

MİKRO ve MESO ÖLÇEKLİ KANALLARIN SOĞUTUCU ÜRETİMİNDE UYGULANMASI

Doç. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
e-mail: onbasiogl1@itu.edu.tr

Mikroelektromekanik Sistemler (MEMS); 1981 yılından bu yana elektronik cihazların soğutulması [1]; ısı pompalarının, ısı makinalarının, yanma sistemlerinin ve yakıt işleme sistemlerinin mikro ölçeklerde geliştirilmesi amacıyla üzerinde çalışılan bir konudur. Ancak; bu çalışmalardan, klasik akış ve ısı transferi mekanizmalarının küçük ölçekteki kanallarda geçerli olmadıkları sonucu çıkmıştır. Öte yandan, mikro ölçekteki geometrilerin soğutma sistemlerine uygulanması, ülkemizdeki soğutucu üretimi açısından önemlidir.

Bu tür bir tasarıma başlamadan önce, mikro-ölçekli (1 - 100 μ m) ve meso-ölçekli (100 μ m - 1 mm) kanallarda basınç düşümlerinin ve ısı transferi katsayısının kanal boyutlarına, geometrisine ve çalışma akışkanının cinsine göre değişimini araştırmak; bu kanallarda türbülansa geçiş ölçütünü oluşturmak gereklidir. Deneysel sonuçların analizine göre; klasik teoriden sapmanın başladığı Navier-Stokes denklemlerinin ve ısı transferi korelasyonlarının geçersizleştiği ölçüt bulunmalı, elde edilen sonuçları kullanarak, konvansiyonel sistemlerle karşılaştırma yapılmalıdır.

Küçük ölçekli kanallardan oluşmuş sistemler aşağıda sıralanan özelliklere [2] sahiptirler:

- *Yüksek ısı akıları.*
- *Küçük boyutlar ve ağırlıklar*
- *Çalışma akışkanı miktarının az olması*
- *Taşınabilir olmaları*
- *İleride seri üretimleri yapılarak ekonomikliklerinin sağlanabilmesi olasılığı.*

Bu özellikler küçük ölçekli sistemleri çekici kılsa da, bazı sorunlar aradan geçen yıllar içerisinde çözülememiştir. Örneğin; bu kanallarda yüksek ısı akılarını sağlayan çok küçük hidrolik çaplar, aynı zamanda basınç düşümlerinin artmasına da yol açmaktadır. Bunun da ötesinde, kanal boyutları küçüldükçe, cidar ve ara yüzey etkilerinin artmasından dolayı, akışın davranışı klasik teoriden uzaklaşmaktadır. Ancak; bu uzaklaşmanın olduğu boyut henüz saptanamamıştır. Ayrıca; bu konuda, araştırmacılar arasında bir uzlaşma da yoktur. 10 mm genişliğindeki dikdörtgen kanallar üzerinde yapılan çalışmalar [3] olduğu gibi; 1.5 mm çapındaki dairesel kesitli borularda yapılan çalışmalar da literatürde "mikro-kanallar " olarak geçebilmektedir [4]. Son yıllarda kabul gören bir sınıflandırma ise şu şekildedir [5]:

- 1) Mikro-ölçekli kanallar (1-100 μ m);

2) Meso-ölçekli kanallar (100 mm-1mm);

3) Makro-ölçekli kanallar (1mm-6mm), ki kompakt ısı değiştiricileri için kabul edilen boyutlardır;

4) Geniş kanallar (>6 mm).

Mikrokanallı bir ev tipi buzdolabı yoğuşturucusu veya buharlaştırıcısı tasarımında aşağıdaki sorulara yanıt aranmalıdır:

1- Hangi boyutta Navier-Stokes denklemleri geçerliliklerini yitirmektedirler?

2- Bu boyut akışın ve akışkanın özelliklerine nasıl bağlıdır?

3- Türbülansa geçişin klasik teoriden uzaklaştığı boyut hangisidir?

Bu sorulara verilecek yanıtlar sonucunda mikro/meso ölçekli kanallar için evrensel bir tanım oluşturulabilir. Bu nedenle literatürdeki benzer çalışmaları gözden geçirmek gerekir.

