

MAKALE

YENİ BİR KENDİNDEN KADEMELİ BUZDOLABI SOĞUTMA ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ*

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A NEW AUTO-CASCADE REFRIGERATION SYSTEM

Fatma ATAMTÜRK, Serhan KÜÇÜKA

**Bu makale, 11-14 Eylül 2019 tarihleri arasında gerçekleştirilen ULIBTK'19 22. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi 'nde sunulmuş ve bildiri kitabında yayınlanmıştır.*

HAKEMLER**

A. İbrahim ATILGAN, Yrd. Doç. Dr.
Abdülvahap YİĞİT, Prof. Dr.
Ahmet CAN, Prof. Dr.
Ali GÜNGÖR, Prof. Dr.
Arif HEPBAŞLI, Prof. Dr.
Aytunç EREK, Prof. Dr.
Bedri YÜKSEL, Prof. Dr.
Dilek KUMLUTAŞ, Prof. Dr.
Fikret PAZIR, Prof. Dr.
Hüsamettin BULUT, Prof. Dr.
İlhan Tekin ÖZTÜRK, Prof. Dr.
İsmail KARAÇALI, Prof. Dr.
M. Barış ÖZERDEM, Prof. Dr.
M. Turhan ÇOBAN, Doç. Dr.
Macit TOKSOY, Prof. Dr.

Mehmet KANOĞLU, Prof. Dr.
Moghtada MOBEDİ, Doç. Dr.
Muhsin KILIÇ, Prof. Dr.
Mustafa ACAR, Prof. Dr.
Olca KINCA, Prof. Dr.
Orhan BÜYÜKALACA, Prof. Dr.
Ramazan KÖSE, Prof. Dr.
Rasim KARABACAK, Prof. Dr.
Recep YAMANKARADENİZ, Prof. Dr.
Selami KESLER, Yrd. Doç. Dr.
Serhan KÜÇÜKA, Prof. Dr.
Y. Onur DEVRES, Prof. Dr.
Tunca YILMAZ, Prof. Dr.
Turan ERKAN
Yunus ÇERÇİ, Prof. Dr.

**Alfabetik olarak sıralanmıştır. Makale/Makaleler, kurulda yer alan ve değerlendirme yapmak üzere seçilen hakemler tarafından incelenmiştir.

ÖZET

Bu çalışmada, buzdolabı soğutulması amaçlı kullanılmak üzere yeni bir kendinden kademeli (oto-kaskad) soğutma çevrimi önerilmiştir. Tek kompresörle iki ayrı buharlaşma sıcaklığı elde edilebilen bu çevrimde, soğutucu evaporatöründen çıkan akışkanın buhar fazı ayrılarak tekrar soğutulmakta ve düşük basıncıdaki dondurucu evaporatörüne gönderilmektedir. Çevrim akışkanı olarak zeotropik bir karışımı olan R290/R600a kullanılmış ve karışımın termodinamik özellikleri REFPROP veri tabanı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada çevrim performansının ve toplam soğutma kapasitesinin soğutucu ve dondurucu yüklerine bağlı değişimi incelenmiştir. Tek kademeli çevrimin etkinlik katsayısı (COP) 2.39 olarak hesaplanırken, kendinden kademeli çevrimde 2.82 olmuştur. Elde edilen sonuçlar, kendinden kademeli sistemlerin kullanılması ile iki farklı sıcaklık elde edilebileceği gibi çevrim performansının ve toplam soğutma kapasitesinin arttırılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Oto-kaskad, kendinden kademeli soğutma çevrimi, ev tipi buzdolabı, soğutma çevrimi, soğutucu akışkan karışımı.

Abstract: In this study, a new auto-cascade refrigerating cycle is proposed. In this cycle, where two separate evaporation temperatures can be obtained by a single compressor, the vapor phase of the refrigerant from the refrigerant evaporator is separated again and cooled again and sent to the low pressure freezer evaporator. R290/ R600a, which is a zeotropic mixture as a cycle fluid, is used and the thermodynamic properties of the mixture were determined using the REFPROP database. In this study, the variation of cycle performance and total cooling capacity due to refrigerant and freezer loads are investigated. The coefficient of performance (COP) of the single-stage cycle is obtained as 2.39, and also, it is 2.82 in the auto-cascade cycle. The results show that by using auto cascade refrigeration systems, two different temperatures can be achieved and cycle performance and total cooling capacity can be increased.

