

MİKROTÜPLERDE VE MİKROKANALLARDA TEK FAZLI AKIŞKANLARDA KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİ

B.Çetin, H.Yüncü ve S. Kakaç

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü 06531 Ankara
barbaroscetin@yahoo.com

ÖZET

Bu çalışmada, mikrotüplerde iki boyutlu, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan tek fazlı laminar akışta ısı transferi analizi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz kaygan-akış (slip-flow) rejiminde, sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akışı ısı sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir.

Akışkan sıkıştırılmaz, akışkanın termofiziksel özellikleri de sabit kabul edilip, sürtünme kaybı terimi ve eksen boyunca ısı iletimi ihmal edilerek, tam gelişmiş hız dağılımı analitik olarak belirlenmiştir. Sıcaklık dağılımı da enerji denkleminde, sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Basıncın düşük olduğu veya mikrokanallardaki akışlarda önemli olan seyrelme (rarefaction) etkisi, momentum ve enerji denklemlerinde sınır şartları olarak yüklenmiş ve seyrelme etkisinin sıcaklık dağılımı ve yerel Nusselt sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki bilinen analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrotüplerde Isı Transferi, Kaygan Akış, Seyrelme Etkisi

ABSTRACT

In this study, heat transfer analysis of two-dimensional, hydrodynamically developed, thermally developing, single phase laminar flow in microtubes is performed for constant wall temperature and constant wall heat flux thermal boundary conditions for slip flow regime, numerically. The fluid is assumed to be incompressible with constant thermophysical properties. Viscous dissipation and the axial conduction is neglected. Fully developed velocity profile is determined analytically, and energy equation is solved by using finite difference method. The rarefaction effect which is important for flow in low pressures or flow in microchannels is imposed to the boundary conditions of the momentum and energy equations. The effects of

rarefaction on local Nusselt number is discussed. The results of the numerical method are discussed and verified with the available analytical results.

Keywords: Heat Transfer in Microtubes, Slip Flow, Rarefaction Effect

1.GİRİŞ

1970'lerden bu yana başlayan minyatürizasyon ve 1980'lerden bu yana mikrofabrikasyon ve nanoteknolojide yaşanan ilerlemeler, başta biomedikal uygulamalar, uzay endüstrisi ve Mikroelektromekanik sistemler (MEMS) olmak üzere mikron boyutundaki parçaların (örneğin; elektronik çipler) birçok alanda kullanımını arttırdı. Bu eğilim, bu küçük ölçekteki parçalarda ısı üretimi sonucu ortaya çıkan, parçaların fazla ısınması problemini de beraberinde getirdi. Bu parçaların güvenilirliği temel olarak çalışma ortamındaki sıcaklıklarından etkilendiği için, bunların verimli bir şekilde kullanımı, ürettikleri ısının dışarı atılmasına bağlıdır (örneğin; elektronik çiplerde çalışma sıcaklığının 70 °C' nin altında olması gerekir). Boyutlarının küçük olması nedeniyle bu üretilen ısının, havanın doğal veya zorlanmış taşınımıyla dışarı atılması gibi klasik yöntemlerle pek mümkün olmamaktadır. Bu noktada, ısı transferi alanlarının hacimlerine oranı yüksek olan mikrokanallı soğutma sistemleri (microchannel heat sinks) bu soruna çözüm olarak ortaya çıkmıştır.

Makro ölçekte, genel olarak akışkan sürekli kabul edilir. Akışkanın hızı, yoğunluğu, basıncı vb özellikleri uzaydaki her noktada, her an için tanımlanır. Kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri yazılarak Navier-Stokes ve enerji denklemleri elde edilir. Makro akışlar için bu denklemler çözülür. Ama mikro akışlarda süreklilik kabulünün geçersizliğinden dolayı Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin kullanılabilmesi için sınır şartlarında bazı değişikliklere gidilmesi gerekir.

Karakteristik uzunluk (L), moleküllerin birbirlerine çarpmadan aldığı ortalama mesafeye (mean free path), (λ), yaklaştıkça süreklilik varsayımı geçerli olmamaktadır. Bu iki uzunluğunun birbirine oranı, **Knudsen (Kn)** sayısı olarak bilinen boyutsuz bir niceliktir. Kn sayısı büyüdükçe akışkan seyrelmekte ve akışın modellenmesi sürekli modelden moleküler modele doğru kaymaktadır.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

Küçük Kn sayıları için akış sürekli, büyük Kn sayıları için de serbest-moleküler kabul edilir. $0,01 < Kn < 0,1$ değerleri için akış kaygan-akış rejiminde, $0,1 < Kn < 10$ değerleri için de akış geçiş rejimindedir. Akış rejimleri Tablo 1' de verilmiştir (Yener vd., 2005).

