



## BORULARDA ZAMANLA PERİYODİK OLARAK DEĞİŞEN SINIR ŞARTI İLE GEÇİCİ REJİM ISI TRANSFERİ

Aziz H. ALTUN\*, Ali ATEŞ\*\*, Ulaş ATMACA\*\*, Saim KOÇAK\*\*, Şefik BİLİR\*\*

\*Selçuk Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, 42031 Konya, ahaltun@selcuk.edu.tr

\*\*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 42031 Konya, sbilir@selcuk.edu.tr, uatmaca@selcuk.edu.tr, skocak@selcuk.edu.tr

\*\*\*Selçuk Üniversitesi, Ilgın Meslek Yüksekokulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, 42031 Konya, aates@selcuk.edu.tr

(Geliş Tarihi: 16.08.2018, Kabul Tarihi: 07.06.2018)

**Özet:** Borularda ısıl gelişme bölgesi geçici rejim ısı transferi, zamanla periyodik olarak değişen cidar dış yüzey sıcaklığı sınır şartında incelenmiştir. Problem, iki bölgeli bir boruda, hidrodinamik olarak gelişmiş laminar akış için, eksenel akışkan iletimi dikkate alınarak ele alınmış ve sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Peclet sayısı ve açısal frekansın ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan akışkan eksenel iletimi nedeniyle borunun üst akış bölgesine, akışa ters yönde önemli ölçüde ısı transfer edildiği ve bunun akışkanın borunun ısıtılan alt akış bölgesine gelmeden önce ön ısıtılmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca alt akış bölgesi dış yüzey sıcaklığındaki periyodik değişime uygun olarak, tüm ısı transferi karakteristiklerinin de, ön ısıtma ve tam gelişmiş bölge de dahil olmak üzere, tüm eksenel konumlarda zamanla periyodik olarak değiştiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan eksenel iletimi, Zamanla periyodik olarak değişen sınır şartı, Geçici rejimde ısı transferi, Borularda laminar akış ısı transferi.

## TRANSIENT HEAT TRANSFER IN PIPES WITH TIME PERIODICALLY CHANGING BOUNDARY CONDITION

**Abstract:** Transient heat transfer in thermal entrance region of pipes with time periodically changing surface temperature is investigated. The problem is handled in a two-regional pipe for laminar, hydrodynamically developed flow by involving fluid axial conduction. The solution is made numerically by a finite-difference method. A parametric study is done to analyse the effects of Peclet number and angular frequency on heat transfer characteristics. The results show that, considerable amount of heat is diffused back towards the upstream region by axial fluid conduction, which causes preheating the fluid prior to the heated downstream region. The heat transfer characteristics, in all axial positions, including the preheated upstream and the fully developed region, are seen to change periodically in time, similar to the periodic change of the surface temperature in the downstream region.

**Key Words:** Fluid axial conduction, Time periodically changing boundary conduction, Transient heat transfer, Laminar flow heat transfer in pipe.

### SEMBOLLER

$a$	Ayrıklaştırılmış denklem katsayısı
$c_p$	Özgül ısı [ $kJ/(kgK)$ ]
$ Fo$	Fourier sayısı [ $= \tau\alpha/r^2$ ]
GCI	Ağ yakınsama indeksi
$Gz$	Graetz sayısı [ $= 2rPe/x$ ]
$k$	Isı iletkenlik katsayısı [ $W/(mK)$ ]
$Nu$	Nusselt sayısı [ $= rh/k$ ]
$Pe$	Peclet sayısı [ $= 2ru/\alpha$ ]
$q$	ısı akısı [ $W/m^2$ ]
$r$	radyal koordinat, yarıçap [ $m$ ]
$t$	zaman [ $s$ ]
$T$	sıcaklık [ $K$ ]
$T_o$	sistemin başlangıç sıcaklığı [ $K$ ]

$u$	eksenel hız [ $m/s$ ]
$x$	eksenel koordinat [ $m$ ]
$\alpha$	ısı yayılım katsayısı [ $= k\rho/c_p$ ]
$\delta r$	radyal konum farkı
$\delta x$	eksenel konum farkı
$\Delta r$	radyal basamak uzunluğu
$\Delta t$	zaman aralığı
$\Delta T$	periyodik sıcaklık değişim genliği
$\Delta x$	eksenel basamak uzunluğu
$\varepsilon$	bağıl hata
$\rho$	yoğunluk [ $m^3/kg$ ]
$\omega$	açısal frekans [ $1/s$ ]
$\Omega$	boyutsuz açısal frekans [ $= r\omega/\alpha$ ]

## Alt İndisler

$b$	yığık
$f$	akışkan
$i, j$	$i, j$ düğüm noktasında
$m$	ortalama
$o$	dış yüzey
$w$	cidar

## Üst İndisler

'	boyutsuz
$0$	önceki zaman adımı

## GİRİŞ

Sıcaklığın veya ısı akısının zamanla periyodik olarak değiştiği sınır şartı problemleri, yeryüzü sıcaklığının yıllık veya günlük değişimi, binaların, güneş enerjili sistemlerin gün boyunca ısınma ve gece boyunca soğuması ile ortaya çıkan sıcaklık değişimi, termostatik kontrollü elektrikli ısıtma sistemleri, nükleer yakıt çubukları, elektronik cihazların soğutulması ve kütle debisi zamanla değişen ısı değiştiricileri gibi birçok uygulamada görülmektedir. Bu problemlerin çözümü oldukça karmaşık ve zor olmasına rağmen birçok araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Boru ve kanal içi akışlarda geçici rejimde ısı transferi analizi, elektronik işlemcilerin soğutulması performansının artırılmasında ve ısı değiştiricilerinin ilk çalıştırma ve durdurma esnasında veya çalışma şartlarındaki herhangi bir değişiklik halinde kontrolü açısından önemlidir. Bu tür problemleri birçok araştırmacı akışkan eksenel iletimini ihmal ederek incelemişlerdir. Ancak düşük Peclet sayılı akışlarda, akışkan eksenel iletimi akışkanın borunun ısıtılan bölgesine gelmeden önce ön ısınmasına neden olduğundan bu tür problemler iki bölgeli borularda ele alınmalıdır.