Key Words: Auto-cascade, internal auto-cascade refrigeration cycle, household refrigerator, refrigeration cycle, refrigerant mixture.

1. GİRİŞ

Günümüzde, çevreye zararsız olmaları ve daha avantajlı özellikleri nedeniyle hidrokarbonların

kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Hidrokarbon karışımlarının bir kullanım şekli kendinden kademeli soğutma çevrimleridir. Bu çevrimlerde birden fazla buharlaşma kademesi mevcut olup, akışkan karışım oranları ve buharlaşma sıcaklıkları her kademe değişmektedir. İlk kademe evaporatörü düşük sıcaklık evaporatörüne gönderilecek akışkanın yoğunlaştırılması için kullanılmakta, bu şekilde farklı sıcaklıklarda soğutma yapılması sağlanmaktadır. Kademelerdeki karışım oranlarının değişmesi ile, düşük sıcaklık buharlaştırıcısının basıncı ve kompresör kütleli emiş kapasitesi artmakta, izentropik verimi yükselmektedir.

He vd. (2015), sıvılaştırılmış doğalgazın üretiminde veya geri kazanımında enerji tasarrufu sağlayacağını düşündükleri kendinden kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. 122.5°C kaynak sıcaklığında, R134a ve R23 soğutucu akışkanlarını kullanarak -52.9°C soğutma sıcaklığı elde etmişlerdir. Rui vd. (2016), R600a/R23/R14 üçlü karışımının kullanıldığı bir kendinden kademeli soğutma çevrimini deneysel olarak test etmiş ve 190 K soğutma sıcaklığına ulaşmışlardır.

Çalışmada, karışım oranlarının etkisi incelenmiştir. Sistem performansı belirli bir kompozisyon aralığında çok az değişmekle birlikte, en uygun kütleli karışım oranı 35/30/35 olarak verilmiştir. Soğutucu akışkanların basınçlarını ayarlamak için kullanılan by-pass vanalarının karışımları etkili bir şekilde düzenlemek için iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir.

Du vd. (2009), R23/R134a karışımını kullanarak kendinden kademeli çevrim üzerinde çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarında, kondenser üzerinden geçen soğutma suyu sıcaklık ve debisi değiştirilmektedir. Farklı karışım oranları ve soğutma suyu sıcaklıklarında sistem performans analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu R23'ün %30 şarj konsantrasyonunda en yüksek COP elde edilmiştir.

Zhang vd. (2015), CO₂/propan karışımı kullanılan bir kendinden kademeli çevrim analizi yapmışlardır. CO₂ çok iyi termodinamik özellikler göstermesine rağmen, yüksek çalışma basıncı dezavantajıdır. Bu nedenle CO₂'ye propan ilave edilerek sistemin çalışma basıncı düşürülmüş ve kritik sıcaklık artırılmıştır. Faz ayırıcı tankın girişine bir ısı değiştirici eklenerek, CO₂/propan ayrılma verimliliğine katkısı test edilmiştir.

Dondurucu ve soğutucu bölmelerindeki farklı sıcaklıkları sağlamak için önerilen diğer düzenlemeler de mevcuttur.



Yan vd. (2015), geleneksel soğutma çevrimiyle R290 (propan) ve R600a (izobütan) karışımı kullanılan kendinden kademeli soğutma çevrimini karşılaştıran bir çalışma yapmıştır. Yapılan düzenlemede ilk kademe evaporatörden sonra akışkanın sıvı ve gaz fazları ayrılmakta, akışkanın gaz fazı tekrar yoğunlaştırılarak düşük sıcaklık evaporatörüne gönderilmektedir. Çalışmalarında, farklı oranlarda gaz karışımları kullanarak soğutma etkinlik ve kapasitesinin değişimini incelemişlerdir. Soğutucu kapasitesinin dondurucu kapasitesine oranı olarak tanımlanan soğutucu kapasite oranı 0.8 ile 1.3 arasında değiştirilmiştir. Kendinden kademeli çevrimde geleneksel çevrime göre soğutma kapasitesinde %10.2-17.1, soğutma etkinlik katsayısında (COP) %7.8-13.3 arasında artış elde edilmiştir. Ev tipi buzdolapları ve soğutucularda sistemin genel performansın artırılması için kendinden kademeli sistemin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Literatürün değerlendirilmesi, ikili ve üçlü akışkan karışımlarının kullanıldığı kendinden kademeli soğutma çevrimlerinde buharlaşma basıncının yükseldiğini ve çevrim performansının iyileştiğini göstermektedir. Önceki çalışmamızda, Yan çevrimi termodinamik olarak incelenmiş ve tek kademeli çevrim ile karşılaştırılmıştı (Atamtürk ve Küçük, 2019). Bu çalışmada ise, Yan çevrimi yeniden düzenlenerek çalışma aralığı bir buzdolabında soğutma çevrimi olarak kullanılmaya uygun hale getirilmiştir. Düzenleme yapılan kendinden kademeli çevrimden elde edilen sonuçlar tek kademeli çevrim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

