörü en düşük 0,5 ve en yüksek 0,95 değeri için kabul edil-

Makale

miştir. Sızıntı oranı ise düşük şarjlı sistemler için literatüre bağlı en düşük %15, en yüksek %30 aralığında görülmektedir. Bu çalışmada da en düşük ve en yüksek sızıntı oranları dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Çalışmada emisyon değerleri için yıllık 8.600 çalışma saati referans alınmıştır. Çalışmada düşük şarjlı sistemlerin CO₂ eşdeğeri emisyon potansiyelleri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5’de verilmiştir.



Bu değerlendirmelere göre TEWI analizlerinde R-404A gazının en düşük emisyon potansiyeli 202,3 ton CO₂/yıl, en yüksek 226,5 ton CO₂/yıl olarak bulunmuştur. R-507 gazının emisyon potansiyeli ise R-404A gazından daha yüksektir. Ancak alternatif olarak önerilen R-407C ve R-152a gazlarının emisyon potansiyelleri sırasıyla en düşük 187,3 ton CO₂/yıl ve 168,2 ton CO₂/yıl, en yüksek 198,7 ton CO₂/yıl ve 169,2 ton CO₂/yıl olarak bulunmuştur.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada düşük şarjlı soğutma sistemleri için farklı soğutucu akışkanlar referans alınarak öncelikle termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre COP ve ekserji verimleri incelenmiştir. Daha sonra her bir akışkanın çevresel etki potansiyelleri TEWI değerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- COP performansında R-404A gazı 3,098 iken, R-407C'nin 3,194, R-152a için 3,396 bulunmuştur.
- Ekserji veriminde de benzer etki görülmüştür.

Tersinmezlik oranı R404A için %43,76 iken R-407C'nin %42,15, R-152a için %38,50 bulunmuştur.

- Soğutucu akışkana bağlı kompresörlerin güç tüketimlerinde ise R-404A gazına göre R-152a gazı %8,31, R-407C gazı için %2,46 daha düşük değerlere sahiptir.
- CO₂ eşdeğeri emisyon potansiyelleri incelendiğinde ise, alternatif olarak önerilen gazların emisyon potansiyelleri daha düşüktür. R404A gazı referans alındığında R-407C ve R-152a gazları sırasıyla en düşük %7,41 ve %16,86, en yüksek %12,29 ve %25,29 olarak bulunmuştur.

Bu çalışma düşük şarjlı sistemlerde daha az enerji tüketiminin olduğunu göstermiştir. Ancak bu tür potansiyel etkilerin yanında soğutucu akışkan tercihinin önemini de ortaya çıkartmıştır. Çalışmada ayrıca sadece COP değerlendirmesinin sistemleri değerlendirmedeki yetersizliğiyle birlikte, ekserji analizleriyle tersinmezliğin oranları da bulunabilmektedir.

SEMBOLLER

- COP : Soğutma tesir katsayısı
 W_{net} : Net kompresör işi [W]
 Q_H : Kondensörden atılan ısı güç [W]
 Q_L : Evaporatörden çekilen ısı güç [W]
 COP_{tr} : Tersinir durumlar için soğutma tesir katsayısı
 T_H : Yüksek kaynak sıcaklığı [K]
 T_L : Düşük ısı çukuru sıcaklığı [K]
 η_{II} : 2. kanun verimi
TEWI : Toplam eşdeğer küresel ısınma etkisi
GWP : Küresel ısınma etkisi (CO₂=1)
 L_{annual} : Yıllık kaçak miktarı [kg]
 n : Sistem çalışma ömrü (yıl)
 m : Sistemin şarj miktarı [kg]
 $\alpha_{recovery}$: Geri kazanım/yeniden kullanım oranı (0 ile 1 arasında)
 E_{annual} : Ünite başına yıllık harcanan enerji miktarı (kWh)
 β : Endirek emisyon oranı (Her kWh başına kg CO₂)

KAYNAKLAR

- [1] ICF, Amerika süpermarket soğutma sistemlerinin revize edilmiş taslak analizi, ICF Consulting for U.S.