Literatürde laminar akışta zorlanmış taşınım ile ilgili geniş bir kaynak araştırması Shah ve London (1978) tarafından yapılmıştır. Siegel (1963), çalışmada paralel plakalar arasında zorlanmış taşınım konumun ve zamanın sinüzoidal fonksiyonu olarak cidardan ısıtılan akışı incelemiştir. Giriş sıcaklığının zamanla sinüzoidal olarak değiştiği bir problemi ele alan Sparrow ve Farias (1968), paralel plakalı kanallarda geçici rejim ısı transferini incelemişlerdir. Fourcher ve Mansouri (1997), yine paralel plakalı bir kanalda, zamanla değişen giriş sıcaklığında birleşik ısı transferini ele almışlar ve dış yüzeyde taşınım ve cidar ısı direncinin etkilerini incelemişlerdir. Dış yüzey ısı akısı zamanla periyodik olarak değişen borularda ısı transferini inceleyen Pearlstein ve Dempsey (1988), çalışmalarında düşük Peclet sayılı, hidrodinamik olarak gelişmiş akışı araştırmışlardır. Eksenel konumla ve zamanla iç ısı üretimi değişen paralel plakalı bir kanalda, birleşik ısı transferini inceleyen Sucec (2002), yığık sıcaklık, cidar sıcaklığı ve yüzey ısı akısını zamana ve konuma bağlı olarak belirlemiştir. Barletta ve Zanchini (2003), eğimli

bir paralel plakalı kanalda, plakalardan birinde periyodik olarak değişen, diğerinde ise sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı altında laminar akışta, karışık taşınımı incelemişlerdir. Barletta ve Rossi di Schio (2004), düşey bir boruda dış yüzey sıcaklığı zamanla periyodik olarak değişen sınır şartı ile karışık taşınımı incelemişlerdir. Barletta ve ark. (2008), açık denizlerde petrol taşımacılığında kullanılan borularda çevre ile olan ısı transferini incelemişlerdir. Conti ve ark. (2012) mikro-kanallarda birleşik ısı transferi problemini ısı akısının zamanla periyodik ve ani olarak değiştiği durumlar için incelemişlerdir. Son yıllarda yaptıkları çalışmada Altun ve ark. (2016), kalın cidarlı borularda zamanla periyodik olarak değişen dış yüzey sıcaklığı sınır şartı altında, geçici rejim birleşik ısı transferini incelemişlerdir.

Konuma bağlı periyodik olarak değişen sınır şartlarının ele alındığı problemler de birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Hsu (1965), ince cidarlı bir boruda ısı transferini, dış yüzeyde eksenel konuma göre periyodik olarak değişen ısı akısı sınır şartında laminar akışta incelemiştir. Yine ince cidarlı bir borunun dış yüzeyinde konuma göre sinüzoidal olarak değişen sıcaklık ve ısı akısı şartı için ısı transferi problemini Patankar ve ark. (1978) incelemişlerdir. Benzer bir problemi Quaresma ve Cotta (1994), dış yüzeyde ısı akısı sınır şartının eksenel yönde sinüzoidal ve üssel olarak değişmesi durumunda analitik olarak incelemişler ve ısı giriş bölgesi için gerçekleştirdikleri çözümü önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Barletta ve Zanchini (1995), ince cidarlı bir boruda, laminar akış ve dış yüzeyde sinüzoidal olarak periyodik değişen ısı akısı şartlarında, eksenel iletim ve viskoz sönüm etkilerini ihmal ederek sıcaklık dağılımını ve yerel Nusselt sayılarını ısı olarak tam gelişmiş bölge için analitik olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki iki farklı çalışmada Barletta ve Rossi di Schio (1999, 2000), aynı problemi viskoz sönüm ve eksenel iletim etkilerini ayrı ayrı dikkate alarak incelemişler ve önceki çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Zniber ve ark. (2005), iki boyutlu bir kanalda, dış yüzeyden eksenel yönde sinüzoidal ısı akısına maruz kalan, laminar magnetohidrodinamik (MHD) akışta ısı transferini analitik olarak incelemişlerdir. Barletta ve Magyari (2007), ince cidarlı borularda ısı giriş bölgesinde viskoz sönümün zorlanmış taşınım etkisini incelemişler ve dış yüzeyde iki farklı sınır şartı için Brinkman ve yerel Nusselt sayısı dağılımlarını elde etmişlerdir.

Barletta ve ark. (2008), kalın cidarlı bir kanalın dış yüzey sıcaklığında eksenel yönde sinüzoidal olarak değişen sınır şartı altında, sürekli rejimde, laminar akış için birleşik ısı transferini incelemişlerdir. Sayısal ve analitik çözüm sonuçlarının birbiri ile uyum sağladığını göstermişler ve literatürdeki sonuçlarla da kıyaslamışlardır. Barletta ve ark. (2009), bir önceki çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirdikleri çalışmada birleşik ısı transferini cidar eksenel iletiminin etkisini de dikkate alarak incelemişlerdir. Aydın ve ark. (2014), bir borunun dış yüzeyinde eksenel yönde sinüzoidal olarak periyodik değişen ısı akısı şartında,

birleşik ısı transferini sonlu hacimler yöntemiyle incelemişlerdir. Aydın ve Avcı (2015), mikro borularda sürekli, laminer, kaygan akışta, eksenal yönde sinüzoidal olarak periyodik değişen ısı akısı şartında, ısı transferini sayısal olarak incelemişler ve genliğin artması ile ortalama Nusselt sayısının azaldığını göstermişlerdir. Zhu ve ark (2016), borularda tam gelişmiş türbülanslı akışta üniform olmayan ısı akısı sınır şartının yerel ve ortalama Nusselt sayısına etkilerini sayısal olarak incelemişler ve üniform olmayan ısı akısı şartında ortalama Nusselt sayısının bir miktar azaldığını göstermişlerdir.

Bu çalışmada, ince cidarlı borularda, laminer akış ısı gelişme bölgesi geçici rejim ısı transferi, zamanla periyodik olarak değişen yüzey sıcaklığı sınır şartı altında, eksenal akışkan iletimi dikkate alınarak incelenmiştir.

### PROBLEMİN TANIMI

Ele alınan problemin şematik diyagramı ve koordinat sistemi Şekil 1'de verilmiştir. Akış iki bölge ve boru her iki yönde sonsuz uzunluktadır. Üst akış bölgesinin uzağında ( $x=-\infty$ ) akışkan üniform bir  $T_o$  sıcaklığı ile boruya girmektedir ve bu tüm sistemin başlangıç sıcaklığıdır. Üst akış bölgesinde akış hidrodinamik olarak gelişmektedir. Zamanın başlangıcında, ( $t=0$ ), borunun alt akış bölgesi, zamanla periyodik olarak

Yukarıda tanımlanan problem için boyutsuz formda enerji denklemi, başlangıç ve sınır şartları aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