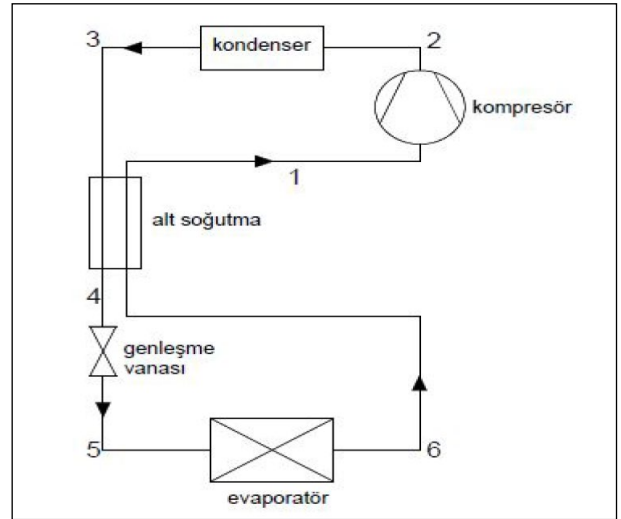
2.1. Soğutucu Akışkan Seçimi ve Çevrim Parametreleri

Soğutucu akışkan olarak %55/45 kütleli karışım oranında R290/R600a karışımı seçilmiştir. Seçilen çalışma akışkanı için önce tek buharlaştırıcısı olan geleneksel buhar sıkıştırıcı soğutma çevriminin termodinamik analizi yapılmış ve soğutma etkinlik katsayısı belirlenmiştir. Daha sonra, iki ayrı soğutma sıcaklığına sahip bir buzdolabı için önerilen kendinden kademeli çevrimin analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki çevrim için kondenser sıcaklıkları 308 K, dondurucu evaporatör giriş sıcaklıkları 249 K, kendinden kademeli çevrimde kullanılan ara kademe soğutucu evaporatörü giriş sıcaklığı 270 K alınmıştır.

Soğutucu akışkan karışımlarının termodinamik özellikleri NIST (Refprop 9.1) veri tabanı kullanılarak değerlendirilmiştir. Çevrim hesaplamaları Refprop veri tabanının MATLAB programına entegre edilmesi ile yapılmıştır.

2.2. Tek Kademeli Çevrim

Kondenser çıkışına alt soğutucu ilave edilmiş geleneksel bir buhar sıkıştırıcı soğutma çevriminin şeması Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Kondensere çıkan sıvı akışkanın genişleme vanası öncesi alt soğutucudan geçmesi ile soğutma kapasitesi arttırılmaktadır.



Şekil 1. Tek kademeli ve alt soğutuculu soğutma çevrimi

Model için seçilen parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tek kademeli çevrim için sistem parametreleri

R290:R600a=0.55:0.45	
Evaporatör giriş sıcaklığı	249 K
Kondenser çıkış sıcaklığı	308 K
Kompresör izentropik verimi	%70
Alt soğutucu (ısı değiştirici) etkenliği	%70

