

SOĞUTMA SİSTEMLERİ İÇİN OPTİMUM BORU BOYUTLARI

Arif İLERİ
Sami Cem KESİM

ÖZET

Soğutma sistemlerindeki bağlantı borularının optimum çaplarını veren ilişkiler elde edilmiştir. Bu termoekonomik optimizasyon, boru ilkyatırım maliyeti ile soğutma sisteminin çalışma ömrü boyunca borulardaki basınç kayıplarını karşılamak için harcanacak enerji maliyetinin toplamını minimize etmektedir. Optimize edilmiş çap değerlerine termodinamik ve ekonomik parametrelerin (soğutkan, yük, yoğunlaşma ve buharlaşma sıcaklıkları, boru ve elektrik fiyatları, faiz oranları, vb.) etkileri ortaya konmuştur. Emme, basma ve sıvı hatlarındaki en uygun kapasite ve basınç kaybını veren tasarım tablosu örnekleri, R-134a için bakır ve amonyak için çelik boru varsayılarak hazırlanmıştır.

1. GİRİŞ

Basit bir soğutma çevrimi, Şekil 1 de belirtildiği gibi, evaporatör, kompresör, kondenser, genişleme vanası, aksesuarlar ile emme, basma ve sıvı hatları olarak adlandırılan bağlantı borularından oluşur. Bir soğutma

soğutma elemanına yeterli miktarda soğutkanı aşırı basınç kaybına neden olmadan sağlayabilmelidir. Büyük boru çapları basınç kaybı ve enerji tüketimini azaltırken, ilk yatırım maliyetini artırırlar. Boru çapının bu zıt etkileri, boru ile ilgili ilk yatırım ve belirli bir sistem ömrü için işletme maliyeti toplamını minimize eden bir termoekonomik optimizasyon yapılmasına imkan sağlar. Belirsizliklerle dolu ekonomik değişkenleri incelemeye dahil etmek hoş olmasa da kaçınılmazdır, çünkü termodinamik inceleme tek başına cevaba ulaşmaya yeterli değildir.

Boru çapları büyültüldükçe soğutkan akış hızı düşeceğinden, sistemdeki yağın sürüklenmesi özellikle dik borularda güçlenecektir. Ayrıca, sıvı hattında mevcut aşırı soğutmanın elverdiğinden de fazla basınç düşümü olursa, genişleme vanasından geçişi azaltarak sistemin işleyişini bozan erken buharlaşmaya yol açılabilir. Bu sınırlamalar ve pratikte karşılaşılabilecek bir takım benzer sorunlar bu çalışmada ele alınmamış olup, tasarımcının tecrübesine bırakılmıştır. Ancak, yağın çevrimde sürüklenmesi için gerekli en düşük kapasiteyi teorik olarak inceleyen bir çalışmanın sonuçları ayrıca yayınlanacaktır [1].

Analizler, termodinamik performansla ispatlanmayan etkileri açısından, emme borusundaki basınç kaybının basma borusundakinden daha önemli olduğunu açıkça göstermektedir. Sıvı borusu yoğun akışkan içerdiğinden ve genişleme vanası ile evaporatör arasındaki isimsiz bağlantı çok kısa olduğundan dolayı çok daha az etkilidirler. Örneğin, 380° C yoğunlaşma ve 4.5 °C buharlaşma sıcaklığında çalışan bir R-134a soğutma sisteminde, emme borusunda 1K'e denk basınç kaybı, kompresör kapasitesinde %3.2 düşüşe ve güç tüketiminde ise %2.6 artışa neden olur. Diğer taraftan, basma borusunda

Arif İLERİ

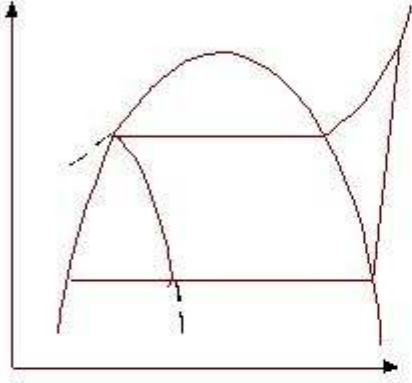
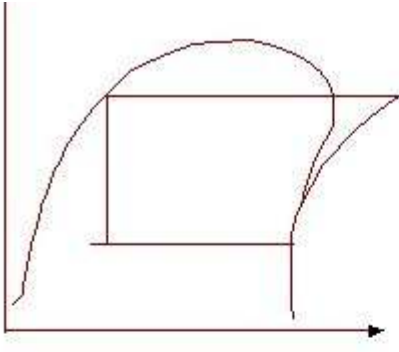
1947 doğumludur. Kalifornia Üniversitesi'nden (Berkeley, USA) lisans, Oregon Devlet Üniversitesinden yüksek lisans ve doktora derecelerini aldıktan sonra 1985 öncesi ODTÜ Gaziantep Yerleşkesinde görev almıştır. ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde profesördür. İlgili alanları soğutma ve diğer ısı sistemleri, ekserji ve enerji kullanımını ve verimliliğini analizleridir.

Arif İleri'yi 17 Ağustos 1999 depreminde yitirdik.

Sami Cem KESİM

1972 Ankara doğumludur. Makina mühendisliği alanında lisans derecesini 1994 de Gazi Üniversitesinden, yüksek lisans derecesini ise 1998 de ODTÜ'den almıştır. Halen bir kamu kuruluşunda çalışmaktadır.

* TESKON '99 Bildiriler Kitabından alınmıştır.

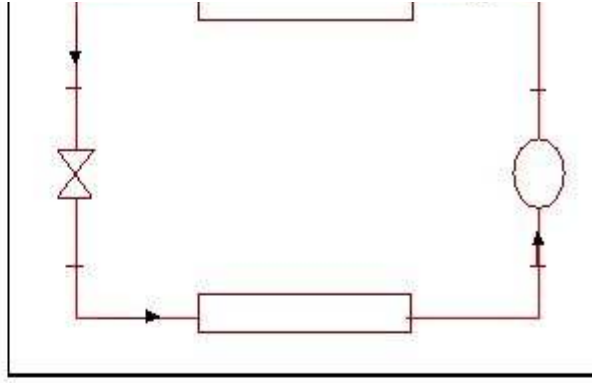


Şekil 1. Tipik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi

1K'lık basınç kaybı, kompresör kapasitesinde sadece %0.8 düşüğe ve güç tüketiminde ise ancak %0.5 artışa neden olur. Bu tipik değerler emme borusunun önemini göstermektedir.