Enerji denklemi

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

Başlangıç ve sınır şartları

$$t' = 0 \text{ da } T' = 0 \quad (1b)$$

$$x' = -\infty \text{ da } T' = 0 \quad (1c)$$

$$x' = \infty \text{ da } \frac{\partial T'}{\partial x'} = 0 \quad (1d)$$

$$r' = 0 \text{ da } \frac{\partial T'}{\partial r'} = 0 \quad (1e)$$

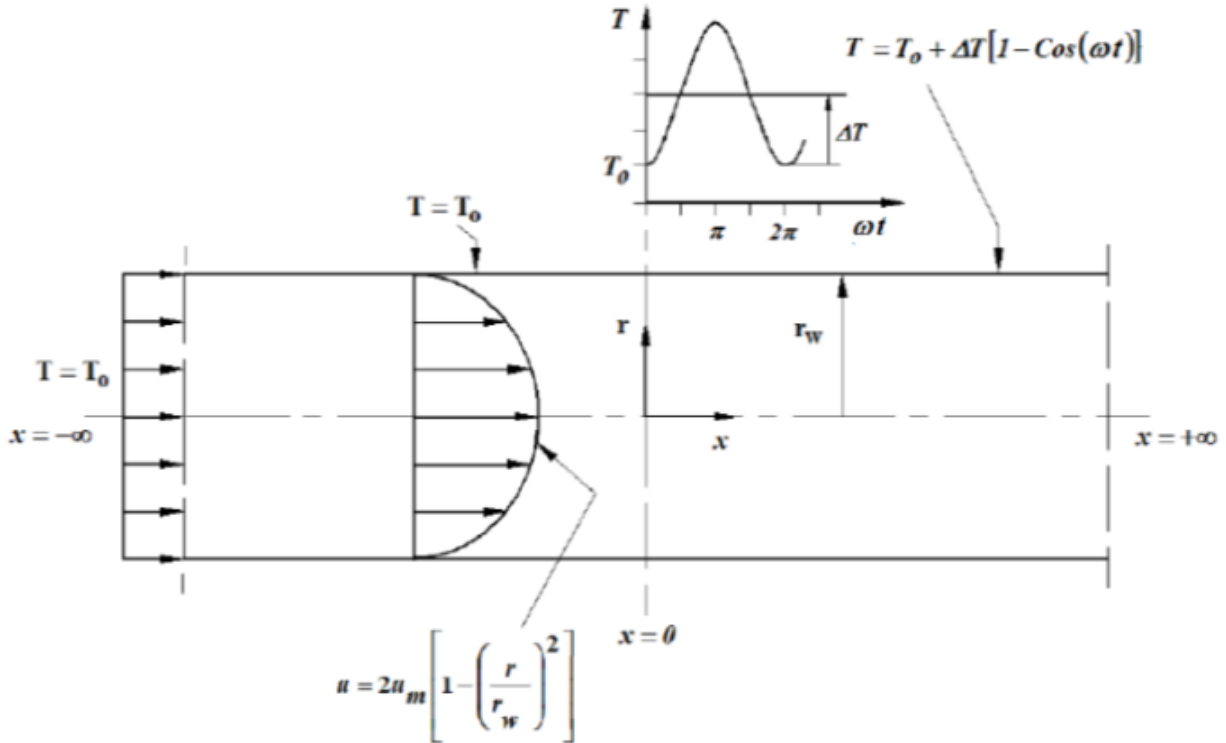
$$r' = 1 \text{ de } x' < 0 \text{ için } T' = 0 \quad (1f)$$

$$r' = 1 \text{ de } x' \geq 0 \text{ için } T' = [1 - \text{Cos}(\Omega t')] \quad (1g)$$

Boyutsuz parametreler şu şekilde tanımlanmıştır;

$$T' = \frac{T - T_o}{\Delta T}, \quad x' = \frac{x}{r_w Pe} \equiv \frac{z}{Gz}, \quad r' = \frac{r}{r_w}, \quad t' = \frac{t \alpha}{r_w^2} \equiv Fo,$$

$$Pe = \frac{2r_w u_m \rho c_p}{k}, \quad \Omega = \frac{r_w^2 \omega}{\alpha}$$



Şekil 1. Problemin şematik resmi ve koordinat sistemi

değişen bir yüzey sıcaklığı sınır şartı ile ısıtılmaya başlanmaktadır. Akışkan ve cidarın tüm fiziksel özellikleri sabit kabul edilmiş ve viskoz sönüm ihmal edilmiştir.

Yığık sıcaklık, yüzey ısı akısı ve Nusselt sayısı da boyutsuz formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$T'_b = 4 \int_0^1 r' (1-r'^2) T' dr' \quad (2)$$

$$q'_w = - \left( \frac{\partial T'_f}{\partial r'} \right)_{r'=1} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{-2q'_w}{T'_w - T'_b} \quad (4)$$

## SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Denklem (1a)'daki iletim terimleri merkezi fark profili ile, taşınım terimi bir kesin çözüm profili ile (Bilir 1992), zamana bağlı terim ise tam kapalı (implicit) yöntem ile ayrıklaştırılmıştır. Taşınım terimi için kullanılan ayrıklaştırma yöntemi, Patankar'ın (1980) kesin çözüm profili olarak adlandırdığı genel profilin, iki boyutlu silindirik koordinat sistemleri için uyarlanan bir versiyonu olarak nitelendirilebilir. Ayrıklaştırılmış enerji denklemi sınırda olmayan bir düğüm noktası için aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$a_{i,j} T'_{i,j} = a_{i+1,j} T'_{i+1,j} + a_{i-1,j} T'_{i-1,j} + a_{i,j+1} T'_{i,j+1} + a_{i,j-1} T'_{i,j-1} + a_{i,j}^0 T'^0_{i,j} \quad (5a)$$

Burada;

$$a_{i+1,j} = \frac{(r'_j - r_j'^3)}{\exp[Pe^2(1-r_j'^2)(\delta x')_{i+1}] - 1} (\Delta r')_j \quad (5b)$$

$$a_{i-1,j} = \frac{(r'_j - r_j'^3) \exp[Pe^2(1-r_j'^2)(\delta x')_{i-1}] (\Delta r')_j}{\exp[Pe^2(1-r_j'^2)(\delta x')_{i-1}] - 1}$$

(5c)

(5c)

$$a_{i,j+1} = \frac{r'_{j+1} (\Delta x')_i}{(\delta r')_{j+1}} \quad (5d)$$

$$a_{i,j-1} = \frac{r'_{j-1} (\Delta x')_i}{(\delta r')_{j-1}} \quad (5e)$$

$$a_{i,j}^0 = \frac{r'_j (\Delta x')_i (\Delta r')_j}{\Delta r'} \quad (5f)$$

$$a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1} + a_{i,j}^0 \quad (5g)$$

Bu ayrıklaştırma yöntemi daha önceki bazı çalışmalarda da [Bilir (1992) , (1995) , (2002) , Bilir ve Ateş (2003) , Ateş ve ark. (2010) ] kullanılmış ve özellikle eksenel iletimin önemli olduğu düşük Peclet sayılı akışlarda hızlı ve güvenilir sonuç verdiği görülmüştür.

Eksenel simetri nedeni ile hesaplama bölgesi olarak, radyal yönde boru eksenine ile yüzey arasında sınırlanan alan, eksenel yönde ise benzer çalışmaların sonuçlarından tahmin edilerek hem üst akış hem de alt akış bölgeleri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Radyal yönde üniform, eksenel yönde ise gerdirmeli bir ağ sistemi oluşturulmuştur. Borunun ısıtılmaya başlandığı kesitin ( $x=0$ ) iki tarafında ilk eksenel basamak uzunluğu 0.001

olarak alınmış ve hem üst akış hem de alt akış bölgelerine doğru uzunluklar bir öncekinin 1.4 katı artırılarak doğrusal olarak gerdirilmiştir. Bu şekilde ısıtmanın başlandığı kesit civarında daha sık düğüm noktaları oluşturularak hassasiyet artırılmıştır. Yapılan deneme çözümleri sonucunda, hesaplama bölgesi 56X16'lık bir ağ yapısı ile karakterize edilmiştir.