Çevrimde, kondenser çıkışı doymuş sıvı, evaporatör çıkışı doymuş buhar durumunda alınmıştır. Akışkanın kütleli debisi kompresör emişindeki özgül hacmi ile ters orantılıdır:

$$m = \frac{1}{v_1} \quad (1)$$

Isı değiştiricisi etkenliğine bağlı olarak alt soğutucudaki ısı transferi miktarı hesaplanmış ve buradan hareketle sıcak ve soğuk akışkanların soğutucudan çıkış durumundaki entalpi değerleri belirlenmiştir: →

$$q_{alt} = m \cdot (h_1 - h_6) = m \cdot (h_3 - h_4) \quad (2)$$

Çevrimin soğutma yükü,

$$q_{ev} = m \cdot (h_6 - h_5) \quad (3)$$

kompresör işi,

$$w = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (4)$$

bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır. Burada h_5 ve h_6 soğutucu evaporatörünün giriş ve çıkışındaki entalpi değerleridir. h_1 soğutucunun kompresör girişindeki entalpisi, h_2 ise izentropik verim göz önüne alınarak hesaplanan çıkış entalpisi. Soğutma etkinlik katsayısı ise,

$$COP = q_{ev}/w \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

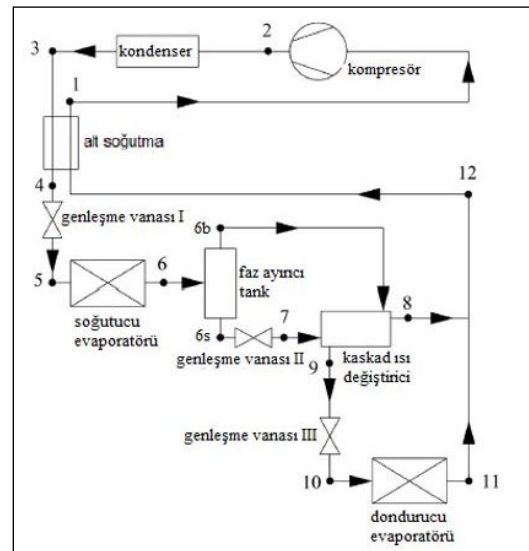
Yukarıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanan çevrim noktaları özellikleri Tablo 2'de gösterildiği gibidir.

Tablo 2. Tek kademeli çevrim üzerindeki durumların termodinamik özellikleri

Durumlar	Karışım Oranı	Sıvı/Gaz Hali	Basınç (kPa)	Sıcaklık (K)	Entalpi kJ/kg
1	0.55/ 0.45	kızgın buhar	144	293.1	605.9
2	0.55/ 0.45	kızgın buhar	898	373.4	738.9
3	0.55/ 0.45	doymuş sıvı	898	308.0	287.6
4	0.55/ 0.45	sıvı	898	284.6	228.1
5	0.55/ 0.45	sıvı+buhar	144	249.0	228.1
6	0.55/ 0.45	doymuş/kızgın buhar	144	256.0	546.3

2.3. Kendinden Kademeli Çevrim Analizi

Yan vd. (2015) tarafından düzenlenen çevrim Şekil 2'deki gibidir. Bu çevrimde, soğutucu evaporatör sonrası orta basınç kademesindeki karışım faz ayırıcıya gönderilmekte, faz ayırıcıda ayrılan buhar tekrar yoğuşturularak dondurucu evaporatörüne gönderilmekte ve burada buharlaşarak çevrim tamamlanmaktadır.



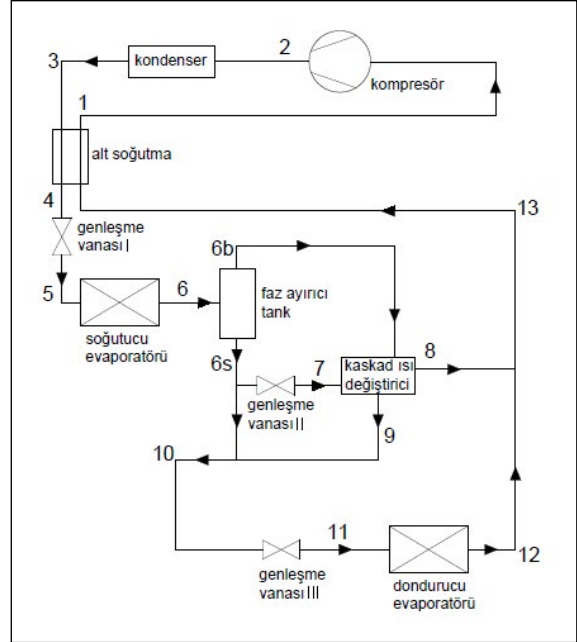
Şekil 2. Yan çevrimi şematik diyagramı



Ancak, bu çevrimde faz ayırıcıdaki kuruluk derecesi buhar kısmının yoğuşmasını sağlayacak oranda olmak zorundadır. Bu durum, soğutucu ve dondurucu yüklerinin birbirine oranını sınırlamaktadır. Yan çalışmasında soğutucu yükünün dondurucu yüküne oranı 0.8 – 1.3 aralığında değişmiştir.