Basıncın düşük olduğu veya mikrokanallardaki akışlarda görülen kaygan-akış rejiminde, -bu çalışmanın da odak noktası- Kn sayısı küçüktür ama akışın seyrelmesinden (rarefaction) dolayı doğan etkileri ihmal edebileceğimiz kadar küçük değildir. Bu rejimde, moleküllerin katı yüzeye olan çarpışma frekansı duvarla moleküller arasında termodinamiksel dengeyi sağlayacak düzeyde değildir. Bu yüzden akışkan parçacıklarının duvarın komşuluğunda duvara teğet bir kayma hızları ve duvar ile parçacıklar arasında belli bir sıcaklık farkı vardır. Bu kayma hızı ve sıcaklık farkı temel olarak Kn sayısı, akışkanın bazı termofiziksel özellikleri, yüzey şartları ve molekül etkileşimine bağlı olarak istatistiksel olarak tanımlanan uyuşma (accommodation) katsayılarına bağlıdır. Deneysel çalışmalar, duvardaki bu hız ve sıcaklık etkilerini sınır şartlarına kayma hızı ve sıcaklık sıçraması olarak yükleyince, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin kaygan-akış rejimi için de kullanılabilir hale gelmektedir.

Daha önceki çalışmalar, mikrotüplerdeki akış değişik sınır şartlarıyla kapsamaktadır. Barron vd. (1997) mikrotüplerdeki iki boyutlu, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan tek fazlı laminar akışı, kararlı rejimde sabit duvar sıcaklığı sınır şartıyla, sınırlı parametrelerle analitik olarak çözmüşlerdir. Larrode vd. (2000) aynı problemi daha kapsamlı parametreler ve sıcaklık sıçraması sınır şartını da probleme dâhil ederek çözmüşler ve sonuçlarını önceki çalışma, (Baron vd., 1997) ile karşılaştırmışlardır. Ameel vd (1997) aynı problemi hava için sabit ısı akışı sınır şartıyla, sınırlı parametrelerle analitik olarak çözmüştür. Bayazıtıoğlu vd. (2001) aynı problemi sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akışı sınır şartlarıyla, sürtünme kaybı terimini enerji denkleminde dâhil ederek analitik olarak çözmüşlerdir. Bayazıtıoğlu vd. (2002) bir önceki çalışmalarındaki problemi bu sefer geçici rejimde analitik olarak çözmüşlerdir. Bütün bu çalışmalarda seyrelme etkisinin (rarefaction effect) yerel Nu sayısı üzerine etkisi gösterilmiştir.

Bu çalışmada, mikrotüplerde iki boyutlu, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan tek fazlı laminar akışta ısı transferi analizi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz kaygan-akış (slip-flow) rejiminde, sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akışı ısı sınır koşulları için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki sayısal çözüm literatürdeki analitik çözümlere alternatif oluşturmakta ve analitik çözümün neredeyse

imkânsız olduğu, akışkanın termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi, sürtünme kaybı, eksen boyunca ısı iletimi vb. etkileri göz önüne alan ileri seviyedeki problemler için bir çıkış noktası oluşturmaktadır.

2. TEORİK ÇALIŞMA

Analiz

Çalışmada ele alınana problemin geometrisi Şekil 1' de gösterilmiştir. Koordinat sistemi mikrotüpün merkezine yerleştirilmiştir. Hidrolik olarak gelişmiş hız dağılımını elde etmek için girişe ısıtmasız bir bölüm konmuştur.

Kaygan akış rejiminde, kayma hızı ve sıcaklık sıçraması sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilmektedir (Larrode, 2000);

$$u_s = -\frac{2-F_M}{F_M} \lambda \left(\frac{du}{dr} \right)_{r=R} \quad (2)$$

$$T_s - T_w = -\frac{2-F_T}{F_T} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{\lambda}{Pr} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (3)$$

Denklem (2)' de; λ , moleküller arası ortalama uzunluk (mean free path), F_M momentum uyuşma (accommodation) katsayısıdır. F_M değeri gazın ve katı yüzeyin çeşidine, yüzeyin temizliğine ve pürüzlülüğüne bağlıdır ve 0,5 ve 1,0 arasında değişir. Ama mühendislik uygulamalarında kullanılan gaz-katı çiftleri için 1,0' a çok yakındır. Bu nedenle bu çalışmada da F_M 1,0 olarak alınmıştır.

Denklem (3)' de; T_s yüzeydeki akışkan moleküllerinin sıcaklığını, γ ($=c_p/c_v$) özgül ısı oranı, λ moleküller arası ortalama uzunluk (mean free path), Pr Prandtl sayısı, F_T ısı uyuşma (acommodation) katsayısıdır. F_T ' nin değeri gazın, yüzeyin cinsine, gazın sıcaklığına, basıncına ve yüzey ile gaz arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Değeri deneysel yöntemlerle belirlenir ve 0 ile 1,0 arasında herhangi bir değeri alabilir.

Denklem (2)' de belirtilen sınır şartı kullanarak momentum dekleminin çözülmesiyle hidrolik olarak gelişmiş hız dağılımı aşağıdaki gibi elde edilir (Çetin, 2005):

$$\frac{u}{u_m} = \frac{2(1-\eta^2) + 8Kn}{1+8Kn} \quad (4)$$

Burada u_m ortalama hızı, η ' da boyutsuz yarıçapı göstermektedir.

$$\eta = \frac{r}{R} \quad (5)$$

Denklem (4)' den de görüldüğü gibi hız dağılımı Knudsen sayısına bağlıdır. Knudsen sayısını sıfıra eşitlediğimizde makrotüplerdeki tam gelişmiş laminar hız dağılımı aynen elde edilmektedir. Knudsen sayısını içeren terimler,

duvardaki kayma hızını, hız dağılımına eklemektedir.