Öngörülen ağ sistemi için ayrıca, Roache (1994) tarafından önerilen düğüm noktası sayısından bağımsızlık çalışması (GCI analizi) yapılmıştır. Bu analiz yöntemi sonlu elemanlar, sonlu hacimler ve sonlu farklar çözümlerinde bu amaçla uygulanabilen en güvenilir olan ve en yaygın olarak tercih edilen yöntemdir. GCI analizi için düğüm noktaları arası mesafelerin (kontrol hacim basamak uzunlukları) oranı 2 olarak belirlenmiştir. Böylece çözümler için kullanılan ağ sistemi orta sıklıkta kabul edilerek yoğun ağ sisteminde kontrol hacim sayısı iki katına çıkartılmış, seyrek ağ sisteminde ise yarıya düşürülmüştür.  $Pe=5$  ve boyutsuz açısal frekansın,  $\Omega=1$  olduğu durumda, ısıtmanın başladığı kesitte ( $x'=0$ ), sürekli periyodik rejimde ( $t' \geq 7.85$ ) yığık sıcaklık ( $T'_b$ ) için yoğun, orta ve seyrek ağ sistemlerinde elde edilen değerler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, özellikle orta ve yoğun ağ sistemlerinde karşılaştırmalı bağıl hata ( $\epsilon$ ) ve GCI oranları değerlerinin kabul edilebilir ölçüde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla  $56 \times 16$  lık ağ yapısı uygundur denebilir.

**Tablo 1** Yığık sıcaklığın ( $T'_b$ ) farklı ağ sistemlerine göre değerleri

Sürekli periyodik rejimde, $x' = 0$ , $t' = 7.854$	$T'_b$
$Pe=5$ ve $\Omega=1$	
Seyrek ağ (28×8)	0.22414
Orta sıklıkta ağ (56×16)	0.37104
Yoğun ağ (112×32)	0.37109
$\epsilon$ seyrek-orta	39 %
$\epsilon$ orta-yoğun	0.013 %
GCI <sub>seyrek-orta</sub>	16.8 %
GCI <sub>orta-yoğun</sub>	0.05 %

Çözümlerde zaman adımı, dış yüzeydeki periyodik sıcaklık değişimine uyum sağlamak için  $\pi/1800$  olarak alınmıştır. Periyodik sınır şartı nedeniyle ısı transferi karakteristiklerindeki değişim hem hızlı hem de sürekli olduğundan, çözüm doğruluğunu ve hassasiyeti arttırmak için zaman adımı küçük ve sabit alınmıştır.

Yine çözümlerin zaman adımından bağımsız olduğunu belirlemek için, zaman adımı önce  $\pi/900$  daha sonra  $\pi/3600$  alınarak aynı parametre değerleri için örnek çözümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.  $\pi/900$  ve  $\pi/3600$  zaman adımlarında elde edilen yığık sıcaklık değerlerinin,  $\pi/1800$  için elde edilen değerleri arasında hemen hemen bir fark olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla çözümün zaman adımından da bağımsız olduğu söylenebilir.

**Tablo 2** Yığık sıcaklığın ( $T'_b$ ) farklı zaman adımlarına göre değerleri

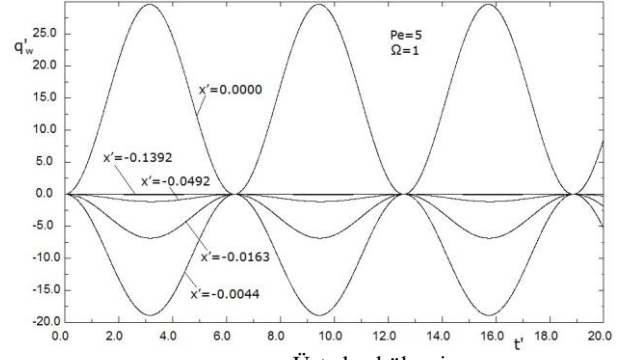
Sürekli periyodik rejimde, $x' = 0, t' = 7.854$	$T'_b$
$Pe=5, \Omega=1$	
Zaman adımı; $\pi/900$	0.14002
Zaman adımı; $\pi/1800$	0.14103
Zaman adımı ; $\pi/3600$	0.14103

Sıcaklık dağılımı Gauss-Seidel iterasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Her zaman adımındaki sıcaklık dağılımı Patankar'ın (1980) çizgi-çizgi (line by line) yöntemiyle belirlenmiştir. Denemeler esnasında düğüm noktaları dış yüzeyden eksene doğru taranmış ve akış yönünde süpürülmüştür. Çözümlerde hassasiyet limiti  $10^{-7}$  olarak alınmıştır. Çözümlerde tüm düğüm noktalarındaki sıcaklığın bir periyot sonraki farkı  $10^{-4}$  ün altına düştüğü zaman da sistem sürekli periyodik rejime ulaşmış kabul edilmiştir. Deneme sayısı ve zaman adımı sayısı parametre değerlerine bağlı olmakla beraber genellikle bir zaman dilimi için ortalama 30-100 deneme ve toplam olarak ortalama  $9 \cdot 10^5$  denemede sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem ilave bazı doğruluk testleri ile de kontrol edilmiştir. Farklı çözümlerde ağ yapısı, tarama ve süpürme yönleri, hassasiyet limiti ve zaman adımları değiştirilerek elde edilen sonuçlarda önemli bir fark gözlenmemiştir. Yığık sıcaklıkların hesaplanması için kullanılan, denklem (2) deki integral, Simpson sayısal integrasyon yöntemi, Hildebrand (1976), ile hesaplanmıştır.

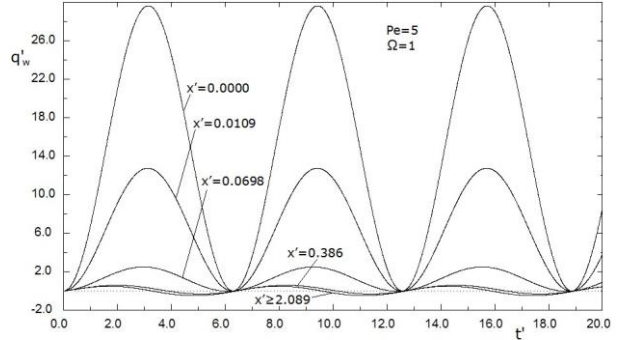
## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Ele alınan problem Peclet sayısı,  $Pe$  ve boyutsuz açılal frekansa,  $\Omega$  bağlıdır. Çözümler bu parametrelerin farklı kombinasyonları için  $Pe=1, 5, \text{ ve } 20, \Omega=1, 60, 900$  ve  $3600$ , yapılmıştır.  $\Omega$  değerleri, sınır şartındaki değişim periyoduna uyum sağlaması için zaman adımının katları olarak alınmıştır. Peclet sayısı değerleri ise uygulamada söz konusu olabilecek ve akışkan aksenal iletiminin etkili olduğu seviyede seçilmiştir. Sonuçlar yüzey ısı akısı ve akışkan yığık sıcaklıkları ile ifade edilmiştir.

