

# DÜŞÜK KÜRESEL ISINMA POTANSİYELİNE SAHİP SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN SOĞUTMA UYGULAMALARINDAKİ KULLANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa ARAZ  
Ali GÜNGÖR  
Arif HEPBAŞLI

## ÖZET

Geçmişten günümüze soğutucu akışkan ihtiyacı ve dolayısıyla soğutma çevrimlerinde kullanılan soğutucu akışkanlar değişim göstermiştir. 1830'lardan 1930'lara kadar işe yarayan her akışkan kullanılırken, 1930'lardan itibaren meydana gelen kazalar neticesinde emniyet ön plana çıkmıştır. Emniyetli bir şekilde kullanılabilen bu soğutucu akışkanların ozon tabakasına zarar verdiği görülmüş ve 1990'lardan itibaren soğutucu akışkanların ozon (tabakasını) inceltme potansiyeli (ODP: Ozone Depletion Potential) değerinin sıfır olması şart koşulmuştur. Daha sonra bu soğutucu akışkanların da küresel ısınmaya ciddi katkıları olduğu görülmüş ve artan küresel ısınma endişeleri ile birlikte yeni nesil soğutucu akışkanların düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP: Global Warming Potential) ve yüksek verimlilik özelliklerine sahip olmaları istenmiştir. Bu bağlamda, değişik yasal düzenlemelerle soğutucu akışkanların kullanımına belli sınırlamalar getirilmiştir. Bu yasal düzenlemeler neticesinde CO<sub>2</sub>, R-1234yf, R-1234ze gibi çeşitli alternatif soğutucu akışkanlar ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle yapılan bu yasal düzenlemeler ve getirdiği kısıtlamalar ele alınacaktır. Daha sonra, düşük GWP'li bu soğutucu akışkanlar incelenerek, performans karşılaştırmaları ve irdemeleri gerçekleştirilecektir. Son olarak da, bunların soğutma uygulamalarındaki kullanımları değerlendirilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel Isınma, Soğutucu Akışkan, GWP, R-1234yf, R-1234ze.

## ABSTRACT

The need for refrigerants and thereby the refrigerants used in refrigeration cycles have changed from past to present. While all the available fluids were used between the 1830's and 1930's, safety has come into prominence since 1930's because of the refrigerant related accidents. Then, it came out that these refrigerants have depleted the ozone layer and since the 1930's, it has been mandated that the refrigerants should have zero ozone depletion potential (ODP). After that, it has been seen that these refrigerants have had serious contribution to the global warming. Parallel to the raising the global warming concerns, it has been expected that the next generation of the refrigerants have low global warming potential (LGWP). In this context, certain restrictions to utilization of refrigerants have been placed through various legal legislations. As a result, alternative refrigerants, such as CO<sub>2</sub>, R1234yf, R-1234ze, have been proposed and used.

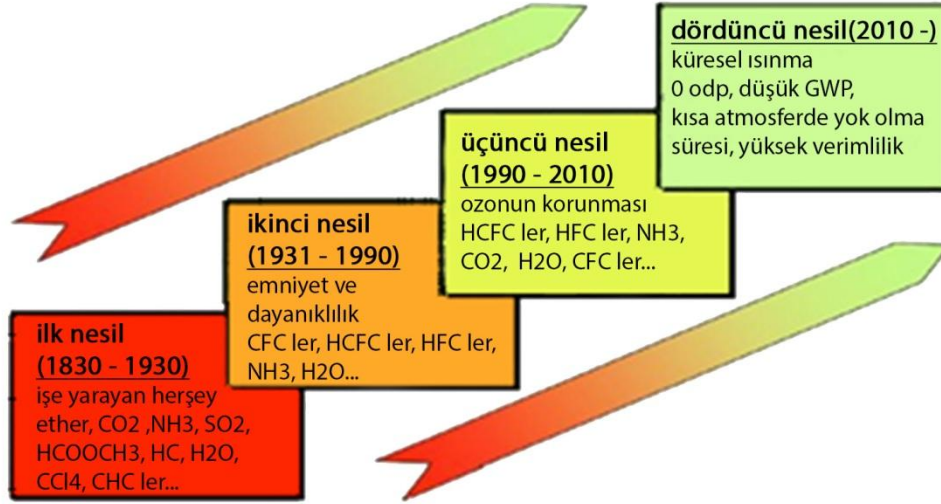
The present study will discuss about some legislations and restrictions first. These LGWP refrigerants will be then investigated while their performances will be compared with each other. Finally, utilization opportunities of these refrigerants in refrigeration applications will be assessed.

**Key Words:** Global Warming, Refrigerant, GWP, R-1234yf, R-1234ze.

## 1. GİRİŞ

Soğutma tarihi, depolanmış buzun kullanıldığı, suyun buharlaştırıldığı ve benzer uygulamaların yapıldığı, eski zamanlara uzanmaktadır. 1600'li yıllarda farklı ülkelerden birçok araştırmacı faz değişim fiziği konusunda çalışarak akıllı (insan yapımı) soğutmanın temellerini atmışlardır. 1830'lu yıllara gelindiğinde ise, Perkins ilk buhar sıkıştırımlı makineyi icat ederek soğutucu akışkanlarla tanışmamızı sağlamıştır [1].

1830'lardan bugüne soğutucu akışkanın sahip olması gereken özelliklere bağlı olarak çok sayıda farklı soğutucu akışkan geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Calm [1] yapmış olduğu bir çalışmada, soğutucu akışkanları dört nesle ayırmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Geçmişten Bugüne Soğutucu Akışkanlar [1].

1. Nesil(1830-1930) : İşe yarayan her akışkan kullanılmıştır.
2. Nesil(1931-1990) : Güvenlik ve kalıcılık özellikleri önem kazanmıştır.
3. Nesil(1990-2010) : Ozon tabakasına zarar vermeyecek soğutkanlar kullanılmıştır.
4. Nesil(2010- ) : Artan küresel ısınma endişelerinden dolayı soğutkanların, 0 ya da düşük ODP ve GWP değerlerine, yüksek verimlilik özelliklerine sahip olması ve atmosferde kısa sürede yok olması gerekli hale gelmiştir [1].

## 2. SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ÇEVRESEL ETKİLERİ VE YASAL DÜZENLEMELER

İklimlendirme ve soğutma sistemlerinin kullanımı günümüzde vazgeçilmez bir hal almıştır ve dünya enerji tüketiminin yaklaşık % 9'unu bu sistemler oluşturmaktadır [2]. Bu nedenle bu sistemlerde kullanılan soğutucu akışkanların küresel ısınmaya olan etkisinin önemi, artan küresel ısınma endişeleri ile birlikte, gittikçe artmaktadır.

## 2.1. Temel Kavramlar

Soğutucu akışkanların çevreye olan etkileri konusunda bilinmesi gereken bazı önemli kavramlar şunlardır:

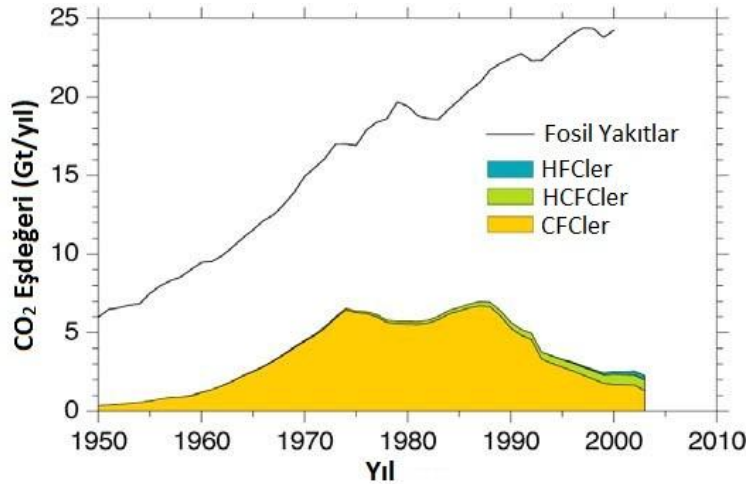
**Ozon İnceltme (Aşındırma) Potansiyeli (Ozone Depletion Potential: ODP):** Bir maddenin ozon tabakasına zarar verme riskini ifade eden ozon inceltme potansiyeli, ODP'si 1 olarak kabul edilen R11 molekülü referans alınarak ifade edilir [3].

**Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential: GWP):** Sera gazı tesiri ile gezegen ısınma etkisinin bir göstergesidir ve küresel ısınma potansiyeli değerleri GWP'si 1 olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) referans alınarak hesaplanır [3].

**Yaşam Boyu İklim Performansı (Life Cycle Climate Performance: LCCP):** İklimlendirme sistemlerinin yarattığı karbondioksit salınımı etkisini belirlemenin bir yolu da LCCP'nin (life cycle climate performance) hesaplanmasıdır. LCCP; iklimlendirme ve soğutma uygulamalarından kaynaklanan sera gazlarını en aza indirmek için kullanılabilir en çevreci soğutkanı belirlemek için kullanılabilir en kapsamlı yöntemdir ve aşağıda verilen denklemle hesaplanmaktadır [4].

$$\text{LCCP} = \text{GWP (MAC sızıntılarından olan direkt emisyonlar)} + \text{GWP (diğer kaynaklardan olan direkt emisyonlar: (soğutucu akışkanın atmosferik reaksiyon ürünleri) + (üretim, nakliye ve servis sızıntıları) + (EOL(End of life-ömür sonu) soğutucu akışkan emisyonları))} + \text{GWP (MAC çalışmasından kaynaklanan indirekt emisyonlar)} + \text{GWP (diğer kaynaklardan olan indirekt emisyonlar: (soğutucu akışkanın üretimi ve nakliyesi) + (MAC üretimi ve araca montajı) + (EOL geri dönüşüm prosesi))} \quad (1)$$

Soğutucu akışkanların küresel ısınmaya olan katkısı Şekil 2'den açıkça görüldüğü üzere, küçümsenemeyecek düzeydedir. Kloroflorokarbonların (CFCl<sub>er</sub>) ozon tabakasına zarar vermeleri nedeniyle yasaklanması ve bunun neticesinde gerçekleşen hidroflorokarbonlara (HFCl<sub>ere</sub>) geçiş ile birlikte, soğutucu akışkanların küresel ısınmaya olan katkısının önemli ölçüde azaldığı da şekilden anlaşılmaktadır [5].



Şekil 2. Halokarbon Soğutucu Akışkanların Küresel Isınmaya Katkısı [5].

## 2.2. Yasal Düzenlemeler

CFC'lerin yasaklanmasıyla birlikte soğutucu akışkanların küresel ısınmaya katkısında istemsiz de olsa bir azalma gerçekleşmiştir. Ancak bu yeterli değildir ve bu nedenle soğutucu akışkanların üretimi ve kullanımı konusunda çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır.

### 2.2.1. Montreal ve Kopenhag Protokolleri

Soğutucu akışkanların üretimi ve kullanımı, ozon tabakasının korunması, sera etkisinin azaltılması gibi önemli konuların kontrol altına alınması dünya çapında amaçlanmıştır. Bu nedenle, 100 kadar ülke, 1987 yılında Kanada'nın Montreal kentinde, ilk defa bir araya gelmişlerdir. Bu bağlamda Montreal Protokolü olarak adlandırılan sözleşme hazırlanarak imzalanmıştır. Daha sonrada 1990 yılında Londra'da ve 1992 yılında Kopenhag'da yapılan toplantılarda CFC türü akışkanların üretim ve kullanımıyla ilgili daha sıkı önlemler alınmasını gerekli görerek yeni bir takvim üzerinde anlaşmaya varılmıştır. Ülkemizde her iki protokolü imzalamış ve resmi gazetede ilan ederek (28.12.1994 tarihli ve 22155 sayılı Resmi Gazete) kanunlaştırılmış bulunmaktadır. Montreal protokolünde 2000 yılı konulmuş olmasına rağmen ABD kongresi aldığı kararla CFC türü soğutkanların üretim ve kullanımını 1.1.1996'dan itibaren sona erdirmiş bulunmaktadır. Bu, Kopenhag 1992 protokolünde de yer almıştır. Diğer kalkınmış ülkeler de (G7 ülkeleri) buna uymuşlardır. Ülkemiz kalkınmakta olan ülke statüsünde bulunduğundan belirlenen takvim 10 yıl ertelemeye uygulanacaktır. Bu tarih Montreal protokolüne göre 2010 yılıdır ve Kopenhag protokolü revizyonu ile 2005 yılı sonu şeklinde olmak durumundadır [6].

Montreal Protokolü, Avrupa Birliği tarafından, topluluğa üye ülkelerde yasa hükmünde bir seri düzenleme ile yürürlüğe koyulmuştur. Eylül 1988'de orijinal Montreal protokolü, 3322/88 no'lu Avrupa Topluluğu Yasası ile yürürlüğe girmiştir. Ancak, topluluğa üye ülkelerin protokolden daha hızlı hareket etmelerinden dolayı, yasalar o günden bu yana birçok kez güncelleştirildi. Halen yürürlükte olan 2037/2000 no'lu yasa çerçevesinde, geri kazanılmış ve temizlenmiş CFC'nin mevcut cihazlarda yeniden kullanılması Temmuz 2001'de yasaklanmıştır. Hidrocloroflorokarbon (HCFC) üretiminin aşamalı olarak bırakılması kararı 2001 yılında alınmış ve son tarih 2010 olarak belirlenmiştir. 2010 yılından itibaren tesislerde yalnızca geri kazanılmış ve temizlenmiş olan HCFC kullanılabilir ve 2015 yılında HCFC kullanımı tamamen yasaklanacaktır. 2037/2000 no'lu yasa ile HCFC'li yeni sistem ve ürünlerin satışına da belirli sınırlamalar getirildi. Bu sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır [3]:

Soğutma kapasitesi 100 kW'dan büyük olan yalnızca soğutma yapan iklimlendirme santrallerinde HCFC kullanılmasının yasaklanması, yürürlük 1 Ocak 2001.

- Soğutma kapasitesi 100 kW'dan küçük olan yalnızca soğutma yapan iklimlendirme santrallerinde HCFC kullanılmasının yasaklanması, yürürlük 1 Temmuz 2002.
- Ters çevrimli ısı pompalı iklimlendirme santrallerinde HCFC kullanımının yasaklanması, yürürlük 1 Ocak 2004.

