

**R12, R22, R502 SOĞUTUCU AKIŞKANLARI VE ALTERNATİF KARIŞIMLARININ BUHAR SIKIŞTIRMALI SOĞUTMA SİSTEMİNDE EKSERJİ ANALİZİ**

**Erol ARCAKLIOĞLU Ali ERİŞEN**

**Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 71450, Kırıkkale, Türkiye**

**ÖZET**

1987'de gerçekleştirilen Montreal Protokolü gereği global kirlenmeyi azaltmak amacıyla uluslararası düzeyde R12, R22 ve R502 yerine HFC ve HC grubu soğutucu akışkan karışımlarının kullanılması düşünülmektedir. Bu amaçla çalışmanın kapsamında yeni karışımların, Termodinamiğin 2. Yasa'sına dayalı olarak Oransal Verim ve Tersinmezlik değerleri açısından CFC akışkanlarıyla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Karşılaştırma için, emme/sıvı hattı ısı değiştiricili buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde sabit sıcaklığa dayalı yöntem kullanılmıştır.

Şu anda mevcut sistemlerde yaygın olarak kullanılan CFC grubundan R12, R22 ve R502, HFC grubundan R134a, R152a, R125, R143a ve R32, HC grubundan R290 ve R600a soğutucu akışkanları ve bunların ikili, üçlü ve dördü olarak farklı oranlarda karışımları çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Performans değerlerini hesaplamada kullanılan soğutucu akışkanlara ait termodinamik özellikler, REFPROP 6.01 yazılımından alınmıştır. Bu amaçla, bu yazılımın alt programları kullanılarak FORTRAN dilinde yeni yazılımlar hazırlanmış ve ilgili hesaplamalar, bu yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Soğutma sistemi, Soğutucu akışkan karışımı, Oransal Verim, Tersinmezlik

**EXERGY ANALYSIS OF REFRIGERANTS R12, R22, R502, AND THEIR SUBSTITUTES IN VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEM**

**ABSTRACT**

In order to decrease global pollution due to CFCs in accordance with Montreal Protocol in 1987, it is considered to use the refrigerant mixtures of HFCs, and HCs instead of CFCs (R12, R22, and R502). For this reason, it is aimed that the new mixtures with CFC refrigerants are compared with rational efficiency and irreversibility based on second law of thermodynamic in the frame of this study. To compare the performance values, constant temperature method has been used in vapor-compression refrigeration system with suction/liquid line heat exchanger. Refrigerants R12, R22, and R502 of CFCs, R134a, R152a, R125, R143a, and R32 of HFCs, R600a, and R290 of HCs, and their binary, ternary, and mixtures of different mass ratios have been used as working fluids. Thermodynamic properties of refrigerants that were used in the performance calculations have been taken from REFPROP 6.01. For this aim, new software has written in FORTRAN programming language using sub-programs of REFPROP, and all related calculations of performance have been achieved by this software.

**Keywords :** Refrigeration system, Refrigerant mixture, Rational Efficiency, Irreversibility

**1. GİRİŞ**

Soğutma makinasının amacı çevre sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olan bir ortamdan ısı çekerek ortamı düşük sıcaklıkta tutmaktır. Soğutma çevriminde daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı verilmesi sadece

çevrimin tamamlanabilmesi için gerekli olan bir işlemdir. Soğutma çevrimlerinde dolaşan akışkanlara soğutucu akışkan denir.

Soğutma makinalarında soğutucu akışkan seçimi uygulamaya göre değişir. Bunlar arasında freonlar (R12, R22, R502 gibi CFC grubu akışkanlar) piyasada kullanılan soğutucu akışkanların en büyük bölümünü oluşturur. Ozon krizi, soğutucu akışkanlar için yeni arayışlar gerektirmiştir. Çünkü araştırmalara göre ozon tabakasının incelmesinin en önemli sebebi atmosferdeki klor ve brom miktarlarının artmasıdır; bu zararlı maddeleri ihtiva eden CFC'ler atmosferde sera etkisine ve yeryüzünün ısınmasına katkıda bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak 1987'de yapılan Montreol Protokolü ve Kyoto Protokolü gereği CFC'lerin üretimi tamamiyle durdurulma aşamasına gelmiştir.

Soğutucu akışkan olarak soğutucu akışkan karışımları üzerine son yıllarda yoğun çalışmalar, CFC'lerin üretiminin sınırlandırılmasının bir sonucu olarak ortaya çıktı. Karışım oranlarının değiştirilmesiyle istenen özelliklerde soğutucu akışkan karışımlarına ulaşılabileceği anlaşıldı. Karışımlarda kullanılacak soğutucu akışkanlar çevresel olarak zararlı olmayan ve diğer temel özellikleri sağlayan akışkanlardan seçilmeye başlandı. Bunlar R32, R125, R134a, R143a, R152a gibi HFC'lerle R290, R600a gibi hidrokarbon (HC) akışkanlardır. Bunlardan R290 (Propan) ve R600a (İzobütan) yanıcılık özellikleri dolayısıyla karışımlarda düşük yüzdelerde tutulmaktadır. Karışıma katılabilecek akışkan sayısının fazlalığı ve karışım oranlarının değişebilirliği dikkate alınırsa bütün alternatifler için soğutucu akışkanların termodinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesinin güçlüğü ortaya çıkar (1). Bundan dolayı soğutucu akışkan karışımlarının termodinamik özelliklerinin belirlenmesinde hal denklemlerini kullanma zorunluluğu doğmuştur.

Termodinamiğin 2. Yasası, ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini; çevrenin iç enerjisinden faydalanılarak iş elde edilemeyeceğini belirterek enerji dönüşümlerini sınıflandırmakta (düzenli, düzensiz) ve bütün doğal olayların tersinmez olduğunu vurgulamaktadır. Tersinmezliğin neden olduğu iş kayıpları entropinin artmasına neden olur. İş potansiyeli tersinmezlikler kadar azalır ve aynı miktarda enerji kullanılamaz hale gelir. Günlük hayatın yürütülmesinde kullanılan, teknolojik gelişmelerin geniş bir aralığını kapsayan soğutma makinalarının ekserji analizine büyük önem verilmiş ve bu amaçla yoğun çalışmalar yapılmıştır.