İki boyutlu, sıkıştırılmaz, sabit termofiziksel özellikli akışın boyutsuz enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\bar{u}}{2} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \quad (6)$$

Burada \bar{u} , x yönündeki boyutsuz hız, θ ise boyutsuz sıcaklıktır. Bu boyutsuz büyüklükler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_i - T_w} \quad (\text{sabit duvar sıcaklığı için}) \quad (7-a)$$

$$\theta = \frac{T - T_i}{q'' R / k} \quad (\text{sabit ısı akısı için}) \quad (7-b)$$

$$\eta = \frac{r}{R} \quad (7-c)$$

$$\xi = \frac{x}{R \text{Re} \text{Pr}} \quad (7-d)$$

$$\bar{u} = \frac{u}{u_m} \quad (7-e)$$

Burada T_i akışkanın giriş sıcaklığını göstermektedir. Sınır şartları da boyutsuz olarak, sabit duvar sıcaklığı sınır şartı için,

$$\text{at } \eta = 1 \quad \theta_s = -2\kappa \text{Kn} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right)_{\eta=1} \quad (8-a)$$

$$\text{at } \eta = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0 \quad (8-b)$$

$$\text{at } \xi = 0 \quad \theta = 1 \quad (8-c)$$

ve sabit ısı akısı sınır şartı için ise,

$$\text{at } \eta = 1 \quad \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 1 \quad (9-a)$$

$$\text{at } \eta = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0 \quad (9-b)$$

$$\text{at } \xi = 0 \quad \theta = 0 \quad (9-c)$$

şeklinde yazılır.

Burada κ , duvardaki sıcaklık sıçramasının büyüklüğünü gösteren; içinde özgül ısı oranının, Prandtl sayısının ve ısıl uyuşma katsayısının etkilerini içeren boyutsuz bir parametredir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\kappa = \frac{2 - F_T}{F_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{1}{\text{Pr}} \quad (10)$$

Boyutsuz sıcaklık dağılımı belirlendikten sonra, yerel Nusselt sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

Sabit duvar sıcaklığı için,

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} = - \frac{2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right)_{\eta=1}}{\theta_m} \quad (11)$$

ve sabit ısı akısı için,

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} = \frac{2}{\theta_m - \theta_s - 2\kappa \text{Kn}} \quad (12)$$

Burada θ_m boyutsuz ortalama sıcaklığı göstermekte ve boyutsuz büyüklükler cinsinden şöyle tanımlanmıştır.

$$\theta_m = 2 \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right) \theta(\eta, \xi) \eta d\eta \quad (13)$$

Sayısal Çözüm Metodu

Bu çalışmada sayısal çözümün kolaylığı açısından problem kararlı rejimde çözülmek yerine geçici rejimde çözülmüştür. Boyutsuz zaman aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$\tau = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (14)$$

Eliptik kısmi diferansiyel denklem olan enerji denklemi parabolik kısmi diferansiyel denklem haline dönüştürülmüştür. Akışkanımızın ilk sıcaklığı, akışkanımızın girişteki sıcaklığına eşit alınmıştır. Zaman sonsuza gittiğinde geçici rejimdeki çözüm, bu çalışmanın asıl amacı olan kararlı rejimdeki çözümü zaten yakalamıştır. Çözümümüzün yakınsaması için seçilecek boyutsuz zaman basamağımız kritiktir. Bu çalışmada zaman basamağı aşağıdaki gibi seçilmiş ve çözümün yakınsadığı görülmüştür.

$$\Delta \tau = 0.4 \Delta \eta^2 \quad (15)$$

Sayısal çözümümüz için çözüm aralığımız sabit duvar sıcaklığı sınır şartı için 100x100, sabit ısı akısı sınır şartı için 250x250, yarıçap ve boy yönünde düzgün dağılmış cisimlere (nodes) bölünmüştür. Düğüm noktalarında, enerji denklemindeki türevler sonlu farklar yöntemiyle tanımlanarak diferansiyel denklem cebirsel denklem takımına dönüştürülmüştür. Uzay türevleri için merkezi-sonlu fark eşdeğeri, zaman türevi için ileri-sonlu farklar eşdeğeri kullanılmıştır.

Çözümde Mikrotüpümüzün boyu, tam gelişmiş bir akış elde edilecek şekilde bir uzunluk seçilmiştir ($\xi = 1$). Yakınsama kriteri olarak da ilerleyen zamanda ardı ardına hesaplanmış iki yerel Nusselt sayısı arasındaki farkın 10^{-3} den küçük olması olarak alınmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, mikrotüplerde iki boyutlu, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan tek fazlı laminar akışta ısı transferi analizi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz kaygan-

akış rejiminde, sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akısı ısı sınır şartları için gerçekleştirilmiştir. Hız dağılımı analitik olarak elde edilmiş, sıcaklık dağılımı sayısal olarak hesaplandıktan sonra farklı Knudsen sayıları için yerel Nusselt sayısının boyutsuz uzunlukla değişimi hesaplanmıştır. Problem sayısal çözümün basitliği için geçici rejimde çözülmüş ama sadece kararlı rejim sonuçları burada sunulmuştur. Kaygan-akış (slip-flow) modeli $0 < Kn < 0,1$ aralığında geçerli olduğu için, analiz de aynı aralıkta gerçekleştirilmiştir. $Kn=0$ makro akışa karşılık geldiği için, sayısal çözümün geçerliliğini test etmek için makro akıştaki analitik çözümler kullanılmıştır (Kakac ve Yener, 1980).