### 2.2.2. Kyoto Protokolü

Rio'dan daha başarılı bir anlaşma yapılması için, Aralık 1997'de 161 ülkeden 2200 delegenin katılımı ile Japonya, Kyoto'da girişimde daha bulunuldu. Kyoto Protokolü'nde, 38 gelişmiş ülkeden sera gazı emisyonlarını 2008-2012 yılları arasında ortalama olarak 1990 seviyesinin % 5,2 altına indirmeleri istendi. Protokolde gelişmekte olan ülkelere azaltma beklenmiyor, ancak emisyon alışverişine izin veriliyordu. Örneğin, bir ülke sera gazı emisyon limitinin altında ise ekstra emisyon limitini kendi limitini aşmış olan bir ülkeye satabilir. Sera gazı emisyonuna en fazla katkısı olan ülke, Amerika Birleşik Devletleri'nin, Kyoto anlaşmasını reddetmesi nedeniyle başarılı olacağı şüphelidir [3].

### 2.2.3. F-Gaz Yönetmeliği

Bu yönetmeliğin hedefi Kyoto Protokolüne uygun olarak florlu gazların neden olduğu sera gazı emisyonlarının düşürülmesidir. Bu yönetmelik; belli miktarda soğutucu akışkan bulunduran sistemlerde periyodik kaçak kontrolleri, geri kazanım ve iyileştirme işlemleri, işletici ve servis elemanlarının eğitimi ve belgelendirilmesi, soğutucu gaz tanklarının etiketlendirilmesini ve kullanım kontrolünü kapsamaktadır [7].

Bu yönetmelik kapsamında emisyon kontrolü anlamında getirilen uygulamalar şu şekildedir:

Florlu sera gazlarını içeren ekipman sahipleri ve işletmecileri; emisyonları önlemek ve tespit edilen kaçakları ivedilikle onarmakla yükümlüdür. Cihazlar belirli periyodlarla kontrol edilmelidir. 3-30 kg arası gaz içeren cihazlar yılda bir kere, 30-300 kg arası gaz içerenler 6 ayda bir, 300 kg ve daha fazla gaz içeren cihazlar ise 3 ayda 1 kere olmak üzere belgelendirilmiş teknik personel tarafından sızıntı

kontrolü yapılmak zorundadır. Tespit edilen kaçaklar onarıldıktan sonra 1 ay içerisinde cihaz tekrar kontrole tabi tutulur [7].

3 kg ve üstü gaz içeren cihaz sahipleri, her bir sabit ekipman için ayrı ayrı olmak üzere,

- Florlu sera gazının tipi ve miktarını,
- Servis hizmeti sırasında eklenen veya geri kazanılan gazın miktarını,
- Bertaraf amacıyla gönderilen gazın miktarını,
- Servis hizmetini veren firmanın ve teknik personelin ilgili bilgilerini ve
- Servis ile bakım hizmetinin tarih ve sonuçlarını

kayıt altında tutmak ve istendiğinde yetkili mercilere sunmakla yükümlüdür [7]:

Emisyon kontrolü kapsamında getirilen bir diğer zorunluluk geri kazanım konusundadır. Buna göre; aşağıda verilen cihazların sahipleri geri dönüşüm, yeniden işleme veya bertaraf edilmek üzere florlu sera gazlarının geri kazanılma işlemini ehliyet sahibi teknik personele yaptırmakla yükümlüdür [7].

- Soğutma, iklimlendirme ve ısı pompası soğutma devreleri,
- Florlu sera gazı bazlı çözücü içeren ekipman,
- Yangından koruma sistemleri veya yangın söndürücüler ve
- Yüksek voltajlı şalt cihazları.

Geri kazanım işlemi ekipmanın nihai bertaraf edilmesinden önce, tercihen servis/bakım hizmeti sırasında yapılmalıdır. Tekrar doldurulabilir olsun veya olmasın ömrünü tamamlayan tüm konteynırların içerisinde kalan gazın, konteynırı gaz taşınması veya saklanması amacıyla kullanan kişi/kurum tarafından geri kazanılması zorunludur [7].

Mobil ekipman da dahil olmak üzere yukarıda listelenmeyen cihazların içerisinde kalan florlu sera gazları teknik olarak uygulanabilir ve makul olmayan maliyetlere sebep olmayacak ise geri kazanılmalıdır [7].

#### 2.2.4. Avrupa Birliği Mobil İklimlendirme Yönergesi

Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 17 Mayıs 2006 tarihli bu yönergesi, 4 Temmuz 2006 itibariyle yürürlüğe girmiş, 4 Temmuz 2008 itibariyle de yasa haline getirilmiştir. Bu yönerge doğrultusunda mobil iklimlendirme sistemleri ile ilgili olarak getirilen kısıtlamalar şu şekildedir [8]:

1. R-134a kullanımı 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren tüm yeni taşıt modellerinin iklimlendirme sistemlerinde yasaklanacaktır.
2. 1 Ocak 2017 tarihinden itibaren tüm yeni taşıtlarda kullanımı tamamen yasaklanacaktır.
3. GWP değeri 150 ve altında olan soğutucu akışkanların kullanılmasına izin verilecektir.

### 3. DÜŞÜK KÜRESEL ISINMA POTANSİYELİNE SAHİP SOĞUTKANLAR

Tüm bu yasal düzenlemelerin getirdiği kısıtlamalar, soğutma çevrimlerinde çeşitli alternatif soğutucu akışkanların kullanımını gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar 3 ana soğutucu akışkan grubu üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlardan birincisi, CFC ve HCFC'lerin ortaya çıkması ile birlikte soğutma piyasasından çıkmış, ancak bahsedilen yeni gelişmelerle birlikte tekrar gündeme gelmiş olan, doğal soğutkanlardır. İkinci grup, çoğunlukla doğal soğutkanlar, dimetil eter ve HFC'lerin farklı oranlarda karışımlarından oluşan, yeni karışımlardır. Soğutucu akışkanların katkı koyduğu çevresel problemlerin önüne geçilmesinin bir yolu da yeni bir soğutucu akışkan geliştirmektir. Üçüncü grup geliştirilmiş olan, R-1234yf, R-1234ze gibi soğutucu akışkanları içermektedir. Tablo 1'de çeşitli alternatif soğutucu akışkanların temel özellikleri verilmiştir [9].

**Tablo 1.** Soğutucu Akışkanların Özelliklerinin Karşılaştırılması [9].

Soğutucu Akışkanlar	Kimyasal Bileşimi	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (MPa)	Normal Kaynama Sıcaklığı (°C)	Emniyet Sınıfı	ODP	GWP
Amonyak (R-717)	N-H <sub>3</sub>	17,02	132,3	11,28	-33,34	B2	0	0
CO <sub>2</sub> (R-744)	O=C=O	44,01	31,03	7,38	-56,6	A1	0	1
Propan (R-290)	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	44,096	134,67	4,23	-42,09	A3	0	3
Propilen (R-1270)	CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>3</sub>	42,08	52,42	4,62	-47,69	A3	0	3
R-152a	F <sub>2</sub> HC-CH <sub>3</sub>	66,05	114	4,76	-24	A2	0	140
R-1234ze (E)	Trans, CHF=CHCF <sub>3</sub>	114,04	79	3,632	-20	A2L	0	6
R-1234yf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	114	95	3,382	-29	A2L	0	4

### 3.1. Doğal Soğutkanlar

Düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanlar söz konusu olduğunda, soğutma tarihinin başlangıcından bu yana kullanılmış olan doğal soğutkanlardan da bahsetmek gereklidir. Tablo 2’de, yukarıda bahsedilmiş olan bu doğal soğutucu akışkanların kullanıldığı çeşitli uygulamaların Avrupa’daki durumu gösterilmiştir [10].

**Tablo 2.** Avrupa’da Doğal Soğutucu Akışkan Teknolojilerinin Durumu [10].

*** = Ticari olarak mevcut ** = Prototip/Test aşamasında * = Geliştirme Aşamasının Başında				
Uygulama	Alt Uygulama	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HC
Endüstriyel Soğutma	Soğuk depolama	***	***	
	Dondurulmuş gıda, et, balık, dondurma vb. soğutma tesisleri	***	***	***
	İçecek, bira ve şarap soğutma tesisleri	**	***	
	Buz yapma tesisleri	***	***	
	Buz pateni alanları	***	***	
	Kar kışağı ve kapalı kayak merkezi		***	
	Eczacılık, kimya, petrokimya ve proses endüstrileri		***	***
Ticari Soğutma	Süpermarket merkezi soğutma tesisleri	***	***	***
	Buz yapma makinesi	***		
Endüstriyel ve Ticari İklimlendirme	Madencilik (yüzeysel soğutucuları)		***	
	Veri merkezi sunucusu soğutulması	***		**
	Bölgesel soğutma		*	
	Fabrika üretim hatları		***	
	Laboratuvar iklimlendirmesi		***	
	Büyük iş binaları ve halka açık binalar	**	***	***
Hafif Ticari Soğutma Uygulamaları	Dondurma ve milkshake makineleri	*		***
	Otomatlar	***		***
	Su şelaleleri			***
	İçecek makineleri			**
	Buz yapma makineleri			**
	Aşı soğutucuları			***



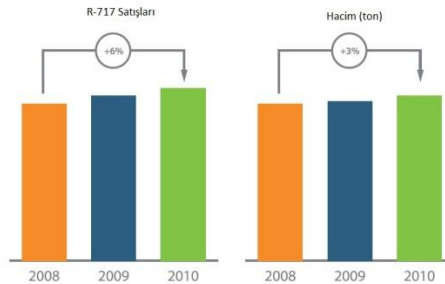
Endüstriyel ve Ticari Isıtma	Isı pompası ile gıda kurutma işlemi	***		
	Bölgesel ısıtma	**	**	**
	Büyük iş binaları ve halka açık binalar (otellerde sıcak su ısıtılması, restoranlarda ortam ısıtılması vb.)	***	***	
Konut İklimlendirmesi, Soğutması ve Isıtması	Portatif iklimlendirme ünitesi			***
	Pencere tipi veya split tip klima			***
	Isı pompaları (ortam ısıtılması ve sıcak su ihtiyacı için)	***		**
	Buzdolapları ve dondurucular			***
	Çamaşır kurutucuları	*		*
Mobil İklimlendirme, Isıtma ve Soğutma	Binek araç klimaları	**		***
	Elektrikli otomobil klimaları	**		
	Otobüsler ve minibüsler	**		**
	Kamyon soğutması	*		*
	Tren iklimlendirme ve ısıtması	*		
	Soğuk hava gemisi soğutması	**		
	Balıkçı gemilerinin soğutulması	***	***	

Tablo 2'den de görüldüğü üzere doğal soğutkanların çok geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bu bölümde başlıca doğal soğutkanlara değinilerek, özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgi verilecektir.

### 3.1.1. Amonyak (R-717)

R-717, hem küresel ısınma potansiyeli (GWP) hem de ozon inceltme potansiyelinin sıfır olması nedeniyle tüm diğer soğutucu akışkanlardan daha çevreci bir soğutucu akışkan olarak karşımıza çıkmaktadır. Kolay bulunabilmesi, iyi ısı transferi özellikleri ve ucuzluğu nedeniyle büyük soğutma sistemlerinde (endüstriyel uygulamalarda) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Termodinamik açıdan bakacak olduğumuzda da, ısı transfer katsayısının R22, R11, R12 ve R502'den yüksek olması nedeniyle en iyi seçeneklerden biri olduğu görülmektedir. Düşük maliyetinin yanı sıra, nispeten daha yüksek kütleli soğutma kapasitesine sahiptir. Tüm bu olumlu özelliklerine rağmen, yanıcı ve zehirli olması, bakır ile uyumlu olmaması ve bu nedenle bakır borulu sistemlerde kullanılamaması, R-717'nin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda zehirli olmasına rağmen keskin kokusu herhangi bir kaçağın kolayca tespit edilmesini sağlamaktadır. Herhangi bir sızma olması durumunda, havadan daha hafif olması nedeniyle yükselerek, atmosferde dağılacaktır [9].

Global ölçekte faaliyet gösteren bir soğutucu akışkan tedarikçisinden elde edilen verilere göre; 2008-2010 yılları arasında, R-717 satışı ve hacimindeki artış, Şekil 3'te yüzdesel olarak gösterilmiştir. Bu artış az gibi görünse de; bu, amonyak piyasasının gelişmiş ve oturmuş bir piyasa olmasından kaynaklanmaktadır [10].



Şekil 3. Amonyak Piyasasının Durumu [10].

### 3.1.2. Karbondioksit (R-744)

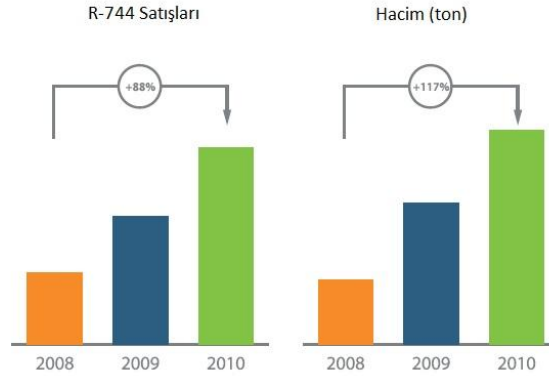
İnsan solunumunun da bir parçası olan CO<sub>2</sub>, 20. yüzyılın başlarında amonyak dışında kullanılan en yaygın soğutucu akışkanlardan biriydi. Ancak CFC'lerin ortaya çıkması ile birlikte yavaş yavaş ortadan kaybolmuştur. En bilindik sera gazı olmasına rağmen, zararlı etkisinin CFC ve HFC'lere oranla çok daha az olması nedeniyle, soğutma endüstrisi tarafından tekrar dikkate alınmıştır. Yanıcı olmaması, sıfır ODP'ye, düşük zehirliliğe ve düşük küresel ısınma potansiyeline sahip olması, CO<sub>2</sub>'yi kayda değer bir alternatif yapmaktadır.

CO<sub>2</sub>, mükemmel ısı transferi özellikleri ve yüksek hacimsel soğutma kapasitesi sayesinde ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılabilecek doğal bir maddedir. Ancak CO<sub>2</sub>'li bir çevrimin çalışma basınçları çok yüksek olup, trans kritik bir çevrimdir. Bu da özel bir tasarıma ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Kokusuz olması nedeniyle olası sızıntıların fark edilebilmesi için bir kokulandırıcı madde kullanımı gerekli olabilecektir.

Daha önce de bahsedildiği gibi, Avrupa Birliği Mobil İklimlendirme Yönergesi ile birlikte R-134a'nın mobil iklimlendirme sistemlerinde kullanımı yasaklanacaktır. CO<sub>2</sub> bu kapsamda kullanılması düşünülen alternatifler arasında önemli bir yere sahiptir.

CO<sub>2</sub>'li sistemler ilk ortaya çıktığında, kompresör, ısı değiştiriciler, valfler ve pompalar gibi elemanların eksikliği söz konusu idi. Ancak bu durum hızlı bir şekilde değişerek, şu an piyasada bulunan sistem elemanlarıyla birçok farklı uygulama için iyi performansa sahip CO<sub>2</sub>'li sistemler tasarlamak mümkün hale gelmiştir.