R22'nin yerine kullanılmak üzere R32/R134a ve R32/R125/R134a karışımları üzerine yapılan çalışmada (2) üçlü karışımın entalpi ve entropi değerlerini hesaplamak için Peng-Rebinson hal denkleminde bağıntılar türetilmiştir. R11/R22 ve R12/R22 karışımlarının ısı pompasında kullanıldığı bir çalışma (3) 1. ve 2. Yasa analizine yöneliktir. İkili soğutucu akışkan karışımlarının kullanıldığı klima sistemleri için bir simülasyon programının geliştirildiği çalışmada (4) entalpi ve entropi değerleri için Redlich Kwong hal denklemi kullanılmıştır. İki farklı sıcaklıkta çalışan iki buharlaştırıcı soğutma sisteminde soğutucu akışkan karışımlarının optimum seçimini hedefleyen teorik bir çalışmada (5) termodinamik değerler için REFPROP programı kullanılmıştır. En uygun karışım olarak R14-R41 karışımı belirlenmiştir. C. Aprea ve arkadaşlarının çalışması(6), R502'ye alternatif soğutucu akışkanların ve karışımlarının soğutma sistemlerindeki davranış ve performanslarının deneysel olarak belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Seçilen alternatif akışkanların 2. Yasa verimleri de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. R404A'nın en uygun seçim olacağı belirtilmiştir.

S. K. Chaturverdi ve arkadaşlarının çalışmasında (7) ise, güneş toplayıcısını buharlaştırıcı kabul eden ısı pompası sistemine 2. Yasa analizi uygulanmıştır. Isıtma tesir katsayısı, ekserji ve toplayıcı verimi gibi bağıntılar türetilmiş ve bu bağıntılar gerçek çalışma şartlarında sistem performansını belirlemek için kullanılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucusu su soğutmalı olan bir ısı pompasının tersinmezlik analizinin yapıldığı deneysel bir çalışmada (8) ise tersinmezlik bağıntıları detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel sonuçlar hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmış ve sistem elemanlarındaki tersinmezlik miktarları yüzde olarak verilmiştir. R134a soğutucu akışkanının kullanıldığı iki kademeli ve mekanik alt soğutmalı bir soğutma sistemi için 2. Yasa analizinin yapıldığı çalışmada (9) tersinmezlik bağıntıları verilmiş, sistem elemanlarındaki tersinmezlik miktarları ve sistemin performans değerleri bulunmuştur.

Mevcut soğutucu akışkanlarla alternatiflerini performanslarıyla bağlantılı olarak karşılaştırmak için bir referans belirleme zorunluluğu vardır. Bu amaçla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan birisi buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıklarının eşit alınmasıyla yapılan karşılaştırmadır (10). Bu karşılaştırma kendi içinde farklı bölümlere ayrılmaktadır (11). Sıcaklıkların eşit alınması önemli bir kıstastır. Çünkü her bir saf akışkan belli sıcaklıklara kadar soğutma yapabilmekte ve istenen sıcaklıklar için uygun soğutucu akışkan seçilmektedir. Bu yöntemde birim kütleli soğutucu akışkan ve karışımları için hesaplamalar yapılmakta

dolayısıyla soğutma sisteminin boyutları dikkate alınmamaktadır. Bu anlamda bu hesaplama şekli teorik hesaplamaların temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada ise R32, R125, R134a, R143a, R152a, R290 ve R600a saf soğutucu akışkanlarıyla bunların ikili, üçlü ve dörtlü karışımları, ayrıca kaynaklarda bulunan R12, R22 ve R502 eşdeğeri karışımlara ait Termodinamiğin 2. Yasasına dayalı olarak Oransal Verim ve Tersinmezlik değerleri sayısal hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir. Hesaplamalar sabit sıcaklık esasına dayalı olarak Şekil 1’de verilen emme/sıvı hattı ısı değiştiricili soğutma sistemi için gerçekleştirilmiştir. Termodinamik değerler REFPROP 6.01 programıyla hesaplanabilmektedir (12). Noktasal olarak değer alınabilen programda bir soğutma sisteminin, basit olarak performans değerleri bulunamamakta ve doğrudan simülasyonu yapılamamaktadır. Bu amaçla ilgili alt programların kullanıldığı özel amaçlı programların yazılması gerekmektedir.

Zeotropik ve azeotropik olmak üzere iki kısma ayrılan soğutucu akışkan karışımları, çözüldür. Yani mekanik olarak ayıramayacak bileşenlere sahiptir (13). Zeotropik karışımda sabit basınçta faz değişimi esnasında sıcaklık değişmektedir. Dolayısıyla yoğuşma sıcaklığı hem basıncın hem de karışım oranının fonksiyonu olmaktadır (14). Karışımın sadece belli bir oranında gerçekleşen azeotropik karışımlarda ise bu sıcaklık aralığı oluşmaz. Yani karışım o noktada aynı buhar ve sıvı bileşimine sahiptir. Azeotropik karışım, saf akışkan gibi davranır (15).

## 2. EKSERJİ ANALİZİ

Termodinamiğin 2. Yasası, evrendeki tüm oluşların düzensizlik artacak yönde geliştiğini ifade eder. Bu durum moleküler düzensizlik olarak da tanımlanan ‘entropi’ kavramıyla açıklanmaktadır. Entropi, enerji gibi korunan bir özellik değildir; dolayısıyla bir hal değişimi sırasında düzensizlik artışının ifadesi olan bir miktar entropi üretimi söz konusudur. Termodinamiğin 2. Yasası aynı zamanda farklı enerji formları arasında oluşan düzensizlik miktarına dayalı olarak enerji dönüşüm sınırlarını da belirler. Enerji kalitesi bu dönüşümü gerçekleştirme kapasitesi ile eşleşir.

Bir sistemin başlangıç ve son hallerindeki iş potansiyelini göz önüne alan bir standart, enerji kalitesi açısından bir fikir verebilecektir. Ekserji olarak isimlendirilecek böyle bir standart, çevre şartları referans olarak alınan bir enerji dönüşüm işleminde elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Yani bir başka enerji türüne tamamen dönüşebilen enerjiye ekserji denir. Enerjinin işe dönüşmeyen kısmı kayıp iş olarak adlandırılır. Enerji olarak da bilinen bu kayıp başka bir enerji türüne dönüşmez. Dolayısıyla bütün enerji türleri için (Enerji = Ekserji + Anerji) eşitliği yazılabilir.

