

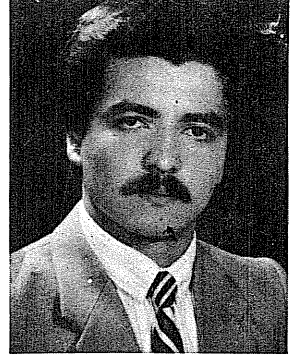
TASARIMA YARDIMCI BİLGİLER



KILCAL BORULARIN BOYUTLANDIRILMASI *

Tuncay YILMAZ **
Makina Müh.Böl.
ÇÜ-ADANA

Kadir AYDIN
Makina Müh.Böl.
ÇÜ-ADANA



1962 yılında doğmuştur. 1983 yılında Çukurova Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. Aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. 1984 yılında araştırma görevlisi olarak atandı. 1986 yılında Makina yüksek mühendisi oldu ve doktora eğitimine başladı. 1987 yılında öğretim görevlisi kadrosuna geçti. Halen Çukurova Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde aynı görevini yürütmektedir.

SUMMARY

In the literature, there is no design criteria for cappillary tubes based on simple theoretical calculations. In this study, the design parameters of cappillary tubes have been calculated both analitically and numerically by using the principles of theormodynamics and fluid mechanics. Although the calculation methods are valid for all refrigerants, in this paper sample calculations are given for only R-12 and it appears that there is nearly no difference between the results obtained by analytical and numerical methods.

ÖZET

Kılcal boruların hem teorik esaslara dayalı hem de basit olan bir hesaplama, dolayısıyla boyutlandırma prensibi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, termodinamik ve akışkanlar mekaniği esaslarından hareketle kılcal borular hem nümerik hem de analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplama yönteminin genel olmasına rağmen sadece R-12 soğutucu akışkanı için örnekler verilmiş, analitik ve nümerik yöntemler arasında önemsenmeyecek farklar olduğu gösterilmiştir.

GİRİŞ

Soğutma tesisleri ve ısı pompalarında yoğuşturucu basıncını buharlaştırıcı basıncına düşürme metodlarından biri de kılcal boru prensibidir. Vanalı basınç düşürme prensiplerine göre kılcal borulu sistemlerin bazı avantajları vardır. Bunların en önemlileri basit ve ucuz oluşları gibi ekonomik nedenler ile komp-

resörün çalışma başlangıcında bir basınca karşı çalışmamasıdır.

* Makale Eylül ayında ODTÜ'de yapılan 6. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi'nde sunulmuştur.

** Yazar daha önceki sayılarımızda tanıtılmıştır.

Kılcal borularda görülebilecek tek arıza, sistem içinde başlangıçta bulunan veya zamanla oluşan kirlilikten dolayı boruların tıkanmasıdır. Arızanın giderilmesi basit ve ucuzdur. Bu arızanın giderilmesi, tıkanmış kılcal borunun sökülerek yerine aynı çapta ve uzunlukta yeni bir kılcal borunun kaynak edilmesinden ibarettir. Buna karşılık termostatik genleşme valflerinde birçok arıza görülebilir (duyar ucun kırılması, içerisindeki akışkanın kaçması, soğutucu akışkan debisini ayarlayan konik milin eğilmesi veya kırılması vs.). Duyar elemandaki bir arıza durumunda termostatik genleşme valfinin bütününi değiştirmek gerekir.

ANALİTİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Kılcal boruda basınç farkı, ivmelenmeden ve sürtünme kayıplarından dolayı meydana gelir. Bundan dolayı basınç için diferansiyel denklem

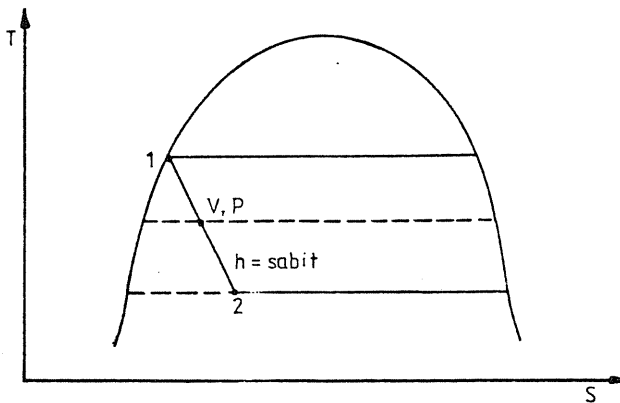
$$-dP = \dot{m}^2 \cdot dV + \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot V \cdot \dot{m}^2 \cdot dL \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada P basıncı, $\dot{m}$ birim alandaki kütle debisini, V özgül hacmi, λ sürtünme kayıp katsayısını, d kılcal boru çapını ve L'de akış yönündeki koordinatı göstermektedir.