Şekil 2' de farklı Kn sayılarında mikrotüp içindeki tam gelişmiş hız dağılımları gösterilmiştir. $Kn=0$ makrotüplerdeki akışı, $Kn=0,1$ ' de kaygan-akış modelinin üst limitini göstermektedir. Kn sayısı arttıkça duvardaki kayma hızı artmakta ve merkezde görülen maksimum hız değeri azalmaktadır. Kayma hızının artması duvardaki hız gradientini azaltmakta, bu da sürtünme katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Hızın, ortalama hıza eşit olduğu noktanın yeri denklem (4)' ü 1' e eşitleyerek, analitik olarak bulunabilir. Noktanın yeri Kn sayısından bağımsız olduğu için şekilde düğüm noktası olarak gözükmemektedir ve $\eta=0,7$ civarındadır.

Şekil 3 ve 4, farklı Kn sayılarında; $\kappa=0$ (Şekil 3), $\kappa=1,667$ (Şekil 4) değerleri; sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akısı sınır şartları için yerel Nu sayısının boyutsuz uzunlukla değişimini göstermektedir. $\kappa=0$, sadece kayma hızının sıcaklık dağılımına etkisini gösteren (sıcaklık sıçramasını ihmal ederek) durumdur. $\kappa=1,667$, birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan havaya karşılık gelen değerdir. $Kn=0$ değeri için, κ değerinden bağımsız olarak bütün eğriler iyi bilinen makro akıştaki tam gelişmiş Nu değerlerini (sabit duvar sıcaklığı için $Nu=3,66$, sabit ısı akısı için $Nu=4,36$) yakalamaktadır. Sabit duvar sıcaklığı için $\xi=0,1$, sabit ısı akısı için $\xi=0,2$ civarında bütün eğriler asimptotik olarak bir tam gelişmiş Nu sayısı değeri yakalamaktadır. Bu da, belli bir noktadan sonra akışımızın ısı olarak tam geliştiğinin göstergesidir.

Kn sayısının artmasıyla- seyrelme (rarefaction) etkisinin artmasıyla- sonuçların makro akıştaki sonuçlardan sapması da artmaktadır. Sabit bir Kn sayısı için de, κ ' nın artmasıyla sonuçların makro akıştaki sonuçlardan sapması yine artmaktadır. $\kappa=0$ için, sonuçlarımız Larrode vd.' lerinin analitik sonuçlarıyla uygunluk göstermekte ve artan Kn sayısı ile Nu sayısı da artmaktadır. Bunun tersine, $\kappa=1,667$ için artan Kn sayısı ile Nu sayısı azalmaktadır.

Sabit duvar sıcaklığı eğrilerinin giriş kısmında çok düzgün olmadığı şekillerde görülmektedir. Bunun nedeni çözümümüzde kullandığımız cisim sayısıdır. Cisim sayısının artırılmasıyla bu sorun

ortadan kaldırılabılır. Fakat cisim sayısının artması, işlem süresini de uzatacaktır. Mikrotüplerde boyun çapa oranı yüksek olduğu için tüpün giriş kısmındaki sapmalar çok önemli değildir. Bu yüzden, bu çalışmada belirtilen cisim sayısı ile elde edilen sonuçların hassaslığı yeterli kabul edilmiştir.

Şekil 5' de, $Kn=0,1$ değeri için, κ ' nın yerel Nu sayısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. κ değerinin artmasıyla, makro akıştaki değerlerden sapma da artmaktadır. Çok büyük κ değerleri için eğriler düz bir çizgi haline gelmekte ve iki farklı sınır şartı için yapılan çözümler üst üste gelmektedir.

Şekil 6 ve 7' de, farklı Kn ve κ değerleri için tam gelişmiş Nu sayısı değerlerini göstermektedir. Sayısal yöntemin doğruluğunu göstermek için Barron vd, Larrode vd ve Ameal vd' lerinin analitik sonuçları da şekil üzerinde gösterilmiştir. κ değeri arttıkça, duvardaki sıcaklık sıçramasının da değeri artmaktadır, bu da duvardaki sıcaklık gradientini azaltmakta ve Nu sayısı azalmaktadır. Ama κ ' nın değerine bağlı olarak, Nu sayısı makro akıştaki değerlerden düşük veya yüksek olabilmektedir.

Bu çalışmadaki sayısal çözüm literatürdeki analitik çözümlere alternatif oluşturmakta ve gerek sınır şartları, gerekse duvardaki kaygan-akış parametreleri göz önüne alındığında daha kapsamlı bir analiz içermektedir. Analitik çözümün neredeyse imkânsız olduğu ileri seviyedeki problemler için bir çıkış noktası oluşturmaktadır. Aynı sayısal yöntem kullanılarak, aynı problemin kartezyen geometrideki (paralel iki plakalı mikrokanallar), ve yine silindirik geometride (mikrotüplerde) sürtünme kaybı terimi göz önüne alınarak, aynı parametrelerle çözümü gerçekleştirilmiştir (Çetin, 2005).