Kinetik enerji, potansiyel enerji, mekanik iş ve elektrik enerjisi tamamen ekserjiden ibarettir. Buna karşılık akışkanın çevre durumundaki iç enerjisi, çevrenin iç enerjisi veya ısısı tamamen anerjiden ibarettir. Sıcaklığı çevre sıcaklığından farklı olan ısının veya iç enerjinin başka enerjiye dönüşebilen kısmı ekserji geri kalanı ise anerjidir. Tersinir işlemlerde ekserjinin tamamı başka enerjiye dönüşürken, tersinmez işlemlerde bir miktarı ısıya dönüşür. Tersinmez işleme, evrende kaçınılmaz olarak düzensizliğe gidış ve dolayısıyla bir entropi artışı eşlik eder.

Ekserji dengesi, ekserjinin azalması yasası diye ifade edilir. Ekserji dengesinde ise enerji dengesinde enerji transferine karşı gelen ekserji transferi tanımlaması vardır. Yani iş, ısı ve kütle transferi ile eşleşen ekserji transferi gibi. Kontrol bölgesine veya kontrol bölgesinden ekserji akışı, maddenin girişi, çıkışı, ısı transferi ve iş transferi ile eşleşir. Kontrol bölgesine ekserji akışı, kontrol bölgesinden olan ekserji akışından daima büyüktür. İkisi arasındaki farklılık, ekserji kaybının hızını verir ve tersinmezlik hızı olarak bilinir. Isıl tesislerin ekserji analizinde enerji kalitesi inceleneceği için performans katsayıları yerine ekserjiye dayalı bir verim tanımlaması yapılır. 2. Yasa gereği birim zamandaki tersinmezlik değişimi pozitif olacaktır. Böylece bir kontrol hacminden çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı ‘1’den küçüktür. Bu değer tersinirlik durumunda ‘1’ olacaktır. Ekserjiye bağlı olarak bulunan bu değer ‘Oransal Verim’ olarak adlandırılır (16).

## 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada esas alınan saf akışkanlar uygulamada yaygın olarak kullanılan R12, R22 ve R502 (azeotrop bir karışımdır, saf akışkan grubuna dahil edilmiştir) ile çevresel açıdan problem doğurmayan R32, R125, R134a, R143a, R152a, R290 ve R600a akışkanlarıdır. CFC grubu dışındaki diğer saf akışkanların ikili, üçlü ve dörtlü olarak farklı oranlarda karışımı, değişik araştırma merkezlerince R12, R22 ve R502 için alternatif karışım olarak teklif edilmektedir. Bu alternatif karışımlar da çalışma konusu yapılmıştır. Parantez içindeki değerler

kütle yüzdelerini göstermek üzere alternatif karışımlar hesaplanan değerlerle birlikte çizelgelerde gösterilmiştir. Yukarıda belirtilen saf akışkanlar ve alternatif karışımlara ilaveten, alternatif karışımlar esas alınarak bunların farklı oranlarda karışımları da çalışma konusu yapılmıştır. Bu ikili, üçlü ve dörtlü karışımlar, parantez içindeki değerler kütle oranını vermek üzere yine çizelgelerde gösterilmiştir.

İkili karışımlar için birinci bileşenin oranı 10'ar artırılarak (veya ikinci bileşeninki 10'ar azaltılarak) yeni karışımlar belirlenmiştir Üçlü karışımlar içinse her bir üçlü karışımdan en düşük orana sahip akışkanın oranı 3 farklı değerde sabit tutulup diğer ikisinin oranı 10'ar artırılarak veya azaltılarak yeni karışımlar belirlenmiştir. Bu karışımların bir kısmı zeotrop diğer kısmı da azeotrop karışımlardır. Saf akışkanlardan R32, R125, R134a, R143a ve R152a HFC grubunda, R290 ve R600a HC grubunda yer almaktadır. Böylece, karışımların tamamı CFC'lerin dışında kalmaktadır. Bu çalışmada 'buharlaştırıcı ve yoğuşturucu çıkış sıcaklıklarının eşit, dolayısıyla sabit alınması' esasına dayalı hesaplamalar ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu, hava soğutmalı ısı değiştiricisidir ve hava sıcaklıklarının değişmediği kabul edilmiştir. Buharlaştırıcı çıkış sıcaklığı olarak  $-10$  ve  $0^{\circ}\text{C}$ , yoğuşturucu çıkış sıcaklığı olarak da  $35^{\circ}\text{C}$  alınmıştır. Hesaplamalarda basınç düşümü ve boru bağlantılarındaki ısı kaybı ihmal edilmiştir. Kompresörde izentropik sıkıştırma, genişleme valfinden ise izentalpik genişleme dikkate alınmıştır. Isı değiştiricisinin, buharlaştırmacıdan doymuş buhar olarak çıkan soğutucu akışkanı aşırı kızdırma ile  $32^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkardığı düşünülmiştir.

Termodinamiğin 2. Yasasına dayalı performans analizinde ise ekserji (kullanılabilirlik) analizi ve Oransal (2.Yasa) verim hesaplamaları vardır. Hesaplamalarda dikkate alınan soğutma sistemi için ekserji girdisi olarak sadece kompresör girişi vardır. Düşük sıcaklıklı ısı değiştiricisinde (buharlaştırıcı) sıcaklık, ortam sıcaklığından düşük olduğu için ısı girdisi, ekserji çıktısı olacaktır. Dolayısıyla ekserji çıktısı olarak buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda gerçekleşen ısı transferi ile eşleşen ısıl ekserjiler vardır. Böylece ekserji çıktısı ısıl ekserji ifadesinden Şekil 1.'deki sistem için aşağıdaki gibi hesaplanır.

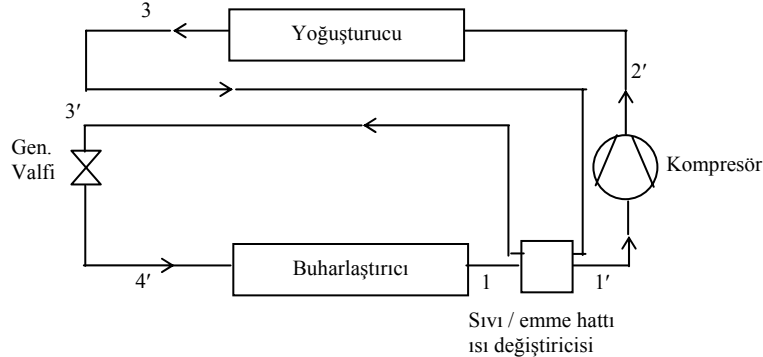
$$\sum E_{\dot{c}} = Q_b \frac{T_0 - T_b}{T_b} \quad (1)$$

Sistemdeki toplam tersinmezlik miktarı ve sistem için oransal verim ise

$$\dot{I} = T_0 \Pi = T_0 \left[ \frac{Q_y}{T_y} - \frac{Q_b}{T_b} \right] \quad (2)$$

$$\psi = 1 - \frac{I}{W_k} \quad (3)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.