LİTERATÜRDEKİ ÇALIşMALAR

Küçük ölçekli kanallar üzerinde, yukarıda da sözedildiği gibi, 1981 yılında elektronik sistemlerin soğutulması amacıyla [1] başlatılan çalışmalar, özellikle minyatür HVAC sistemlerinde kullanılabilecekleri [2] düşünülerek, son yıllarda artmıştır. Bunların arasında, incelenen ölçekler ve amaçları açısından bu projeye en yakın olanları, tek fazlı çalışmalarda, Mala ve Li'nin [6], iki fazlı akışta ise Xu'nun [7] 1999'da yayınlanan çalışmalarıdır. Mala ve Li [6]; çapları 50 mm ile 254 mm arasında değişen silika ve paslanmaz çelikten yapılmış iki ayrı dairesel kesitli kanalda basınç düşümlerini ölçmüşler; sabit kütleli debilerde Reynolds sayısı arttıkça Pousielle eşitliğinden;

$$Q = (pR^4)(8ml)^3P$$

uzaklaşıldığını ve bu uzaklaşmanın 130 mm'den daha küçük borularda daha fazla olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak su kullanılan bu deneyler için, akış davranışının mikro - kanal malzemesine de bağlı olduğu yorumu yapılmış; dolayısıyla türbülansa erken geçişe ek olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde durulması da önerilmiştir. Mala ve Li'den sekiz yıl önce, ASME'nin "Micro-mechanical Sensors, Actuators and Systems" başlıklı toplantısında, Pfahler vd. [8] ve Choi vd. [9] diğer akışkanlarla yaptıkları çalışmaları sunmuşlardır. Pfahler vd. [8] isopropyl alkol, silikon yağı, azot ve helyum ile dikdörtgen ve yamuk kesitli, silikon malzemedden yapılmış kanallarda gelişen akışı gözlemleyerek kanal hidrolik çapı küçüldükçe Navier-Stokes denklemlerinin geçerliliğini yitirdiği sonucunu çikarmışlardır. 0.5 mm ile 50 mm arasında yapılan deneylerde, araştırmacılar, 470 MPa/m'ye kadar basınç düşümü gözledikleri deneylerinden teorik bir sonuç çikaramayacaklarını belirtmişlerdir. Choi vd.'nin[9] aynı toplantıda sunulan çalışmalarında ise, yüksek basınç düşümleri

nedeniyle, Pfahler vd.'nin [8] aksine, gaz akışkan (azot) sıkıştırılmaz kabul edilmemiş ve Darcy sürtünme katsayısı Fanno çizgisi kullanılarak hesaplanmıştır. Dairesel kesitli kanallarda 3-81 mm aralığında yapılan ölçümlerde 10 mm'den küçük çaplı kanallarda $f = 64/Re$ bağıntısının geçerli olmadığı gözlenmiştir. Isı transferinin de izlendiği deneylerde, laminar akış için, mikro kanallarda Nusselt sayısının Reynolds sayısına bağlı olduğu; türbülanslı akışta ise normal kanallardan çok daha büyük ısı transferi katsayılarının elde edildiği vurgulanmış; mikro kanallarda ne Colburn, ne de Petukhov benzeşimlerinin geçerli olduğu bu davranış için, radyal doğrultudaki eddi hareketleri neden gösterilmiştir. Choi vd.'nin [9] çalışması, kanal çaplarının, bu projede mikro ölçek olarak kabul edilen sınırlar içinde kalmaları açısından önemlidir.

Mikro-ölçek aralığında kalması açısından, iki fazda yapılan çalışmalarda Xu'nun [7], hava-su karışımı ile 0.3, 0.6, 1 mm genişliğindeki dikdörtgen kesitli düşey kanallarda yaptığı çalışmalardan söz etmekte fayda vardır. Xu, iki fazlı rejimlerde "görünür (superficial) hız" olarak adlandırılan parametrenin mikro-kanallardaki etkisi üzerinde durmaktadır. İki fazlı akışta, sıvı faza ait görünür hız

$$J_l = Q_l / A$$

gaz fazına ait görünür hız ise;

$$J_g = Q_g / A$$

biçiminde tanımlanır. Yani; herhangi bir faza ait görünür hız, o fazın hacimsal debisinin toplam kesit alanına oranıdır. Diğer yandan iki fazlı akış, geniş kanallarda bile henüz evrensel isimler konmamış rejimlerden oluşmaktadır. Bu nedenle; iki fazlı akış rejimlerini özetlemekte fayda vardır:

a) Kabarcıklı akış (bubly flow): Sıvı faz, sürekli bir ortamda akarken, gaz faz, sıvı faz içerisinde kabarcıklar halinde dağılmıştır.