Şekil 2'de  $Pe=5$  ve  $\Omega=1$  için, yüzey ısı akısının farklı aksenal konumlarda zamana göre değişimi görülmektedir.  $Pe=5$  akışkan aksenal iletiminin etkili olduğu akış koşulları için ( $Pe < 20$ ) ortalama bir değerdir. Bu Peclet değeri, örnek olarak  $0.5$  mm çaplı bir mini kanalda, normal sıcaklıklarda su için yaklaşık  $0.002$  m/s, hava için yaklaşık  $0.25$  m/s ve  $300$  °C da sıvı sodyum için yaklaşık  $0.6$  m/s ortalama hız ile akışa karşılık gelmektedir. Bu şekil ve benzerleri sadeleştirme amacıyla iki parça halinde, üst akış ve alt akış bölgeleri için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 3'te ise aynı parametre değerleri için, aynı aksenal konumlarda akışkan yığık sıcaklığının zamana göre değişimleri verilmiştir. Şekilde karşılaştırma amacıyla yüzey sıcaklık değişimi de kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

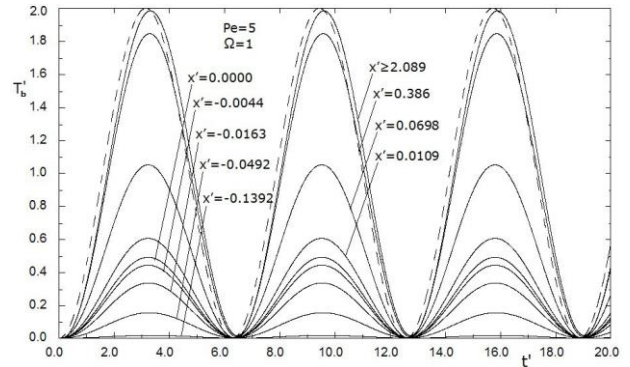


**a** Üst akış bölgesi



**b** Alt akış bölgesi

**Şekil 2.** Yüzey ısı akısının farklı aksenal konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=1$ ).



**Şekil 3.** Yığık sıcaklığın farklı aksenal konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=1$ )

Bu şekillerin birlikte incelenmesinden çıkarılabilecek ilk sonuç, akışkan aksenal iletimi nedeniyle borunun üst akış bölgesine, akışa ters yönde önemli ölçüde ısı transfer edildiği ve bunun akışkanın borunun ısıtılan alt akış bölgesine gelmeden önce ön ısıtılmasına neden olduğudur. Bunun yanında, ısı akısı ve yığık sıcaklık eğrilerinin, alt akış bölgesi dış yüzey sıcaklığındaki değişime uygun olarak, zamanla periyodik olarak değiştiği görülmektedir. Bu periyodik değişim tüm aksenal konumlar için, üst akış bölgesindeki ön ısıtma mesafesinin başlangıcından itibaren ısıl gelişme bölgesinin tamamında ve tam gelişmiş bölgede görülmektedir. Burada olduğu gibi küçük açılal frekans değerleri için periyot büyüdüğünden, sistem ikinci periyodun hemen başlangıcında ( $t'=7.854$ ) sürekli periyodik rejime girmiştir. Sürekli periyodik rejimde herhangi bir aksenal konum için ısı transferi karakteristiklerinin zamanla değişimi tüm periyotlarda aynı olmaktadır.

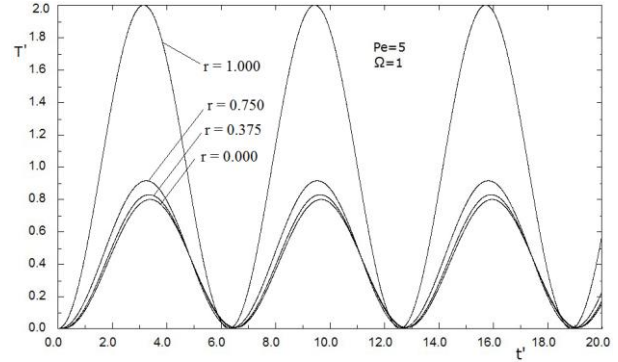
Üst akış bölgesi dış yüzey sıcaklığı, boru ısıtmaya başladıktan sonra da sistemin başlangıç sıcaklığı olan  $T_0$  da sabit tutulduğu için, akışkan aksel iletimi ile geriye doğru transfer edilen ısı kısmen dış yüzeyden kaybolmaktadır. Bu nedenle bu bölgede negatif ısı akısı değerleri görülmektedir. Negatif ısı akısı değerleri ve bu değerlerdeki değişim genliği akış yönünde artmaktadır.

Alt akış bölgesinde, borunun ısıtmaya başladığı kesitte, ısı akısı yönü aniden değişmekte, değerler pozitif olmakta ve en yüksek değerleri almaktadır. Ayrıca alt akış bölgesinde akış yönünde taşınımın etkisini artırmasıyla akışkan sıcaklığı yükselmekte ve ısı akısı değerleri ve değişim genliği azalmaya başlamaktadır. Isıl gelişme bölgesinin sonlarına doğru ve tam gelişmiş bölgede ise cidar ve yığık sıcaklıklardaki değişim hızı birbirine yakın olmakta ve dolayısıyla ısı akısı değerleri ve genlik iyice azalmaktadır. Herhangi bir periyotta, cidar sıcaklığındaki değişim akışkan tarafından daha erken başladığı için de, periyodun sıcaklık artışı sürecinde cidar sıcaklıkları daha yüksek olmakta ve pozitif ısı akısı değerleri görülmektedir. Sıcaklığın azalış sürecinde ise cidar sıcaklığından daha yüksek yığık sıcaklık değerleri negatif ısı akısına neden olmaktadır.

Tam gelişmiş bölgede, sürekli periyodik rejimde ara yüzey ısı akısı eğrileri ortalaması sıfır, genliği 0.5 olan bir değişim göstermekte ve cidardan akışkana net ısı transferi beklenildiği gibi sıfır olmaktadır. Yine tam gelişmiş bölgede, sürekli periyodik rejimde, yığık sıcaklık eğrilerinin ortalama değeri cidar sıcaklığı gibi 1.0 dır. Ancak cidar sıcaklığı değişim genliği 1.0 olmasına rağmen yığık sıcaklık için bu değer çok az düşüktür. Farklı aksel konumlardaki ısı akısı eğrileri arasında bir miktar faz farkı oluşmakta ve bu üst akış bölgesinde gerilere doğru gidildikçe ve alt akış bölgesinde tam gelişmiş bölgeye doğru yaklaşıldıkça daha belirgin hale gelmektedir.