4. SEMBOLLER

F_M	momentum uyuşma (accommodation) katsayısı
F_T	ısı uyuşma (accommodation) katsayısı
h	ısı transferi katsayısı. W/m^2K
k	ısı iletim katsayısı. W/mK
Kn	Knudsen sayısı, λ / L
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı, ν/α
R	tüp yarıçapı, m
Re	Reynolds sayısı, $U_m D/\nu$
u_s	kayma hızı, m/s
\bar{u}	boyutsuz hız
γ	özgül ısı oranı, c_p/c_v
λ	moleküller arası ortalama uzunluk. m
μ	dinamik viskozite, kg/ms
θ	boyutsuz sıcaklık

η	boyutsuz yarıçap
ξ	boyutsuz uzunluk
τ	boyutsuz zaman
κ	denklem (14)'te tanımlanan parametre

5. KAYNAKLAR

Ameel, T. A., Baron, R. F., Wang, X. M., and Warrington, R. O., Laminar forced convection in a circular tube with constant heat flux and slip flow, *Microscale Thermophysical Eng.*, 1997, 1, 303-320.

Barron, R. F., Wang, X. M., Warrington, R. O., and Ameel, T. A., The Graetz problem extended to slip flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, 40 (8), 1817-1823

Çetin, B., Mikrotüplerde ve Mikro kanallarda Tek Fazlı Akışkanlarda Konveksiyonla Isı Transferi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, *Lisansüstü Tezi*, Makine Mühendisliği, 2005.

Kakac, S. and Yener, Y., Convective Heat Transfer, Pub. No: 65, METU, Ankara, 1980.

Larode, F. E., Housiadas, C., and Drossinos, Y., Slip-flow heat transfer in circular tubes, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 43(2000) 2669-2680.

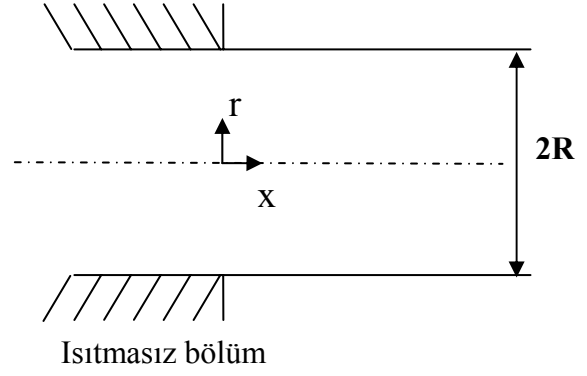
Tunc, G., Bayazitoglu, Y., Convection at the entrance of micropipes with sudden wall temperature change, *Proceedings of IMECE 2002*, November 17-22, New Orleans, Louisiana.

Tunc, G., Bayazitoglu, Y., Heat transfer in microtubes with viscous dissipation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001a, 44 (13), 2395-2403

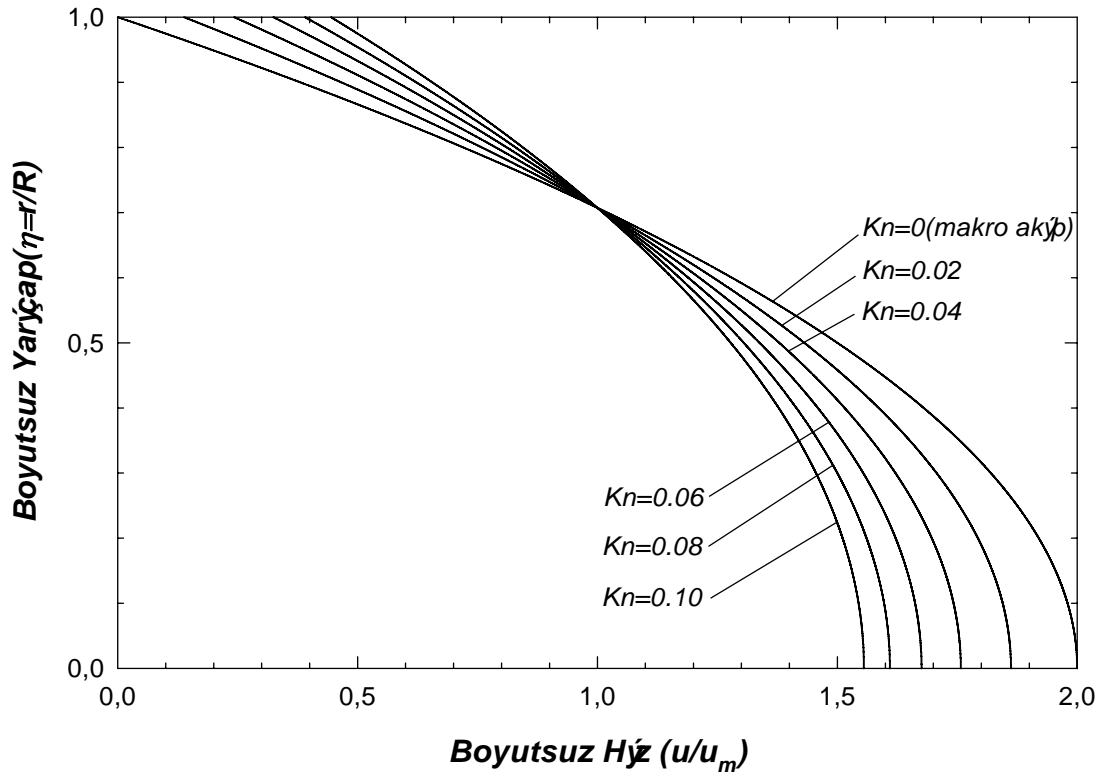
Yener, Y., Kakac, S. and Avelino, M., Single Phase Forced Convection in Microchannels- State-of Art-Review, *Microscale Heat Transfer- Fundamentals and Applications in Biological Systems and MEMS*, (edits) Kakac, S., Vasiliev, L., Bayazitoglu, Y., Yener, Y., Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, 2005.