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi CO<sub>2</sub>'in soğutucu akışkan olarak kullanımında son yıllarda ciddi bir artış söz konusudur [10].



Şekil 4. R-744 piyasasının durumu [10].

### 3.1.3. Hidrokarbonlar

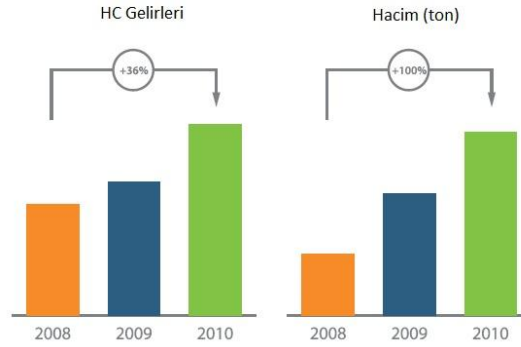
Hidrokarbonlar da CO<sub>2</sub>'e benzer şekilde 20. yüzyılın başlarında soğutucu akışkan olarak kullanılmaktaydı. Ancak hidrokarbonların kullanımından kaynaklanan çeşitli teknik ve emniyet sorunlar ve CFC'lerin gelişi soğutma piyasasından çıkmalarına neden olmuştur. Çevreci olmayan soğutkanlardan kaynaklanan problemlerin ortaya çıkması ile birlikte tekrar alternatif bir seçenek olarak düşünülmeye başlanmıştır. Propane (R-290), İzobütan (R-600a) ve Propilen (R-1270) soğutma çevrimlerinde en yaygın olarak kullanılan hidrokarbon türleridir. Genel olarak, R-1270 ve R-290 ısı pompası uygulamalarında kullanılırken, R-600a buzdolapları ve dondurucularda kullanılmaktadır [9].

Bu soğutucu akışkanların her biri farklı termodinamik özellik göstermekle birlikte, çevresel özelliklerine bakıldığında, ODP=0, GWP<3, benzer karakteristikte oldukları görülmektedir.

HC'ler yanıcı ve az zehirli özellikte olup, ASHRAE tarafından yapılan sınıflandırmada A3 sınıfına girmektedir. Soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılan hemen hemen tüm yağlayıcılarla (silikon ve silikat içerenler hariç) uyumludurlar. Hem özellikle kendi kullanımları için tasarlanan sistemlerde, hem de florokarbon soğutkanlar için tasarlanan sistemlerde kullanılabilirler.



Hidrokarbon piyasasında da karbondioksite benzer şekilde ciddi bir canlanma olduğu Şekil 5'ten anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere, 2008-2010 yılları arasında HC satış miktarları iki katına çıkmıştır [10].



Şekil 5. Hidrokarbon Piyasasının Durumu [10].

### 3.1.4. Hidrokarbon Karışımları

ASHRAE, doğal soğutkanların farklı karışımlarından oluşan çevre dostu soğutucu akışkanların bir listesini yayımlamıştır (Tablo 3). Bunların çoğu hidrokarbon dimetil eter (DME, RE170) karışımıdır. Hem hidrokarbonlar hem de dimetil eter düşük küresel ısınma potansiyeline (LGWP) sahip olup, bu karışımlar yüksek GWP'ye sahip geleneksel soğutkanlara iyi birer alternatif oluşturmaktadır.

Tablo 3. Yeni Çevre Dostu Doğal Karışımların Listesi [9].

Soğutucu Akışkan	Bileşim (% kütle)	Normal Kaynama Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Kayması (1 atm'de)	GWP	ODP	Emniyet Sınıfı	OEL (ppm)
4-429A	R-E170/R-152a/R-600 a (60/10/30)	-25,9	0,5	14	0	A3	1000
R-430A	R-152a/R-600a (76/24)	-27,6	0,2	107	0	A3	1000
R-431A	R-290/R-152a (71/29)	-43,2	0	43	0	A3	1000
R-432A	R-1270/R-E170 (80/20)	-46,4	1,2	<3	0	A3	710
R-433A	R-1270/R-290 (30/70)	-44,5	0,4	<3	0	A3	880
R-435A	R-E170/R-600a (80/20)	-26,0	0,2	30	0	A3	1000
R-436A	R-290/R-600a (56/44)	-34,3	8,2	<3	0	A3	1000
R-436B	R-290/R-600a (52/48)	-33,3	8,3	<3	0	A3	1000
R-433B	R-1270/R-290 (5/95)	-42,6	0,1	<3	0	N/A	N/A
R-433C	R-1270/R-290 (25/75)	-44,2	0,4	<3	0	N/A	N/A
R-510A	R-E170/R-600a (88/12)	-25,1	0,0	<3	0	A3	1000

### 3.2. R-152a

R-152a, iklimlendirme sistemlerinde hala R-134a alternatifi olarak düşünülebilecek tek HFC soğutucu akışkandır. R-152a'nın GWP'si 140'tır, ki bu değer R-134a'nın GWP'sinin % 10'una tekabül etmektedir. Gerekli olan soğutucu akışkan şarj miktarı da R-134a'lı sistemlere oranla % 35 daha azdır. Moleküllerinin R-134a'ya göre daha büyük olması nedeniyle soğutucu akışkan sızıntısı daha azdır. Kimyasal özellikleri de R-134a'ya benzerdir. Bu sayede mevcut sistemlerde küçük değişiklikler yapılarak kullanılması mümkündür. A2 emniyet sınıfına giren R-152a orta derecede yanıcı bir soğutkan olmakla birlikte, daha az şarj miktarı gerektirmesi yanıcılık özelliğinin getirdiği riski azaltmaktadır [9].

### 3.3. Yeni Soğutucu Akışkanlar

#### 3.3.1. R-1234yf

HFO-1234yf olarak da adlandırılan R-1234yf soğutucu akışkanı, mobil iklimlendirme uygulamalarında R-134a'nın yerini almak üzere geliştirilmiştir. Tablo 4'ten de görüldüğü gibi mükemmel çevresel özelliklere sahip olan R-1234yf, R-134a ile benzer performans özellikleri göstermektedir. Bu nedenle de otomotiv sektörü tarafından dikkate alınan alternatif soğutucu akışkanlar arasında öne çıkmaktadır.

**Tablo 4.** R-1234yf ve R-134a'nın Temel Özelliklerinin Karşılaştırılması ([9]'dan uyarlandı).

Soğutucu Akışkan	R-1234yf	R-134a
Kimyasal Formülü	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
Moleküler Ağırlığı (g/mol)	114,04	102,3
1 atm. Basıncıta Kaynama Noktası	-29 °C	-26 °C
Kritik Sıcaklık	95°C	101,08 °C
Kritik Basınç	3382 kPa	4059,3 kPa
Ozon İnceltme Potansiyeli (ODP)	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	4	1430
Doğada Yok Olma Süresi	11 gün	13 yıl
Yanıcılık	Orta derecede yanıcı	Yanıcı değil

#### 3.3.1.1. Emniyet

Bir soğutucu akışkanın kabul edilebilmesi için emniyetli bir şekilde kullanılabilir olmalıdır. Emniyetin sağlanması da soğutucu akışkanın iki temel özelliği ile ilgilidir. Bunlar soğutucu akışkanın zehirlenme etkisi (zehirliliği) ve yanıcılık özelliğidir.

##### 3.3.1.1.1. Zehirlilik Özelliği

R-1234yf ve çeşitli alternatif soğutucu akışkanların zehirlenme etkisi Tablo 5'te gösterilmiştir. Akut toksisite maruz kalma limiti (ATEL: acute toxicity exposure limit) olarak adlandırılan bu değer 30 dakikadan kısa bir süre içerisinde sağlığı kötü bir şekilde etkilemeyecek maksimum limiti göstermektedir. Yani ortamdaki R-1234yf miktarı 101000 ppm'in üzerine çıkmadığı sürece herhangi bir zehirlenme etkisi yaratmayacaktır. Görüldüğü gibi R-1234yf'nin ATEL değeri alternatifi olarak gösterildiği R-134a'dan daha uygundur. ASHRAE standartlarında da R-1234yf'nin zehirlilik sınıfı A olarak belirtilmiştir [11].

**Tablo 5.** Soğutucu Akışkanların Zehirlenme Etkisi [11].

Soğutucu Akışkan	ATEL (ppm)
R-12	18000
R-134a	50000
R-152a	50000
CO <sub>2</sub>	40000
R-1234yf	101000

##### 3.3.1.1.2. Yanıcılık

R-1234yf'nin yanıcılık özelliğine geçmeden önce, soğutucu akışkanların yanıcılıklarını belirleyen temellerden bahsetmekte fayda vardır. Bu noktada cevaplanması gereken ilk soru, soğutucu akışkan yanıcı özelliğe sahip olup olmadığı ve eğer yanıcı ise yanma limitlerinin ne olduğu sorusudur. Yanma limitlerini belirleyen iki kavram; alt yanma limiti (LFL: lower flame limit) ve üst yanma limitidir (UFL: upper flame limit). Alt yanma limiti bir soğutucu akışkanın yanması için ortamda bulunması gereken minimum miktarını belirtmektedir. Üst yanma limiti ise yanma oluşması için havada bulunabilecek maksimum soğutucu miktarını göstermektedir. Havadaki soğutucu yüzdesi belli bir miktarın üzerine çıktığı zaman yanmayı sağlayacak yeterli oksijen miktarı bulunamamaktadır [11].

İkinci önemli konu; bir tutuşturma kaynağının, alev almaya yetecek enerji miktarını sağlama olasılığının ne olduğudur. Bunun için de iki kavram tanımlanmıştır. Bunlar kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (KTS) ve minimum tutuşma enerjisidir (MIE: minimum ignition energy). Soğutucu akışkanlara ait bu özellikler, soğutkanın alev alma ihtimalinin birer göstergesidirler.

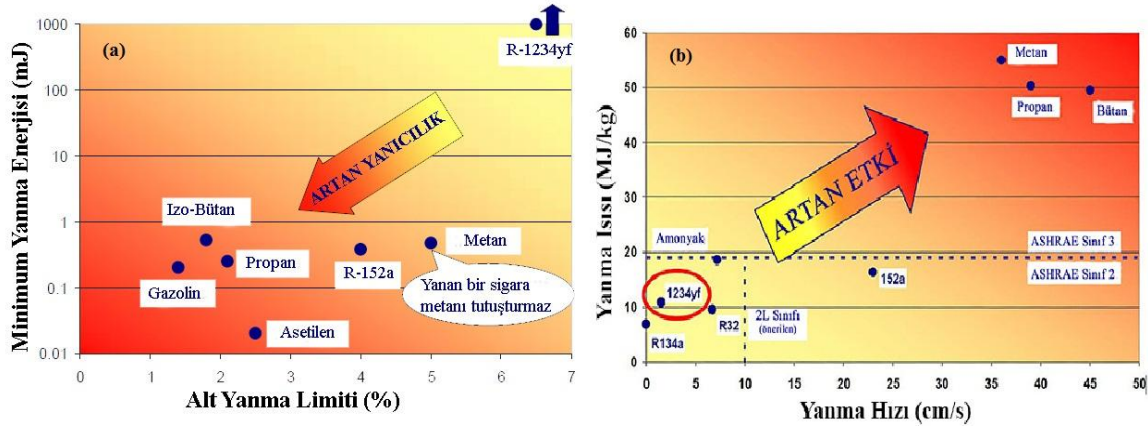
Soğutucu akışkanın alev alması durumunda yaratacağı etki de üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Yanma ısı (HOC: heat of combustion) ve yanma hızı (BV: burning velocity), soğutkanın bu etkisini ortaya koyan göstergelerdir. Yanma ısı yanma sonucunda kg başına ortaya çıkan ısı enerjisi miktarını belirtmekte olup birimi MJ/kg'dır. Yanma hızı ise cm/s cinsinden ifade edilmektedir [11].

Tablo 6'da, R-1234yf'nin yanıcılık bakımından sahip olduğu özellikler verilmiştir. Şekil 6a ve 6b'de ise bu özellikler gruplandırılarak, yanma meydana gelmesi ihtimali ve yanmanın yapacağı etki grafik halinde gösterilmiştir.

**Tablo 6.** R-1234yf'nin Yanıcılık Özellikleri [12].

LFL (%)	6.5
UFL (%)	12.3
MIE (mJ)	5000 - 10000
BV (cm/s)	1.5
KTS (°C)	405
HOC (MJ/kg)	11.8

Şekil 6a incelenecek olursa; sol alt köşeye-eksenlerin kesişim noktasına- doğru gidildikçe yanıcılığın arttığı görülür. Buradan da anlaşılmaktadır ki R-1234yf'nin yanma (tutuşma) ihtimali diğer alternatif olan R-152a dahil birçok akışkandan daha azdır. Şekil 6b'de ise sağ üst köşeye doğru yanma etkisinin arttığı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere R-1234yf'nin yanma etkisi oldukça düşüktür.



**Şekil 6.a.** Yanma Meydana Gelmesi İhtimali **b.** Yanmanın Yaratacağı Etki [13].

ASHRAE 34'de soğutucu akışkanlar yanıcılık özelliklerine göre üç kategoriye ayrılmıştır:

- 1: Yanıcı değil (101 kPa ve 21°C'de).
- 2: LFL>0.1 kg/m<sup>3</sup> (101 kPa ve 21°C'de) ve HOC<19 MJ/kg
- 3: LFL<0.1 kg/m<sup>3</sup> (101 kPa ve 21°C'de) ve HOC>19 MJ/kg

R-1234yf bu sınıflandırmaya göre ikinci sınıfa girmektedir. Ancak yapılan yeni sınıflandırma önerisine göre, ikinci sınıfa giren ancak yanma oluşumunun etkisi az olan soğutucu akışkanlar yeni bir sınıfa ayrılacaktır. 2L adı verilen bu sınıfa yanma hızı 10 cm/s'ye kadar olan 2 sınıfı soğutucu akışkanlar girmektedir [14].

R-1234yf'nin yanıcılığını ve yanıcılığının yaratacağı etkiyi ortaya koymak amacıyla gerek soğutucu akışkan üreticileri gerekse bu akışkanı kullanan firmalar tarafından bir dizi yanma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin bir kısmı bir önceki bölümde bahsettiğimiz R-1234yf'nin yanıcılık özelliklerini belirlemek, bir kısmı da bu özelliklerin yaratacağı etki ve tehlikeyi ortaya koymak üzere simülasyon ve saha testleri biçiminde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda (sızıntı olması durumu, aracın kaza yapması durumu vb.) aracın farklı bölümlerindeki R-1234yf konsantrasyonu ölçülerek, yanma alt limitini geçip geçmediği ve herhangi bir tutuşma olup olmadığı kontrol edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının da test sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği görülmüştür [15].