Şekil 4 te aynı parametre değeri ve  $\Omega=1$  için, akışkan sıcaklığının farklı radyal konumlarda zamana göre değişimi, bir örnek olarak ısıtmanın başladığı kesitte ( $x'=0$ ), verilmiştir. Görüldüğü gibi tüm radyal konumlar için sıcaklık, yığık sıcaklıklarda olduğu gibi, cidar sıcaklığına uygun olarak periyodik bir değişim göstermektedir. Cidardan boru eksenine doğru gidildikçe sıcaklıklar ve sıcaklıklardaki değişim genliği de azalmaktadır. Ayrıca sıcaklık eğrileri arasında faz farkı görülmekte ve bu fark cidardan boru eksenine doğru gidildikçe artmaktadır.

Bu bölümde problem sonuçları, farklı açısal frekans değerleri için incelenecektir.  $\Omega < 1$  değerleri için ısı transferi karakteristiklerinin değişim eğilimi,  $\Omega=1$  için elde edilen sonuçlarla tümüyle aynı olmakta ve genlik değişmemektedir. Sadece  $\Omega$  küçüldükçe periyot büyümektedir. Bu nedenle küçük  $\Omega$  değerleri için sonuçlar verilmemiştir.  $\Omega=60$  a kadar olan boyutsuz açısal frekans değerleri için de  $\Omega=1$  ile benzer değişim eğiliminin sürdüğü, ancak  $\Omega$ 'nın 60 dan daha büyük

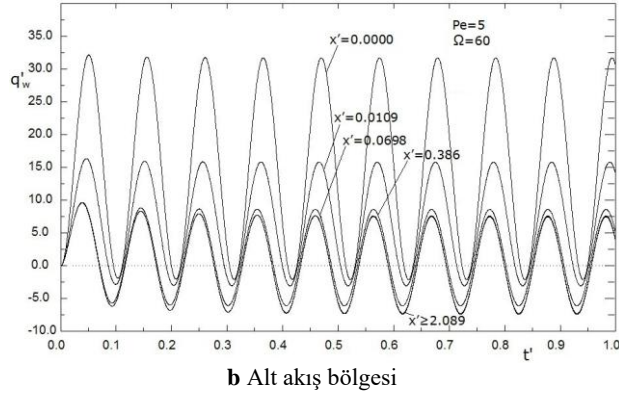
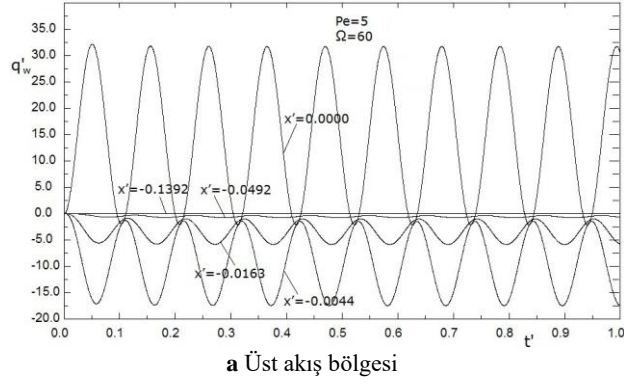


Şekil 4. Farklı radyal konumlarda akışkan sıcaklığının zamana göre değişimi ( $x'=0.000$ )

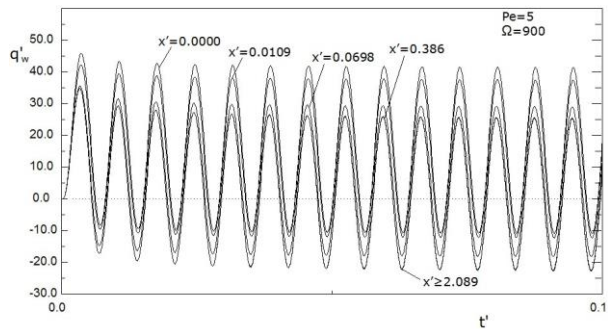
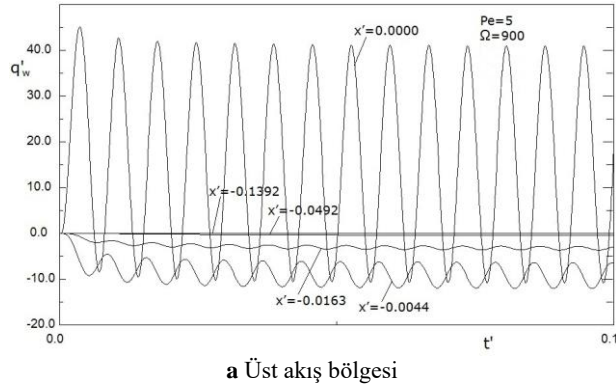
değerleri için eğrilerin karakteristiğinin değiştiği görülmüştür. Giriş bölümünde örnekleri verilen, sınır şartlarının periyodik olarak değiştiği ısı transferi uygulamalarında periyot nispeten büyük, dolayısıyla frekans değerleri küçük olmaktadır. İçten yanmalı motorların silindir cidarlarındaki sıcaklık dalgalanmaları, toprağa gömülü boruların yeryüzü ile ısı alışverişi, kan dokusu ile kan damarları arasında gerçekleşen ısı transferi, tünellerin soğutulması gibi örnekler de bunlara ilave edilebilir. Diğer taraftan, metallerin ve yarı iletkenlerin işlenmesi, lazerli ameliyat işlemleri, malzemelerin eritilmesi gibi yüksek hızlı darbeli lazer uygulamalarında ve yüksek hızlı süper iletken radyasyon detektörlerinde olduğu gibi çok yüksek frekans değerleri görülebilmektedir, Vedavaz ve ark. (1994).

Şekiller 5-7 de açısal frekansın 1'den büyük değerleri ve aynı Peclet sayısı ( $Pe=5$ ) için yüzey ısı akılarının farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi verilmiştir. Şekiller 8-10 da ise aynı parametre değerleri için yığık sıcaklıklarının değişimi gösterilmiştir.

Yüzey ısı akısı değerleri ve değişim genlikleri  $\Omega=3600$  e kadar açısal frekansın büyümesiyle artmaktadır.  $\Omega$ 'nın daha yüksek değerlerinde ise ısı akısı değerleri ve değişim genliklerinin hemen hemen değişmediği görülmüştür. Tüm aksel konumlar için periyodik ısı akısı eğrileri geçici rejimin başlangıç safhalarında önce bir maksimum değere yükselmekte daha sonra azalmaktadır. Ayrıca açısal frekans arttıkça bu maksimum değerler artmakta ancak değişim genliği sürekli azalmaktadır. Dolayısıyla açısal frekansın büyümesiyle eğrilerdeki bu farklılaşma daha belirginleşmekte ve sistemin geçici rejimden sürekli periyodik rejime geçiş süreci daha iyi görülebilmektedir. Sistem sürekli periyodik rejime belirli sayıdaki periyot sonrasında girmekte ve geçici rejimdeki periyot sayısı  $\Omega$  büyüdükçe artmaktadır. Geçici rejimde artan periyot sayısı nedeniyle Şekiller 6 ve 7, ısı transferi karakteristikleri eğrilerindeki büyük  $\Omega$  değerleri için ortaya çıkan farklılaşma eğilimini daha net görebilmek için geçici rejimin başlangıç safhaları için verilmiştir. Bu nedenle sürekli periyodik rejim sonuçları bu şekillerde görülmemektedir.