Kılcal boru boyunca yaklaşık olarak h=sabit kabul edilebileceğinden özgül hacim ile basınç arasında

$$V = f(P) \quad (2)$$

şeklinde bir bağıntı olmak zorunluluğu vardır.



Şekil 1 Kılcal boruda akışkanın durum değişimi

Kılcal boruda akışkanın durum değişimi Şekil 1'deki T-S diyagramında gösterilmiştir. Pratikte görülen çalışma bölgelerinde eş. (2)'deki bağıntı yaklaşık olarak

$$V = V_1 \left(\frac{k}{P/P_1} - k + 1 \right), \quad V^* = \frac{k}{P^*} - k + 1 \quad (3)$$

$$dV = -k P_1 V_1 \frac{dP}{P^2} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$V^* = \frac{V}{V_1}, \quad P^* = \frac{P}{P_1} \quad (5)$$

olarak boyutsuz özgül hacmi ve basıncı, V_1 ve P_1 1 noktasındaki özgül hacmi ve basıncı, k'da bir sabiti göstermektedir. Eşt. (1)'den, eş. (3) ve eş. (4) ile

$$\begin{aligned} -dP (1 - \dot{m}^2 k P_1 V_1 / P^2) \\ = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{d} V_1 \left(\frac{k}{P/P_1} - k + 1 \right) \dot{m}^2 dL \end{aligned} \quad (6)$$

elde edilir. λ 'nın sabit olduğu kabul edilerek ve aşağıdaki boyutsuz sayılarla

$$k_2 = k \frac{V_1}{P_1} \dot{m}^2 \quad (7)$$

$$L^* = \frac{\lambda}{2} \frac{L}{d} \quad (8)$$

eşt. (6) aşağıdaki şekle gelir:

$$-dP^* (1 - k_2 / P^{*2}) = k_2 \left(\frac{1}{P^*} - 1 + \frac{1}{k} \right) dL^* \quad (9)$$

Buhar kuruluk derecesi için

$$x = \frac{V - V_s}{V_b - V_s} = \frac{h - h_s}{h_b - h_s} \quad (10)$$

bağıntısı yazılabilir. $h=h_1$ kabul edildiğinden

$$V = V_s + \frac{(h_1 - h_s)}{r} (V_b - V_s) \quad (11)$$

$V_b \gg V_s$ varsayılarak

$$h_1 - h_s = C_{p_s} (T_1 - T_s) \quad (12)$$

ve $V_s \approx V_1$ ile

$$V = V_1 + \frac{Cp_s (T_1 - T)}{r} V_b \quad (13)$$

bulunur. Buhar yaklaşık ideal gaz kabul edilecek

$$V_b = \frac{R \cdot T}{P} \quad (14)$$

ve Clausius Clapeyron bağıntısı kullanılarak [1] elde edilen

$$\ln \frac{P}{P_1} = \frac{r}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \quad (15)$$

eşitliğiyle

$$\frac{V}{V_1} = 1 - \frac{Cp}{r^2} \frac{R^2 T^2}{P} T_1 \ln \frac{P}{P_1} \quad (16)$$

bulunur.

$$k_1 = \frac{Cp}{r^2 P_1 V_1} R^2 T_1^2 = \frac{Cp_1 R^2 T_1^3}{r_1^2 P_1 V_1} \quad (17)$$

tarifiyle

$$V^* = 1 - k_1 \left(\frac{\ln P^*}{P^*} \right) \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Küçük basınç değişimleri için de yukarıdaki bağıntıdan