### 3.3.1.1.3. Risk Değerlendirmesi

Son olarak; R-1234yf'nin mobil iklimlendirme ünitelerinde kullanımının yarattığı riski ortaya koymak amacıyla risk analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları, Tablo 7 ve 8'de verilmiştir. Tablolardan da görüldüğü gibi R-1234yf kullanımından kaynaklanan risk diğer olası risklere oranla çok az olduğu yapılan hata ağacı analizleri sonucunda ortaya konmuştur.

**Tablo 7.** Araçta Meydana Gelebilecek Çeşitli Kaza Risklerinin R-1234yf İle İlgili Risklerle Karşılaştırılması [13].

Risk	Araç çalışma süresi başına risk
Bir araç kazasında bulunma riski	$5 \times 10^{-5}$
Fren arızasından kaynaklı bir kaza olma riski	$3 \times 10^{-7}$
Yoldayken araçta yangın olması riski (herhangi bir nedenden dolayı)	$10^{-7}$
Bir kazada, hava yastığıyla ilişkili bir ölüm olması riski	$2 \times 10^{-10}$
Araç sürücüsünün hayati sınırın üstünde bir HF'ye maruz kalma riski	$3 \times 10^{-12}$
Araç sürücüsünün R-1234yf yanmasından kaynaklanan bir aleve maruz kalma riski	$9 \times 10^{-14}$

Risk	Çalışma saati başına risk
Ölümcül olmayan kayda değer iş kazaları (tüm meslek gruplarında)	$2 \times 10^{-5}$
Araba tamircilerinin bir nesnenin çarpması sonucu yaralanma riski	$2 \times 10^{-6}$
Tamircilerin yüksek basınçlı R-1234yf ekipman hortumunun çarpması sonucu kayda değer bir kaza olması riski	$3 \times 10^{-8}$
Servis teknikerinin R-1234yf yanması sonucu açık bir aleve maruz kalması riski	$10^{-20}$

**Tablo 8.** R-1234yf Sızıntısıyla İlgili Risklerin, Çeşitli Olaylar Sonucu Oluşabilecek Yaralanma Veya Ölüm Riskleriyle Karşılaştırılması [16].

Risk	Yıllık risk oranı
Kalp krizi	$2.7 \times 10^{-3}$
Evde ölümcül kaza olması	$1.1 \times 10^{-4}$
Dağa çıkarken ölümcül kaza olması (dağcılar için)	$6 \times 10^{-4}$
Bir yaya olarak yaralanma riski	$2.1 \times 10^{-5}$
İş yerinde ölümcül kaza olması (tüm meslek dalları)	$3.6 \times 10^{-5}$
Yıldırım çarpması sonucu yaralanma	$10^{-6}$
Asansörde ölümcül şekilde yaralanma riski	$2 \times 10^{-7}$
Bir kaza sonucunda hayati limitlerin üstünde R-1234yf'ye maruz kalma riski	$10^{-10}$
Bir kazada, R-1234yf'nin yanması sonucu yaralanma riski	$4.5 \times 10^{-11}$

### 3.3.1.2. Isıl Kararlılık, Materyallerle Uyumluluk ve Yağlayıcılarla Karışabilirlik

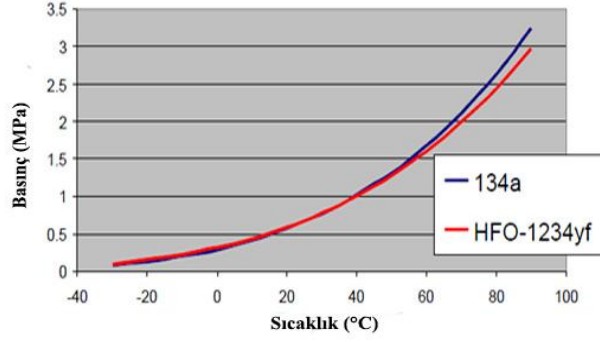
Bir soğutucu akışkanın bir soğutma uygulamasında kullanılabilir olması için ısı kararlılığına sahip olması, soğutma sisteminde kullanılan materyallerle uyumlu olması ve yağlayıcılarla karışabilir olması gerekmektedir. R-1234yf'nin ısı kararlılığının değerlendirilmesi için ASHRAE/ANSI Standard 97'de yer alan sızdırmaz cam tüp protokolleri uygulanarak yapılan testlerde bakır, çelik ve alüminyum ile farklı yağlar kullanılmış ve testler 175 °C ve 200 °C'de farklı nem koşulları altında 14 günlük süre boyunca yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda R-1234yf'nin alternatif olarak gösterildiği R-134a ile benzer özellikte olduğu, ısı kararlılık açısından herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği ortaya konmuştur. [17].

Soğutma sisteminde kullanılan materyallerle uyumluluğu da yapılan testlerle ortaya konmuştur. Sonuç olarak hem plastik, hem de elastomer malzemeler ile yapılan testlerde R-1234yf'nin bu malzemelerle uyumlu olduğu görülmüştür [17,18].

Bir soğutucu akışkanın soğutma çevriminde kullanılan yağlarla karışabilir olması da gerekmektedir. R-1234yf'nin bu özelliğini belirlemek üzere testler yapılarak, ISO 120 POE ve ISO 68 POE yağları ile farklı sıcaklıklarda (-50 ile 90°C arasında) ve farklı yağ yüzdelerindeki (%5 ile %70 arasında) karışabilirliği ortaya konmuştur. Çıkan sonuçlar R-1234yf'nin karışabilme aralığının alternatifi olduğu R-134a'dan daha geniş olduğunu ve R-134a ile karışabilirlik bakımından benzer özellikte olduğunu göstermiştir [17,19].

### 3.3.1.3. Termodinamik Özellikler

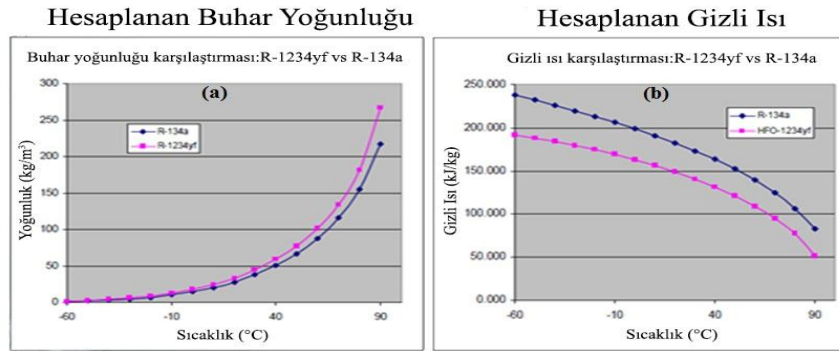
Şekil 3'ten de görüldüğü gibi R-1234yf ve R-134a'nın buhar basıncı eğrileri hemen hemen çakışmış vaziyettedir. Bu da, R-1234yf'nin, R-134a kullanılan bir iklimlendirme ünitesinde çok küçük değişiklikler yapılarak veya hiç değişiklik yapılmadan kullanılabileceği anlamına gelmektedir.



**Şekil 7.** R-134a ve R-1234yf'nin Buhar Basıncı Eğrilerinin Karşılaştırılması [20].

Bir soğutucu akışkanın performansının değerlendirilebilmesi için termodinamik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bunun için de bu özellikler çeşitli hal denklemleri kullanılarak hesaplanır. Ekte yer alan Tablo Ek1'de R-1234yf'nin termodinamik özellikleri verilmiştir [19].

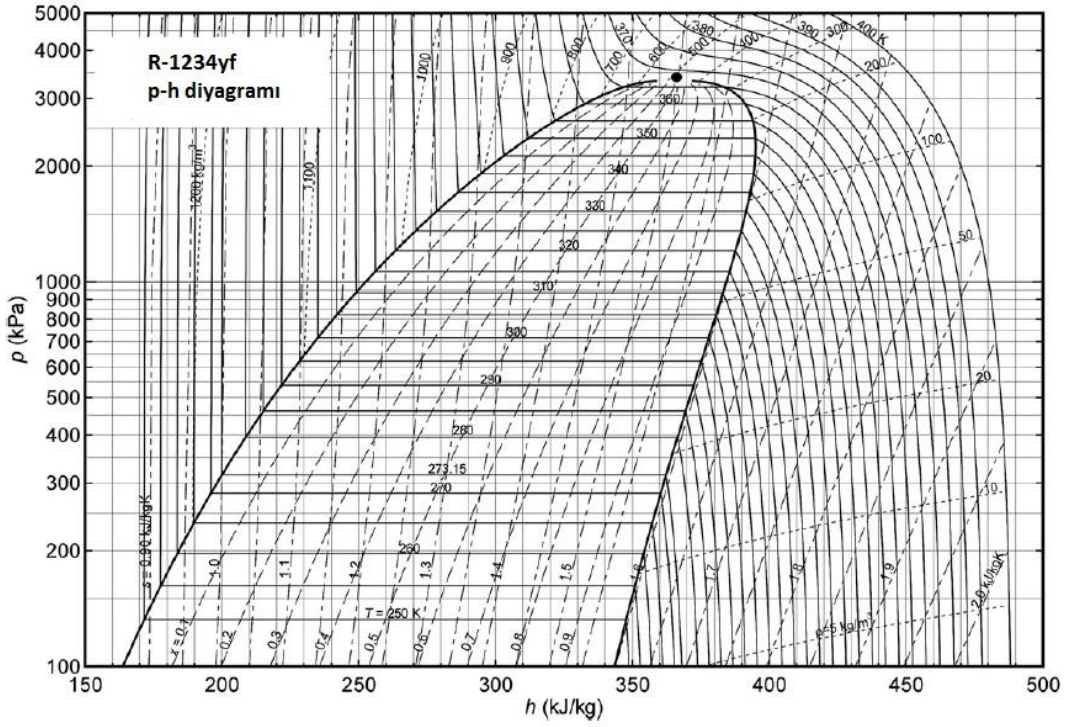
Şekil 8a ve 8b'de ise R-1234yf'nin buhar yoğunluğu ve gizli ısısı R-134a ile karşılaştırılmıştır [14].



**Şekil 8 a.** R-1234yf'nin yoğunluk-sıcaklık eğrisi **b.** R-1234yf'nin gizli ısı-sıcaklık eğrisi [21].

Basınç – Entalpi (P-h) diyagramı soğutma çevrimi performansının değerlendirilebilmesi konusunda oldukça faydalıdır. Bu nedenle de soğutucu akışkanın termodinamik özelliklerinin değerlendirilmesinde sıkça kullanılır. R-1234yf'nin P-h diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.



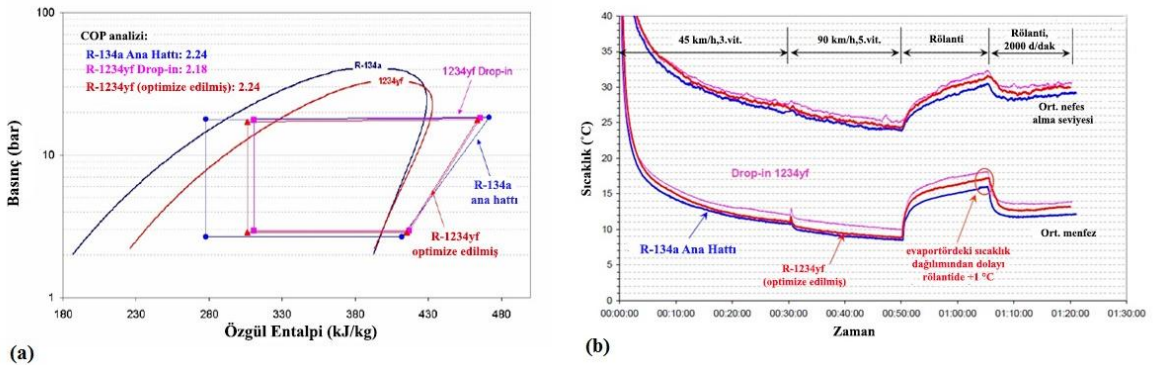


Şekil 9. R-1234yf'nin basınç-entalpi diyagramı [22].

### 3.3.1.4. Performans Karşılaştırmaları

Termodinamik özellik tablolarından faydalanarak soğutma sisteminin performansı hakkında bir fikir sahibi olunsa bile, gerekli testler yapılmadan sistemin gerçek performansı tam anlamıyla ortaya konamaz.

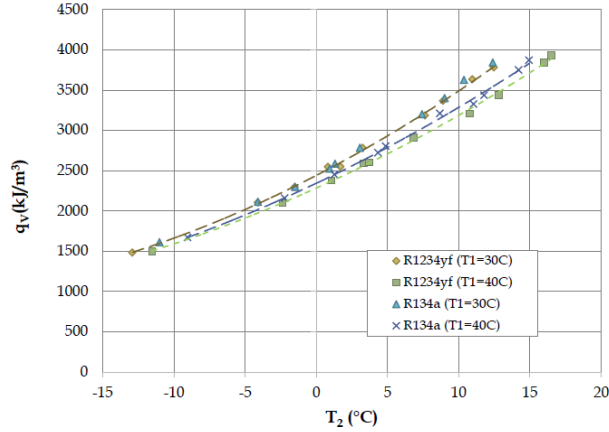
R-1234yf'li sistem performansını ölçmek amacıyla, bir otomobil üreticisi tarafından performans testleri yapılmıştır. Bu testler ilk olarak R-134a'lı iklimlendirme sistemi üzerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın (drop-in), daha sonra ise sistemin yoğuşturucusu ve termal genişleme vanası R-1234yf'ye göre optimize edilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan performans testlerinin sonuçları Şekil 10a ve 10b'de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi R-134a ile aynı soğutma kapasitesine ulaşmak için sistem üzerinde birtakım iyileştirmeler yapmak gereklidir. Yapılan optimizasyon sonucunda ise, R-1234yf'li sistemin COP'si R-134a ile aynı değere gelmiş, menfez çıkışında ve nefes alma seviyesindeki hava sıcaklıkları da aynı seviyelere ulaşmıştır [23].



Şekil 10 a. Optimizasyon analizi b. Optimizasyon analizi

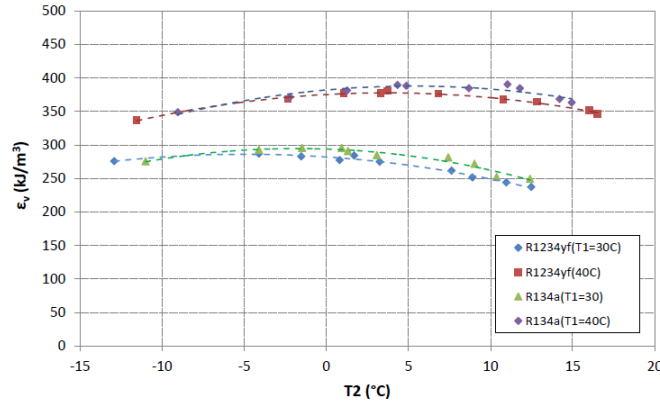
Mariam Jarahnejad [9] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise R-1234yf'nin performansı R-134a ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda bir deney düzeneği hazırlanarak iki soğutucu akışkan da bu deney düzeneğinde iki farklı yoğuşurucu sıcaklığında (30 °C ve 40 °C) ve 1 kW ile 3,2 kW arasında değişen 10 farklı ısı yükünde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 11-13'de görülmektedir.