Tablo 1. Değişik Kn Sayıları için Akış Rejimleri

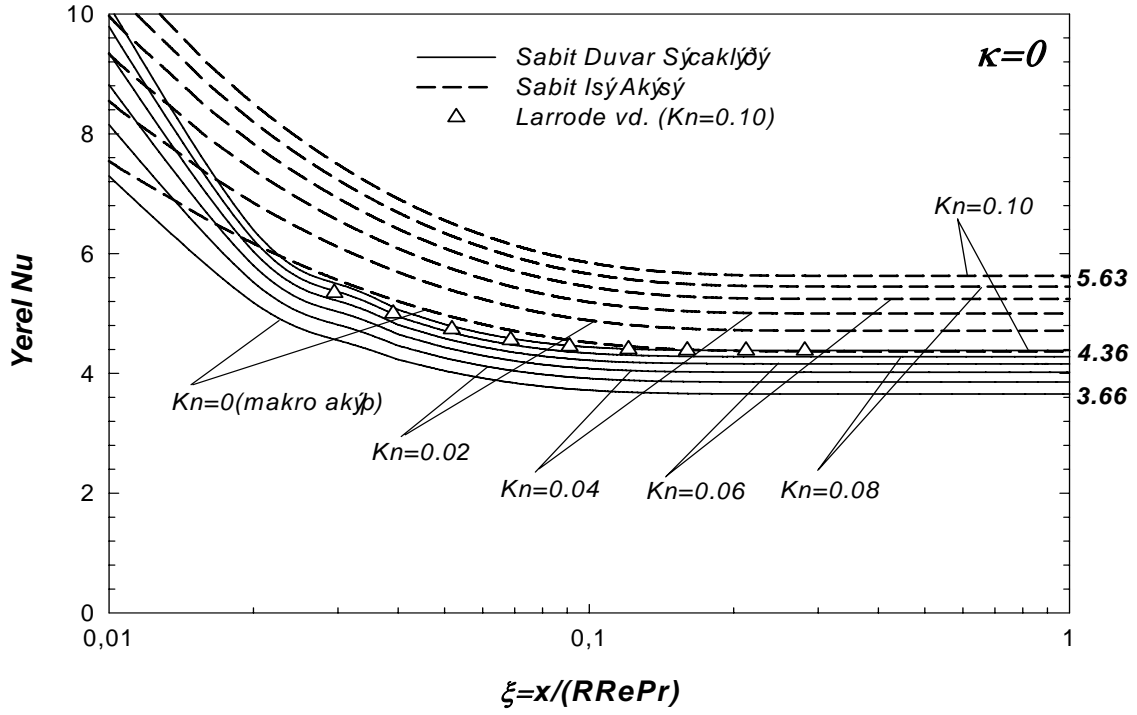
Knudsen Sayısı ($Kn=\lambda/L$)	Rejim
$Kn < 0.01$	"Sürekli" Rejim
$0.01 < Kn < 0.1$	"Kaygan-Akış" Rejimi
$0.1 < Kn < 10$	"Geçiş" Rejimi
$Kn > 10$	"Serbest-Moleküler" Rejim