b) Darbeli akış (slug flow): Gaz fazı, cidardan sıvı faz ile ayrılmış ve yarım daire şapkali dikdörtgenler biçiminde dağılmıştır. Sıvı fazı ayrıca bu gaz parçalarını da ayırır ve ayrı ayrı gaz kabarcıkları da içerebilir.

c) Çalkantılı akış (churn flow): Büyük gaz kabarcıklarının slug akışa geçmeleri sırasında oluşur. Kaotik bir karakteri vardır.

d) İç içe akış (annular flow): Cidar sıvı ile çevrili iken gaz fazı sürekli biçimde kanalın ortasında akar. Bu akış dalgalı bir karakter gösterebilir.

Kanallardaki iki fazlı akış çalışmaları bu akışların sıvı ve gaz fazlarının görünür hızlarına göre gelişimlerini içerir. Xu [7], çalışmasında; 0.3 mm genişlikteki kanallardaki akış rejimlerinin, geniş kanallardakilerden tümüyle farklı olduğunu belirtmekte; geniş kanallardakinin aksine, çok düşük gaz hızlarında bile kabarcıklı akışın hiç bir zaman oluşmadığını vurgulamaktadır. 0.6 mm ve 1mm'lik kanallarda ise geniş kanallardaki akış haritaları ile uyumlu bir akışın gözlemlenmiş; dolayısıyla mikro-ölçekli kanallar için yeni akış rejimi haritalarının çıkarılması gerektiği belirtilmiş; bu kanallardaki

farklılığın nedeni olarak da dar kanallarda kayma gerilmesinin artan etkisi gösterilmiştir (burada, Xu'nun mikro-ölçekli kanal biçiminde sözettiği kanalların, bu projedeki kabullere göre meso-ölçek grubuna girdiğini vurgulamakta fayda vardır).

Makro-ölçekli kanallardaki iki fazlı akış konusunda son yıllarda yapılan çalışmalara verilebilecek iyi bir örnek de Triplet vd.'nin [10] 1999 yılında, 1.1mm-1.450 mm boyutlarındaki dairesel ve yarı üçgensel kesitli kanallarda, yine hava su karışımı ile yaptıkları çalışmadır. Bu araştırmacılar, "microchannel" olarak niteledikleri geometrilerinde, hidrolik çapın kompakt ısı değiştiricilerinde kullanılan Laplace sabiti olan;

s

g(rl – rg)

değerinden küçük olduğunu vurgulamaktadırlar. Ancak; yaptıkları deneylerden, geniş kanallara uyarlanabilen akış haritalarından fazla bir sapma olmadığı; fakat, geçiş rejimleri açısından fark olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu sonuca; deney yapılan aralığın, mikro değil, makro ölçekli olmasının neden olduğu açıktır. Çalışmada sözü edilen Laplace sabiti, bu ölçekleri belirleyen bir ölçüt olmaktan uzaktır.

Öte yandan; makro ölçekde, içiçe geçmiş cam borulardaki iki fazlı akışın incelendiği bir başka çalışmada [11] elde edilen akış haritalarının hem geniş kanallardaki; hem de mikro-kanallardaki akış rejimleri ile uyumsuz olduğu görülmektedir.

Meso ölçekte, tek fazlı rejimde yapılan çalışmalarda ise azalan kanal genişliğinin ısı transferini iyileştirdiği; fakat, basınç düşümünü arttırdığı gözlemlenirken, türbülansa geçişin de bilinenden (Re=2400) daha düşük Reynolds sayılarında gerçekleştiği belirtilmiştir [12].

KAYNAKLAR

[1] Tuckerman, D.B., and Pease, R.F.W., *High Performance Heat Sinking for VLSI*, IEEE Electron Device Letters EDL, Vol. 2, No. 5 (1981) pp. 126-129.