Şekil 1. Sıvı/emme hattı ısı değiştiricili soğutma sistemi

#### 4. SONUÇLAR

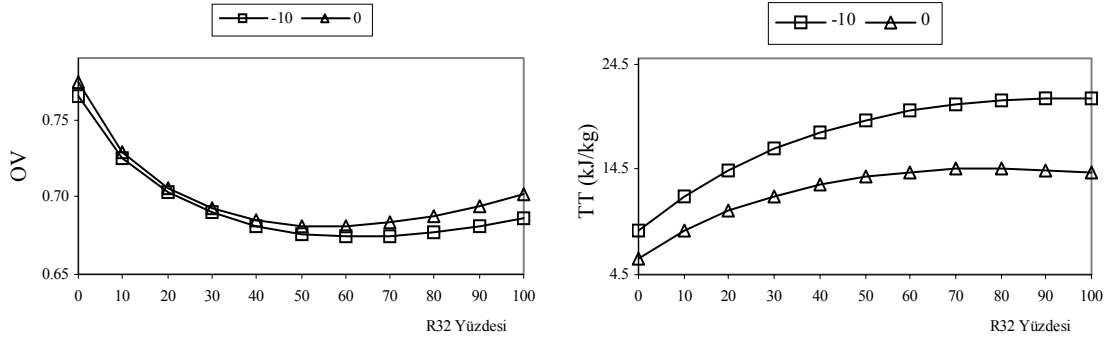
Çalışılan bütün karışımlara ait değerler çizelge olarak verilmiştir. Fakat şekil fazlalığı dolayısıyla eşdeğer karışımlarla birlikte ikili ve üçlü karışımlardan seçme yapılarak sadece OV değerleri grafik halinde gösterilmiştir. Eşdeğer karışımlara ait şekillerdeki numaralandırma ilgili çizelgede verilmiştir. Bütün akışkanlar ve karışımları dikkate alınırsa OV değerleri %56-80 arasında değişmekte ve beklendiği gibi buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça OV değerleri artmakta, buna karşılık tersinmezlik miktarları da azalmaktadır.

R32/R134a karışımında genelde R32 oranı arttıkça OV düşmekte ve TT artmaktadır. Fakat 70/30 oranındaki karışımdan sonra OV'de az da olsa artma gözlenmekte, TT'de ise bir duraklama olmaktadır. (Çizelge 1, Şekil 2) R290/R134a karışımı azeotrop bir karışım olduğu için farklı bir değişim gözlenmektedir. Şöyle ki; 10/90 oranında (azeotrop nokta) en düşük OV elde edilmekte, 40/60 oranında kadar OV artmakta daha sonra R290 oranı arttıkça az da olsa azalma (70/30 karışımına kadar) ve artma gözlenmektedir. TT'de ise 10/90 ve 40/60 oranlarındaki kırılma yine ortaya çıkmaktadır. En yüksek TT değeri 90/10 oranındaki karışımda elde edilmektedir.(Çizelge 1)

R600a/R134a karışımı da azeotrop bir karışımdır ve azeotrop noktaya (20/80 oranı) kadar OV değeri az miktarda düşmekte, daha sonra 60/40 oranına kadar belirgin bir düşme gözlenmekte ve bu noktadan sonra R600a oranı arttıkça OV artmaktadır. TT ise 70/30 oranındaki karışıma kadar artmakta daha sonra ise azalmaktadır. (Çizelge 1) R152a/R134a karışımında ise R152a'nın oranı arttıkça hem OV hem de TT değeri artmaktadır. Fakat OV'deki artış TT'ye göre çok düşük kalmaktadır (Çizelge 1). R125/R143a karışımında ise R125 oranı arttıkça OV hem de TT değeri azalmaktadır (Çizelge 1). R32/R125 karışımında R125'nin oranı azaldıkça OV azalmakta, buna karşılık TT artmaktadır (Çizelge 1).

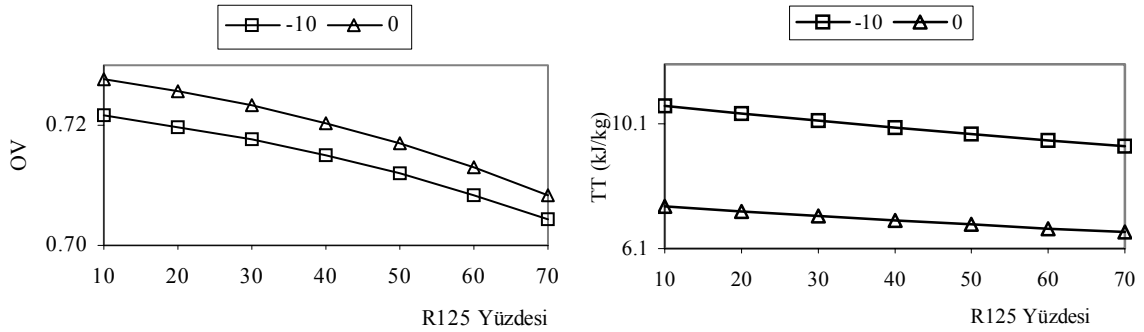
Çizelge 1. İkili karışımlara ait değerler