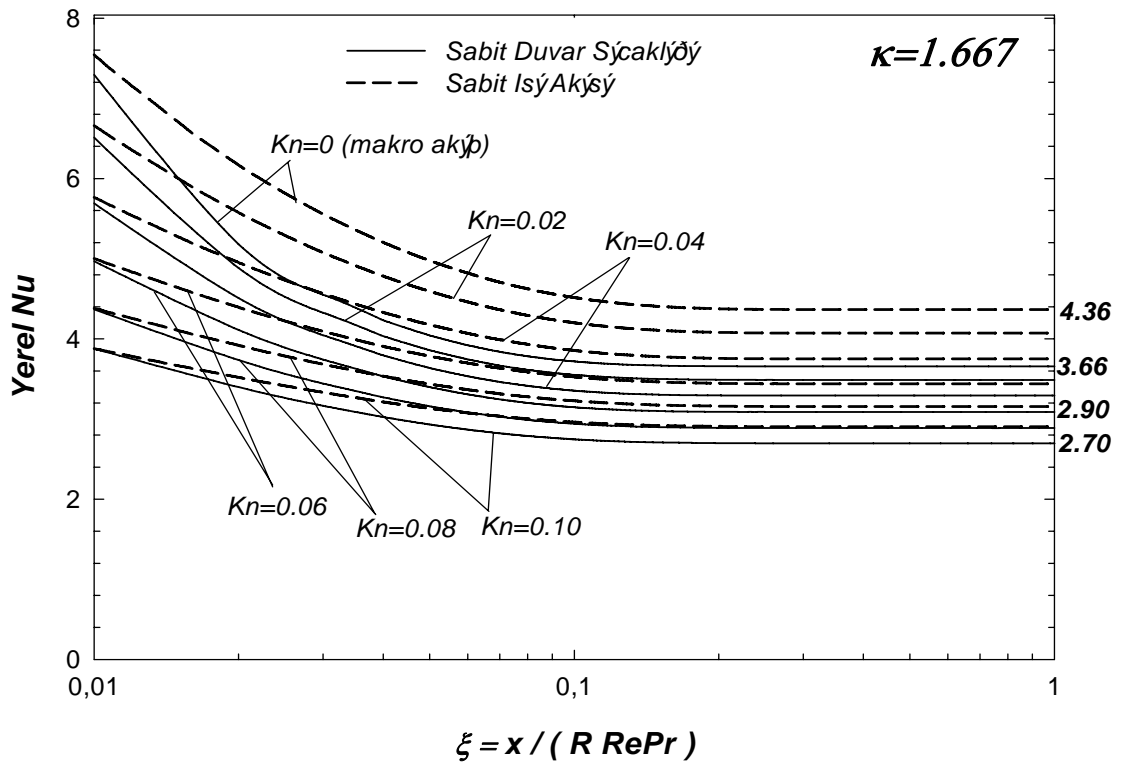
Şekil 1. Problem Geometrisi



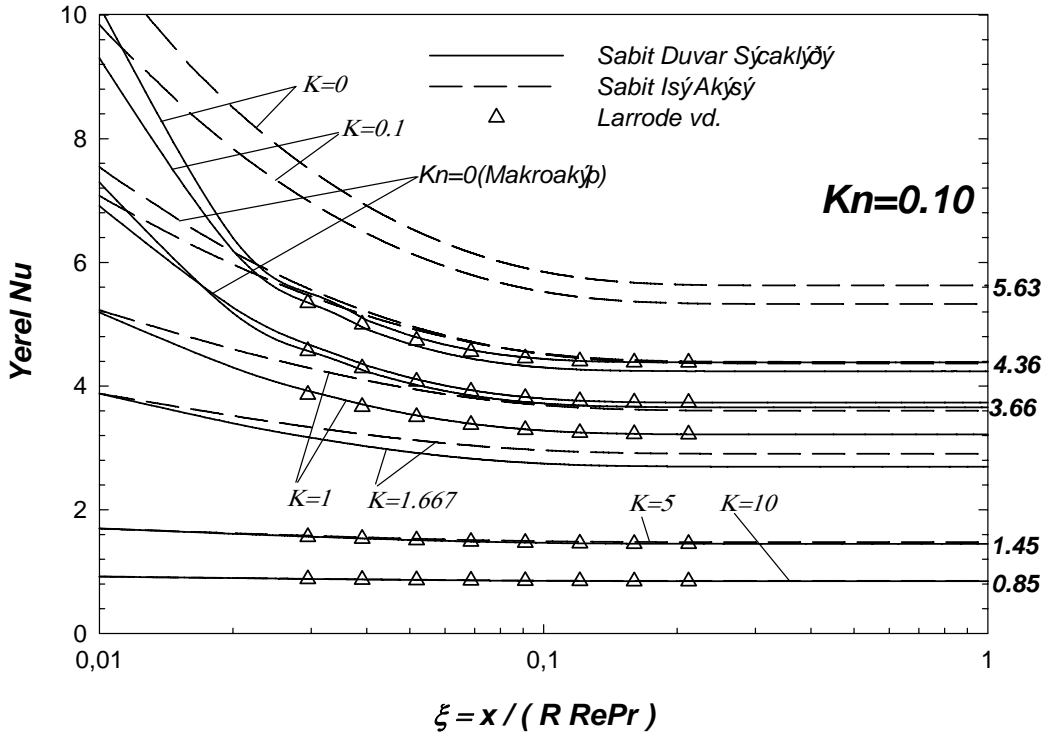
Şekil 2. Farklı Kn Sayılarında Mikrotüplerdeki Tam Gelişmiş Hız Dağılımları



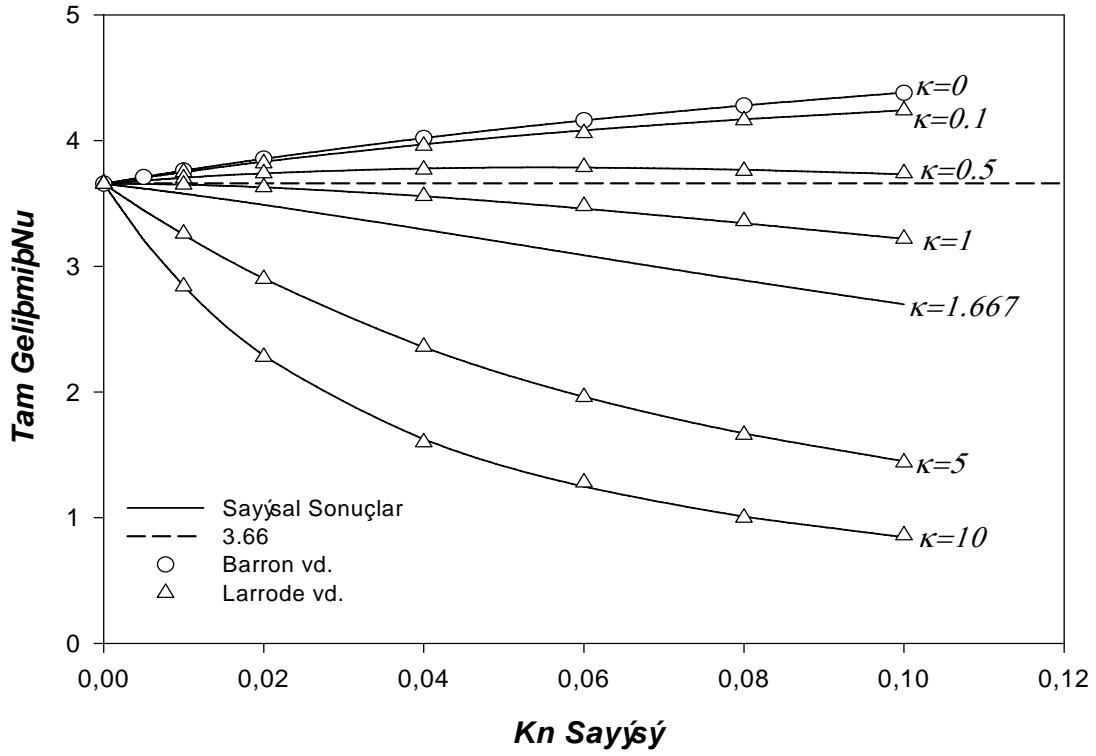
Şekil 3. Farklı Kn Sayılarında Yerel Nu Sayısının Boyutsuz Uzunlukla Değişimi



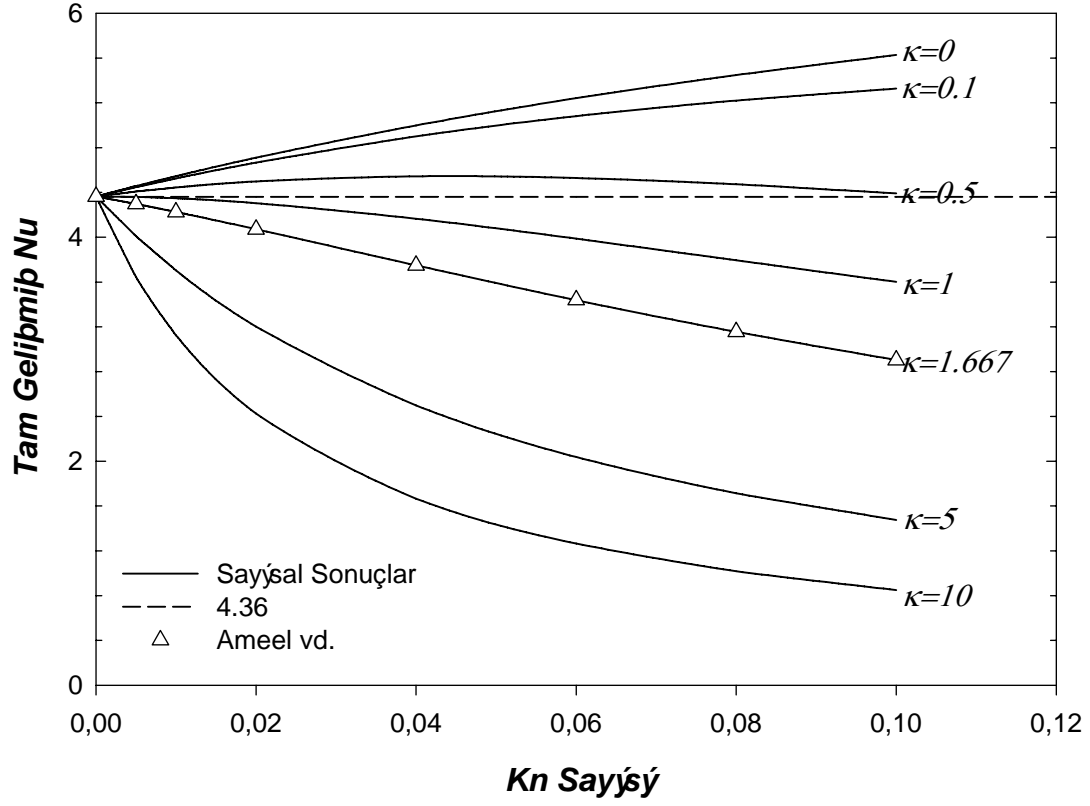
Şekil 4. Farklı Kn Sayılarında Yerel Nu Sayısının Boyutsuz Uzunlukla Değişimi



Şekil 5. Farklı κ Değerlerinde Yerel Nu Sayısının Boyutsuz Uzunlukla Değişimi



Şekil 6. Farklı Kn Sayısı ve κ Değerleri için Tam Gelişmiş Nu Sayısı (Sabit Duvar Sıcaklığı)



Şekil 7. Farklı Kn Sayısı ve κ Değerleri için Tam Gelişmiş Nu Sayısı (Sabit Isı Akısı)