- EPA's Stratospheric Protection Division, Energy Protect Agency, USA, Kasım 2005.
- [2] Horst K., Avrupa'da Soğutucu akışkan kullanımı, ASHRAE journal, 2000 www.ashraejournal.org (17.01.2013 tarihinde erişildi).
- [3] Schijnel, P.P.A.J.V., Kasteren, J.M.N. and Janssen, F.J.J.G., Exergy Analysis—A Tool for Sustainable Technology-in Engineering Education, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi, Hollanda, 1998.
- [4] Dincer, I. and Rosen M.A., Thermodynamic aspects of renewable and sustainable development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Sayı 9, sayfa 169–189, 2005.
- [5] Wall, G., Exergy Flow in Industrial Processes, Teorik Fiziksel Araştırma Grubu, Chalmers Teknoloji Üniversitesi ve GoteborgS Üniveritesi, Goteborg, İsviçre, 1986.
- [6] Kanoglu M, Dincer I, Rosen M. A., Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants, Energy Policy, 2007; 35: 3967–3978.
- [7] Hepbasli A., “A review on energetic, exergetic and exergoeconomic aspects of geothermal district heating systems(GDHSs), Energy Conversion and Management Volume 51, Issue 10, October 2010, Pages 2041-2061.
- [8] Koroneos C.J., Nanaki E.A., Xydis G.A., “Exergy analysis of energy use in Greece”, Energy policy Volume 39, Issue 5 May 2011, Pages 2475-2481.
- [9] Wall G., Exergy Tools In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Wilson Applied Science and Technology Abstracts, Plus Text; 2003. p. 125–36.
- [10] Sogut M.Z., “A research on exergy consumption and potential of total CO₂ emission in the Turkish cement sector”, Energy Conversion and Management 56, (2012) 37–45.
- [11] Stegou-Sagia A., Paignigiannis N.(2005), Evaluation of mixtures efficiency in refrigerating systems, Energy Conversion and Management 46, (2005) 2787–2802.
- [12] Otaibi D.A., Dincer I and Kalyon M., Thermoeconomic optimization of vapor-compression refrigeration systems, Int Comm Heat Mass Transfer, Vol. 31, No.1, pp. 95-107, 2004, page 95-107.
- [13] Ahamed J.U., Saidur R., Masjuki H. H., A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, (2011) 1593–1600.
- [14] Schwiegel M., Meurer C. (1998), “Refrigerants concepts for commercial refrigeration”, Solvay Fluor und Derivate GmbH Technical Service-Refrigerants-Product Bulletin no. C/03.02/16/E, Page 3, 4.
- [15] Hellmann J., and Barthélemy P., AFEAS-TEWI III study: results and evaluation of alternative refrigerants, Solvay Fluor und Derivate GmbH Technical Service-product Refrigerants, Bülten no: C/11.97/06/E, 1997.
- [16] Rhiemeier J.M., Kauffeld M., Leisewitz A., Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment, Çevre Doğa Koruma Bakanlığı Çevresel Araştırma ve Nükleer Güvenlik Araştırma Raporu, 206 44 300, UBA-FB 001180/e, Federal Çevre Ajansı, Londra 2009.
- [17] Brian Fricke and Bryan Becker 2010, Energy Use of Doored and Open Vertical Refrigerated Display Cases, 13th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 12-15, West Lafayette, IN, USA.
- [18] Baxter Van D., 2003, IEA Annex 26: Advanced Supermarket Refrigeration/Heat Recovery Systems Final Report Volume 1-Executive Summary, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
- [19] Güngör A., Süpermarket Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Teknolojilerin Enerji Verimliliği Açısından Karşılaştırılması, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi-13/16 Nisan 2011 / İzmir, sayfa 1185-1199.
- [20] Walker David H., Baxter Van D. 2003. Analysis of Advanced, Low-Charge Refrigeration Systems For Supermarkets, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 2001.
- [21] www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/113914.pdf (12.01.2013 tarihinde erişildi).
- [22] Sogut Z., A study on the exergetic and environmental effects of commercial cooling systems, Int. J. Exergy, Vol. 9, No. 4, 2011.
- [23] Cengel Y., Boles M.A., Thermodynamics: an engineering approach, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [24] Moore D., A comparative method for evaluating industrial refrigerant systems, Sabroe Ltd. (revA). Kasım 2005, www.sabroe.org.
- [25] DUPONT, Dupont refrigerants the science of cool, Du Pont de Nemours (Almanya) GmbH, Almanya, 2005, www.refrigerants.dupont.com.
- [26] Eurammon, Evaluation of the environmentally friendly refrigerant ammonia according to the TEWI Concept, NH₃ for ecologically friendly future, Frankfurt, Almanya 1996, <http://www.eurammon.com>.