Karışım Oranı	T <sub>b</sub> °C	R32/R134a		R290/R134a		R600a/R134a		R152a/R134a		R125/R143a		R32/R125	
		TT (kJ/kg)	OV	TT (kJ/kg)	OV	TT (kJ/kg)	OV	TT (kJ/kg)	OV	TT (kJ/kg)	OV	TT (kJ/kg)	OV
0/100	-10	8.7622	0.7654	8.7622	0.7654	8.7622	0.7654	8.7622	0.7654	10.433	0.7205	7.5342	0.7096
	0	6.0724	0.7738	6.0724	0.7738	6.0724	0.7738	6.0724	0.7738	7.2612	0.727	5.2793	0.7149
10/90	-10	11.972	0.7257	14.473	0.6965	9.2298	0.7627	10.109	0.7207	10.109	0.7207	8.8843	0.7038
	0	8.6535	0.7289	10.762	0.6975	6.413	0.7704	7.0398	0.7272	7.0398	0.7272	6.2315	0.7093
20/80	-10	14.431	0.7034	14.795	0.6961	9.6047	0.7633	9.8088	0.7205	9.8088	0.7205	10.129	0.7012
	0	10.537	0.7056	10.662	0.7003	6.7661	0.7689	6.8351	0.7269	6.8351	0.7269	7.0701	0.7077
30/70	-10	16.378	0.6898	13.463	0.7143	11.759	0.7427	9.5123	0.7201	9.5123	0.7201	11.346	0.6997
	0	11.947	0.6924	9.228	0.7247	8.5907	0.7435	6.6332	0.7264	6.6332	0.7264	7.8682	0.7075
40/60	-10	17.931	0.6814	11.398	0.7489	14.457	0.7226	9.2201	0.7195	9.2201	0.7195	12.585	0.6984
	0	12.998	0.685	7.9729	0.7552	10.936	0.7185	6.4344	0.7257	6.4344	0.7257	8.6693	0.7075
50/50	-10	19.148	0.6765	12.695	0.7449	16.593	0.7135	8.9323	0.7187	8.9323	0.7187	13.869	0.6969
	0	13.754	0.6816	9.0224	0.7489	12.814	0.7068	6.2388	0.7247	6.2388	0.7247	9.4938	0.7073
60/40	-10	20.066	0.6744	14.505	0.7381	18.081	0.7116	8.6487	0.7176	8.6487	0.7176	15.208	0.6952
	0	14.251	0.6813	10.412	0.7409	14.144	0.703	6.0462	0.7234	6.0462	0.7234	10.35	0.7068
70/30	-10	20.708	0.6746	16.016	0.7362	18.697	0.7175	8.3685	0.7162	8.3685	0.7162	16.605	0.6932
	0	14.518	0.6834	11.565	0.7383	14.686	0.7081	5.8555	0.7219	5.8555	0.7219	11.24	0.7059
80/20	-10	21.092	0.6767	17.033	0.7394	18.378	0.7301	8.0896	0.7145	8.0896	0.7145	18.059	0.691
	0	14.574	0.6877	12.293	0.7416	14.344	0.7214	5.665	0.72	5.665	0.72	12.163	0.7049
90/10	-10	21.232	0.6806	17.478	0.7469	16.611	0.7553	7.8085	0.7124	7.8085	0.7124	19.569	0.6887
	0	14.433	0.694	12.504	0.7503	12.659	0.75	5.4713	0.7178	5.4713	0.7178	13.118	0.7037
100/0	-10	21.162	0.6859	17.201	0.7599	12.707	0.8036	13.727	0.7661	7.5342	0.7096	21.162	0.6859
	0	14.123	0.702	12.072	0.7657	9.0279	0.8077	9.4121	0.7764	5.2793	0.7149	14.123	0.702



Şekil 2. R32/R134a karışımının OV ve TT değerlerinin kütle oranıyla değişimi

R125/R143a/R134a üçlü karışımında sabit R125 oranı için R134a oranı arttıkça ve sabit R134a oranı için R125 oranı arttıkça OV ve TT düşmektedir. Dolayısıyla R125 ve R134a'nın düşük oranları avantajlı olmaktadır (Çizelge 2). R125/R143a/R290 karışımında sabit R290 oranında R125 oranı arttıkça OV değeri azalırken sabit R125 oranında R290 oranının değişmesiyle OV değişiminde düzenli olarak azalma veya artma olmamaktadır. TT, sabit R290 oranı için R125 oranı azaldıkça ve sabit R125 oranı için R290 oranı arttıkça değerleri artmaktadır (Çizelge 3, Şekil 3). R32/R125/R143a karışımında OV, sabit R125 oranında R32 oranı arttıkça azalırken, sabit R32 oranında R125 arttıkça çok yakın değerlerde seyretmektedir. TT ise sabit R32 oranı için R125 oranının azalmasıyla ve sabit R125 oranı için R32 oranının yükselmesiyle artmaktadır (Çizelge 4). R32/R125/R134a karışımında genelde sabit R32 oranı için R125 oranı azaldıkça OV artmakta, TT ise sabit R125 oranında R32 oranı arttıkça ve sabit R32 oranında R125 oranı arttıkça yükselmektedir (Çizelge 5). R125/R290/R134a karışımında sabit R125 oranında R290 oranı arttıkça OV değerleri azalmaktadır. TT ise sabit R125 oranında R290 oranı arttıkça ve sabit R290 oranında R125 oranı azaldıkça (Çizelge 6).



Şekil 3. R125R143aR290 karışımında %5'lik sabit R290 oranı için OV ve TT değerlerinin kütle oranıyla değişimi

4'lü karışımında ise R290 oranı %5'de sabit tutulmuş, R290'la birlikte ayrı ayrı diğer bir bileşenin oranı sabit tutularak geri kalan diğer iki bileşenin oranı değiştirilmiştir. 20/65/5/10 oranında en yüksek OV, 10/65/5/20 karışımında en düşük TT değeri elde edilmiştir, bunu ise en yüksek OV'nin elde edildiği karışım takip etmektedir (Çizelge 7). R12 ve alternatif karışımları içinde en yüksek OV değeri R12'ye aittir. R12'ye en yakın karışım R152a/R134a'dır. TT için en az değer R12'de elde edilmektedir (Çizelge 8, Şekil 4).

R22 ve alternatif karışımları içinde OV açısından R32/R134a (25/75) karışımı en avantajlıdır. TT'de ise R290/R134a karışımında en düşük değer elde edilmiştir (Çizelge 9, Şekil 5). R502 ve alternatif karışımları içinde OV ve TT açısından R502 en uygun değere sahiptir. R502'yi R125/R143a karışımı takip etmektedir (Çizelge 10, Şekil 6).

Çizelge 2. R125/R143a/R134a  
karışımına ait değerler

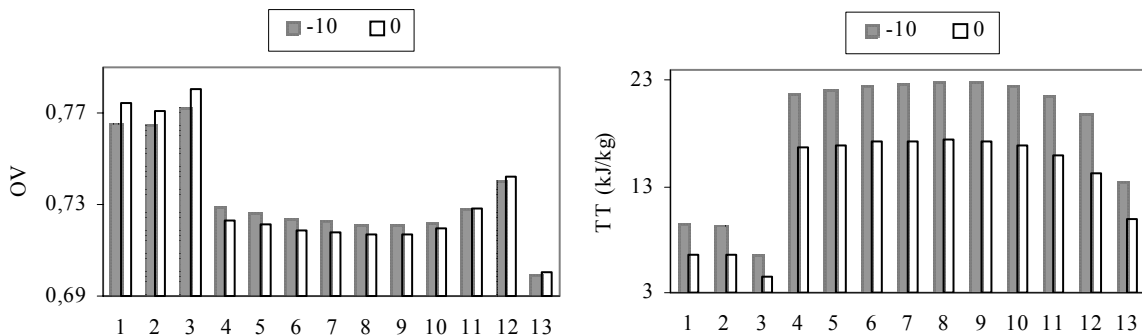
Karışım Oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
15/81/4	-10 0	10.138 7.0857	0.7191 0.7252
25/71/4	-10 0	9.8354 6.8796	0.7188 0.7248
35/61/4	-10 0	9.5385 6.6776	0.7183 0.7241
45/51/4	-10 0	9.2474 6.48	0.7175 0.7232
55/41/4	-10 0	8.9622 6.2867	0.7165 0.722
65/31/4	-10 0	8.6826 6.0971	0.7151 0.7205
75/21/4	-10 0	8.4073 5.9101	0.7134 0.7186
15/75/10	-10 0	10.372 7.2835	0.7173 0.723
25/65/10	-10 0	10.065 7.0747	0.717 0.7225
35/55/10	-10 0	9.7662 6.8717	0.7164 0.7218
45/45/10	-10 0	9.4754 6.6749	0.7156 0.7208
55/35/10	-10 0	9.1933 6.4845	0.7144 0.7194
65/25/10	-10 0	8.9195 6.3002	0.7128 0.7176
75/15/10	-10 0	8.653 6.1207	0.7108 0.7154
15/70/15	-10 0	10.534 7.4242	0.7164 0.7217
25/60/15	-10 0	10.225 7.2141	0.716 0.7212
35/50/15	-10 0	9.9257 7.0115	0.7153 0.7203
45/40/15	-10 0	9.6368 6.8169	0.7144 0.7192
55/30/15	-10 0	9.359 6.6307	0.713 0.7176
65/20/15	-10 0	9.0922 6.4526	0.7113 0.7156
75/10/15	-10 0	8.8356 6.2816	0.709 0.7131

Çizelge 3. R125/R143a/R290  
karışımına ait değerler

Karışım oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
10/85/5	-10 0	10.66 7.4427	0.7165 0.7226
20/75/5	-10 0	10.418 7.2856	0.7148 0.7206
30/65/5	-10 0	10.189 7.1379	0.7127 0.7182
40/55/5	-10 0	9.9714 6.9992	0.7101 0.7154
50/45/5	-10 0	9.7648 6.8689	0.707 0.712
60/35/5	-10 0	9.5677 6.745	0.7034 0.708
70/25/5	-10 0	9.377 6.6248	0.6992 0.7034
10/80/10	-10 0	11.035 7.7052	0.7158 0.7217
20/70/10	-10 0	10.811 7.5617	0.7134 0.7191
30/60/10	-10 0	10.598 7.4257	0.7106 0.716
40/50/10	-10 0	10.394 7.2956	0.7073 0.7124
50/40/10	-10 0	10.195 7.1681	0.7035 0.7083
60/30/10	-10 0	9.9982 7.0391	0.6991 0.7036
70/20/10	-10 0	9.7945 6.9015	0.6942 0.6985
10/75/15	-10 0	11.37 7.9445	0.7164 0.7222
20/65/15	-10 0	11.152 7.8063	0.7137 0.7192
30/55/15	-10 0	10.938 7.6704	0.7105 0.7157
40/45/15	-10 0	10.724 7.5326	0.707 0.7119
50/35/15	-10 0	10.503 7.3868	0.7031 0.7077
60/25/15	-10 0	10.266 7.2245	0.6988 0.7032
70/15/15	-10 0	9.9975 7.0335	0.6943 0.6986

Çizelge 4. R32/R125/R143a  
karışımına ait değerler

Karışım oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
10/10/80	-10 0	11.524 8.0829	0.7067 0.7124
10/20/70	-10 0	11.204 7.8625	0.7065 0.7121
10/30/60	-10 0	10.883 7.6402	0.7062 0.7118
10/40/50	-10 0	10.56 7.4157	0.7059 0.7114
10/50/40	-10 0	10.234 7.1886	0.7056 0.711
10/60/30	-10 0	9.9051 6.958	0.7052 0.7106
10/70/20	-10 0	9.5717 6.7229	0.7047 0.7101
20/10/70	-10 0	12.571 8.7976	0.7003 0.7066
20/20/60	-10 0	12.235 8.5633	0.7003 0.7066
20/30/50	-10 0	11.895 8.3254	0.7004 0.7066
20/40/40	-10 0	11.551 8.0836	0.7005 0.7067
20/50/30	-10 0	11.203 7.8376	0.7006 0.7068
20/60/20	-10 0	10.85 7.5871	0.7007 0.707
20/70/10	-10 0	10.492 7.3314	0.7009 0.7073
30/10/60	-10 0	13.458 9.3638	0.6975 0.7049
30/20/50	-10 0	13.114 9.1228	0.6978 0.7051
30/30/40	-10 0	12.767 8.8784	0.698 0.7054
30/40/30	-10 0	12.417 8.6307	0.6984 0.7058
30/50/20	-10 0	12.063 8.3796	0.6988 0.7063
30/60/10	-10 0	11.706 8.1254	0.6992 0.7068



Şekil 4. R12 ve alternatif karışımları için OV ve TT değerlerinin değişimi

Çizelge 5. R32/R125/R134a karışımına ait değerler

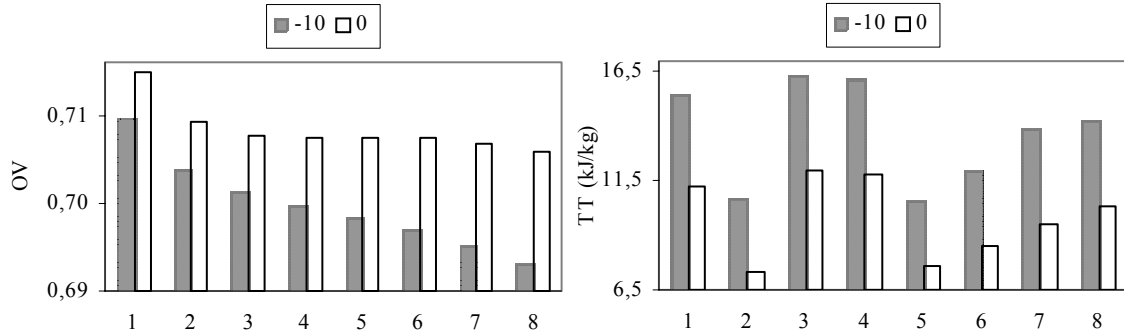
Karışım Oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
15/5/80	-10	13.354	0.7094
	0	9.7428	0.7115
25/5/70	-10	15.423	0.6934
	0	11.27	0.6955
35/5/60	-10	17.053	0.6836
	0	12.396	0.6867
45/5/50	-10	18.321	0.678
	0	13.2	0.6825
55/5/40	-10	19.27	0.6755
	0	13.729	0.6818
65/5/30	-10	19.929	0.6755
	0	14.015	0.6837
75/5/20	-10	20.319	0.6776
	0	14.08	0.688
15/10/75	-10	13.395	0.7061
	0	9.7883	0.7079
25/10/65	-10	15.35	0.6912
	0	11.216	0.6933
35/10/55	-10	16.867	0.6825
	0	12.246	0.6857
45/10/45	-10	18.02	0.6778
	0	12.955	0.6826
55/10/35	-10	18.851	0.6762
	0	13.389	0.6828
65/10/25	-10	19.389	0.6772
	0	13.578	0.6858
75/10/15	-10	19.654	0.6803
	0	13.547	0.6913
15/15/70	-10	13.4	0.703
	0	9.8019	0.7047
25/15/60	-10	15.239	0.6894
	0	11.129	0.6915
35/15/50	-10	16.641	0.6817
	0	12.061	0.6851
45/15/40	-10	17.676	0.678
	0	12.673	0.683
55/15/30	-10	18.385	0.6774
	0	13.009	0.6844
65/15/20	-10	18.798	0.6793
	0	13.102	0.6885
75/15/10	-10	18.935	0.6835
	0	12.973	0.6952

Çizelge 6. R125/R290/R134a karışımına ait değerler

Karışım oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
10/5/85	-10	13.416	0.6951
	0	9.9649	0.6961
20/5/75	-10	13.23	0.6914
	0	9.8386	0.6918
30/5/65	-10	12.972	0.6881
	0	9.6425	0.6881
40/5/55	-10	12.633	0.6851
	0	9.3699	0.685
50/5/45	-10	12.201	0.6826
	0	9.0132	0.6827
60/5/35	-10	11.662	0.6811
	0	8.5698	0.6813
70/5/25	-10	11.026	0.6801
	0	8.0382	0.681
10/10/80	-10	14.192	0.6938
	0	10.602	0.6927
20/10/70	-10	14.015	0.6876
	0	10.45	0.6863
30/10/60	-10	13.731	0.6822
	0	10.18	0.6817
40/10/50	-10	13.301	0.6786
	0	9.7958	0.6789
50/10/40	-10	12.652	0.6786
	0	9.2806	0.6786
60/10/30	-10	11.978	0.6776
	0	8.6953	0.679
70/10/20	-10	11.183	0.678
	0	8.0323	0.6807
10/15/75	-10	14.665	0.6884
	0	10.778	0.6895
20/15/65	-10	14.165	0.6875
	0	10.405	0.6877
30/15/55	-10	13.705	0.6845
	0	9.9915	0.6857
40/15/45	-10	13.115	0.683
	0	9.4673	0.6858
50/15/35	-10	12.365	0.6839
	0	8.9404	0.6846
60/15/25	-10	11.661	0.6824
	0	8.3032	0.6862
70/15/15	-10	10.788	0.6845
	0	7.6315	0.6886

Çizelge 7. R32R125R290R134a karışımına ait değerler

Karışım oranı	T <sub>b</sub> °C	TT (kJ/kg)	OV
1)	-10	12.547	0.6711
	0	9.1099	0.673
2)	-10	14.25	0.6665
	0	10.322	0.6691
3)	-10	15.871	0.664
	0	11.471	0.6668
4)	-10	17.468	0.6623
	0	12.567	0.6662
5)	-10	19.093	0.6607
	0	13.656	0.6659
6)	-10	20.747	0.6591
	0	14.769	0.6655
7)	-10	13.431	0.6695
	0	9.8666	0.6698
8)	-10	14.522	0.6702
	0	10.367	0.6743
9)	-10	16.954	0.6617
	0	12.592	0.6618
10)	-10	16.182	0.6622
	0	11.944	0.6628
11)	-10	15.287	0.6636
	0	11.207	0.6646
12)	-10	13.043	0.6718
	0	9.3516	0.6749



Şekil 5. R22 ve alternatif karışımları için OV ve TT değerlerinin değişimi



Çizelge 8. R12 ve alternatif karışımları için değerler

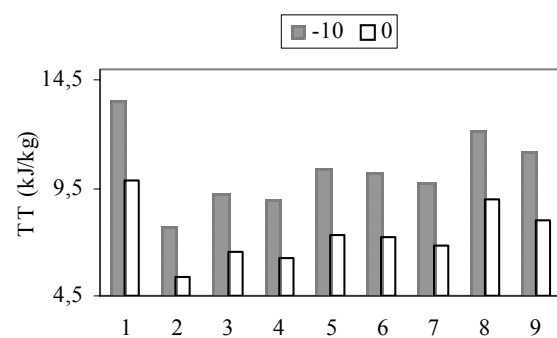
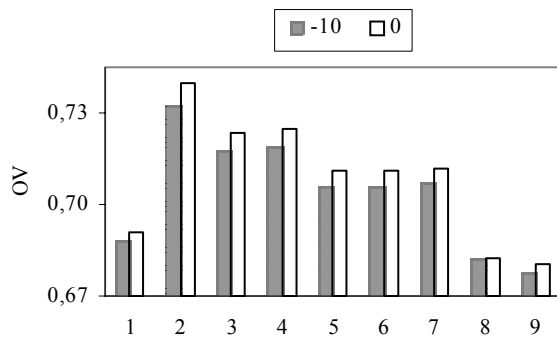
R12 ve Alternatifleri	T <sub>b</sub> (°C)	TT (kJ/kg)	OV
1) R152aR134a 14/86	-10 0	9.475 6.5642	0.7656 0.7741
2) R600aR134a 18/82	-10 0	9.4307 6.6037	0.7645 0.7709
3) R12	-10 0	6.5661 4.5692	0.7724 0.78
4) R290R600a 40/60	-10 0	21.776 16.679	0.7287 0.7232
5) R290R600a 43/57	-10 0	22.08 16.904	0.7266 0.7212
6) R290R600a 48/52	-10 0	22.477 17.182	0.7239 0.7187
7) R290R600a 50/50	-10 0	22.597 17.258	0.723 0.7179
8) R290R600a 56/44	-10 0	22.822 17.367	0.7213 0.7168
9) R290R600a 60/40	-10 0	22.857 17.339	0.7209 0.7168
10) R290R600a 70/30	-10 0	22.52 16.902	0.7226 0.7199
11) R290R600a 80/20	-10 0	21.524 15.912	0.7286 0.7279
12) R290R600a 90/10	-10 0	19.785 14.32	0.7403 0.7423
13) R290R134a 5/95	-10 0	13.505 10.026	0.6996 0.7007

Çizelge 9. R22 ve alternatif karışımları için değerler

R22 ve Alternatifleri	T <sub>b</sub> (°C)	TT (kJ/kg)	OV
1) R32R134a 25/75	-10 0	15.459 11.292	0.6958 0.6981
2) R22	-10 0	10.732 7.3076	0.7352 0.7472
3) R32R134a 30/70	-10 0	16.378 11.947	0.6898 0.6924
4) R32R125R134a 30/10/60	-10 0	16.158 11.775	0.6863 0.6888
5) R32R125R134a 10/70/20	-10 0	10.617 7.6214	0.6955 0.6986
6) R290R134a 46/54	-10 0	11.987 8.4846	0.7483 0.753
7) R32R125 50/50	-10 0	13.869 9.4938	0.6969 0.7073
8) 4'lü 20/55/5/20	-10 0	14.25 10.322	0.6665 0.6691

Çizelge 10. R502 ve alternatif karışımları için değerler

R502 ve Alternatifleri	T <sub>b</sub> (°C)	TT (kJ/kg)	OV
1) R32R125R134a 20/40/40	-10 0	13.554 9.8485	0.6883 0.6906
2) R502	-10 0	7.6843 5.3507	0.7328 0.7399
3) R125R143aR134a 44/52/4	-10 0	9.2762 6.4995	0.7176 0.7233
4) R125R143a 50/50	-10 0	8.9323 6.2388	0.7187 0.7247
5) R32R125R143a 10/45/45	-10 0	10.397 7.3025	0.7058 0.7112
6) R32R125R143a 10/50/40	-10 0	10.234 7.1886	0.7056 0.711
7) R125R143aR290 50/45/5	-10 0	9.7648 6.8689	0.707 0.712
8) R125R290R134a 50/5/45	-10 0	12.201 9.0132	0.6826 0.6827
9) R125R290R134a 70/10/20	-10 0	11.183 8.0323	0.678 0.6807



Şekil 6. R502 ve alternatif karışımları için OV ve TT değerlerinin değişimi

İkili ve üçlü karışımlarla yapılan bu çalışma sonuçları dikkate alınarak deneysel çalışmalarla daha net değerler elde edilebilir. Bu çalışmaya esas alınan referansların ilgi alanıyla sınırlı kalmak üzere karışımları bu kadar geniş aralıkta inceleyen çalışma olmamıştır. Daha önceki çalışmalar genelde R12, R22 veya R502 ile bunların alternatifi olarak teklif edilen üç veya dört karışımdan oluşmaktadır.

**KAYNAKLAR**

1. Barolo, M., Bertucco, A., Scalabrin, G., 1995, "A method for the prediction of vapor-liquid equilibria of refrigerant mixtures at low and moderate pressure", **International Journal of Refrigeration**, Vol 18, P 550-556.
2. Stegou-Sagia, A., Damanakis, M., 2000, "Binary and ternary blends fo R-134a as alternative refrigerants to R-22", **Energy Conversion and Management**, Vol 41, P 1345-1359.
3. Çomaklı, Ö., Çelik, C., Erdoğan, S., 1999, "Determination of optimum working conditions in heat pumps using nonazeotropic refrigerant mixtures", **Energy Conversion and Management**, Vol 40, P 193-203.
4. Haselden, G. G., Chen, J., 1994, "A computer simulation program for mixed-refrigerant air conditioning", **International Journal of Refrigeration**, Vol 17, P 343-350.
5. Churi, N., Achenie, L. E. K., 1997, "The Optimal design of refrigerant mixtures for a two-evaporator refrigeration system", **Comp.Chemical Engineering**, Vol 21, P 349-354.
6. Aprea, C., Mastrullo, R., 1996, "Behaviour and performances of R502 alternative working fluids in refrigerating plants", **International Journal of Refrigeration**, Vol 19, P 257-263.
7. Chaturvedi, S.K., Mohieldin, T.O., Chen, D.T., 1991, "Second-Law Analysis of Solar-Assisted Heat Pumps", **Energy**, Vol 16, P 941.
8. Liang, H., Kuehn, T.H., 1991, "Irreversibility analysis of a water-to-water mechanical-compression heat pump", **Energy**, Vol 16, P 883-896.
9. Zubair, S. M., Yaqub, M., Khan, S. H., 1996, "Second-law-based thermodynamic analysis of two-stage and mechanical-subcooling refrigeration cycles", **International Journal of Refrigeration**, Vol 19, P 506-516.
10. McLinden, M. O., Radermacher, R., 1987, "Methods for comparing the performance of pure and mixed refrigerants in the vapour compression cycle", **International Journal of Refrigeration**, Vol 10, P 318-325.
11. Hogberg, M., Vamling, L., Berntsson, T., 1993, "Calculation methods for comparing the performance of pure and mixed working fluids in heat pump applications", **International Journal of Refrigeration**, Vol 16, P 403-413.
12. NIST Thermodynamics Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), 1996, **Standart Reference Database 23**, Version 6.01, Gaithersburg, MD.
13. Didion, D. A., Bivens, D. B., 1990, "Role of refrigerant mixtures as alternatives to CFCs", **International Journal of Refrigeration**, Vol 13, P 163-175.
14. Hogberg, M., Berntsson, T., 1994, "Non-azeotropic mixtures as working fluids in two-stage economizer-type heat pumps", **International Journal of Refrigeration**, Vol 17, P 417-429.
15. Rohlin, P., 1996, "Zeotropik refrigerant mixtures in systems and in flow boiling", **Doktora Tezi**, Sweden.
16. Kotas T.J., 1985, **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, London Butterworths