Bu çalışmada ise, faz ayırıcıdaki sıvının bir kısmının dondurucu evaporatörüne gönderilmesi ile evaporatör yüklerinin daha geniş bir aralıkta değişmesi amaçlanmıştır.

Düzenlenmiş çevrimin akış şeması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Düzenleme yapılmış kendinden kademeli soğutma çevrimi akış diyagramı

Geliştirilen çevrim modeli için seçilen çalışma parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Düzenleme yapılmış kendinden kademeli çevrim için sistem parametreleri

R290:R600a=0.55:0.45	
Soğutucu evaporatör giriş sıcaklığı	273 K
Dondurucu evaporatör giriş sıcaklığı	249 K
Kondenser çıkış sıcaklığı	308 K
Kompresör izentropik verimi	%70
Alt soğutucu etkenliği	%70

Faz ayırıcıdan gelen buhar, kaskad ısı değiştiriciyi doymuş sıvı durumunda terk etmektedir.

$$x_5 \cdot (h_{6b} - h_9) = r_7 \cdot (h_8 - h_7) \quad (6)$$

x_5 değeri, soğutucunun evaporatör çıkışındaki buhar kütlelerinin toplam kütleyle oranı olup, soğutucu ve dondurucu yüklerinin değişimine bağlıdır. r_7 değeri ise, kaskad ısı değiştiricisine gönderilen sıvı miktarının çevrimde dolaşan akışkan kütleli debisine oranını göstermektedir.

Kaskad ısı değiştiriciden ve dondurucu evaporatöründen gelen akışkanların karışım noktasındaki entalpi değeri,

$$h_{14} = r_7 \cdot h_8 + r_{11} \cdot h_{12} \quad (7)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

Soğutucu evaporatör yükü,

$$q_{soğ} = m \cdot (h_6 - h_5) \quad (8)$$

dondurucu yükü,

$$q_{don} = m \cdot r_{11} \cdot (h_{12} - h_{11}) \quad (9) \rightarrow$$

ve toplam soğutma yükü,

$$q_{ev} = q_{soğ} + q_{don} \quad (10)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada r_{11} değeri, dondurucu evaporatöre gönderilen akışkan debisinin çevrimde dolaştırılan akışkan kütleli debisine oranını göstermektedir. h_5 , h_6 , h_{11} ve h_{12} ise soğutucu ve dondurucu evaporatörlerin giriş ve çıkış entalpileridir.

Kompresör işi (w) ve çevrimin soğutma etkinlik katsayısı (COP) ise tek kademeli çevrimde gösterildiği gibi sırası ile Eş. (4) ve Eş. (5) bağıntıları ile hesaplanır.

Soğutucu yükünün toplam soğutma yüküne oranının %60 olduğu durum için hesaplanmış çevrim noktaları özellikleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Kendinden kademeli çevrim üzerindeki durumların termodinamik özellikleri

Durumlar	Karışım Oranı	Sıvı/Gaz Hali	Basınç (kPa)	Sıcaklık (K)	Entalpi (kJ/kg)
1	0.55/ 0.45	kızgın buhar	185	294.8	607.6
2	0.55/ 0.45	kızgın buhar	898	364.8	720.8
3	0.55/ 0.45	doymuş sıvı	898	305.0	287.6
4	0.55/ 0.45	sıvı	898	287.1	234.2
5	0.55/ 0.45	sıvı+buhar	337	273.0	234.2
6	0.55/ 0.45	sıvı+buhar	337	276.8	425.6
6s	0.410/ 0.590	doymuş sıvı	337	276.8	208.7
7	0.410/ 0.590	sıvı+buhar	185	259.5	208.7
8	0.410/ 0.590	doymuş buhar	185	266.7	556.5
6b	0.646/ 0.354	buhar	337	276.8	574.5
9	0.646/ 0.354	doymuş sıvı	337	269.8	191.8
10	0.813/ 0.187	sıvı	337	264.9	179.9
11	0.813/ 0.187	sıvı+buhar	185	249.0	179.9
12	0.813/ 0.187	doymuş buhar	185	253.7	549.6
13	0.55/ 0.45	buhar	185	262.5	554.1