Şekil 11'de yer alan  $q_v$  terimi hacimsel soğutma kapasitesini,  $T_2$  ise buharlaştırıcı sıcaklığını göstermektedir. Görüldüğü gibi hacimsel soğutma kapasitesi buharlaştırıcı sıcaklığı ile ciddi miktarda artmaktadır. İki soğutucu akışkan kıyaslanacak olursa, her iki yoğuşurucu sıcaklığında da noktaların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak bakacak olduğumuzda da R-134a'nın ortalama olarak % 3 daha yüksek hacimsel soğutma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir [9].



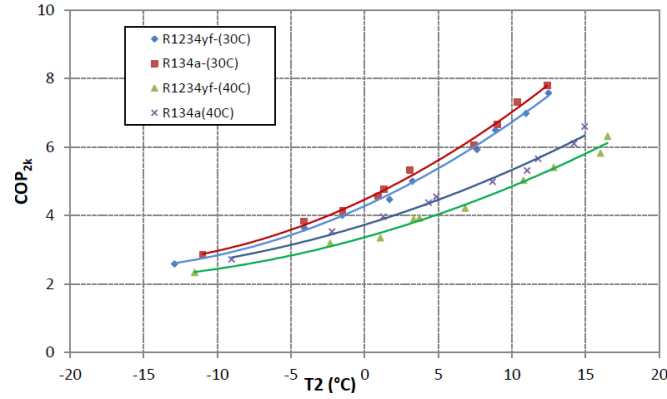
Şekil 11. Hacimsel Soğutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması [9].

Şekil 12'de ise iki soğutucu akışkan için gerekli kompresör işleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi daha düşük yoğuşurucu sıcaklığında daha az kompresör işi gerekmektedir. İki soğutucu akışkan kıyaslandığında ise R-1234yf için her iki yoğuşurucu sıcaklığında da % 0-8 arasında daha az kompresör işi gerektiği görülmektedir [9].



Şekil 12. Gerekli Kompresör İşlerinin Karşılaştırılması [9].

Son olarak da sistem STK'ları hesaplanarak, Şekil 13'de verilen grafikte gösterilmiştir. 30 °C ve 40 °C yoğuşurucu sıcaklıkları için hesaplanan STK değerleri incelendiğinde R-134a'nın R-1234yf göre sırasıyla % 2-10 ve % 5-15 arasında daha yüksek STK'ya sahip olduğu görülmektedir [9].



Şekil 13. Sistem STK'larının karşılaştırılması [9].

### 3.3.2. R-1234ze

Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yeni soğutucu akışkanlardan biri de R-1234ze'dir. Bu soğutucu akışkan da R-1234yf gibi mükemmel çevresel özelliklere sahiptir. Bu nedenle de yapılan yasal düzenlemeler sonucunda R-134a'ya alternatif olarak gösterilmektedir. Tablo 9'da R-1234yf'nin temel özellikleri verilmiştir [9].

Tablo 9. R-1234ze'nin Temel Özellikleri ([9]'dan uyarlandı).

Soğutucu Akışkan	R-1234ze	R-134a
Kimyasal Formülü	Trans, CHF=CHCF <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
Moleküler Ağırlığı (kg/kmol)	114,04	102.03
1 atm. Basınçta Kaynama Noktası	-20 °C	-26.06 °C
Kritik Sıcaklık	79 °C	101.08 °C
Kritik Basınç	3632 kPa	4060.3 kPa
Kritik Yoğunluk	486 kg/m <sup>3</sup>	515.3 kg/m <sup>3</sup>
Ozon İnceltme Potansiyeli (ODP)	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	6	1430
Doğada Yok Olma Süresi	18 gün	13 yıl
Yanıcılık	Yanıcı değil	Yanıcı değil

#### 3.3.2.1. Emniyet

ASTM E-681 ve EU A-11 test metotlarına göre yapılan testlerde, R-1234ze'nin oda sıcaklığında (≈21 °C) yanıcı olmadığı ortaya konmuştur [9]. Ancak 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar söz konusu olduğunda R-1234ze de belirli yanma limitlerine sahiptir. R-1234ze'nin yanıcılık özellikleri Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. R-1234ze'nin Yanıcılık Özellikleri [24].

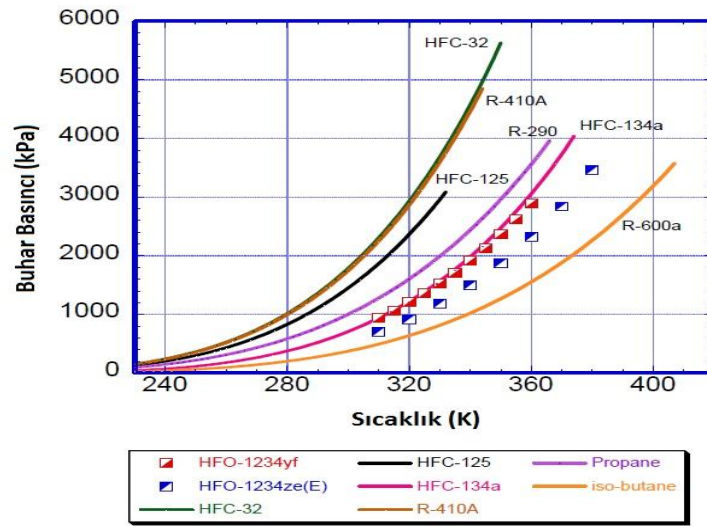
LFL (%)	7 <sup>(1)</sup>
UFL (%)	9,5 <sup>(1)</sup>
MIE (mJ)	61000-64000 <sup>(2)</sup>
BV (cm/s)	0
1- Verilen değerler 30 °C'de elde edilmiştir.	
2- Verilen değerler 54 °C'de elde edilmiştir.	

Zehirlilik açısından bakacak olduğumuzda da ATEL değerinin 59000 ppm olduğu görülmektedir. ASHRAE'nin zehirlilik sınıflandırmasına göre de A sınıfında (zehirleyici olmayanlar) yer almaktadır [24].

İklimlendirme, Isıtma ve Soğutma Enstitüsü (AHRI: Air Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute) tarafından hazırlanan raporda, 2L sınıfı yanıcı soğutucu akışkanları kullanan ve konutlarda kullanılan ısı pompalarının yarattığı risk değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında; herhangi bir kaçak olması durumunda, evin farklı bölmelerinde ortaya çıkacak R-1234ze, R-1234yf ve R-32 konsantrasyonları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri ile hesaplanmış ve bunlara paralel olarak ilgili testler gerçekleştirilmiştir. Son olarak da hata ağacı analizi yapılarak, bu soğutucu akışkanların kullanımından kaynaklanan riskler ortaya konmuştur. Buna göre R-1234ze kullanımından kaynaklanan en büyük risk  $2 \times 10^{-5}$  olarak hesaplanmış olup, diğer olası risklerle karşılaştırıldığında bu rakamın çok uygun seviyede olduğu görülmektedir [24].

### 3.3.2.2. Termodinamik Özellikler

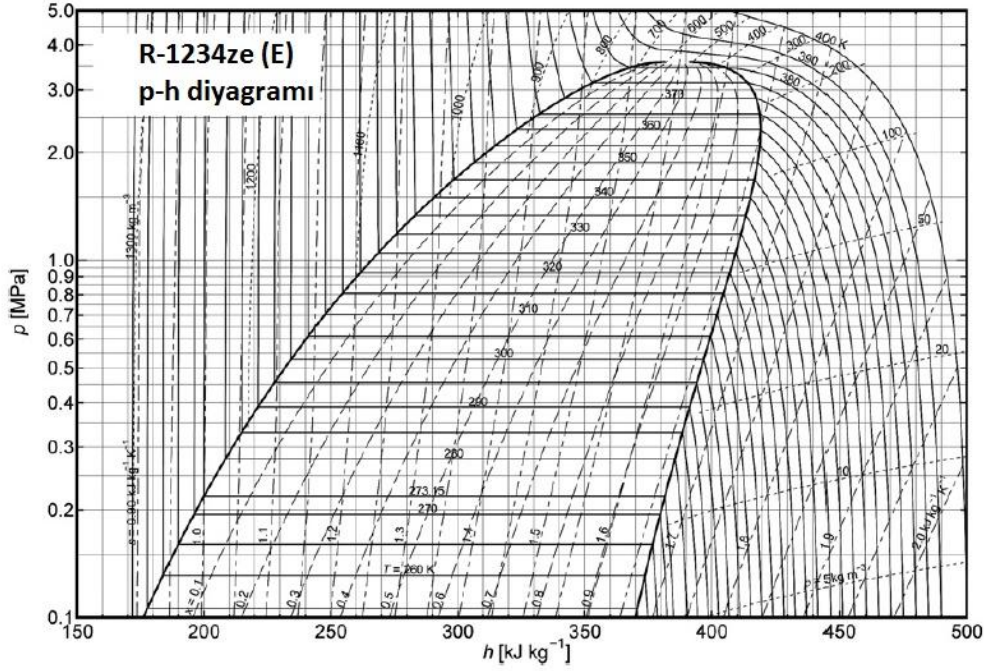
Yukihiro Higashi [25] yapmış olduğu bir çalışmada, R-1234yf ve R-1234ze'nin buhar basınçlarını deneysel çalışmalarla ortaya koymuştur. Bu çalışmayla elde edilen buhar basıncı eğrileri, diğer soğutucu akışkan eğrileriyle birlikte Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. R-1234ze ve Diğer Soğutucu Akışkanların Buhar Basıncı Eğrileri [25].

Ryo Akasaka [26] tarafından yapılan çalışmada, bir termodinamik model oluşturulmuş ve deneysel verilere dayanılarak R-1234ze'nin termodinamik özellikleri hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen basınç-entalpi diyagramı Şekil 15'te verilmiştir.

R-1234ze'nin termodinamik özellikleri ise ekte yer alan Tablo Ek2'de bulunmaktadır [19].



Şekil 15. R-1234ze'nin basınç-entalpi diyagramı [26].

### 3.3.2.3. Performans Karşılaştırmaları

Omar Abdelaziz v.d. [27] yapmış oldukları çalışmada 2 farklı buzdolabında R-134a, R-1234yf ve R-1234ze kullanılması durumundaki kompresör davranışlarını inceleyerek, günlük çalışma sürelerini ve güç tüketimlerini hesaplamışlardır. Yapılan bu testin sonuçları Tablo 11'de yer almaktadır.

Tablo 11. Enerji tüketimi ve çalışma sürelerinin R-134a ile karşılaştırılması [27].

	Soğutucu Akışkan	Enerji Tüketimi	Çalışma Süresi
1. Buzdolabı	R-134a	%100,0	%100,0
	R-1234yf	%102,7	%84,3
	R-1234ze	%84,5	%150,8
2. Buzdolabı	R-134a	%100,0	%100,0
	R-1234yf	%101,3	%89,0
	R-1234ze	%94,6	%140,0

Tablo'dan da görüldüğü üzere R-1234yf hem enerji tüketimi hem de çalışma süresi bakımından R-134a ile benzerdir. Bu durum, R-1234yf'nin R-134a'ya iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir. Öte yandan R-1234ze enerji tüketimi açısından R-134a'ya göre oldukça iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Ancak R-1234ze'nin sahip olduğu düşük soğutma kapasitesi kompresör çalışma süresinin artmasına ve dolayısıyla defrost çevrimleri arasındaki sürenin azalmasına yol açmıştır. Bu çalışma kapsamında defrost enerjisi günlük enerji tüketiminde hesaba katılmamıştır. Bu nedenle artan defrost çevrim frekansı sistemin gerçekte neden olduğu enerji tüketimini artıracaktır [27].

Koyama v.d. [28] tarafından yapılan bir çalışmada R-1234ze'nin R-410A yerine kullanılması durumu değerlendirilmiştir. Saf R-1234ze'li sistem, R-410A'lı sistemlere göre %6 civarında daha yüksek ITK'ya sahipken, hacimsel soğutma kapasitesi bakımından %30 civarında daha düşük kapasiteye sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle hacimsel kapasitenin artırılması amacı ile R-1234ze ve R-32'nin kütlice farklı oranlarda karışımları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 12'de sunulmuştur.



**Tablo 12.** Bir İklimlendirme Sisteminin Çevrim Analizi [28].

Soğutucu Akışkanlar	R-410A	R-1234ze/R-32		
		%100 R-1234ze	%80 R-1234ze	%50 R-1234ze
Yoğuşturucu sıcaklığı (°C)	27	27	27	27
Buharlaştırıcı sıcaklığı (°C)	-3	-3	-3	-3
Aşırı soğutma (K)	0	0	0	0
Aşırı ısıtma (K)	3	3	3	3
Kompresör Verimi	0,85	0,85	0,85	0,85
Buharlaştırıcı basıncı (MPa)	0,725	0,193	0,341	0,521
Yoğuşturucu basıncı (MPa)	1,886	0,583	0,994	1,428
Soğutma etkisi (kJ/kg)	174,12	144,65	172,35	201,81
Hacimsel soğutma etkisi (kJ/m <sup>3</sup> )	4736,0	1509,3	2577,7	3698,4
Kompresör özgül işi (kJ/kg)	31,98	24,65	29,65	35,46
ITK	6,45	6,87	6,81	6,69
ITK oranı (R-410A'ya göre)	1,0	1,07	1,06	1,04
Hacimsel soğutma kapasitesi oranı	1,0	0,32	0,54	0,78
GWP	1730	6	135	328

### 3.3.3. Geliştirilmekte Olan Soğutucu Akışkanlar

Küresel iklim değişikliği endişeleri karşılık olarak ve yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanların üretimini etkileyebilecek olası yasal düzenlemeler düşünülerek, soğutucu akışkan üreticileri tarafından yeni soğutucu akışkan adayları geliştirilmektedir.

Genel itibarıyla R-1234yf ve farklı soğutkanların belli oranlarda karışımlarından oluşan bu soğutucu akışkanlar, R-1234yf'nin çevre dostu özelliklerini kısmi olarak taşıırken; R-1234yf'nin hacimsel kapasite ve yanıcılık özelliklerini adres etmektedirler. Bu soğutkanların geliştirilmesindeki temel amaç; küresel ısınma potansiyelini belli bir seviyenin altında tutarken yanıcılık, performans gibi özelliklerin iyileştirilmesidir. Ya da tersten bakacak olursak; performans ve yanıcılık özelliklerini belli düzeyde tutarken, küresel ısınma potansiyelinin belli bir seviyenin altına getirilmesidir. Bu bölümde, bu amaçla geliştirilmekte olan bazı soğutucu akışkanların değerlendirilmesi yapılacaktır.

Leck [29] yapmış olduğu çalışmada teorik bir soğutma çevrimi modeli geliştirerek, geliştirilmekte olan farklı soğutucu akışkanların çeşitli uygulamalarda kullanımını değerlendirmiştir. Tablo 13'te bir klima soğutma modelinin sonuçları, konut iklimlendirmesinde yüksek soğutma kapasitesine sahip olması nedeniyle tercih edilen R-410A ile karşılaştırılmıştır.

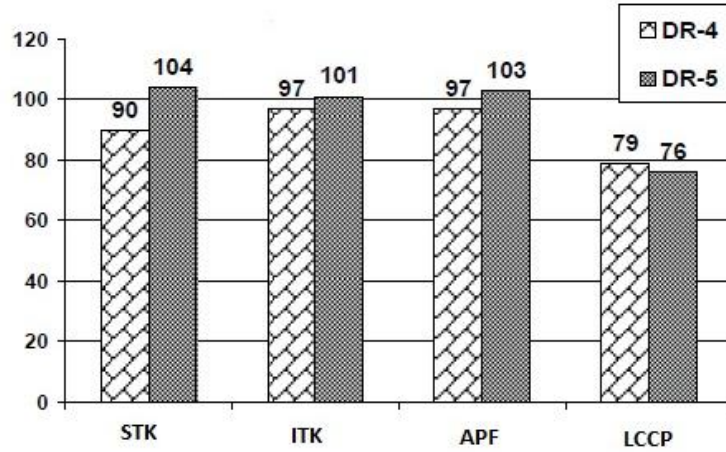


**Tablo 13.** Geliştirilmekte Olan Soğutucu Akışkanların Karşılaştırılması [29].

Evaporatör Sıcaklığı = 7 °C Yoğuşturucu Sıcaklığı = 47 °C Aşırı soğutma = 12 K Aşırı ısıtma = 3 K Kompresör hacimsel verimi = %70							
Soğutucu Akışkan	GWP	Sıcaklık Kayması (K)	Deşarj Basıncı (kPa)	Deşarj Sıcaklığı (°C)	Kapasitenin R-410A'ya oranı (% Δ)	COP'nin R-410A'ya oranı (% Δ)	Yanıcılık Sınıfı (beklenen)
R-22	1810	0	1812	83	-31	6,4	1
R-407C	1774	4,8	1935	75	-30	5,0	1
R-410A	2088	0,1	2823	81	0	0,0	1
R-32	675	0	2939	102	9,7	0,3	2L
R-134a	1430	0	1222	64	-55	8	1
R-1234yf	4	0	1209	55	-57	6	2L
DR-11	<600	0	<1300	<60	-54	7	1
DR-3	<150	7	1850	70	-35	3,5	2L
DR-4	<300	5	2300	<80	-20	1,3	2L
DR-5	<500	1	2750	<90	0	<1	2L
DR-9	<1500	4	1600	66	-37	4	1

Tablodan da görüldüğü gibi DR-9 ve DR-11 yanıcı değilken, DR-3, DR-4 ve DR-5 yanıcı olup 2L yanıcılık sınıfına girmektedirler. DR-5, R-410A ile aynı soğutma kapasitesine sahipken; diğer tüm adaylar R-410A'ya oranla daha düşük ancak R-134a ve R-1234yf ile kıyasla daha yüksek soğutma kapasitesine sahip oldukları görülmektedir. Yine tüm soğutkan adaylarının COP'lerinin R-410A'dan daha yüksek ve GWP değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir [29].

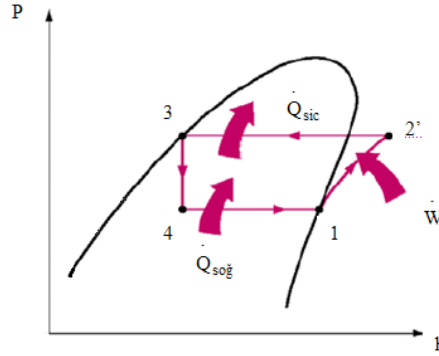
Aynı çalışmada, en yüksek kapasiteye sahip iki aday olan DR-4 ve DR-5, bir R-410A'lı sistemde hiçbir değişiklik yapmadan test edilerek, sistemin ısıtma ve soğutma tesir katsayıları, yıllık performans faktörü (APF: Annual Performance Factor) ve LCCP değerleri R-410A ile karşılaştırılmış ve Şekil 16'da verilmiştir [29].

**Şekil 16.** Drop-in Testte Ölçülen Sistem Performansları [29].

#### 4. İDEAL ÇEVİRİM ANALİZİ

Herhangi bir soğutucu akışkanın beklenen performansı, o akışkanın termodinamik ve taşınım özellikleri ile değerlendirilebilir. Karşılaştırma yapmak için tavsiye edilen bir yöntem de ideal çevrim analizi yapılmasıdır. İdeal bir çevrimde soğutma çevriminin, aşırı soğutma ya da aşırı kızdırma olmadan ve izantropik sıkıştırma ile gerçekleştiği varsayılmaktadır. Böyle bir karşılaştırmayı

yapabilmek için tek gerekli olan buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklıklarını bilmek yeterlidir. Bu değerlere dayanarak, soğutma çevriminin ısı tesir katsayısı (COP), kompresör gücü değerleri hesaplanarak, farklı soğutucu akışkanların kullanımı durumundaki olası performans artış veya düşüşleri önceden görülebilmektedir. İdeal bir çevrimin basınç-entalpi diyagramı Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. İdeal çevrimin basınç-entalpi diyagramı

Bir ideal çevrimde, soğutucu akışkan kompresöre girerken doymuş buhar, yoğuşturucu çıkışında ise doymuş sıvı haldedir. Bu durumda, sistem performansı ile ilgili değerlerin hesaplanabilmesi için tüm noktadaki entalpi değerleri bilinmelidir. Belirtilen noktalardaki entalpi değerleri ile kompresör gücü, akışkan debisi, yoğuşturucu kapasitesi ve STK değerleri denklem 2-6 ile hesaplanabilir.

$$\eta_s = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$m = Q / (h_1 - h_4) \quad (\text{kg/s}) \quad (3)$$

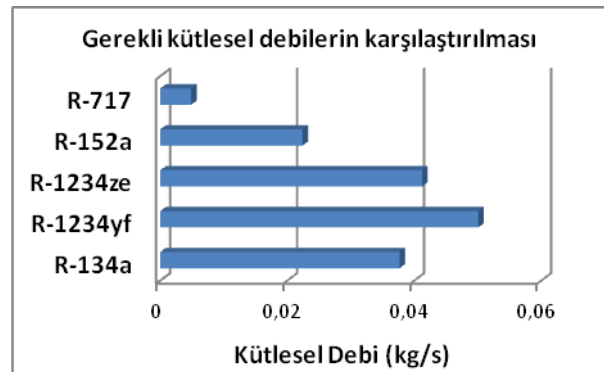
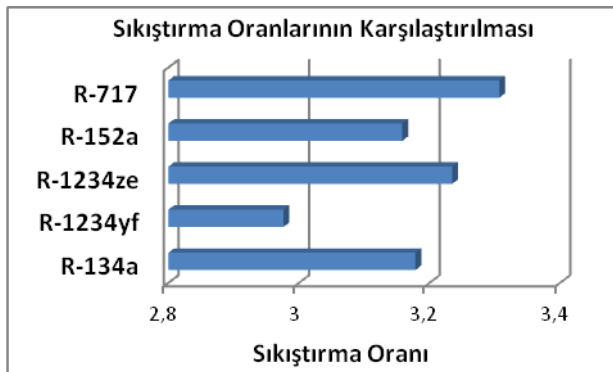
$$W = m (h_2 - h_1) \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

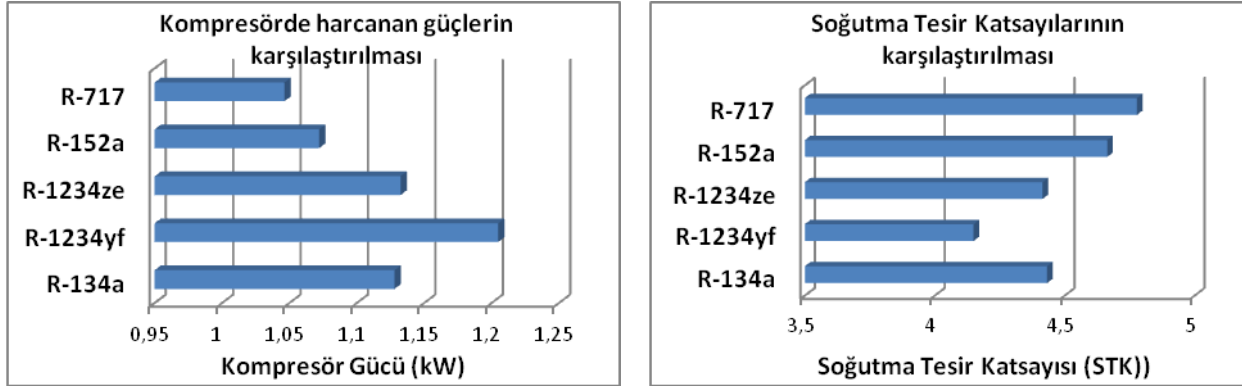
$$Q_{yoğ} = m (h_2 - h_3) \quad (\text{kW}) \quad (5)$$

$$STK = W / Q \quad (6)$$

$$\text{Sıkıştırma Oranı} = P_{yoğ} / P_{buh} \quad (7)$$

Bu çalışma kapsamında da R-1234yf, R-1234ze, R-152a ve R-717 soğutucu akışkanları ve baz oluşturması amacıyla R-134a soğutucu akışkanının ideal çevrim analizleri yapılmıştır. Bu analizler yapılırken 5 kW soğutma kapasitesine sahip bir sistem ele alınmış, buharlaştırıcı sıcaklığı 10 °C, yoğuşturucu sıcaklığı 50 °C, kompresör izantropik verimi ise 0,8 olarak alınmış, bu şartlar altında sıkıştırma oranları, gerekli olan kütleli debiler, kompresör güçleri ve STK değerleri hesaplanarak, karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları tablo ve grafikler şeklinde aşağıda verilmiştir.





Şekil 18. İdeal Çevrim Analizinin Sonuçları

Tablo 14. İdeal Çevrim Karşılaştırması

T <sub>yoğ</sub> = 50 °C, T <sub>buh</sub> = 10 °C, η <sub>s</sub> = 0,8								
Soğutucu Akışkan	GWP	Emniyet Sınıfı	Sıkıştırma Oranı	Gerekli Yoğuşturucu Kapasitesi (kW)	Kütleli Debi (kg/s)	Gerekli Kompresör Gücü (kW)	Soğutma Tesir Katsayısı	STK Oranı (%)
R-134a	1430	A1	3,179	6,128	0,038	1,128	4,433	100,00
R-1234yf	4	A2L	2,976	6,205	0,050	1,205	4,150	93,62
R-1234ze	6	A2L	3,235	6,132	0,041	1,132	4,415	99,61
R-152a	140	A2	3,159	6,072	0,022	1,072	4,664	105,22
R-717	0	B2	3,307	6,046	0,005	1,046	4,778	107,80

Verilen koşullarda, aynı soğutma ihtiyacını karşılamak için gerekli sistem gereksinimlerini ortaya koymak amacıyla yapılan bu ideal çevrim analizinin sonuçlarına göre; gerekli kompresör kapasiteleri karşılaştırıldığında en küçük kompresör gücünün R-717'de olduğu görülmektedir. Soğutma kapasitesi tüm akışkanlar için aynı alındığı için bu aynı zamanda en yüksek STK'nın da R-717'li sistemde olacağı anlamına gelmektedir. Bu durumun nedeni, amonyağın sahip olduğu yüksek gizli ısıdır. Yüksek gizli ısı sayesinde buharlaştırıcıda ortamdaki ısı çekerken çok küçük bir kütleli debi yeterli olmaktadır.

R-1234yf'nin sıkıştırma oranı, R-134a'lı sisteme oranla daha az olup, STK'sı beklediği gibi daha düşük çıkmıştır. R-1234ze'li sistemin STK değeri ise R-134a'lı sistemle neredeyse aynıdır.

## 5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

HFC'lerin sahip olduğu yüksek GWP küresel ısınma endişelerinin artmasına neden olmuştur. Bunun neticesinde, çeşitli yasal düzenlemeler ortaya çıkmış ve HFC'lerin kullanımına belirli sınırlamalar getirilmiştir. Bu nedenle de mevcut soğutucu akışkanların çevreye olan zararlı etkilerini azaltabilecek yeni alternatifler geliştirmek için dünya çapında birçok çalışma yapılmaktadır. Karbondioksit, amonyak, hidrokarbonlar, R-152a, R-1234yf ve R-1234ze sahip oldukları düşük GWP ile mevcut soğutucu akışkanların yerine geçebilecek alternatifler olarak öne çıkmaktadırlar.

Soğutucu akışkan seçiminde dikkat edilmesi gereken birçok özellik bulunmaktadır. Tahmin edilebileceği gibi bu özelliklerin hepsini tek başına karşılayacak, ideal bir soğutucu akışkan bulmak olanaksızdır. Emniyet, kararlılık, materyallerle uyumluluk gibi bazı özellikler soğutucu akışkan tarafından mutlaka sağlanmalıdır. Öte yandan ODP, GWP gibi çevreyle ilgili özellikler yasal

düzenlemelerle belirtilen sınırların altında tutulmalıdır. Bunu yaparken de aynı zaman da sistem performansının istenilen seviyede olması gerekmektedir. Ancak soğutucu akışkanların özellikleri incelendiğinde; genel olarak GWP değeri azalırken, sistem performansının düştüğü veya emniyetle (çoğunlukla yanıcılık) ilgili sorunların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu noktada soğutucu akışkanın kullanılacağı uygulama alanı önemli hale gelmektedir.