[2] Ameer, T.A., R.O. Warrington, R.S. Wegeng, M.K. Drost, *Miniaturization technologies applied to energy systems*, Energy Conversion and Management 38 (10-13) (1997) pp. 969-982.

[3] Mala, Gh.M., D. Li, C. Werner, H.-J. Jacobasch, Y.B. Ning, *Flow characteristics of water through a microchannel between two parallel plates with electrokinetic effects*, International Journal of Heat and Fluid Flow 18 (5) (1997) pp. 489-496.

[4] Kennedy, J.E., Roach, G.M., Dowling, M.F., Abdel-Khalik, S.I., Ghiaasiaan, S.M., *Onset of Flow Instability in Uniformly Heated Horizontal Microchannels*, Journal of Heat Transfer, Vol. 122, No. 1(Feb. 2000) pp. 118-125.

- [5] Jacobi, A.M., Özel Görüşme, (20 Haziran 2000).
- [6] Mala, Gh.M., D. Li, Flow characteristics of water in microtubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20 (2) (1999) pp. 142-148.
- [7] Xu, J., Experimental study on gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20 (4) (1999) pp. 422-428.
- [8] Pfahler, J., J. Harley, and H. Bau, Gas and Liquid Flow in Small Channels, ASME, DSC-Vol. 32, *Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems* (1991) pp. 49-60.
- [9] Choi, S.B., Barron, R.F., and Warrington, R.O., Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes, ASME, DSC-Vol. 32, *Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems* (1991) pp. 123-133.
- [10] Triplett, K.A., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski, Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns, *International Journal of Multiphase Flow* 25 (3) (1999) pp. 377-394.
- [11] Ekberg, N.P., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, M. Yoda, S.M. Jeter, Gas-liquid two-phase flow in narrow horizontal annuli, *Nuclear Engineering and Design* 192 (1) (1999) pp. 59-80.
- [12] Harms, T.M., M.J. Kazmierczak, F.M. Gerner, Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20 (2) (1999) pp. 149-157.
- [13] Mala, G.M., Li, D., Dale, J.D., Heat transfer and Fluid Flow in Microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (13) (1997) pp. 3079-3088.
- [14] C.W. C., B.C. C., C.L. D., Single-phase heat transfer and flow friction correlations for microfin tubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 17 (5) (1996) pp. 500-508.
- [15] Peles, Y.P., S. Haber, A steady state, one dimensional, model for boiling two phase flow in triangular micro-channel, *International Journal of Multiphase Flow* 26 (7) (2000) pp. 1095-1115.
- [16] Narrow, T.L., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski, Gas-liquid two-phase flow patterns and pressure drop in a horizontal micro-rod bundle, *International Journal of Multiphase Flow* 26 (8) (2000) pp. 1281-1294.
- [17] Triplett, K.A., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, A. LeMouel, B.N. McCord, Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part II: void fraction and pressure drop, *International Journal of Multiphase Flow* 25 (3) (1999) pp. 395-410.
- [18] Adams, T.M., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, Enhancement of liquid forced convection heat transfer in microchannels due to the release of dissolved noncondensables, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (19) (1999) pp. 3563-3573.
- [19] Tso, C.P., S.P. Mahulikar, Combined evaporating meniscus-driven convection and radiation in annular microchannels for electronics cooling application, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (6) (2000) pp. 1007-1023.
- [20] Kim, S.J., D. Kim, D.Y. Lee, On the local thermal equilibrium in microchannel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (10) (2000) pp. 1735-1748.
- [21] Li, J.M., B.-X. Wang, X.-F. Peng, 'Wall-adjacent layer' analysis for developed-flow laminar heat transfer of gases in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (5) (1999) pp. 839-847.

[22] Tso, C.P., S.P. Mahulikar, *Experimental verification of the role of Brinkman number in microchannels using local parameters*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (10) (2000) pp. 1837-1849.

[23] Uygur-Onbaşıoğlu S., *"Effect of Interfacial Drag Terms on Simulation of Two Phase Flow Distribution through Narrow Channels"*, *Energy Conversion and Management* 39(8), (1998).