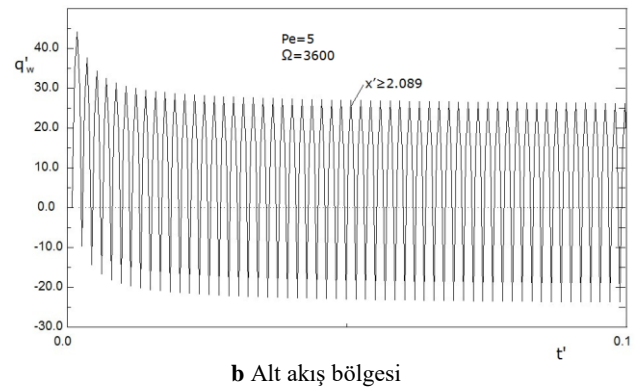
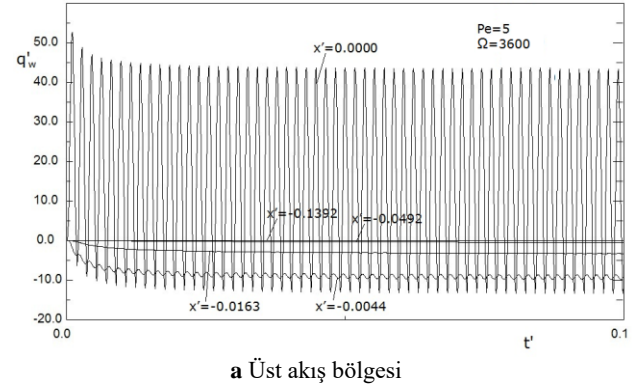
**Şekil 5.** Yüzey ısı akısının farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=60$ )



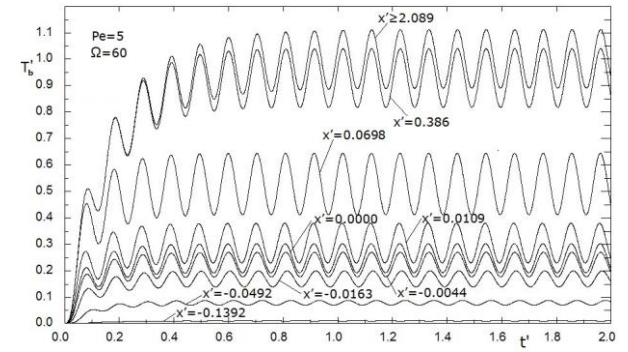
**Şekil 6.** Yüzey ısı akısının farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=900$ )

$\Omega$  nın 3600 den büyük değerleri için cidar sıcaklığının değişim periyodu çok küçülmekte ve sistemin ataleti bu değişimi algılayamamaktadır. Dolayısıyla yığık sıcaklık değişim genliği tümüyle yok olmakta ve sonuçlar, Şekil 10'da görüldüğü gibi, Bilir'in (2002) alt akış bölgesinde

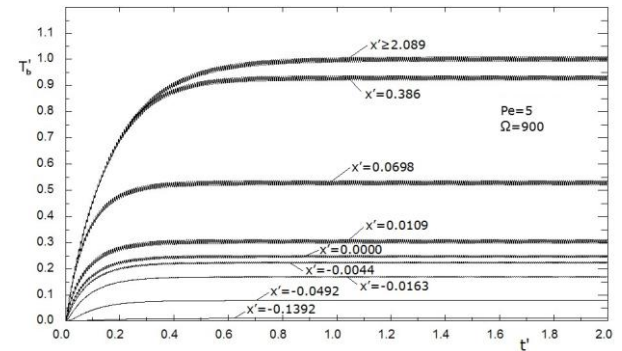
dış yüzey sıcaklığında aniden  $\Delta T$  kadar sabit sıcaklık artışı uygulanan benzer bir problemin sonuçları ile hemen hemen aynı olmaktadır.



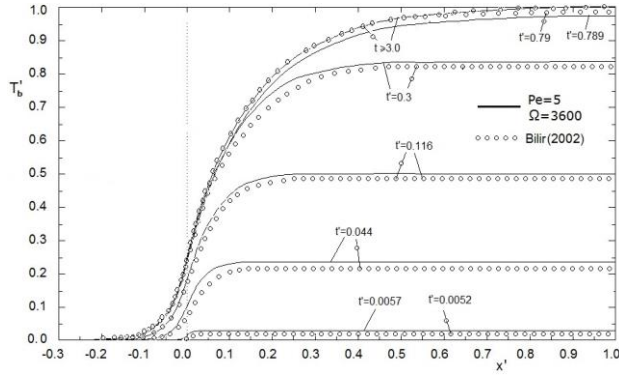
**Şekil 7.** Yüzey ısı akısının farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=3600$ )



**Şekil 8.** Yığık sıcaklığın farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=60$ )



**Şekil 9.** Yığık sıcaklığın farklı aksel konumlarda zamana göre değişimi ( $\Omega=900$ )



**Şekil 10.** Yığık sıcaklığın aksel konuma göre değişimi ( $\Omega=3600$ )

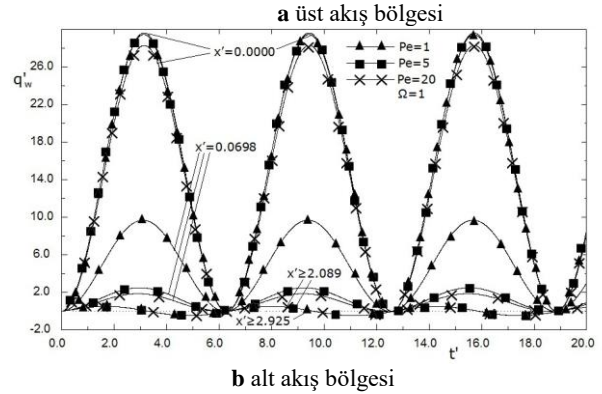
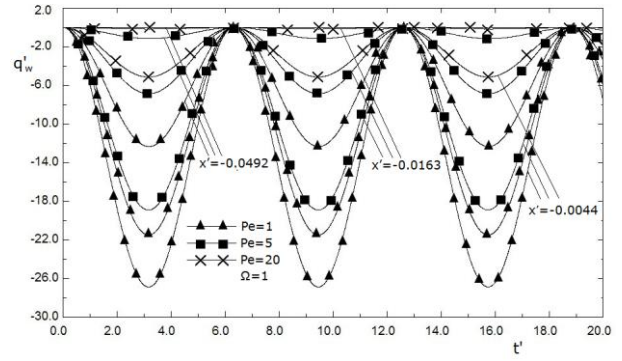
Tüm açısal frekans değerleri için, tam gelişmiş bölgede yüzey ısı akısının ortalama değeri sıfır ve yığık sıcaklığın ortalama değeri ise asimptotik değer olan 1.0 olmaktadır. Açısal frekansın üst akış bölgesindeki ön ısıtma mesafesini, ısıl gelişme mesafesini ve sürekli periyodik rejime ulaşma süresini etkilemediği, tüm  $\Omega$  değerleri için ısıl gelişmenin  $x'=2$  civarında gerçekleştiği, sürekli periyodik rejime ise yaklaşık olarak  $t'=12.6$  da ulaşıldığı görülmektedir. Bu değerler, kalın cidarlı borular için yapılan Altun ve ark. (2016) sonuçları ile çok yakındır.