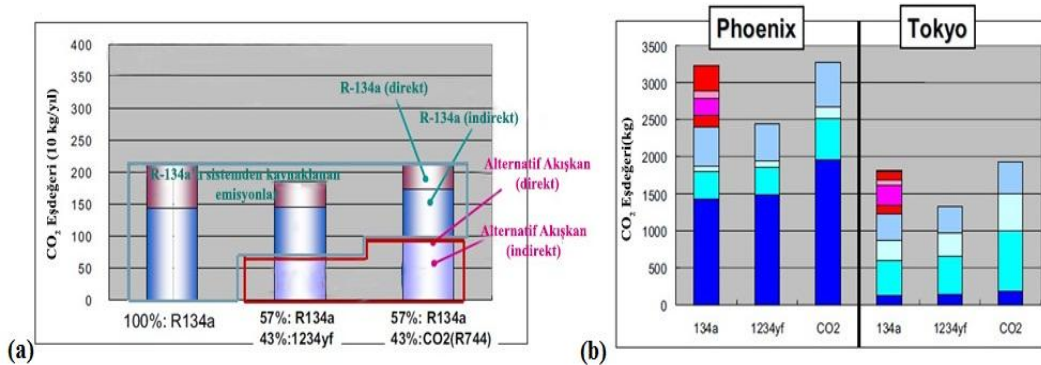
Soğutma uygulamaları çok çeşitlilik göstermekte olup, her bir uygulama için farklı termodinamik gereksinimler ve farklı çalışma sıcaklıkları söz konusudur. Tüm sistemlerde verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilecek bir soğutucu akışkan mevcut değildir. Bu noktada soğutucu akışkanın kullanılacağı sistemin çalışma şartları ve gereksinimleri ve mevcut kısıtlar belirlenerek, bu gereksinimleri karşılayacak en uygun soğutucu akışkan seçilmelidir.

Yapılan ideal çevrim analizinde, en iyi performansı R-717'nin verdiği görülmektedir. Ancak soğutucu akışkanın kullanılacağı uygulama çok önemli olduğu unutulmamalıdır. Farklı buharlaştırıcı ve yoğusturucu sıcaklıklarında başka bir soğutucu daha iyi performans gösterebileceği de not edilmelidir.

R-134a'lı bir sistem söz konusu olduğu zaman R-1234yf hariç tüm soğutucu akışkanlar R-134a'lı sistem üzerinde ciddi değişikliklere ihtiyaç duyulmasına neden olacaktır. R-1234yf ise R-134a'lı sistem üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan ya da çok küçük değişiklikler yapılarak kullanılabilir. MAC yönergesi ile birlikte R-134a'nın mobil iklimlendirme sistemlerinde kullanımının yasaklanacağı göz önüne alınırsa, R-1234yf kullanımı tasarım açısından ciddi kolaylık sağlayacaktır. Doğal soğutkanlardan olan R-744 kullanımı ise baştan aşağı yeni bir sistem tasarımı gerektirmektedir. Bu da maliyetleri ciddi miktarda artırmaktadır.

Doğru seçim yapılabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir değer unsur da soğutucu akışkan maliyetleridir. Doğal soğutkanlar bu konuda uygun fiyatlarıyla oldukça avantaj sağlamaktadırlar. R-1234yf ve R-1234ze soğutucu akışkanları ise henüz tam anlamıyla ticarileşmemiş olup, fiyatlarının mevcut soğutucu akışkanlara oranla oldukça yüksek olması beklenmektedir. Bu nedenle soğutma sistemi maliyetlerini ciddi miktarda etki edebilecekleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak ilerleyen dönemlerde, artan üretim miktarlarıyla birlikte fiyatlarında, R-134a'nın ilk çıktığı zamanlardaki gibi, ciddi bir düşüş olması beklenmektedir.

Bir soğutma sisteminin küresel ısınmaya olan katkısı, ikinci bölümde açıklanmış olan LCCP tanımından da anlaşılacağı gibi hem direkt, hem de indirekt emisyonlar yoluyla olmaktadır. Bu durum, düşük küresel ısınma potansiyeline sahip bir soğutucu akışkanın, performansının kötü olması halinde, daha fazla emisyonla neden olabileceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle soğutucu akışkanın kullanılacağı sistemdeki performansı ciddi bir şekilde incelenmeli ve LCCP veya TEWI (toplam eşdeğer ısınma etkisi) değerleri hesaplanmalıdır. Aşağıda verilmiş olan Şekil 19'da mobil iklimlendirme sistemleri için yapılmış olan böyle bir analizin sonuçları görülmektedir.



Şekil 19a'da, 2017 yılında dünyadaki mevcut araçların %43'ünün iklimlendirme sistemlerinde alternatif soğutucu (R-1234yf ve CO<sub>2</sub>) kullanılıyor olacağı kabul edilerek yapılan bir LCCP hesabının sonuçları görülmektedir. Şekilde yer alan kırmızı çerçeve alternatif soğutucu kullanan sistemlerin yarattığı CO<sub>2</sub>

salınımını mavi çerçeve ise R-134a'lı sistemlerin yarattığı CO<sub>2</sub> salınımını göstermektedir. Görüldüğü gibi alternatif soğutkanlı sistemlerin direkt salınımı yok denecek kadar azdır. Üç soğutkanın dünya üzerindeki toplam salınımları açısından kıyaslaması yapıldığında, soğutucu akışkan olarak R-1234yf'nin kullanılmasının yıllık CO<sub>2</sub> salınımlarını R-134a ve CO<sub>2</sub>'ye oranla %12 düşüreceği görülmektedir [30].

Araç başına düşen emisyonlara bakıldığında ise Phoneix ve Tokyo için Şekil 19b'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Kırmızıya tonlarındaki bölümler direkt emisyonları, mavi tonları ise indirekt emisyonları göstermekte olup, R-1234yf kullanımının araç başına düşen CO<sub>2</sub> salınımı açısından %20-%30 civarında bir fayda sağlayacağı görülmektedir [30].

Soğutma sektörünün yönelimleri incelendiğinde de 2 farklı yönelim olduğu görülmektedir. 1. grup doğal soğutkanların kullanılması gerektiğini savunurken, diğer grup R-1234yf gibi yapay soğutkanların kullanımının daha uygun olacağı görüşünü savunmaktadır. Bu durum özellikle MAC yönergesi ve getirdiği yasal zorunluluk nedeniyle mobil iklimlendirme sistemlerinde kullanılacak soğutucu akışkan seçiminde çok net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bazı firmalar R-134a'nın yerine karbondioksit (R-744) kullanacağını açıklarken, bir grup da R-1234yf kullanacağını açıklamıştır.

Geliştirilen yeni soğutucu akışkanlar arasında kısa vadede piyasaya sürülmesi beklenen tek akışkanın R-1234yf olması beklenmektedir. R-1234ze'nin ise püskürtme ajanı olarak kendine yer bulması olasıdır. Doğal soğutkanlar açısından bakacak olduğumuzda ise, satış rakamları soğutma sistemlerindeki kullanımlarını giderek artmakta olduğunu göstermektedir. Bu nedenle önümüzdeki günlerde doğal soğutkanların piyasadaki yerini sağlamlaştıracağını rahatça söyleyebiliriz. Geliştirilmekte olan diğer soğutucu akışkanlar (DR türevleri) da, düşük GWP'leri ile, yapılması olası yasal düzenlemelere de bağlı olarak, spesifik uygulamalarda kendine yer bulabileceği düşünülebilir.

Sonuç olarak diyebiliriz ki; ideal bir soğutucu akışkan yoktur. Yapılması gereken; çevresel özellikler (GWP, ODP, doğada yok olma süresi, LCCP), ısıl kararlılık, soğutma çevriminde kullanılan malzemelerle uyumluluk, yağlayıcılarla karışabilirlik, emniyet, performans özellikleri ve tabii ki sistem maliyeti dikkate alınarak, söz konusu uygulama için en uygun soğutucu akışkanın seçilmesidir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada soğutucu akışkanların küresel ısınmaya olan etkileri, bu konuda yapılan yasal düzenlemeler açıklanarak, öne çıkan düşük GWP'li alternatifler ele alınmıştır. Bu alternatiflerin sahip olduğu özellikler, avantajlar ve dezavantajlar üzerinde durularak, soğutma uygulamalarındaki kullanımları değerlendirilmiştir. Bir ideal çevrim analizi gerçekleştirilerek 5 soğutucu akışkanın (R-1234yf, R-1234ze, R-152a, R-717 ve R-134a) performansları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ana başlıklarla aşağıda sıralanmıştır:

- Mevcut soğutucu akışkanların küresel ısınmaya olan katkıları ve bunun neticesinde ortaya çıkan yasal düzenlemeler, düşük GWP'ye sahip soğutucu akışkanların kullanımını zorunlu kılmaktadır.
- Düşük GWP'li alternatifler incelendiğinde; doğal soğutucu akışkanlar ve yeni geliştirilmiş olan sentetik soğutucu akışkanlar (R-1234yf ve R-1234ze) olmak üzere başlıca iki grup olduğu görülmektedir.
- Bir soğutma sisteminin küresel ısınmaya olan katkısı soğutucu akışkanın GWP değerine bağlı olduğu kadar, soğutma sistemi performansına da bağlıdır. Bu yüzden, bir soğutma sisteminin küresel ısınmaya olan etkisi incelenirken, direkt ve indirekt emisyonları da içeren, LCCP veya benzer CO<sub>2</sub> emisyon analizleri yapılmalıdır.
- Yapılan ideal çevrim analizi sonuçlarına göre en yüksek STK'ya sahip akışkan R-717'dir. R-1234yf'nin STK değeri ise beklenildiği gibi R-134a'dan daha düşüktür. R-1234ze'nin STK'sı R-134a ile aynı seviyede iken R-152a'nın daha yüksek STK'ya sahip olduğu görülmüştür.



- e. R-1234yf soğutucu akışkanı sahip olduğu özellikler sayesinde R-134a'lı bir sistemde hiç değişiklik yapmadan, ya da çok küçük değişiklikler ile kullanılma şansına sahiptir. Bu nedenle mobil iklimlendirme sistemlerinde alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.
- f. Doğal soğutucu akışkanların fiyatları çok düşük iken, R-1234yf soğutucu akışkanın fiyatlarının oldukça yüksek olması beklenmekte olup, sistem maliyetine etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun ana nedeni ürünün ticarileşmemiş olmasıdır.
- g. Yakın zamanda piyasaya sürülmesi beklenen tek yeni soğutucu akışkan R-1234yf olup, geliştirilmekte olan diğer soğutucu akışkanların (DR türevleri) yapılması olası yasal düzenlemelere de bağlı olarak, spesifik uygulamalarda kendilerine yer bulması olasıdır.
- h. Soğutucu akışkanların sahip olması istenen tüm özellikleri sağlayan, ideal bir soğutucu akışkan yoktur. Bu nedenle her uygulama için, o uygulamanın koşullarına ve getirdiği kısıtlara en uygun soğutucu akışkan seçilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] CALM, J., M..”The Next Generation of Refrigerants – Historical Review, Considerations, and Outlook”, International Journal of Refrigeration, 31,1123-1133, 2008.
- [2] SÖĞÜT, M. Z., BULGURCU, H., YALÇIN, E., “Soğutma Sektöründe Soğutucu Akışkanlara Bağlı Emisyon Envanteri”, 1. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu, 13-15 Eylül 2012.
- [3] KEOGH, A.; “Soğutucu Akışkan Seçimi ve Su Soğutma Grubu Tasarımı”, “Paket Tip Su Soğutma Gruplarında R-410A Kullanımı”, Teknik Bülten Sayı:4, Nisan-2005.  
[http://www.alarko-carrier.com.tr/eBulten/TekBulten/images\\_4/e\\_tekbulten4\\_print.pdf](http://www.alarko-carrier.com.tr/eBulten/TekBulten/images_4/e_tekbulten4_print.pdf) (Erişim Tarihi: Aralık-2012)
- [4] PAPASAVVA, S., HİLL, W., R., ANDERSEN S., O.. “ Green-Mac-LCCP: A Tool for Assessing the Cycle Climate Performance of Mac Systems”, Environmental Science & Technology, 44, 7666-7672, 2010.
- [5] PALM, B., “Refrigerants of the Future”, Royal Institute of Technology, Department of Energy Technology, Stockholm, Sweden.
- [6] ÖZKOL, N.; “Uygulamalı Soğutma Tekniği”,TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayın No: MMO/2007/115/7, Eylül 2007.
- [7] BULGURCU, H., İSA, K., ONAT, A., “Florlu Gazlar ile İlgili Avrupa Birliği Düzenlemeleri: F-Gaz Yönetmeliği”,1. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu, 13-15 Eylül 2012.
- [8] “Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 Relating To Emissions from Air-Conditioning Systems in Motor Vehicles And Amending Council Directive 70/156/EEC”, Office Journal of the European Union,14 June 2006.
- [9] JARAHNEJAD, M., “New Low GWP Synthetic Refrigerants”, Master of Science Thesis, 2012.
- [10] “Guide 2012: Natural Refrigerants- Market Growth for Europe”  
<http://guide.shecco.com/GUIDE-Natural-Refrigerants-Europe-2012.php> (Erişim Tarihi:24.01.2013)
- [11] SPATZ, M., MİNOR, B.; “ HFO-1234yf : A Low GWP Refrigerant for MAC”, SAE World Congress, Detroit, Michigan, 14-17 April 2008.
- [12][http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/uses\\_apps/automotive\\_ac/SmartAutoAC/flammability\\_table.html#.UOxh4XdZiNc](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/uses_apps/automotive_ac/SmartAutoAC/flammability_table.html#.UOxh4XdZiNc) (Erişim Tarihi: Ocak 2013)
- [13] HİLL, W.; “Industry 3 Year Evaluation of Low Global Warming Potentia Refrigerant HFO-1234yf”, 21 January 2010.
- [14] CLODIC, D.,”Low GWP Refrigerants and Flammability Classification”, Paris.  
<http://www.nedo.go.jp/content/100080128.pdf> (Erişim tarihi: 14.07.2012).
- [15] HİLL, W.; “Risk Assessment and Performance Evaluation of HFO-1234yf”, VDA Winter Meeting, 13 February 2008.
- [16] SPATZ, M., MİNOR B.; “HFO-1234yf – Low GWP Refrigerant Update”, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 14-17 July 2008.
- [17] KOBAN, M.; “Automotive Material Investigation with Low GWP Refrigerant HFO-1234yf”, Willmington,DE.
- [18] TALLEY, E.; “R1234yf Refrigerant”, Fall 2010 ICAIA Conference, 2010.