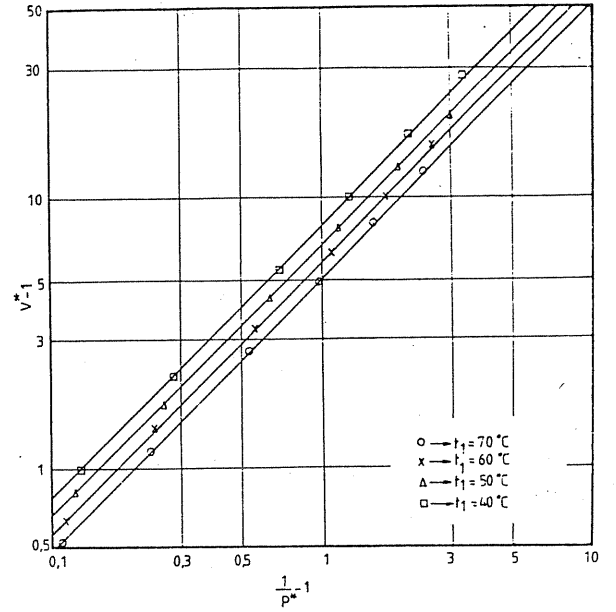
$$V^* = 1 + k_1 \left(\frac{1}{P^*} - 1 \right) \quad (19)$$

bulunur. Burada k_1 boyutsuz bir sayı olup, akışkan türüne bağlıdır. k_1 , r ve Cp sıcaklığa bağlı olmalarına rağmen, küçük sıcaklık veya basınç değişimleri için sabit kabul edilebilir. k_1 değeri R-12 için 5-8 arasında değişmektedir. Bu değer

$$k_1 = \frac{7.8}{P_1^{2/3}} \quad (20)$$

eşitliğiyle basit olarak hesaplanabilir. Burada P_1 MPa birimindedir.

Şekil 2'de pratikte görülen basınç değişimlerinde k_1 'in V^* ve P^* 'ın fonksiyonu olarak değişimi R-12 için verilmiştir. Böylece kılcal boruda basınç değişimi için



Şekil 2 R-12 için k_1 'in V^* ve P^* 'ın fonksiyonu olarak değişimi

$$-\frac{1}{k} \frac{P^* dP^*}{(1-k_1)P^* + k_1} + \frac{dP^*}{((1/k_1)-1)P^* + P^*} = dL^* \quad (21)$$

ve sınır şartı olarak da

$$L^* = 0 : P^* = 1 \quad (22)$$

yazılmalıdır. Bu durumda diferansiyel denklemin çözümü

$$L^* = \ln \frac{P^*}{k_1 + (1-k_1)P^*} - \frac{1}{k(1-k_1)} \{P^* - 1 - \frac{k_1}{1-k_1} \ln[k_1 + (1-k_1)P^*]\} \quad (23)$$

olarak bulunur. Burada

$$k = \dot{m}^2 V_1 / P_1 \quad (24)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Eşit. (1)'deki diferansiyel denklem boyutsuz olarak

$$-dP^* = k(dV^* - V^* dL^*) \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir.

Kılcal boruda durum değişimi, analitik çözümde olduğu gibi her zaman h =sabit olarak kabul edilemez. Gerçek durum değişimi adyabatik durum değişimi olup

$$h + \frac{\dot{m}^2}{2} V^2 = h_1 + \frac{\dot{m}^2}{2} V_1^2 \quad (26)$$

şeklindedir. Bu ve eş. (10) ile kuruluk derecesi

$$X^2 \frac{\dot{m}^2}{2} (V_b - V_s)^2 + X(h_b - h_s) + \frac{\dot{m}^2}{2} 2V_s(V_b - V_s) + h_s - h_1 + \frac{\dot{m}^2}{2} (V_s^2 - V_1^2) = 0 \quad (27)$$

olarak elde edilir. Bu bağıntı boyutsuz olarak

$$(V_b^* - V_s^*)X^2 + \frac{h_1}{k} (h_b^* - h_s^*) + 2V_s^*(V_b^* - V_s^*)X + \frac{h_1}{k} (h_s^* - 1) + V_s^* - 1 = 0 \quad (28)$$

şeklinde yazılır. Burada

$$h_1^* = \frac{2h_1}{P_1 V_1}, \quad h_s^* = \frac{h_s}{h_1}, \quad h_b^* = \frac{h_b}{h_1}, \\ V_s^* = \frac{V_s}{V_1}, \quad V_b^* = \frac{V_b}{V_1} \quad (29)$$