Soğutma boruları için kullanılan malzemeler, siyah çelik, dökme demir, bakır, alüminyum, pirinç ve benzeridir. Ancak, hafifliğinden, korozyona dayanıklılığından ve montaj kolaylığından dolayı amonyak hariçindeki soğutkanların kullanıldığı orta ve düşük kapasiteli sistemlerde genelde bakır tercih edilir. Bakır ve alaşımlarıyla amonyakın etkileşime girmesinden dolayı ise, amonyaklı sistemlerde yaygın olarak demir veya çelik borular kullanılmaktadır. Bu yüzden bu çalışmanın örneklerinde sadece bakır ve çelik borular ele alınmıştır.

Soğutma sistemlerinde boru çaplarının belirlenmesine yönelik çeşitli kaynaklar mev-



cuttur: Eski kaynaklardaki [2-4] tablolar yeni çalışmalarda da, örneğin [5] veya [6], tekrarlanmaktadır. Wile [7], soğutkan viskozitesi ve boru tipinin düz borulardaki basınç kaybını incelemiş ve sonuçları grafiklerde sunmuştur. Vana ve dirsekler için eşdeğer uzunluklar düz boru uzunluğuna eklenmelidir. Termoekonomik anlamda optimum boru çapına birçok tasarım parametresi etki eder; örneğin: soğutkanın viskozite ve yoğunluğu, soğutma yükü, yıllık çalışma saatleri, enflasyon ve faiz oranları, elektrik enerjisi fiyatı. Bu yüzden, mevcut yayınlarda açıkça belirtilmeyen birçok varsayım mevcuttur. Tablo 1 maliyet ile basınç düşümünü dengelemek üzere verilmekte olan pratik ama kaba önerileri içermektedir. Genel bir kabule göre [3, 6], amonyak için emme borusundaki basınç düşüşüne karşılık gelen doymuş sıcaklıktaki düşüş 0.5 K'i geçmemeli; diğer soğutkanlar için ise bu değer en çok 1 K olmalıdır. Kısa emme borulu, yıllık çalışma süreleri 4000 saati geçmeyen ve yatırım maliyeti işletme maliyetinden daha önemli olan klima ve diğer soğutma sistemlerinde, daha yüksek gaz hızları ve basınç kayıpları kabul edilebilir. Öte yandan daha sürekli çalışan endüstriyel ve ticari soğutma uygulamalarında soğutkan akış hızı belirtilen sınırın düşük ucunda seçilmelidir. Ancak tecrübe ve mühendislik içgüdüüne dayanılarak yapılabilecek bu yorum ve değerlendirmelere, bu çalışmada sunulan sonuçların kullanılmasında da gereksinim olacaktır.

2. SOĞUTKAN BORULARININ TERMOEKONOMİK

Tablo 1. Çeşitli soğutkanlar için tavsiye edilen hızlar (m/s) [3].

Soğutkan cinsi	Emme hattında	Basma hattında	Sıvı hattında	
			Kondensersıvı tankı	Sıvı tankı-Evaporatör
12,22,500	6-20	10-18	0.5	0.5-1.27
717	10-25	15-30	0.5	0.5-1.27

ki burada kullanılan amortisman faktörü,

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (5)$$

ve enflasyondan arındırılmış,

40	6-20	10-20	0.5	0.5-1.27
----	------	-------	-----	----------

gerçekçi faiz oranı,

$$i_i = \frac{1 + i_d}{1 + j} - 1 \quad (6)$$

BOYUTLANDIRILMASI

2.1 Basınç kaybı formülasyonu

Kararlı türbülant akışta basınç kaybı, iyi bilinen Darcy-Weisbach eşitliğinden hesaplanabilir,

$$\Delta P = f \frac{V^2 L}{2D_i} = f \frac{8Lm}{\rho \pi^2 D_i^5} \quad (1)$$

Görüldüğü üzere, tanımlanan bir akışta, basınç kaybı boru çapının beşinci kuvvetiyle ters orantılıdır. $Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} = 4m/\nu$ ile pürüzsüz borudaki türbülant akış için geçerli Blasius korelasyonu kullanılarak, $f = 0.3164/Re^{0.25}$ olarak bilinen sürtünme faktörü aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$f = \frac{0.224 \rho^{0.25} D_i^{0.25} m^{0.25}}{m^{0.25}} \quad (2)$$

2.2 Maliyet analizi

Herhangi bir boru için ömürboyu toplam maliyet, yıllık maliyetler metodu ile şöyle hesaplanabilir:

$$C_{total} = C_{cap} + C_{opr} \quad (3)$$

Hurda değer ihmal edilince, her bir yıla düşen yatırım maliyeti vergiler dahil boru maliyetinin yıllara yayılmasından ibarettir:

$$C_{cap} = IC \cdot CRF = L \cdot C_{upipe} \cdot CRF \quad (4)$$

Bu çalışmada boruların servis veya ekonomik ömrü 20 yıl ve CRF faktörü de, yaklaşık yıllık %4 arındırılmış faiz oranına denk gelecek şekilde, 0.075 alınmıştır. Farklı oranların etkisi, istenirse, aşağıda geliştirilen bağıntılar yardımıyla kolayca hesaplanabilecektir.

Boruların birim maliyeti, borunun ağırlığına bağlı olarak hesaplanabilir. Böylece; $C_{upipe} = \frac{A \cdot C_{mat} \cdot r_{mat}}{D_o^2 - D_i^2}$ ve $A = \pi(D_o^2 - D_i^2)/4$ alınabilir. Boru dış ve iç çaplarını ilişkilendirmek için $D_o = d_i$ kullanılacaktır ki, burada d_i değeri Tablo 2'de verilen bir sabittir [8].

Diğer taraftan, yıllık işletme gideri, basitçe, borulardaki basınç kayıplarını karşılayan kompresör tarafından tüketilecek elektrik enerjisi maliyetidir:

$$C_{opr} = \frac{\Delta P \cdot Q}{h_s \cdot h_m} C_e t_{an} \quad (7)$$

Elektrik fiyatı, C_e , bütün girdi ve vergileri içerecek şekilde, 0.0000785 \$/Wh olarak alınmıştır. Kompresörün mekanik verimi, h_m , %90 varsayılmış, izantropik verim, h_s , ise sıkıştırma oranının bir fonksiyonu olarak değiştirilmiştir [6].

2.3. Optimum boru çapı

Yukarıdaki eşitliklerin bir araya getirilmesi ve hacimsel debinin soğutma yükü ve entalpiler cinsinden

Tablo 2. Boru dış iç çapları oranı, d_o/d_i (K ve L indisleri, K ve L tipi bakır borular; 40 ve 80 indisleri, 40 ve 80 tipindeki çelik borular içindir).

Bakır borular		
D_o (in)	d_K	d_L
1/4"	1.309	1.283
1/2"	1.23	1.165
5/8"	1.185	1.143
7/8"	1.174	1.115
1 1/8"	1.129	1.095
1 3/8"	1.104	1.087
1 5/8"	1.098	1.081
2 1/8"	1.082	1.071

Çelik borular			
boy(in)	D_o (mm)	d_{40}	d_L
3/8"	17.145	1.369	1.596
1/2"	21.336	1.35	1.538
3/4"	26.671	1.27	1.415
1"	33.401	1.25	1.374
1 1/4"	42.161	1.20	1.299
1 1/2"	48.26	1.18	1.267
2"	60.325	1.06	1.224

2 5/8"	1.077	1.065
3 1/8"	1.074	1.061
3 5/8"	1.071	1.058
4 1/8"	1.069	1.056
5"	1.067	1.054
6"	1.066	1.047

2 1/2" 3.025	1.104	1.237
3"	88.9	1.1411.206
3 1/2"	101.61	1271.189
4"	114.31	1171.176
5"	141.31	1021.156
6" 168.275	1.092	1.15
8" 219.075	1.0831	1.131
10" 273.05	1.0351	1.124
12" 323.85	1.0681	1.121
16"	406.41	0661.118

$$Q = \frac{r(h_{vap} - h_{liq})}{r} \quad (8)$$

olarak ifade edilmesi sonucu, soğutma borularının toplam yıllık maliyeti aşağıdaki gibi olur:

$$C_{total} = \frac{1.79m^{0.25} q}{\check{S}1.75\#2D_i^{-.75} (h_{vap} - h_{liq})^{2.75}} \frac{1}{r_l} C_{e,tan} + L \frac{\check{S}(d^2 - 1)D_i^2 C_{mat} r_{mat}}{4} CRF \quad (9)$$

Bu aşamadan sonra, termoekonomik optimum boru çapı aşağıdaki eşitliğin çözümü olarak bulunur.

$$\frac{dC_{total}}{dD_i} = 0 \quad (10)$$

Böylece,

$$D_{i,opt} = \frac{0.714C_{e,tan} t_e^{0.75}}{(d^2 - 1)C_{mat} r_{mat} CRF} \frac{m^{0.25} q}{r_l^2 (h_{vap} - h_{liq})^{2.75}} h_m \quad (11)$$

Bu ifadenin iki çarpılan grup olarak derlenebilmesi sayısal analizi kolaylaştıracaktır. Kök içindeki ilk grup, ekonomik ve boru türü ile ilgili genel parametrelerden ibaretken, ikinci kök içindeki grup soğutkan ve çevrime ait ve uygulanan örneğe bağlı olarak değişecek değerlerdir.

2.4. Bakır borular

Bakır borular için nominal boyut dış çap - tır. Tipler, K (en kalın), L ve M, boru et kalınlığını simgeler. Soğutma uygulamalarında sadece tip K ve daha yaygın olarak tip L kullanılır. Bakırın yoğunluğu 8890 kg/m³ ve boru birim maliyeti 6.5 \$/kg alınmıştır. Tablo 2'de belirtilen, D_o/D_i oranı 1/4"(K) için 1.3 den 5"(L) için 1.05'e kadar değişmektedir.

Parametrelerin etkilerini aydınlatmak ve elle tasarımda kolaylık sağlamak amacıyla,

yukarıdaki eşitlikleri kullanarak, R-134a sistemi için optimum bakır boru çapları hesaplandı ve sonuçlar Tablo 3-8 olarak sunuldu. Bu tabloların herbiri kaynama sıcaklığını 10 K lik basamaklarla 5°C den -35°C ye kadar içermektedir. Her sıcaklık basamağı için, Pa cinsinden bulunacak gerçek basınç düşüşlerini değerlendirmekte yardımcı olmak üzere, doymuş basınçtaki 1K mertebesindeki düşmeye karşılık gelen basınç kaybı kPa olarak belirtilmiştir. Hem inç hem de mm olarak belirtilen boru çapları, emme için 6 inç mertebesine kadar diğer hatlarda ise emme hattından çok büyük kapasiteler içermeyecek şekilde verilmiştir. Daha büyük çaplara ihtiyaç olması halinde bakır yerine çelik boru

kullanılması uygun olacaktır. Belirlenen bir kaynama sıcaklığı ve boru çapı için, tablo iki değer sunmaktadır: bu şartlarda optimum olan soğutma kapasitesi ve alt satırda, o şartlarda oluşacak Pa/m cinsinden basınç kaybı. Soğutma yükü ve buharlaşma sıcaklıklarının orta değerleri için İnterpolasyon ve mühendislik yargıları uygulanabilir. Optimum değer tablolarının hazırlanışında varsayılan 40°C yoğuşma sıcaklığının etkisini diğer sıcaklıklar için düzeltmek amacıyla Tablo 9 hazırlanmıştır. Örneğin, 30°C yoğuşma sıcaklığı için, kapasite değerleri emme borularında 1.146 ve basma borularında 0.926 sayıları ile çarpılmalıdır.

Tablo 3. EMME hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m). R134a sistemleri, 400° yoğuşma sıcaklığı ve K tipi bakır borular için

Bakır Boru	Evaporasyon Sıcaklığı
------------	-----------------------

Bakır Boru (tip K), D _o : (in) (mm) ³ P, (Pa/m)	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
	1/4" 6.35 ³ P	0.07 281.0	0.12 367.6	0.18 415.3	0.28 619.7
1/2" 12.7 ³ P	0.23 187.8	0.37 245.6	0.54 277.4	0.81 413.9	1.93 442.0
5/8" 19.0 ³ P	0.72 132.9	1.10 174.1	1.62 195.7	2.43 292.5	3.37 341.0
7/8" 22.3 ³ P	0.96 118.5	1.48 155.3	2.24 175.5	3.30 260.7	4.88 307.7
1 1/8" 28.7 ³ P	2.95 91.00	2.72 119.2	4.14 127.1	6.15 189.2	8.64 222.5
1 3/8" 35.0 ³ P	3.29 71.51	4.27 93.17	6.46 104.7	9.74 156.0	13.7 176.2
1 5/8" 41.4 ³ P	4.18 59.95	6.43 78.73	9.75 88.84	14.6 132.9	20.6 156.7
2 1/8" 54.1 ³ P	7.73 46.95	12.0 61.39	18.2 69.34	27.3 104.0	38.5 122.8
2 5/8" 66.8 ³ P	12.9 4.45	19.9 54.17	30.2 60.67	45.3 91.01	64.0 106.9
3 1/8" 79.5 ³ P	19.7 36.84	30.4 48.39	46.0 54.89	69.0 81.62	96.9 96.06
3 5/8" 92.2 ³ P	28.1 33.95	43.3 44.78	65.5 49.84	98.1 74.39	138 87.40
4 1/8" 104.9 ³ P	38.5 31.78	59.3 41.17	89.6 46.23	134 68.62	189 80.89
5" 127.0 ³ P	55.0 28.17	85.0 37.56	128 42.61	192 63.56	270 74.39
6" 152.4 ³ P	84.3 26.00	130 33.95	196 38.28	295 57.78	414 67.89

**Tablo 4. BASMA hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R134a sistemleri, 40°C yoğunlaşma sıcaklığı ve K tipi bakır borular için.**

Bakır Boru (tip K), D _o : (in) (mm) ³ P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
1/4" 6.35 ³ P	0.27 663.0	0.31 779.3	0.36 888.4	0.40 1054	0.44 1118
1/2" 12.7 ³ P	1.49 390.8	1.71 459.4	1.94 522.9	2.20 621.2	2.42 660.2
5/8" 19.0 ³ P	4.49 273.7	5.12 322.1	5.80 364.7	6.33 436.3	7.33 463.7
7/8" 22.3 ³ P	6.20 245.6	7.12 288.9	8.04 330.1	9.24 391.5	10.1 416.0
1 1/8" 28.7 ³ P	11.4 178.4	13.0 210.2	14.8 239.1	5.39 283.1	18.5 226.1
1 3/8" 35.0 ³ P	18.0 140.1	20.7 165.4	25.3 188.5	27.0 223.1	29.4 237.6
1 5/8" 41.4 ³ P	27.1 125.0	31.2 147.3	35.2 168.3	40.3 199.3	44.1 211.6
2 1/8" 54.1 ³ P	50.9 98.23	58.5 115.6	66.3 132.2	75.7 156.0	82.8 166.8
2 5/8" 66.8 ³ P	84.4 85.23	97.0 100.4	110 114.8	125 135.8	137 144.5
3 1/8" 79.5 ³ P	129 76.56	148 91.01	167 103.3	191 122.8	209 130.7
3 5/8" 92.2 ³ P	183 69.34	211 88.84	239 93.17	272 111.2	298 118.5
4 1/8" 104.9 ³ P	250 64.28	287 75.84	325 86.67	372 102.2	407 102.6

**Tablo 5. SIVI hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R134a sistemleri, 40°C yoğuşma sıcaklığı ve K tipi bakır borular için.**

Bakır Boru (tip K), D _o : (in) (mm) ³ P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
1/4" 6.35 ³ P	2.10 1963	2.41 2305	2.72 2618	3.09 3130	3.39 3326
1/2" 12.7 ³ P	11.5 1158	13.4 1359	15.1 1242	17.2 1848	18.8 1963
5/8" 19.0 ³ P	35.0 810.4	40.3 952.0	45.5 1014	52.0 1294	56.9 1374
7/8" 22.3 ³ P	48.4 730.2	55.6 856.6	62.8 853.0	71.7 1165	78.6 1237
1 1/8" 28.7 ³ P	88.6 529.4	102 621.2	115 638.5	131 845.1	144 897.1
1 3/8" 35.0 ³ P	141 417.5	162 490.4	183 515.0	209 650.8	229 707.8
1 5/8" 41.4 ³ P	211 372.0	243 436.3	274 436.3	313 593.0	343 629.8
2 1/8" 54.1 ³ P	396 292.5	456 342.4	515 353.2	588 465.9	643 494.8
2 5/8" 66.8 ³ P	657 254.2	755 298.3	853 312.7	973 405.9	1066 430.5
3 1/8" 79.5 ³ P	999 228.2	1149 268.7	1298 284.6	1481 364.7	1622 387.9

14 ■ TESİSAT MÜHENDİSLİĞİ Nisan 2000

**Tablo 6. EMME hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R134a sistemleri, 40°C yoğuşma sıcaklığı ve L tipi bakır borular için.**

Bakır Boru (tip K), D _o : (in) (mm) ³ P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
1/4" 6.35 ³ P	0.05 317.8	0.07 415.3	0.09 473.1	0.14 673.9	0.20 684.0
1/2" 12.7 ³ P	0.22 161.1	0.32 210.2	0.50 239.1	0.74 355.3	1.00 394.4
5/8" 19.0 ³ P	0.65 117.7	1.00 154.6	1.51 175.5	2.27 275.9	3.09 288.9
7/8" 22.3 ³ P	0.85 96.06	1.32 125.7	1.98 143.7	2.97 213.1	4.04 236.2
1 1/8" 28.7 ³ P	1.62 74.39	2.49 98.23	3.77 111.2	5.66 165.4	7.68 183.5
1 3/8" 35.0 ³ P	2.65 64.28	4.17 83.78	6.29 95.34	9.43 141.6	12.8 156.7
1 5/8" 41.4 ³ P	4.03 56.34	6.21 73.67	9.38 84.51	14.1 125.0	19.1 138.7
2 1/8" 54.1 ³ P	7.68 45.50	11.8 59.95	17.9 67.90	26.8 101.1	36.5 112.0
2 5/8" 66.8 ³ P	12.6 39.00	19.5 51.28	29.4 58.50	44.1 86.67	59.8 96.06
3 1/8" 79.5 ³ P	19.0 34.67	29.3 44.06	44.3 51.28	66.4 77.28	90.2 85.23
3 5/8" 92.2 ³ P	27.1 31.06	41.8 41.17	63.0 46.95	94.5 69.34	128 76.56
4 1/8" 104.9 ³ P	36.8 28.89	56.7 37.56	85.7 43.34	128 63.56	175 70.78
5" 127.0 ³ P	53.7 26.00	82.8 34.67	125 39.00	187 57.78	255 64.28
6" 152.4 ³ P	96.2 22.39	148 28.89	225 33.22	336 49.11	372 54.17

**Tablo 7. BASMA hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R134a sistemleri, 40°C yoğuşma sıcaklığı ve L tipi bakır borular için.**

Bakır Boru (tip K), D _o :	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C	-25°C	-15°C	-5°C	5°C

(in) (mm) °P, (Pa/m)	(3.52 kPa/K)	(4.88 kPa/K)	(6.84 kPa/K)	(9.29 kPa/K)	(12.27 kPa/K)
1/4" 6.35 °P	0.27 626.2	0.29 736.0	0.35 838.6	0.39 993.9	0.43 1056
1/2" 12.7 °P	1.33 315.6	1.52 372.0	1.72 423.3	1.96 502.7	2.16 533.8
5/8" 19.0 °P	4.06 231.9	4.70 272.3	5.33 310.6	6.09 369.1	6.73 391.5
7/8" 22.3 °P	5.39 189.2	6.22 222.5	6.92 254.2	7.97 301.2	8.68 319.2
1 1/8" 28.7 °P	10.3 146.6	11.8 172.6	13.3 197.2	15.1 234.0	16.6 248.5
1 3/8" 35.0 °P	17.1 125.7	19.6 147.3	22.1 168.3	25.2 200.1	27.7 212.3
1 5/8" 41.4 °P	25.4 111.2	29.2 130.0	33.1 148.8	37.6 177.0	41.2 187.8
2 1/8" 54.1 °P	48.5 89.56	55.8 105.5	63.2 119.9	71.8 143.0	78.5 151.7
2 5/8" 66.8 °P	79.6 77.28	91.6 90.28	104 103.3	118 122.8	129 130.0
3 1/8" 79.5 °P	120 68.62	138 80.17	156 91.00	178 108.3	195 114.8
3 5/8" 92.2 °P	171 63.56	197 72.23	223 104.0	253 98.23	277 104.0
4 1/8" 104.9 °P	232 57.06	267 66.45	302 75.84	344 90.28	377 96.06

**Tablo 8. SIVI hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R134a sistemleri, 40°C yoğuşma sıcaklığı ve L tipi bakır borular için.**

Bakır Boru (tip K), Do: (in) (mm) °P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
1/4" 6.35 °P	0.27 663.0	0.31 779.3	0.36 888.4	0.40 1054	0.44 1118
1/2" 12.7 °P	1.49 390.8	1.71 459.4	1.94 522.9	2.20 621.2	2.42 660.2
5/8" 19.0 °P	4.49 273.7	5.12 322.1	5.80 364.7	6.33 436.3	7.33 463.7
7/8" 22.3 °P	6.20 245.6	7.12 288.9	8.04 330.1	9.24 391.5	10.1 416.0
1 1/8" 28.7 °P	11.4 178.4	13.0 210.2	14.8 239.1	5.39 283.1	18.5 226.1
1 3/8" 35.0 °P	18.0 140.1	20.7 165.4	25.3 188.5	27.0 223.1	29.4 237.6
1 5/8" 41.4 °P	27.1 125.0	31.2 147.3	35.2 168.3	40.3 199.3	44.1 211.6
2 1/8" 54.1 °P	50.9 98.23	58.5 115.6	66.3 132.2	75.7 156.0	82.8 166.8
2 5/8" 66.8 °P	84.4 85.23	97.0 100.4	110 114.8	125 135.8	137 144.5
3 1/8" 79.5 °P	129 76.56	148 91.01	167 103.3	191 122.8	209 130.7
3 5/8" 92.2 °P	183 69.34	211 88.84	239 93.17	272 111.2	298 118.5
4 1/8" 104.9 °P	250 64.28	287 75.84	325 86.67	372 103.3	407 109.8

Tablo 9. Farklı yoğuşma sıcaklıkları için düzeltme tabloları, bakır boru, R134a.

Yoğuşma T (°C)	Emme hattı	Basma hattı	Sıvı hattı
25	1.226	0.899	1.25
30	1.146	0.926	1.16
35	1.07	0.961	1.072

40	1	1	1
45	0.93	1.031	0.923
50	0.853	1.043	0.837

gun olmaktadır. İlaveten, boru dış çapı 4 inç'den büyükse her tür soğutkan için çelik boru kullanılmalıdır. Ayrıca, çelik boru büyük çaplarda daha ekonomik olabilir. Piyasada Tip 40 ve 80 olarak bulunan çelik borulardan

2.5. Çelik borular

Amonyaklı sistemlerde çelik borular uy -

Tablo 10. EMME hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m). R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğuşma sıcaklığı ve tip 40 çelik borular için.

Tip 40 Çelik Boru boy (inç) ³ P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³ P	0.87 16.61	1.30 24.56	2.02 31.06	2.60 36.84	3.75 44.78
1/2" ³ P	1.42 13.72	2.26 21.67	3.40 26.72	4.53 32.50	6.38 39.00
3/4" ³ P	2.19 10.83	3.62 16.61	5.30 20.95	7.11 24.56	10.1 30.34
1" ³ P	3.66 9.390	6.17 14.45	8.95 18.06	12.0 21.67	17.0 26.00
1 1/4" ³ P	6.03 7.223	9.98 10.83	14.5 13.72	19.5 16.61	27.8 20.22
1 1/2" ³ P	8.12 6.500	13.3 10.11	19.5 12.28	26.0 14.45	37.2 18.06
2" ³ P	9.89 2.889	16.3 5.056	23.7 5.778	31.8 7.223	45.4 8.667
2 1/2" ³ P	21.6 5.056	35.7 7.945	51.9 9.390	69.6 11.56	99.4 13.72
3" ³ P	33.1 4.334	54.9 6.500	79.6 7.945	107 9.390	152 11.56
3 1/2" ³ P	45.5 3.611	75.4 5.778	109 7.223	147 7.945	206 10.11
4" ³ P	57.4 3.611	95.0 5.056	138 6.500	185 7.223	264 9.390
5" ³ P	91.8 2.890	152 4.334	221 5.056	296 6.500	422 7.945
6" ³ P	136 2.167	225 3.611	326 4.334	438 5.056	625 6.500
8" ³ P	250 2.167	414 2.890	601 3.611	806 4.334	1150 5.778
10" ³ P	330 0.722	546 1.445	792 2.1670	1062 2.167	2129 2.890
12" ³ P	607 1.445	1005 1.167	1458 2.890	1955 3.611	2791 4.334

daha kalın cidarlı olan tip 80, amonyaklı uy -
culamalarda tercih edilmektedir

Amonyaklı sistemlerde tip 40 ve 80 çelik bo-
rular için optimum kapasiteleri veren Tablo

güvenlikleri için eğitimlerdir.

Çelik borular için, boru maliyeti direkt olarak boru ağırlığına bağlı değildir. Ancak, $C_{upipe} = A C_{st} \cdot r_{st}$ şeklindeki bir ilişki gerçek piyasa fiyatlarından çıkartılmıştır. Yoğunluk 14990 kg/m³ ve malzeme birim maliyeti, tip 40 için 0.84 \$/kg, tip 80 için ise biraz daha düşük, 0.81 \$/kg olarak alınabilir.

Tablo 10-15'de yoğunlaşma sıcaklığı 30 °C alınmıştır. Diğer yoğunlaşma sıcaklıkları için kapasite değerleri Tablo 16'daki düzeltme faktörleri ile çarpılmalıdır.

Tablo 11. BASMA hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m). R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğunlaşma sıcaklığı ve tip 40 çelik borular için.

Tip 40 Çelik Boru boy (inç) ³P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³P	4.63 31.78	5.49 36.84	5.92 47.67	6.36 52.00	6.65 56.34
1/2" ³P	7.79 28.17	9.35 32.50	10.1 41.89	10.6 44.78	11.2 49.11
3/4" ³P	12.3 21.67	14.6 24.56	15.8 31.78	16.8 34.67	17.7 37.56
1" ³P	20.8 18.78	24.8 21.67	27.9 27.45	28.5 30.34	30.1 32.50
1 1/4" ³P	33.9 14.45	40.5 16.61	43.6 21.67	46.4 23.84	49.1 25.28
1 1/2" ³P	45.3 12.28	54.2 14.45	58.2 18.78	62.0 20.22	65.5 22.39
2" ³P	55.3 6.500	66.1 7.223	71.0 9.390	75.7 10.11	80.0 10.83
2 1/2" ³P	121 10.11	145 11.56	156 14.45	166 15.90	175 17.33
3" ³P	186 7.945	222 9.390	239 12.28	254 13.00	269 14.45
3 1/2" ³P	255 7.223	305 8.668	328 10.83	349 11.56	369 13.00
4" ³P	321 6.500	384 7.223	413 9.390	440 10.83	465 11.56
5" ³P	514 5.056	615 6.500	661 7.945	705 8.668	744 9.390
6" ³P	761 4.334	910 5.056	978 7.223	1042 7.223	1101 8.668
8" ³P	1400 3.611	1674 4.334	1801 5.779	1918 6.500	2027 6.500
10" ³P	1871 2.167	2237 2.167	2406 2.889	2563 3.611	2708 3.611

Tablo 12. SIVI hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m). R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğunlaşma sıcaklığı ve tip 40 çelik borular için.

Tip 40 Çelik Boru boy (inç) ³P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³P	77.7 125.7	92.9 167.6	99.9 186.3	106 203.7	112 221.0
1/2" ³P	130 109.8	156 146.6	168 163.2	178 178.4	188 193.6
3/4" ³P	206 84.51	246 112.7	264 125.7	281 137.2	297 148.8
1" ³P	349 72.95	416 97.51	448 108.3	477 118.5	504 128.6
1 1/4" ³P	568 57.06	678 75.84	730 84.51	777 92.45	821 100.4
1 1/2" ³P	759 49.84	906 66.45	976 73.67	1038 80.89	1097 87.40
2" ³P	926	1106	1191	12.67	1339

³ P	24.56	32.50	36.11	39.73	42.61
2 1/2"	2028	2422	2607	2774	29.31
³ P	39.00	52.00	57.78	62.84	68.62

**Tablo 13. EMME hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğuşma sıcaklığı ve tip 80 çelik borular için.**

Tip 80 Çelik Boru boy (inç) ³ P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³ P	1.37 41.89	2.41 63.56	3.44 75.84	4.64 96.06	6.53 115.6
1/2" ³ P	2.32 35.39	3.81 54.89	5.63 67.17	7.61 80.17	10.8 98.23
3/4" ³ P	3.62 27.45	6.03 41.17	8.90 51.28	11.9 61.39	16.9 75.12
1" ³ P	6.09 23.11	10.2 34.67	14.8 43.34	19.9 52.00	28.3 63.56
1 1/4" ³ P	10.0 18.06	16.6 27.45	24.2 33.95	32.4 40.45	46.3 49.84
1 1/2" ³ P	13.5 15.89	22.2 23.84	32.4 29.61	43.4 35.39	61.9 43.34
2" ³ P	21.9 13.00	36.1 19.50	52.4 23.84	70.3 28.89	100 34.67
2 1/2" ³ P	35.5 12.28	58.9 18.06	85.6 23.11	115 27.45	164 33.22
3" ³ P	54.8 10.11	90.8 15.17	132 18.78	177 23.11	252 28.17
3 1/2" ³ P	84.4 8.667	140 13.00	203 16.61	272 20.22	388 26.00
4" ³ P	95.9 7.945	159 12.28	230 15.17	309 18.78	441 22.39
5" ³ P	154 6.500	256 10.11	371 13.00	498 15.17	711 18.78
6" ³ P	234 6.500	387 9.390	562 11.56	754 13.72	1076 17.33
8" ³ P	425 5.056	704 7.223	1022 9.390	1371 11.56	1957 13.72
10" ³ P	846 4.334	1402 5.056	2035 7.945	2729 11.56	3895 12.28
12" ³ P	1078 4.334	1786	2593	3477	4962

**Tablo 14. BASMA hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğuşma sıcaklığı ve tip 80 çelik borular için.**

Tip 80 Çelik Boru boy (inç) ³P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³P	7.90 82.34	9.46 109.8	10.3 122.8	10.8 132.9	11.5 144.5
1/2" ³P	13.1 69.34	15.7 93.17	16.9 104.0	17.9 113.4	19.0 122.8
3/4" ³P	20.7 53.45	24.7 70.78	26.5 79.45	28.2 93.17	29.8 93.90
1" ³P	34.5 44.78	41.2 59.95	44.4 67.17	47.3 72.95	49.9 79.45
1 1/4" ³P	56.3 35.39	67.4 46.95	72.5 52.73	77.2 57.06	81.6 62.12
1 1/2" ³P	75.4 31.06	90.1 41.17	96.9 46.23	103 49.84	109 54.17
2" ³P	122 24.56	146 33.22	157 36.84	167 40.45	177 44.06
2 1/2" ³P	199 23.84	238 31.78	256 35.39	273 38.28	289 41.89
3" ³P	307 19.50	367 26.00	395 29.61	421 31.78	444 34.67
3 1/2" ³P	473 17.33	565 23.11	608 26.00	648 28.17	684 30.34
4" ³P	537 15.90	643 20.95	691 23.84	736 26.00	778 28.17
5" ³P	866 13.72	1035 18.06	1113 20.22	1185 21.67	1253 2384
6" ³P	1310 12.28	1567 15.90	1685 18.06	1795 19.50	1896 20.95
8" ³P	2384 10.11	2850 13.00	3065 14.45	3264 15.90	3449 17.33
10" ³P	4744 8.667	5672 11.56	6100 13.00	6497 13.72	6865 15.17

**Tablo 15. SIVI hattı optimum kapasiteleri (kW) ve basınç Kayıpları (Pa/m).
R-717 (amonyak) sistemleri, 30°C yoğuşma sıcaklığı ve tip 80 çelik borular için.**

Tip 80 Çelik Boru boy (inç) ³P, (Pa/m)	Evaporasyon Sıcaklığı				
	-35°C (3.52 kPa/K)	-25°C (4.88 kPa/K)	-15°C (6.84 kPa/K)	-5°C (9.29 kPa/K)	5°C (12.27 kPa/K)
3/8" ³P	133 323.6	159 431.2	171 479.6	182 524.4	193 569.2
1/2" ³P	220 274.5	263 366.2	283 406.7	301 507.0	318 482.5
3/4" ³P	346 210.2	413 280.2	445 311.3	473 340.9	500 369.8
1" ³P	578 177.7	691 234.0	744 262.9	791 287.5	836 312.0
1 1/4" ³P	944 132.9	1128 184.9	1214 205.1	1292 224.6	1365 243.4
1 1/2" ³P	1263 121.3	1508 161.8	1624 179.8	1728 196.5	1826 213.1
2" ³P	2049 100.4	2447 130.7	2634 145.2	2803 158.9	2962 172.6
2 1/2" ³P	3342 93.17	39.92 124.2	4297 138.0	4574 151.0	4832 164.0
3" ³P	5147 78.01	6149 104.0	6618 115.6	7044 126.4	7442 137.2

Tablo 16. Farklı yoğuşma sıcaklıkları için düzeltme faktörleri, çelik boru, R-717.

Yoğuşma	Emme	Basma	Sıvı
---------	------	-------	------

önem kazanmıştır. Bu şekilde aynı zaman - da bazı çevresel avantajlar da sağlanabile - cektir. Bu durum, -5°C buharlaşma ve 40 °C yoğuşma sıcaklıkları arasında çalışan, 30

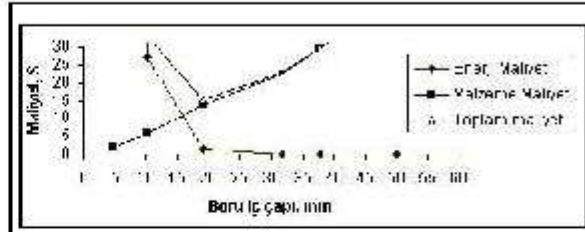
T (°C)	hattı	hattı	hattı
20	0.968	1.056	0.965
25	0.985	1.028	0.98
30	1	1	1
35	1.0140.973		1.014
40	1.0310.947		1.032
45	1.0540.939		1.057

3. SONUÇ

Yukarıda sunulan inceleme, soğutma ve iklimlendirme sistemleri, ısı pompaları ve benzeri uygulamalarda geçerli optimum çap ve kapasite ilişkisini ortaya çıkarmıştır. Bu şekildeki bir termo-ekonomik optimizasyon doğal olarak fiziksel özellikler yanında ekonomik parametreleri de içermektedir. Sonuçun bir denklem şeklinde ifade edilebilmesi, zamanla veya bölgeye göre değişebilecek parametrelere istendiğinde tercih edilen başka nümerik değerlerin verilmesine ve özellikle bilgisayarlı çalışmalara imkan sağlamaktadır. İlerde ilgi duyulacak özel durumlar için bu çalışmada örneği oluşturulanlara benzer yeni tablo veya grafikler de hazırlanabilir. Denklem genel ve çevrim ile ilgili parametreleri çarpanlar olarak içermesi, bazı değerler değiştiğinde yeni sonuçların düzeltme yoluyla elde edilmesine imkan vermektedir.

Optimum boru çapı eşitliklerinin kullanılması, bir takım parametrelerin (maliyet, boru ve soğutucu gaz vb.) değişmesi durumlarında avantaj sağlamaktadır. Varolan tablolar ile bu tabloların sonuçları karşılaştırıldığında, yeni sonuçlarda daha büyük boru çaplarının ve daha düşük basınç kayıplarının önerildiği görülmektedir [5,9 ve 10]. Anlaşılan yıllardır artan enerji fiyatları sonucu, başlangıçta ilk yatırımı biraz daha fazla tutarak azaltılan basınç kayıpları ile yıllık enerji harcamasından tasarruf etmek daha da

m bakır emme borulu, 5 kW'lık R-134a soğutma sistemi için Şekil 2 'de daha detaylı incelenmiştir. Görüldüğü üzere, 22.3 mm (7/8 in) optimum boru çapı için, boru ile ilgili toplam yıllık maliyet 15.3\$'dır. Bu maliyet 31.7 mm (1 3/8 in) için 22.7\$ ve 12.7 mm (1/2 in) için 32.7\$ olacak şekilde artmaktadır.



Şekil 2. -5°C buharlaşma ve 40°C yoğuşma sıcaklıkları arasında çalışan, 30 m bakır emme borulu, 5 kW'lık R-134a kullanılan soğutma sistemi için çap ve toplam maliyet ilişkisi.

Belli çaplı bir boru tablolarında önerilenden farklı bir soğutma yükünde kullanıldığında, oluşacak basınç düşüşü ve buna karşılık gelen doymuş sıcaklıktaki düşüş şu şekilde hesaplanabilecektir:

$$\frac{P_{gerçek}}{P_{tablo}} = \left(\frac{q_{gerçek}}{q_{tablo}} \right)^{1.75} \quad (12)$$

$$T_{gerçek} = \frac{P_{gerçek}}{K_{gerçek}} \quad (13)$$

Bekleneceği gibi, tüm şıklarda belli boru çapı için emme hattında kullanılacaksa basma hattına kıyasla daha düşük soğutma yükleri ve basınç kayıpları önerilmiştir. Örneğin, -25°C'da çalışan bir sistemdeki 2 1/8 inç (L) boru, emme hattındaysa önerilen yük, 59.95 Pa/m basınç kaybı karşılığı 11.8 kW iken basma hattında bu değerler 105.5 Pa/m ve 55.8 kW'dır. Yük 11.8 kW ise, basma borusu için 1 1/8 inç seçilecek ve düşüş 172.6 Pa/m, yani emme hattının yaklaşık üç katı olacaktır. Gerçi bu durumda bile 30 m'lik bir boru doymuş sıcaklıkta sadece 1.06 K gibi çok makul seviyede bir düşmeye sebep olmaktadır.

Belli bir boru çapı ve çevrim şartlarında

daha kalın olan tipler (bakırda K, çelikte 80) için daha büyük yük ve basınç kayıpları önerilmektedir. Emme, basma ve sıvı hatlarında gözlenen bu sonuç çelik borularda daha belirgindir. Bu durum daha kalın yani pahalı boru kullanınca daha fazla enerji harcamasına katlanılabilesinin sonucudur.

Farklı yıllık çalışma saatleri ve enerji maliyetinin etkisi Denklem 11 den kolaylıkla hesaplanabilir. Beklediği üzere, optimum ha-

m - dinamik viskozite, kg/ms

Alt indisler

cap - ilk yatırım
i - iç
mat - malzeme
o - dış
opr - işletim
ref - soğutkan
st - çelik

hesaplanabilir. Derinliği üzere, optimum boru çapı yıllık çalışma saatlerinin ve enerji maliyetinin artışı ile artmaktadır. Bunlardan zamanın etkisi çok az ise de, özellikle büyük kapasiteli uygulamalarda enerji maliyetinin optimum boru çapını değiştirebilecek kadar etkili olduğu durumlar olabilir.

Semboller

A	- boru kesit alanı, m ²
C	- maliyet,
CRF	- amortisman faktörü
D	- boru çapı, m
D _{l,opt}	- optimum boru iç çapı, m
f	- Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı
h _{liq}	- sıvı soğutkanın genleşme vanası girişindeki entalpisi, kJ/kg
h _{vap}	- soğutkanın evaporatör çıkışında -ki entalpisi, kJ/kg
IC	- ilk yatırım maliyeti
i _d	- indirim oranı
i _i	- enflasyondan arındırılmış, gerçek, faiz oranı
j	- enflasyon oranı
L	- boru uzunluğu, m
m	- kütleli debi kg/s
n	- amortisman periyodu
³ P	- borudaki sürtünmeden dolayı olan basınç kaybı, Pa veya Pa/m
q	- soğutma yükü, kW
Q	- hacimsel debi, m ³ /s
Re	- Reynolds sayısı
t _{an}	- yıllık çalışma süresi, h
V	- ortalama akış hızı, m/s

Yunan

d	- Boru dış/ iç çap oranı
r	- akışkan yoğunluğu, kg/m ³
n	- kinematik viskozite, m ² /s
h _s	- izantropik verim
h _m	- mekanik verim

st- çelik
ue- birim enerji (elektrik) fiyatı
upipe - birim metre boru fiyatı

KAYNAKLAR

- [1] Kesim, S.C., Albayrak, K., İleri, A. "Oil Entrainment in Vertical Refrigerant Piping". Basım için I.J.of Refrigeration dergisine sunulmuştur. 1999.
- [2] _____, Air Conditioning-Refrigerating Data Book, Design, ASRE, New York, N.Y. 1955.
- [3] _____, Air Conditioning-Refrigerating Data Book, Refrigeration, ASRE, New York, N.Y. 1959.
- [4] _____, Carrier System Design Manuel, Carrier Corporation, New York, N.Y. 1961.
- [5] _____, ASHRAE Handbook, Refrigeration Volume, ASHRAE, Atlanta, GA. 1977.
- [6] Dossat, R. J., Principles of Refrigeration, John Wiley & Sons, London, 1991.
- [7] Wile, D. D., Refrigerant Line Sizing, ASHRAE, RP-185, No.2669, New York, N.Y., 1977.
- [8] Crocker, S., Piping Handbook, McGraw-Hill Company, New York, N.Y., 1945.
- [9] Cooper, W. B., Commercial, Industrial and Institutional Refrigeration, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1987.
- [10] Atwood, T., Pipe Sizing and Pressure Drop Calculations for HFC-134a, ASHRAE Journal, 32(4) pp: 62-67, 1990.