- [19] LEMMON, E.W., HUBER, M.L., MCLINDEN, M.O., 2010, NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2010.
- [20] KOBAN, M.; “HFO-1234yf Low GWP Refrigerant LCCP Analysis”, SAE 2009 World Congress, 2009.
- [21] LECK, T.,J.; “Evaluation of HFO-1234yf as a Potential Replacement for R-134a in Refrigeration Applications”, 3. IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Boulder,2009.
- [22] AKASAKA R. , TANAKA K, HIGASHI Y., 2009, Thermodynamic Property Modeling for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), International Journal of Refrigeration, 33(2010)52-60 ,Elsevier Ltd and IIR, September 2009.
- [23] MONFORTE, R., ROSE, B., L’HUIILLIER, J-M.; “Updated Situation About Alternate Refrigerant Evaluation”, SAE 2008 Alternate Refrigerant Systems Symposium, Scottsdale,AZ, 10-12 June 2008.
- [24] [http://www.ahrinet.org/App\\_Content/ahri/files/RESEARCH/Technical%20Results/AHRI-8004%20Final%20Report.pdf](http://www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/RESEARCH/Technical%20Results/AHRI-8004%20Final%20Report.pdf) (Erişim Tarihi: 21.01.2013).
- [25] HIGASHI, Y., “Thermophysical Properties of HFO-1234yf and HFO-1234ze(E)”, International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, Tokyo, Japan,17 – 19 February 2010.
- [26] AKASAKA, R., “An Application of the Extended Corresponding States Model to Thermodynamic Property Calculations for Trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234ze(E))”, 33 (2010), 907-914, 2010.
- [27] KARBER, K., M., ABDELAZİZ, O., VİNEYARD, E., A., “Experimental Performance of R-1234yf and R-1234ze as Drop-in Replacements for R-134a in Domestic Refrigerators”, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 16-19, 2012.
- [28] SHİGERU, K., TAKADA N., MATSUO, Y., YOSHİTAKE, D., FUKUDA, S., “Possibility to Introduce HFO-1234ze(E) and its Mixture with HFC-32 as Low-GWP Alternatives for Heat Pump/Refrigeration Systems”, International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, Tokyo, Japan,17 – 19 February 2010.
- [29] LECK, T., J., “New High Performance Low GWP Refrigerants for Stationary AC and Refrigeration”, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 12-15,2010.
- [30] İKEGAMİ T., İGUCHİ, M., AOKİ, K., İJİMA K.; “New Refrigerants Evaluation Results”, SAE 2008 Alternate Refrigerant Systems Symposium, Arizona, 10-12 June 2008.

## ÖZGEÇMİŞ

### Mustafa ARAZ

1986 yılında Karaman’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2010 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü bitirdi. 2011 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Ekim, 2012 itibariyle Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

### Ali GÜNGÖR

1955 Elazığ doğumlu, evli ve iki kız çocuk babasıdır. Ege Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 1977 yılında Mühendis, 1978 yılında Yüksek Mühendis ve aynı Üniversitenin Güneş Enerjisi Enstitüsü’nden 1985 yılında Doktor Mühendis derecelerini aldı. 1986 yılında Kanada’da Brace Research Institute’de altı ay araştırmalarda bulundu. 1989 yılında Isı ve Madde Transferi Bilim Dalında Doçent oldu. 1996 yılında Ege Üniversitesinde Profesör oldu. Çalışma konuları iklimlendirme, soğutma teknolojileri, güneş enerjisi ısı uygulamaları, kurutma tekniği, ısı boruları, termodinamik: ısı ve madde transferi uygulamalarıdır.

**Arif HEPBAŞLI**

1958 yılı İzmir doğumludur. Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesidir. Dr. Hepbaşlı'nın, iş yaşamı felsefesi; üniversite eğitimi, Ar-Ge (günümüzde son derece popüler olan RIC; Araştırma, İnovasyon ve Ticarileştirme) ve toplumsal (sanayiye) hizmet üçlüsünün dengeli olarak yürütülmesinden oluşmaktadır. Yaklaşık 31 yıllık iş yaşamının 10 yılı İzmir'in değişik sanayi kuruluşlarında farklı pozisyonlarda (1986-1996 yılları arasında, Proje Başmühendisi, Planlama-Kalite Sağlama Müdür Yardımcısı, Yatırımlar Müdür Yardımcısı ve Bakım Onarım Müdürü) ve geri kalanının çoğunluğu ise, üniversitede çalışarak geçti ve halen geçmektedir. 500 adetten fazla bilimsel yayının (220'den fazlası SCI bazında makale, Web of Science göre, h-indeks= 29 ve kendi atıfları olmadan 2311 atıf), Türkçe ve İngilizce olarak basılan değişik kitapların yazarı/ortak yazarıdır. Çok sayıda ulusal/uluslararası bilimsel etkinliklerin organizasyonunda yer alan/almakta olan Dr. Hepbaşlı, prestijli uluslararası sekiz derginin yayın danışma kurulu üyesi olup, ayrıca, enerjiyle ilgili çok sayıda ulusal ve uluslararası dergilere ve projelere de hakemlik yapmaktadır. Değişik ulusal ve uluslararası üniversite ödülü olup, ilgi alanları çerçevesinde olmazsa olmaz olarak gördüğü sanayiye de uzun yıllardır danışmanlık hizmeti sunmaktadır. Evli ve bir kız babası olan Dr. Hepbaşlı, İngilizce ve Almanca bilmekte olup, Sertifikalı Enerji Yöneticisidir.

**Tablo Ek1.** R-1234yf'nin Termodinamik Özellik Sıcaklık Doyma Tablosu

-50	0.0376	1319	2.363	-24.266	165.83	-0.1038	0.7481	0.7800	0.6875	1.1616	0.7690	0.0942	0.0095	0.0041996	0.00009145
-45	0.0488	1305.8	3.016	-18.421	169.33	-0.0779	0.7450	0.7903	0.7004	1.1746	0.7839	0.0923	0.0099	0.003872	0.000093454
-40	0.0626	1292.3	3.805	-12.510	172.84	-0.0524	0.7426	0.8007	0.7134	1.1879	0.7991	0.0904	0.0103	0.0035824	0.00009545
-35	0.0793	1278.7	4.748	-6.530	176.36	-0.0270	0.7409	0.8113	0.7265	1.2015	0.8149	0.0885	0.0106	0.0033247	0.00009744
-30	0.0993	1264.9	5.866	-0.480	179.87	-0.0020	0.7398	0.8219	0.7398	1.2156	0.8311	0.0867	0.0110	0.0030939	0.000099426
-25	0.1231	1250.8	7.182	5.643	183.38	0.0229	0.7391	0.8325	0.7531	1.2300	0.8478	0.0849	0.0114	0.0028861	0.00010141
-20	0.1512	1236.5	8.719	11.839	186.87	0.0475	0.7389	0.8432	0.7665	1.2449	0.8652	0.0831	0.0118	0.0026979	0.0001034
-15	0.1840	1221.9	10.504	18.112	190.36	0.0719	0.7392	0.8538	0.7800	1.2602	0.8832	0.0813	0.0122	0.0025265	0.0001054
-10	0.2221	1207	12.565	24.463	193.81	0.0962	0.7397	0.8644	0.7937	1.2761	0.9020	0.0796	0.0126	0.0023699	0.00010741
-5	0.2659	1191.8	14.934	30.896	197.24	0.1203	0.7406	0.8750	0.8074	1.2925	0.9215	0.0778	0.0131	0.0022259	0.00010945
0	0.3161	1176.3	17.646	37.413	200.64	0.1442	0.7418	0.8854	0.8213	1.3097	0.9421	0.0761	0.0135	0.0020931	0.00011152
5	0.3732	1160.3	20.739	44.018	203.99	0.1680	0.7431	0.8958	0.8351	1.3277	0.9636	0.0745	0.0140	0.00197	0.00011363
10	0.4377	1143.9	24.256	50.713	207.3	0.1916	0.7447	0.9061	0.8491	1.3466	0.9865	0.0728	0.0144	0.0018555	0.00011581
15	0.5104	1127.1	28.248	57.504	210.55	0.2152	0.7463	0.9162	0.8631	1.3666	1.0109	0.0711	0.0149	0.0017485	0.00011807
20	0.5918	1109.7	32.770	64.395	213.73	0.2386	0.7481	0.9263	0.8773	1.3880	1.0373	0.0695	0.0154	0.0016482	0.00012043
25	0.6827	1091.7	37.888	71.392	216.83	0.2620	0.7498	0.9362	0.8918	1.4110	1.0664	0.0679	0.0160	0.0015539	0.00012291
30	0.7835	1073.1	43.680	78.500	219.83	0.2854	0.7516	0.9461	0.9068	1.4360	1.0989	0.0662	0.0165	0.0014647	0.00012556
35	0.8952	1053.7	50.236	85.730	222.73	0.3087	0.7533	0.9560	0.9224	1.4636	1.1357	0.0646	0.0171	0.00138	0.00012852
40	1.0183	1033.5	57.669	93.090	225.49	0.3320	0.7548	0.9658	0.9388	1.4944	1.1780	0.0630	0.0177	0.0012994	0.0001315
45	1.1537	1012.2	66.114	100.590	228.11	0.3553	0.7562	0.9758	0.9560	1.5296	1.2275	0.0614	0.0184	0.0012222	0.00013477
50	1.3021	989.82	75.745	108.260	230.55	0.3788	0.7572	0.9860	0.9742	1.5704	1.2862	0.0597	0.0192	0.001148	0.00013844
55	1.4644	966	86.785	116.100	232.79	0.4024	0.7579	0.9966	0.9933	1.6192	1.3576	0.0581	0.0201	0.0010762	0.0001426
60	1.6415	940.49	99.533	124.160	234.76	0.4262	0.7582	1.0078	1.0134	1.6792	1.4468	0.0565	0.0211	0.0010064	0.00014742
65	1.8343	912.84	114.410	132.460	236.42	0.4503	0.7577	1.0198	1.0348	1.7562	1.5630	0.0548	0.0222	0.00093775	0.00015309
70	2.0440	882.43	132.010	141.070	237.67	0.4749	0.7564	1.0331	1.0578	1.8602	1.7227	0.0531	0.0236	0.00086963	0.00015994
75	2.2717	848.3	153.320	150.080	238.37	0.5002	0.7538	1.0486	1.0832	2.0112	1.9697	0.0515	0.0254	0.00080093	0.00016848
80	2.5191	808.77	179.970	159.650	238.26	0.5266	0.7492	1.0679	1.1125	2.2560	2.3643	0.0499	0.0278	0.00072997	0.00017962
85	2.7877	760.45	215.340	170.090	236.88	0.5550	0.7415	1.0947	1.1491	2.7378	3.1552	0.0486	0.0313	0.00065359	0.00019531
90	3.0804	694.05	268.770	182.270	232.92	0.5876	0.7271	1.1405	1.2030	4.2215	5.6810	0.0484	0.0376	0.0005635	0.00022119

**Tablo Ek2. R-1234ze'nin Termodinamik Özellik Sıcaklık Doyma Tablosu**

Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Sıvı Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Buhar Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Sıvı Entalpisi (kJ/kg)	Buhar Entalpisi (kJ/kg)	Sıvı Entropisi (kJ/kg-K)	Buhar Entropisi (kJ/kg-K)	C <sub>v</sub> (Sıvı) (kJ/kg-K)	C <sub>v</sub> (Buhar) (kJ/kg-K)	C <sub>p</sub> (sıvı) (kJ/kg-K)	C <sub>p</sub> (Buhar) (kJ/kg-K)
-50	0.0210	1374.5	1.307	-38.34	173.36	-0.161	0.788	0.807	0.672	1.201	0.750
-45	0.0280	1362.0	1.711	-32.30	176.87	-0.134	0.783	0.815	0.683	1.211	0.763
-40	0.0368	1349.3	2.210	-26.22	180.39	-0.107	0.779	0.822	0.695	1.222	0.777
-35	0.0477	1336.4	2.818	-20.08	183.92	-0.081	0.775	0.830	0.707	1.233	0.791
-30	0.0611	1323.3	3.553	-13.88	187.45	-0.056	0.772	0.838	0.719	1.244	0.805
-25	0.0773	1310.1	4.433	-7.63	190.98	-0.030	0.770	0.846	0.732	1.255	0.820
-20	0.0968	1296.6	5.476	-1.31	194.51	-0.005	0.768	0.855	0.744	1.267	0.836
-15	0.1200	1282.9	6.704	5.06	198.03	0.020	0.767	0.863	0.757	1.280	0.852
-10	0.1474	1269.0	8.140	11.50	201.53	0.044	0.766	0.872	0.770	1.292	0.868
-5	0.1793	1254.8	9.807	18.00	205.02	0.069	0.766	0.880	0.783	1.306	0.886
0	0.2165	1240.3	11.733	24.58	208.49	0.093	0.766	0.889	0.797	1.320	0.904
5	0.2593	1225.5	13.946	31.23	211.93	0.117	0.767	0.898	0.810	1.335	0.923
10	0.3083	1210.4	16.480	37.95	215.34	0.141	0.767	0.907	0.824	1.350	0.943
15	0.3641	1194.9	19.368	44.75	218.70	0.164	0.768	0.916	0.838	1.366	0.964
20	0.4273	1179.0	22.650	51.64	222.03	0.188	0.769	0.926	0.852	1.384	0.986
25	0.4986	1162.7	26.371	58.61	225.30	0.211	0.770	0.935	0.866	1.402	1.009
30	0.5784	1145.9	30.581	65.68	228.51	0.235	0.772	0.944	0.880	1.422	1.034
35	0.6676	1128.5	35.338	72.84	231.65	0.258	0.773	0.954	0.894	1.443	1.061
40	0.7666	1110.6	40.709	80.11	234.70	0.281	0.774	0.963	0.908	1.466	1.090
45	0.8764	1092.0	46.775	87.50	237.65	0.304	0.776	0.973	0.922	1.492	1.123
50	0.9975	1072.7	53.629	95.00	240.48	0.327	0.777	0.982	0.937	1.520	1.160
55	1.1308	1052.5	61.388	102.64	243.16	0.350	0.778	0.992	0.954	1.553	1.205
60	1.2769	1031.2	70.191	110.43	245.69	0.373	0.779	1.002	0.972	1.589	1.258
65	1.4368	1008.8	80.216	118.39	248.03	0.396	0.780	1.013	0.992	1.632	1.323
70	1.6113	984.9	91.694	126.53	250.15	0.420	0.780	1.025	1.015	1.684	1.403
75	1.8014	959.3	104.930	134.90	252.00	0.443	0.780	1.037	1.039	1.748	1.503
80	2.0080	931.5	120.360	143.53	253.53	0.467	0.779	1.052	1.065	1.831	1.633
85	2.2323	900.9	138.620	152.49	254.62	0.492	0.777	1.068	1.092	1.944	1.811
90	2.4757	866.4	160.720	161.88	255.13	0.517	0.774	1.087	1.122	2.108	2.075
95	2.7396	826.3	188.420	171.88	254.79	0.544	0.769	1.110	1.156	2.378	2.519
100	3.0261	776.8	225.360	182.84	253.04	0.572	0.760	1.143	1.199	2.922	3.438