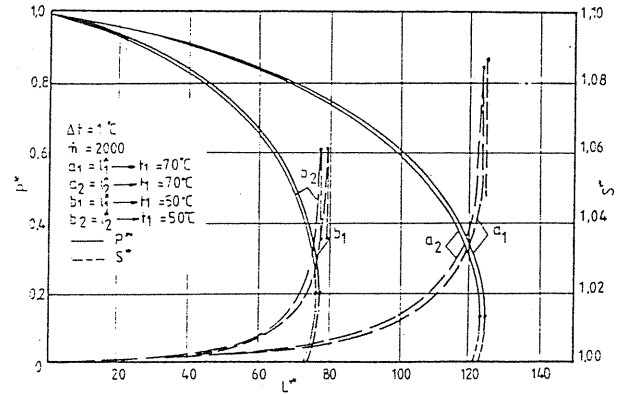
şeklinde tarif edilmiştir.

Eş. (25), eş. (28) ve başlangıç sınır şartı eş. (22) ile nümerik olarak çözülmüştür. λ kılcal boru boyunca çok az değiştiğinden nümerik çözümlerde de sabit kabul edilmiştir. Böylece analitik ve nümerik çözümü doğrudan karşılaştırma da daha kolay olmaktadır.

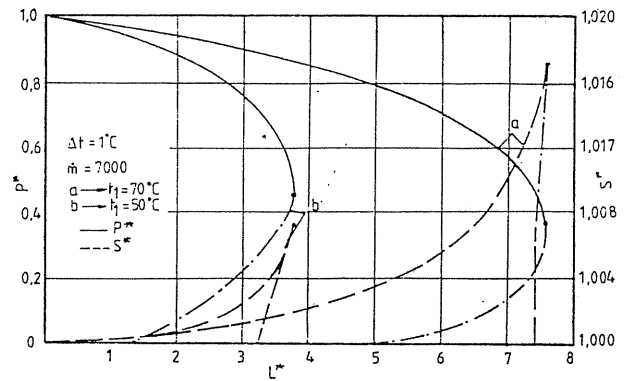
ANALİTİK VE NÜMERİK ÇÖZÜMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Şekil 3'de kılcal boru boyunca basınç ve entropi değişimi gösterilmiştir.

a eğrileri $t_1=70^\circ\text{C}$ ve b eğrileri de $t_1=50^\circ\text{C}$ için geçerlidir. Analitik çözümler 1 indisi, nümerik çözümler de 2 indisi ile gösterilmiştir. Burada nümerik ve analitik çözümlerde pek büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Eğrilerin eğiminin sonsuza gittiği noktalar hem basınç hem de entropi için aynı L^* değerlerindedir. Belirtilen noktalarda akışkan ses hızına erişmektedir.



Şekil 3 Kılcal boru boyunca P^* ve S^* 'ın değişimi



Şekil 4 Kılcal boruda P^* ve S^* 'ın L^* 'la değişimi

Şekil 4'de $\dot{m}=7000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olarak arttırılmıştır. Büyük debilerde analitik ve nümerik sonuçlar arasında kayda değer bir fark bulunmamaktadır.

Şekil 5'de de

$$\eta^* = \eta / \eta_1 \quad (30)$$

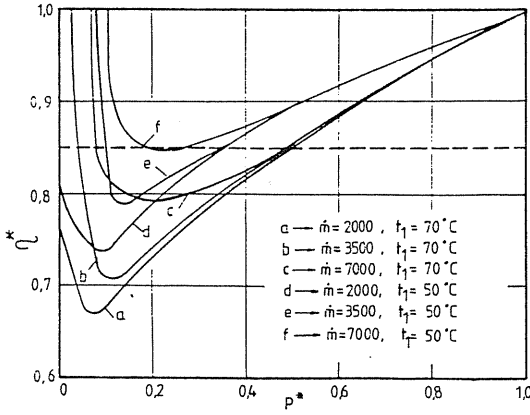
olarak tarif edilen boyutsuz viskozitenin basınçla değişimi çeşitli debi ve sıcaklık değerleri için çizilmiş, η^* 'da dolayısıyla Reynolds sayısında büyük bir değişme olmadığı gösterilmiştir.