Tek kademeli çevrim ve düzenleme yapılmış çevrim için (soğutucu yükü oranı %60), soğutucu ve dondurucu yükleri, kompresör emme ve basma basınçları, kompresör basınç oranları, kompresör işi ve COP değerleri Tablo 5'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Tablo 5. Geleneksel ve kendinden kademeli çevrim değerlerinin sayısal karşılaştırılması

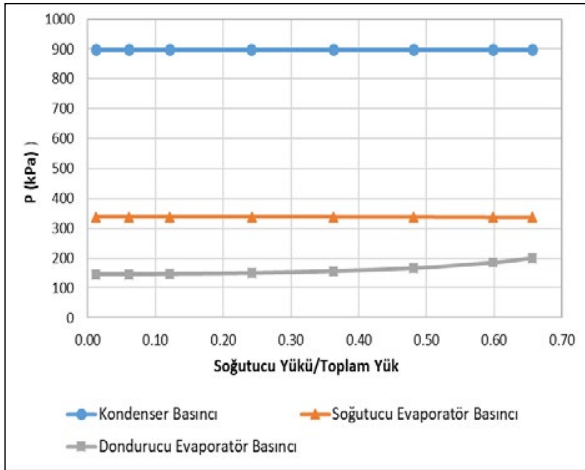
Soğutma Çevrimi Tipi	Soğutucu ve Dondurucu Yükleri (kJ/m ³)	Emme Basıncı (kPa)	Kondenser basıncı (kPa)	Sıkıştırma Basınç Oranı	Kompresör işi (kJ/m ³)	COP
Tek Kademeli	0 961	144	898	6.24	402	2.39
Kendinden Kademeli	743 499	185	898	4.85	450	2.82

Soğutucu yükünün dondurucu yüküne oranının değiştirilmesi ile elde edilen sonuçlar ise sonraki bölümde gösterilmiştir.

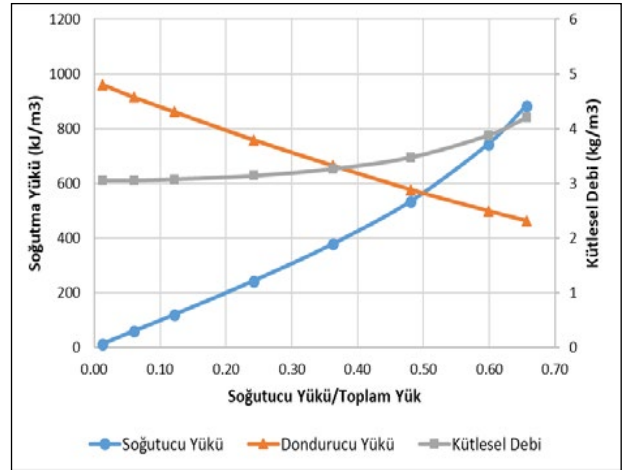
3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Üst buharlaştırıcıda buharlaşmayan bir kısım sıvının alt buharlaştırıcıya gönderilmesi ile düzenlenen çevrimde, soğutucu yükünün toplam yüke oranının 0 ile %66 arasında değiştirilerek çevrim basınç, soğutma kapasitesi ve yükleri hesaplanmıştır.

Soğutucu yükünün toplam yüke göre değişimine bağlı olarak soğutucu-dondurucu evaporatör basınçlarının, soğutma yüklerinin ve kütleli debinin değişimleri Şekil 4 ve 5'te grafik olarak gösterilmiştir:



Şekil 4. Kondenser ve soğutucu-dondurucu evaporatör basınç değişimleri



Şekil 5. Soğutma yükleri ve kütleli debi değişimi

Görüldüğü üzere, dondurucu evaporatör yük oranının azalması ile birlikte evaporatör basıncı artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, akışkan kütleli debisinde bir artış görülmektedir.

Çevrimin toplam soğutma yükü, kompresör işi ve COP değişimi ise Şekil 6'daki gibidir:

