

KALIN CİDARLI ÜNİFORM AKIŞLI BİR BORUDA, ISIL GİRİŞ BÖLGESİ GEÇİCİ REJİM BİRLEŞİK ISI TRANSFERİ

Selçuk DARICI^{a*}, Ali ATEŞ^b, Şefik BİLİR^a

^aS.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Müh. Bölümü, 42031, Konya

^bS.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü, 42031, Konya

Özet

Üniform akışlı bir boruda, ısıl giriş bölgesi, geçici rejim birleşik ısı transferi, iki boyutlu cidar ve aksel akışkan iletimi dikkate alınarak incelenmiştir. Problem, başlangıçta eşit sıcaklıktaki yarı sonsuz bir boruda, çevre akışkan sıcaklığındaki ani değişim şartı ile ele alınmış ve sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Sonuçlar boyutsuz yerel arayüzey ısı akısı, dış yüzey ve arayüzey sıcaklıkları, yığık sıcaklık, radyal yönde sıcaklık değişimi ve Nusselt sayısı cinsinden verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birleşik ısı transferi, geçici rejimde ısı transferi, üniform akış, sayısal çözüm.

TRANSIENT CONJUGATED HEAT TRANSFER IN A THICK WALLED PIPE IN THERMAL ENTRANCE REGION WITH SLUG FLOW

Abstract

Transient conjugated heat transfer in a pipe with slug flow is analysed involving two-dimensional wall and fluid axial conduction. The problem is solved numerically by a finite difference method for a semi-infinite pipe which is initially isothermal and with a sudden change in the ambient temperature. The results are given by nondimensional interfacial heat flux values, the outer and inner wall temperatures, bulk temperatures, radial temperature distributions and Nusselt numbers.

Key Words: Conjugated heat transfer, transient heat transfer, slug flow, numerical solution.

*Yazışmacı yazar Tel:+90-332-223 34 67; Faks:+90-332-241 06 35, E-posta: sdarici@selcuk.edu.tr (S. Darıcı)

1. Giriş

Boru içi laminer akış ısı transferi problemlerinin çözümünde genellikle ya tam gelişmiş hız profili ya da üniform hız profili kabul edilmektedir. Prandtl sayısı yüksek akışkanlar (yağlar) için, borunun girişinde hız dağılımı tam gelişmiş olarak kabul edilebilir. Çünkü, hız profili sıcaklık profilinden daha hızlı gelişir. Ancak küçük Prandtl sayılı akışkanlar (sıvı metaller) için, sıcaklık profili hız profilinden daha hızlı gelişir. Bu durumda, hız profilini üniform kabul ederek yapılan çözümün önemli bir hata oluşturmayacağı söylenebilir [1, 2].

Boru içi akışlarda birleşik ısı transferi, cidar iletimini ve cidar ile akışkan arasındaki taşınımı birlikte ele alan problemlerdir. İnce cidarlı borularda cidar-akışkan ara yüzeyindeki sınır şartının dış yüzeydekine eşit olduğu ve dolayısıyla önceden bilindiği kabul edilebilir. Bu kabul kalın cidarlı borular için gerçekçi değildir ve birleşik ısı transferi analizi yapılması gerekir.

Geçici rejimde birleşik ısı transferinin analizi, ısı değiştiricilerinin ilk çalıştırma ve durdurma esnasında veya çalışma şartlarındaki herhangi bir değişiklik halinde kontrolü açısından önemlidir. Bunun yanında gaz türbini kanatlarının soğutulmasında, nükleer reaktör soğutma sistemlerinde, uçak motorlarında ve uzay araçlarında karşımıza çıkabilecek bu problemin incelenmesi, istenmeyen ısı performans düşüşlerinin yanı sıra oluşabilecek ani ısıl gerilmelerin ve mekanik tahribatın önlenmesi açısından da önemlidir. Söz konusu problem genellikle boru ve kanallarda veya geometrik olarak boru ya da kanal şeklinde modellenebilecek akış kesitlerinde incelenebilir.

Boru ve kanallarda üniform akışlı zorlanmış taşınım ile ilgili literatürdeki çalışmalar yakından incelenmiştir. Türbülanslı akış, küçük Prandtl sayılı bir akışkanın hidrodinamik giriş bölgesindeki laminer akış ve sanki plastik (pseudoplastik) bir akışkanın tam gelişmiş laminer akış analizlerinde üniform akış (slug flow), kolaylık sağlayan bir kabul

olarak dikkate alınabilir. Üniform akışlı zorlanmış taşınım ile ısı transferi, ısıtılan bir boru veya kanal içinde, yüzeyler ile tam ısıl temas halinde, hareket halinde içi dolu bir çubuk (piston) olarak tanımlanabilir [3, 4].

Sabit yüzey sıcaklığı ve sabit yüzey ısı akısı sınır şartlarında, üniform akışlı zorlanmış taşınım için elde edilen sonuçlar Shah ve Bhatti [5] tarafından yeniden incelenmiştir. Bejan [6], üniform akışlı dairesel bir kanalda zorlanmış taşınım ile ısı transferi problemini üçüncü tür sınır şartı altında incelemiş ve tam gelişmiş sıcaklık profillerini ve Nusselt sayılarını belirlemiştir. Tam gelişmiş bölgede boyutsuz sıcaklık profillerinin ve Nusselt sayısının sadece Biot sayısı ile değişimi verilmiştir. Aynı problem üçüncü tür sınır şartı ile Javeri [7], Laplace dönüşümü yöntemi ile Tyagi ve Nigam [8] ve yine Laplace dönüşümü kullanılarak ve eksenel ısı iletimi ihmal edilerek Golos [9] tarafından çözülmüştür. Vick, Özışık ve Ullrich [10], taşınım sınır şartı ile ısıl giriş bölgesinde eksenel ısı iletiminin etkisini dikkate alan benzer problem için bir analitik çözüm sunmuşlardır. Soliman [11], belirli bir bölgesi ısıtılan, sonsuz uzunlukta, üniform akışlı bir boru içindeki sıcaklık dağılımı için yine bir analitik çözüm gerçekleştirmiştir. Çözümlerde, akışkan içindeki ve boru cidarındaki eksenel ısı iletimi dikkate alınmıştır.

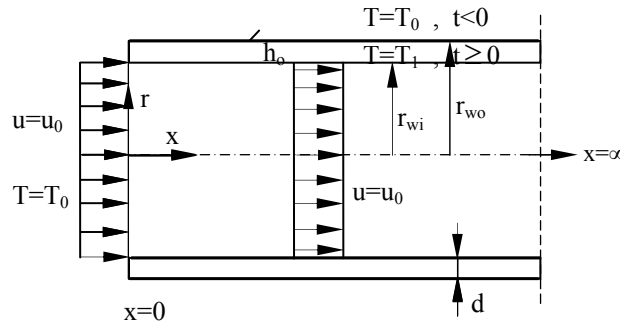
Akışkan eksenel iletiminin etkilerini, dış yüzeyde taşınım sınır şartı ile inceleyen çalışmaların ilkinin Schneider [12] gerçekleştirmiş ve paralel plakalar ve borular için üniform akış halinde problemi çözmüştür. Aynı problem, borular için üniform akış halinde Vick, Özışık ve Ullrich [10], parabolik hız profili ile Lee ve Hwang [13] ve dış yüzeyde hem taşınım hem de ışıma sınır şartı ile Campo ve Auguste [14] tarafından çözülmüştür.

Bu çalışmada, kalın cidarlı bir borunun ısıl giriş bölgesinde üniform akış için, geçici rejim birleşik ısı transferi üçüncü tür sınır şartı altında incelenmiştir. Geçici rejim birleşik ısı

transferi problemlerinin üniform hız profili kabulü ile çözümüne dair, bilindiği kadarı ile şu ana kadar literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3. Matematiksel Formülasyon

Problemin şematik diyagramı ve koordinat sistemi Şekil 1’de görülmektedir. Akışkan üniform bir u_0 hızı ve yine üniform bir T_0 sıcaklığı ile boruya girmektedir. Boru boyunca akış hızı üniform olarak devam etmektedir. Zamanın başlangıcında ($t = 0$) dış ortam akışkan sıcaklığı yeni bir T_1 sıcaklığına yükseltilmekte ve sistem sürekli rejime ulaşana kadar sabit kalmaktadır. Dış ortamdaki akışkandan boruya, tüm dış yüzey boyunca sabit bir taşınım katsayısı, h_0 , ile ısı transfer edilmektedir. Akış sürekli, ısı transferi ise geçici rejimdedir. Akışkanın ve cidarın fiziksel özellikleri sabit kabul edilmiş ve viskoz sönüm ihmal edilmiştir.



Şekil 1. Problemin şematik diyagramı ve koordinat sistemi.

Yukarıda tanımlanan problemi karakterize eden denklemler boyutsuz halde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Cidar bölgesi için enerji denklemi:

$$\frac{1}{\alpha_{wf}} \frac{\partial T'_w}{\partial t'} = \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial T'_w}{\partial r'} \right) + \frac{1}{Pe^2} \frac{\partial^2 T'_w}{\partial x'^2} \quad (1)$$

Akışkan bölgesi için enerji denklemi:

$$\frac{\partial T'_f}{\partial t'} + \frac{1}{2} \frac{\partial T'_f}{\partial x'} = \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial T'_f}{\partial r'} \right) + \frac{1}{Pe^2} \frac{\partial^2 T'_f}{\partial x'^2} \quad (2)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

Cidar bölgesi için:

$$t' = 0 \text{ iken } T'_w = 0 \quad (3a)$$

$$x' = 0 \text{ da } T'_w = 0 \quad (3b)$$

$$x' = \infty \text{ da } \frac{\partial T'_w}{\partial x'} = 0 \text{ (sürekli rejimde } T'_w = 1) \quad (3c)$$

$$r' = 1 \text{ de } T'_w = T'_f \text{ ve } \frac{\partial T'_w}{\partial r'} = \frac{1}{k_{wf}} \frac{\partial T'_f}{\partial r'} \quad (3d)$$

$$r' = 1 + d' \text{ de } \frac{\partial T'_w}{\partial r'} + Bi(T'_w - 1) = 0 \quad (3e)$$

Akışkan bölgesi için:

$$t' = 0 \text{ iken } T'_f = 0 \quad (4a)$$

$$x' = 0 \text{ da } T'_f = 0 \quad (4b)$$

$$x' = \infty \text{ da } \frac{\partial T'_f}{\partial x'} = 0 \text{ (sürekli rejimde } T'_f = 1) \quad (4c)$$

$$r' = 0 \text{ da } \frac{\partial T'_f}{\partial r'} = 0 \quad (4d)$$

$$r' = 1 \text{ de } T'_w = T'_f \text{ ve } \frac{\partial T'_f}{\partial r'} = k_{wf} \frac{\partial T'_w}{\partial r'} \quad (4e)$$

Problemin boyutsuz parametreleri şu şekilde tanımlanmıştır.

$$u' = \frac{u}{u_0} = 1, \quad x' = \frac{x}{r_{wi} Pe} \equiv \frac{z}{Gz}, \quad r' = \frac{r}{r_{wi}}$$

$$T' = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}, \quad d' = \frac{d}{r_{wi}}, \quad k_{wf} = \frac{k_w}{k_f}, \quad \alpha_{wf} = \frac{\alpha_w}{\alpha_f}$$

$$t' = \frac{t \alpha_f}{r_{wi}^2} = Fo, \quad Bi = \frac{h_o r_{wi}}{k_w}, \quad Pe = \frac{2 r_{wi} \rho_f c_{p f}}{k_f}$$

Akışkan yığık sıcaklığı, T'_b , ara yüzey ısı akısı, q'_{wi} , ve yerel Nusselt sayısı, Nu , ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$T'_b = 2 \int_0^1 r' T'_f dr' \quad (5)$$

$$q'_{wi} = - \left(\frac{\partial T'_f}{\partial r'} \right)_{r'=1} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{-2 \left(\frac{\partial T'_f}{\partial r'} \right)_{r'=1}}{T'_{wi} - T'_b} \quad (7)$$

4. Sayısal Çözüm

Akış alanı ve boru cidarı birlikte kontrol hacimlerine bölünmüş ve diferansiyel denklemler bu kontrol hacimlerinde integre edilerek ayrıklaştırılmış denklemler elde edilmiştir [15, 16].

Enerji denklemlerinin ayrıklaştırılmasında, iletim terimleri için merkezi fark profilleri, taşınım terimi için bir kesin çözüm (exact) profili [17], zamana bağlı terimler için ise tam kapalı (implicit) yöntem [18] kullanılmış, çözüm için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Sıcaklık dağılımı Gauss-Seidel iterasyon yöntemi ile belirlenmiştir.

Hesaplama bölgesi belirlenirken, radyal yönde aksel simetri nedeni ile cidar dış yüzeyi ile boru ekseni arasında sınırlanan bölge, boru girişinden aksel yönde ise ısıl gelişmenin tam olarak sağlandığı yere kadar olan uzunluk dikkate alınmıştır. Isıl gelişmenin sağlandığı aksel uzunluk, seyrek düğüm sistemleri ile denenerak belirlenmiştir.

Düğüm noktaları hem cidar hem de akışkan tarafına yerleştirilmiş, radyal yönde üniform, aksel yönde ise gerdirmeli düğüm sistemi kullanılmıştır. Borunun girişinde ilk aksel basamak uzunluğu 0.001 olarak alınmış ve sonraki uzunluklar bir öncekinin 1.25-1.40 katı

arttırılarak doğrusal olarak gerdirilmiştir. Hesaplama bölgesi 24 X 28'lik (x,r) düğüm sistemi ile karakterize edilmiştir.

Her bir zaman adımındaki sıcaklık dağılımı Patankar [18] 'ın çizgi-çizgi (line-by-line) yöntemi ile belirlenmiştir. Düğüm noktaları dış cidardan eksene doğru taranmış ve akış yönünde süpürülmüştür. Boyutsuz ilk zaman adımı 0.0001 olarak kabul edilmiş, takip eden zaman adımları bir öncekinin % 10'u kadar arttırılmıştır. Cidar-akışkan ara yüzeyinde fiziksel özelliklerdeki ani değişimleri ifade etmek için harmonik ortalama [18] formülü kullanılmış ve bu nedenle cidar ve akışkan tarafı için denemelerde sürekli çözüm prosedürü uygulanmıştır. Herhangi bir deneme esnasında, bir önceki denemede hesaplanmış olan ara yüzey sıcaklıkları, akışkan tarafı için sınır şartı olarak kullanılmıştır. Cidar tarafında deneme yapılırken ise, arayüzey ısı akıları, akışkan tarafından cidar tarafına bilgi aktarılmak için kullanılmıştır.

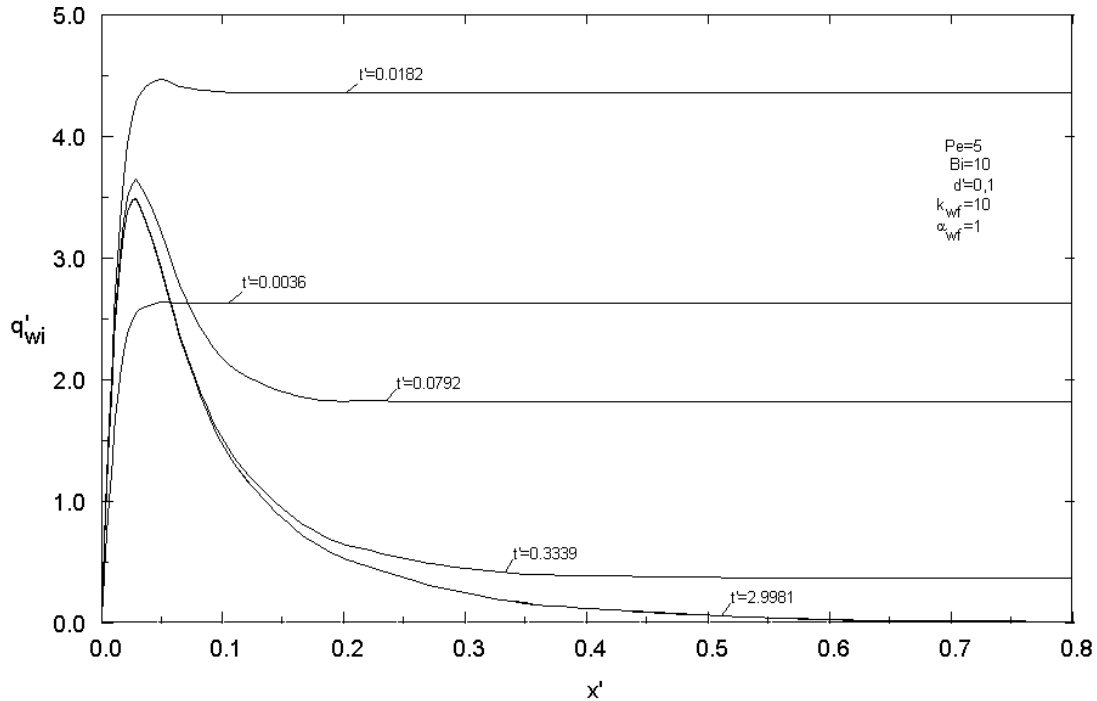
Çözümlerde hassasiyet limiti 10^{-5} olarak alınmıştır. Bir zaman dilimindeki deneme sayısı 2'nin altına düştüğü anda sistemin sürekli rejime ulaştığı kabul edilmiştir. Geçici rejimin başlangıcında birkaç denemede çözüme ulaşılırken, ilerleyen zamanlarda deneme sayısının arttığı, sürekli rejime yaklaşıldıkça da tekrar ve hızla azaldığı görülmüştür. Çözümlerde genellikle bir zaman adımı için ortalama 80 civarında deneme ve toplam 4450 denemede sonuçlara ulaşılmıştır.

Kullanılan yöntem bazı doğruluk testleri ile de kontrol edilmiştir. Düğüm sayısı ve konumları, tarama ve süpürme yönleri, hassasiyet limiti ve zaman adımları değiştirilerek yapılan çözüm sonuçlarında önemli bir fark gözlenmemiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

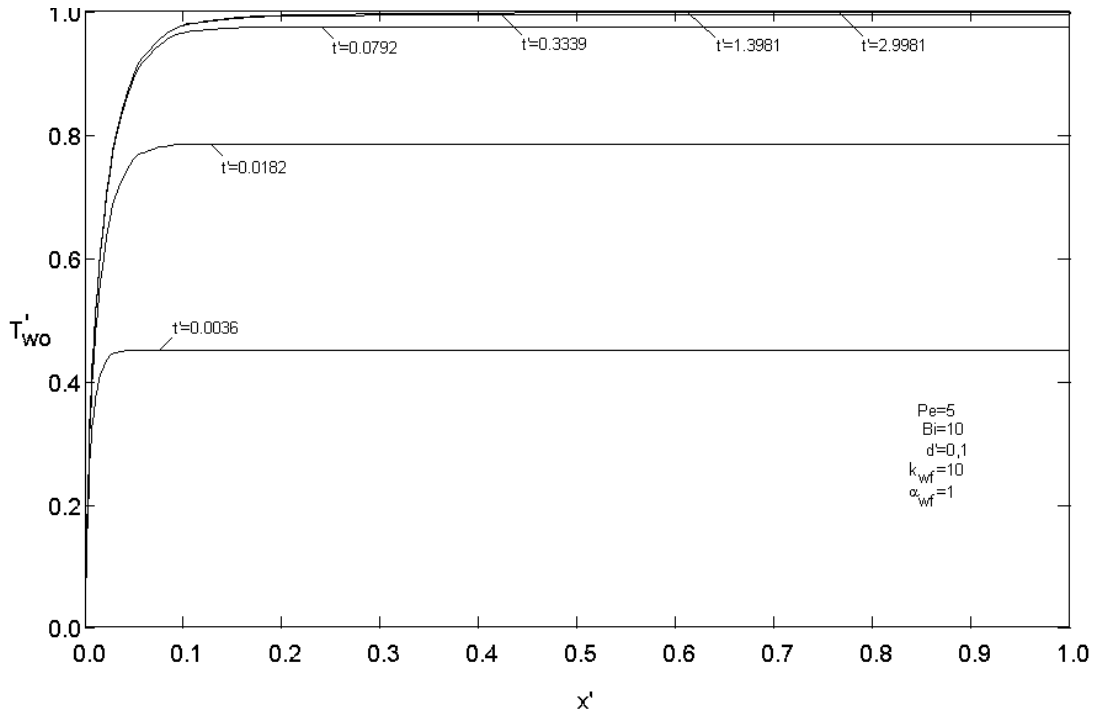
Bu çalışmada incelenen geçici rejim birleşik problemin çözümünde parametre değerleri $Pe = 5$, $Bi = 10$, $d' = 0.1$, $k_{wf} = 10$ ve $\alpha_{wf} = 1$ olarak alınmıştır. Bu değerler, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek değerler arasından ortalama değerler olarak seçilmiştir.

Şekil 2’de, farklı zaman adımlarında, boyutsuz arayüzey ısı akısının aksenal dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi, eğriler bir maksimum değere yükselmekte ve önceleri bu değerde sabit kalmaktadır. Geçen zamanla birlikte bir miktar azalma gösteren ısı akısı yine aksenal yönde belirli bir değerde sabit kalmaktadır. Başlangıçta cidardaki hızlı radyal iletim nedeni ile boru iç yüzey sıcaklıkları akışkan sıcaklığına nazaran daha hızlı artmakta ve buna bağlı olarak ısı transfer hızı da artmaktadır. Daha sonraları, cidar sıcaklıklarındaki artış hızı azalırken akışkan sıcaklığındaki artış, ısı akısı değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle farklı zaman adımlarındaki eğriler birbirlerini kesmektedir. Buna ilave olarak zamanla taşınımın etkisini arttırması ile, hem pik ve ortalama ısı akısı değerleri azalmakta, hem de ısı akısı değerlerindeki düzgünlük bozulmaktadır. Bu eğilim sistem sürekli rejime ulaşana kadar devam etmektedir.

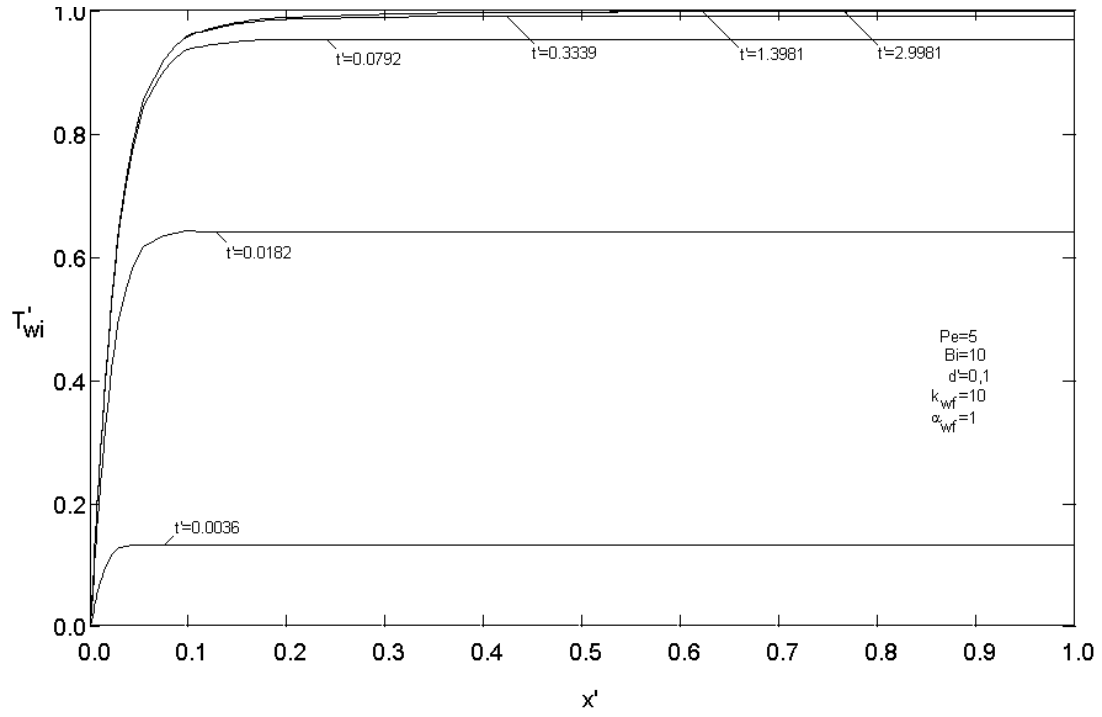


Şekil 2. Arayüzey ısı akısı aksenal dağılımının zamana göre değişimi.

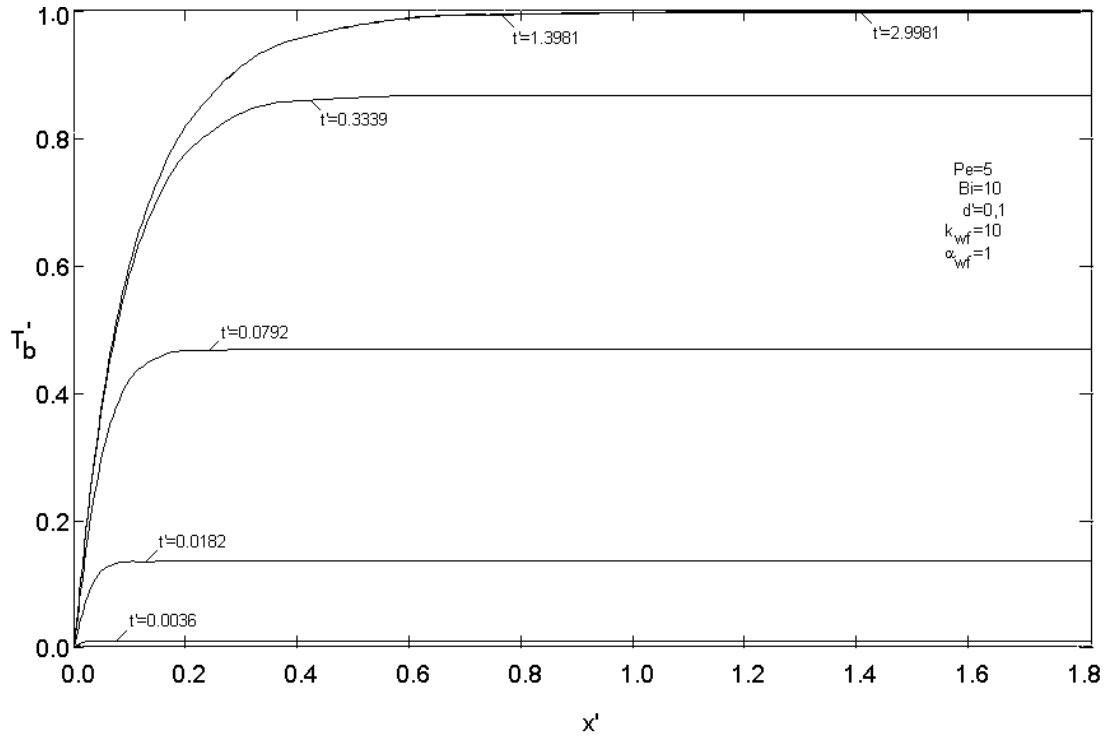
Şekiller 3, 4 ve 5’de aynı parametre değerleri ile yapılan çözüm için sırası ile dış yüzey sıcaklığı, arayüzey sıcaklığı ve akışkan yığık sıcaklığı aksenal dağılımının zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Şekillerin incelenmesinden, her üç sıcaklık için de eğrilerin geçici rejimin ilk zamanlarında, büyük ölçüde düz olduğu gözlenmektedir. Zamanın ilerlemesi ile, dış yüzey, arayüzey ve akışkan yığık sıcaklıkları artmaktadır. Arayüzey sıcaklıklarının ve yığık sıcaklıkların zamana göre değişimi (Şekil 4 ve Şekil 5) kıyaslanırsa, başlangıçta arayüzey sıcaklıklarının yığık sıcaklıklara göre daha hızlı arttığı, ilerleyen zamanlarda ise yığık sıcaklıkların diğerine göre daha hızlı arttığı gözlenebilir. Bu da arayüzey ısı akısı değerlerinin başlangıçta artarken daha sonraları azalmasını açıklamaktadır.



Şekil 3. Dış yüzey sıcaklığı aksenal dağılımının zamana göre değişimi.



Şekil 4. Arayüzey sıcaklığı aksenal dağılımının zamana göre değişimi.



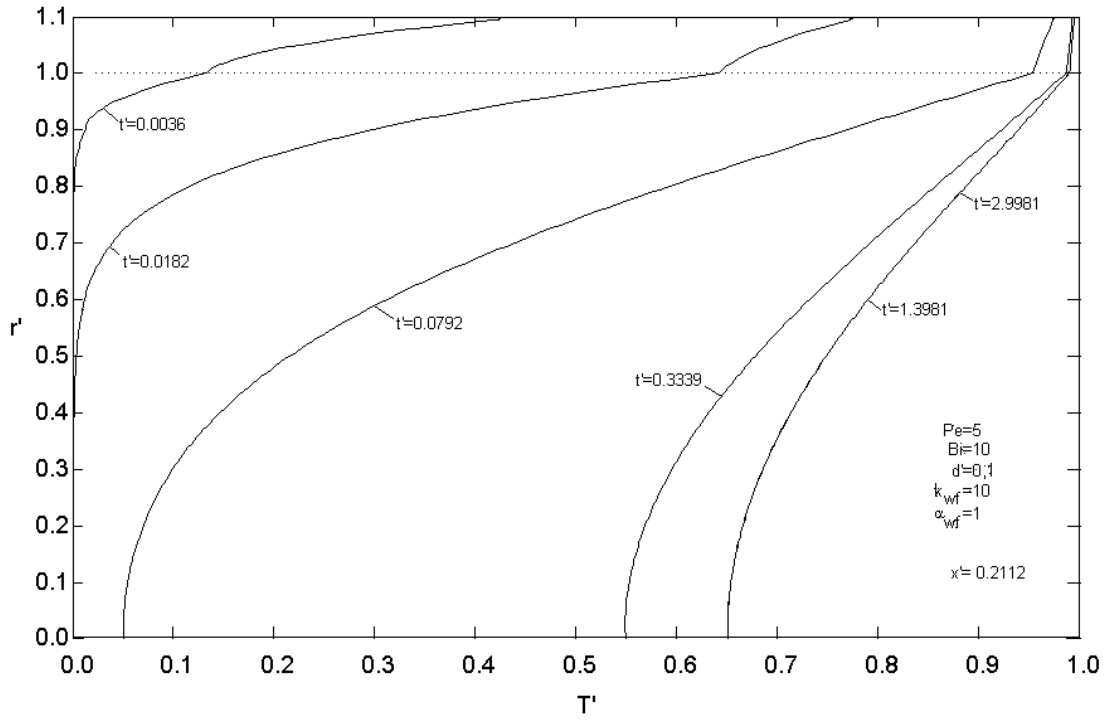
Şekil 5. Yığık sıcaklık aksenal dağılımının zamana göre değişimi.

Sıcaklık profilleri, beklendiği gibi, dış yüzey için arayüzeye göre ve arayüzey için de yığık sıcaklığa göre daha hızlı gelişmektedir. Her üç sıcaklık için eğriler sürekli rejimde ve gelişmiş bölgede asimptotik değerleri olan 1'e ulaşmaktadırlar.

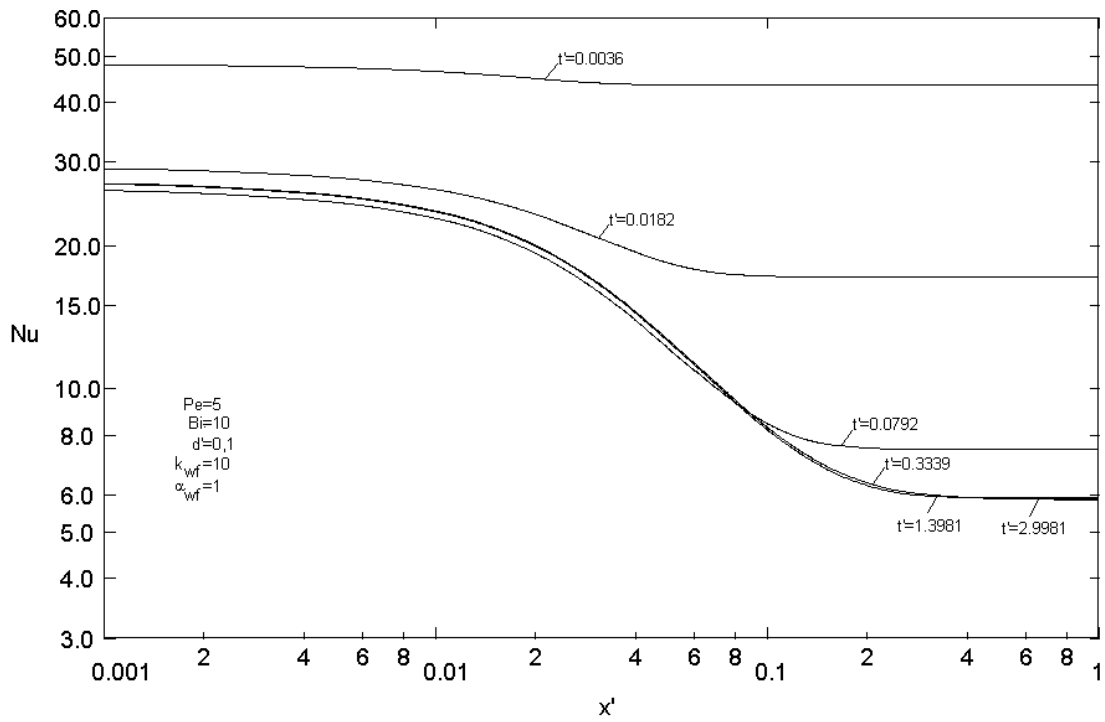
Şekil 6'da ısı gelişme bölgesi içinde, $x' = 0.2112$ aksenal konumunda, radyal yönde sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, başlangıçta cidar tarafında sıcaklıklar akışkan tarafına nazaran daha hızlı artmaktadır. Daha sonraları cidar sıcaklıklarındaki artış hızı azalırken akışkan sıcaklığındaki artış hızı artmaktadır.

Şekil 7'de yerel Nusselt sayısının zamana göre değişimi verilmiştir. Nusselt sayısının ilk zamanlarda borunun girişinde belirli bir değerden başlayarak azaldığı ve bir değerde sabit kaldığı görülmektedir. Zamanın ilerlemesi ile tam gelişmiş bölgede Nusselt sayısı azalmakta ve sürekli rejimde 5.8 civarında sabit kalmaktadır. Biot sayısının çok büyük değerleri için yapılan denemelerde ise, tam gelişmiş bölgedeki Nusselt sayısının değeri 5.78 bulunmuştur. Biot sayısının çok büyük olması, borunun dış yüzeyinde sabit sıcaklık sınır şartına karşılık gelmektedir.

Literatürde, dış yüzeyde taşınım sınır şartı ve boru içinde üniform hız dağılımı için, analitik olarak elde edilmiş bir tam gelişmiş bölge Nusselt sayısı değeri bulunmamaktadır. Ancak, bu çalışmada Biot sayısının 10 olarak alınması ile dış yüzeyde taşınım direnci küçüldüğünden, dış yüzeyde sabit yüzey sıcaklığı sınır şartına yaklaşılmıştır. Dairesel bir borudaki laminar, üniform hızlı akışta, sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında tam gelişmiş bölgedeki Nusselt sayısının değerinin 5.783 olduğu literatürde belirtilmektedir [1, 3, 11, 12]. Bu durum Graetz üniform-hız çözümü olarak bilinir [1, 3]. Bu çalışmada üniform akış için elde edilen tam gelişmiş bölge Nusselt sayısı değerinin (5.80), literatürde belirtilen değer (5.783) ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Radyal sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi ($x' = 0.2112$).



Şekil 7. Yerel Nusselt sayısı aksenal dağılımının zamana göre değişimi.

5. Sonuç

Dairesel bir borunun ısı giriş bölgesinde üniform akışlı, geçici rejim birleşik ısı transferi problemi, iki boyutlu cidar ve akışkan aksel iletimi dikkate alınarak incelenmiştir. Problem, yarı sonsuz bir boruda, çevre akışkanı sıcaklığında meydana gelen ani değişim sınır şartında, sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Kullanılan sayısal yöntem, problemin çözümü için basit ve hızlı bir çözüm imkanı sunmaktadır.

Borunun giriş bölgesinde arayüzey ısı akısı değerleri, cidardaki hızlı radyal iletim nedeni ile başlangıçta hızla artmakta ve kısa bir mesafede sabit bir değere ulaşmaktadır. İlerleyen zamanlarda ise taşınımın etkisini arttırması ile, ısı akısı değerleri hem ortalama olarak azalmakta ve hem de eğrilerdeki düzgünlük bozularak bir maksimum değere eriştikten sonra akış yönünde azalmaktadır. Bu eğilim sistem sürekli rejime ulaşıncaya kadar devam etmektedir.

Sıcaklık profilleri dış yüzey için ara yüzeye göre ve ara yüzey için de yığık sıcaklığa göre daha hızlı gelişmektedir. Her üç sıcaklık için eğriler sürekli rejimde ve gelişmiş bölgede asimptotik değerleri olan 1'e ulaşmaktadırlar.

Tam gelişmiş bölge Nusselt sayısı değerinin literatür ile uyumlu olması nedeniyle, problemin çözümünde kullanılan formülasyonun, sayısal çözüm yönteminin ve geliştirilen bilgisayar programının yeteri kadar hassas sonuç verdiği söylenebilir. Bu yöntemin, geliştirilmiş analitik yöntemlere nazaran daha basit olması ve doğru sonuçlar vermesi benzer problemler için de güvenilir bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir.

Simgeler

Bi Biot sayısı

c_p	sabit basınçta özgül ısı
d	boru cidar kalınlığı
$ Fo $	Fourier sayısı
$ Gz $	Graetz sayısı
$ h $	ısı taşınım katsayısı
$ k $	ısı iletkenlik katsayısı
$ Nu $	Nusselt sayısı
$ Pe $	Peclet sayısı
$ q $	ısı akısı
$ r $	radyal koordinat
$ t $	zaman
$ T $	sıcaklık
$ T_0 $	sistemin başlangıç sıcaklığı
$ T_1 $	çevre akışkanı sıcaklığı
$ u $	eksenel hız
$ u_0 $	akışkanın giriş hızı
$ x $	eksenel koordinat
$ \alpha $	ısı yayılım katsayısı
$ \rho $	yoğunluk

Alt İndisler

$ b $	yığık
$ f $	akışkan
$ i $	iç yüzey

- o* dış yüzey
- w* cidar
- wf* cidar-akışkan oranı
- wi* cidar-akışkan arayüzeyi
- wo* cidar dış yüzeyi

Üst İndisler

- ' Boyutsuz

Kaynaklar

- [1] Kays WM. Numerical solutions for laminar-flow heat transfer in circular tubes. Trans. ASME 1955; 77: 1265-1274.
- [2] McMordie RK, Emery AF. A numerical solution for laminar-flow heat transfer in circular tubes with axial conduction and developing thermal and velocity fields. Journal of Heat Transfer Trans. ASME 1967; 89(1): 11-16.
- [3] Kakaç S, Yener Y. Convective Heat Transfer. CRC Pres Inc., Second Edition; 1994.
- [4] Barletta A, Zanchini E. Forced convection in the thermal entrance region of a circular duct with slug flow and viscous dissipation. Int. J. of Heat Mass Transfer 1997; 40(5): 1181-1190.
- [5] Shah RK, Bhatti MS. Laminar Convective Heat Transfer in Ducts: In Handbook of Single Phase Convective Heat Transfer, edited by Kakaç S, Shah RK, and Aung W. Wiley; New York, 1987.
- [6] Bejan A. Convection Heat Transfer. Chapters 1 and 3, New York: Wiley; 1984.

- [7] Javeri V. Simultaneous development of the laminar velocity and temperature fields in a circular duct for the temperature boundary condition of the third kind. *Int. J. of Heat Mass Transfer* 1976; 19(8): 943-949.
- [8] Tyagi VP, Nigam KM. On closed-form analytical solution for circular duct, thermally developing slug flow under mixed boundary condition. *Int. J. of Heat Mass Transfer* 1975, 18(11): 1253-1256.
- [9] Golos S. Theoretical investigation of the thermal entrance region in steady, axially symmetrical slug flow with boundary conditions. *Int. J. of Heat Mass Transfer* 1970, 13(11): 1715-1725.
- [10] Vick B, Özisik MN and Ullrich DF. Effects of axial conduction in laminar tube flow with convective boundaries. *J. of the Franklin Institute* 1983; 316: 159-173.
- [11] Soliman HM. Analysis of low-peclet heat transfer during slug flow in tubes with axial wall conduction. *Journal of Heat Transfer Trans. ASME* 1984; 106: 782-788.
- [12] Schneider PJ. Effects of axial fluid conduction on heat transfer in the entrance region of parallel plates and tubes. *Journal of Heat Transfer Trans. ASME* 1957; 79: 765-773.
- [13] Lee SL, Hwang GJ. Finite element solution of low peclet number fluid flow in a round pipe with the cauchy boundary condition. *The Canadian J. of Chem. Eng.* 1981; 59: 760-765.
- [14] Campo A, Auguste JC. Axial conduction in laminar pipe flows with nonlinear wall heat fluxes. *Int. J. of Heat Mass Transfer* 1978; 30(21): 1597-1607.
- [15] Darıcı S. Kalın cidarlı borularda eşzamanlı gelişen laminar akışta geçici rejim birleşik ısı transferi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

- [16] Darıcı S, Bilir Ş ve Ateş A. Kalın cidarlı borularda eşzamanlı gelişen laminar akışta geçici rejim birleşik ısı transferi. Ulibtk'05 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı 2005; 2: 714-722.
- [17] Bilir Ş. Numerical solution of graetz problem with axial conduction. Numerical Heat Tr. 1992; 21: 493-500.
- [18] Patankar SV. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Co.; 1980.