Böylece λ =sabit varsayımının yapılabileceği anlaşılmaktadır. λ 'nın hesaplanmasında gerekli olan viskozite değeri ortalama bir değer

$$\eta = 0.85 \eta_1 \quad (31)$$

olarak kabul edilebilir.

Bu şekillerden, pratikte görülen değerler için analitik yöntemin uygunluğu açık olarak görülmektedir.



Şekil 5 Kılcal boruda η^* 'ın P^* 'ın fonksiyonu olarak değişimi

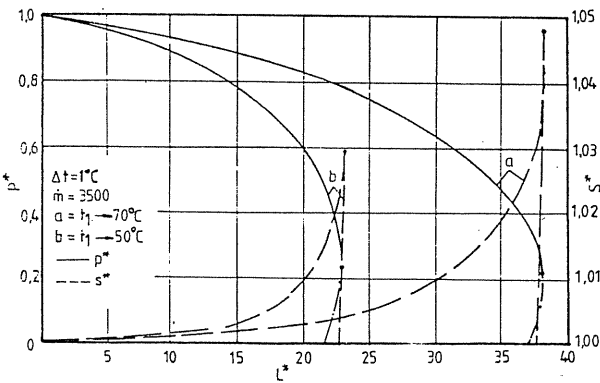
UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Şekillerin ve analitik sonuçların nasıl kullanılacağı aşağıdaki bir örnekle açıklanacaktır.

Yoğusturucu sıcaklığı 70°C ve devridaim yapan debi $\dot{m}=3500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olsun. Buharlaştırıcı sıcaklığını 15°C dolayısıyla buharlaştırıcı basıncını 0.4915 MPa kabul edelim. Bu durumda gerekli L^* değeri Şekil 6'dan

$$L^* = \frac{\lambda}{2} \frac{L}{d} = 37.8033 \quad (31)$$

olarak okunur.



Şekil 6 Kılcal boruda $m=3500$ için P^* ve S^* 'ın L^* 'la değişimi

Kılcal boru çapı $d=1.0 \text{ mm}$ olarak alındığında

$$L = 0.0756/\lambda \quad (33)$$

olarak hesaplanır. Blasius eşitliğinden

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{1/4}} \quad (34)$$

$$\text{Re} = \frac{\dot{m} \cdot d}{\eta} \approx \frac{\dot{m} \cdot d}{0.85 \eta_1} \quad (35)$$

ile $\lambda=0.0272$ çıkar ve böylece kılcal boru uzunluğu $L=2.78 \text{ m}$ olarak hesaplanır. Boru uzunluğunun çok küçük veya çok büyük çıkması durumunda d büyütülmeli veya küçültülmelidir. R-12'nin termodinamik özellikleri üzerine Aydın [2] tarafından eşitlikler verilmiş olup, gerekli değerler bu eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır. Aydın tarafından verilen eşitliklerde çeşitli firmalar tarafından yayınlanan kitaplardan [3,4] yararlanılmıştır.

Aynı örneğin analitik olarak çözülmesi durumunda eş. (23)'den $L^*=38.1319$ bulunur. Yine nümerik çözüme benzer şekilde $d=1.0 \text{ mm}$ alınarak

$$L = 0.0763/\lambda \quad (36)$$

elde edilir. Daha önce Blasius eşitliğinden hesaplanan $\lambda=0.0272$ ile de $L=2.80 \text{ m}$ olarak bulunur.

SONUÇ

Bu çalışmada kılcal boruların kolay olarak boyutlandırılması için analitik ve nümerik yöntemler önerilmiş, boyutlamanın analitik olarak yapılabileceği gösterilmiştir. Tüm sonuçların R-12 soğutucu akışkanı için verilmesine rağmen, aynı yöntem tüm diğer akışkanlara kolayca uygulanabilir.

KAYNAKLAR

1. Benson, R.S., "Advanced Engineering Thermodynamics", Pergamon Press, Manchester, 46-48, 1976.
2. Aydın, K., "Isı Pompalarının Teorik Modelenmesi", Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kod No. 101, Adana, 1986.
3. Anonym, "Frigen Handbuch", Hoechst AG., Frankfurt, 1962.
4. Anonym, "Kaltron Taschenbuch", Kali Chemie AG., Hannover, 1978.