Şekil 11,  $\Omega=1$  için Peclet sayısının yüzey ısı akısına etkilerini göstermektedir. Düşük Peclet sayılarında akışkan aksel iletimi arttığı için, akışkan tarafında ısı daha gerilere doğru yayılmakta ve akışkanın ön ısıtma mesafesi artmaktadır. Dolayısıyla üst akış bölgesinin uzağında daha yüksek ve değişim genliği daha büyük negatif ısı akısı değerleri görülmektedir. Düşük Peclet sayılı akışta taşınım etkisi de azaldığı için ısıl gelişme mesafesi yaklaşık iki kat büyümüş ancak Peclet sayısının sürekli periyodik rejime ulaşma süresini etkilemediği görülmüştür. Peclet sayısının 20 den büyük değerleri için bu parametrenin etkisini kaybettiği söylenebilir.

## SONUÇ

Borularda, laminar akış ısıl gelişme bölgesi, geçici rejim ısı transferi, aksel akışkan iletimi göz önüne alınarak incelenmiştir. Problem iki bölgeye ayrılmıştır. Problem bir sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüş, problemi tanımlayan boyutsuz parametrenin,  $Pe$  ve boyutsuz açısal frekansın,  $\Omega$ , etkilerini belirleyebilmek için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

1. Akışkan aksel iletim nedeniyle borunun üst akış bölgesine, akışa ters yönde önemli ölçüde ısı transfer edilmekte ve bu akışkanın borunun ısıtılan alt akış bölgesine gelmeden önce ön ısıtılmasına neden olmaktadır. Peclet sayısı azaldıkça bu ön ısıtma mesafesi de artmaktadır.



**Şekil 11.** Pelet sayısının yüzey ısı akısına etkisi ( $\Omega=1$ )

2. Alt akış bölgesi dış yüzey sıcaklığındaki periyodik değişime uygun olarak, ısı transferi karakteristikleri de tüm aksel konumlarda zamanla periyodik olarak değişmektedir. Sürekli periyodik rejimde herhangi bir aksel konum için ısı transferi karakteristiklerinin zamanla değişimi tüm periyotlarda aynı olmaktadır.

3. Üst akış bölgesinde akışkan sıcaklıklarının cidar sıcaklığından daha yüksek olması nedeniyle negatif ısı akısı değerleri görülmektedir. Benzer şekilde, alt akış bölgesinde de, özellikle tam gelişmiş bölgeye yaklaşıldıkça, bir periyodun sıcaklık azalış sürecinde, cidar sıcaklığından daha yüksek yığık sıcaklık değerleri negatif ısı akısına neden olmaktadır.

4. Isıtılan bölgenin başlangıç bölümlerinde yüksek ısı akısı değerleri görülmektedir. Belirli bir aksel mesafe sonrasında ise taşınım etkisini artırmasıyla akışkan sıcaklığı yükselmekte ve ısı akısı değerleri ve değişim genliği azalmaya başlamaktadır. Tam gelişmiş bölgede ve sürekli periyodik rejimde, Peclet sayısından ve açısal frekanstan bağımsız olarak, ısı akısının ortalama değeri sıfır, yığık sıcaklığın ortalama değeri ise asimptotik değer olan 1.0 olmaktadır. Tam gelişmiş bölgede, sürekli periyodik rejimde net ısı transferi beklenildiği gibi sıfırdır.

5. Farklı aksel konumlardaki ısı akısı eğrileri arasında bir miktar faz farkı oluşmakta ve bu üst akış bölgesinde gerilere doğru gidildikçe ve tam gelişmiş bölgeye yaklaşıldıkça daha belirgin hale gelmektedir.

6. Büyük  $\Omega$  değerleri için ısı akısı değerleri geçici rejimin başlangıç safhalarında önce bir maksimum değere yükselmekte, daha sonra azalmaktadır. Açısal frekans



artıkça bu maksimum değerler ve değişim genliği artmaktadır. Geçici rejimdeki periyot sayısı  $\Omega$  büyüdükçe artmaktadır. Çok büyük  $\Omega$  değerleri için yığık sıcaklık değişim genliği çok küçülmekte ve sistem sınır şartı değişikliğini sanki dış yüzey sıcaklığında ani bir sıcaklık artışı gibi algılamaktadır.

7. Problemin, Peclet sayısı ve açısal frekanstan önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür.  $Pe > 20$  ve  $\Omega > 3600$  için bu parametrelerin etkilerinin kaybolduğu söylenebilir.

## KAYNAKLAR

Ateş, A., Darıcı, S. ve Bilir, Ş., 2010, Unsteady conjugated heat transfer in thick walled pipes involving two-dimensional wall ve axial fluid conduction with uniform heat flux boundary condition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (23-24), 5058-5064.

Altun, A. H., Bilir, Ş. ve Ateş, A., 2016, Transient conjugated heat transfer in thermally developing laminar flow in thick walled pipes and minipipes with time periodically varying Wall temperature boundary condition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 63-47.

Aydın, O., Avcı, M., Bali, T. ve Arıcı, M.E., 2014, Conjugate heat transfer in a duct with an axially varying heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 385-392.

Aydın, O. ve Avcı, M., 2015, Laminar forced convective slip flow in a microduct with a sinusoidally varying heat flux in axial direction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 606-612.

Barletta, A. ve Magyari, E., 2007, Forced convection with viscous dissipation in the thermal entrance region of a circular duct with prescribed wall heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 26-35.

Barletta, A. ve Schio, E.R., 1999, Effects of viscous dissipation on laminar forced convection with axially periodic wall heat flux, *Heat and Mass Transfer*, 35, 9-16.

Barletta, A. ve Schio, E.R., 2000, Periodic forced convection with axial heat conduction in a circular duct, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2949-2960.

Barletta, A. ve Schio, E. R., 2004, Mixed convection flow in a vertical circular duct with time-periodic boundary conditions: steady-periodic regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3187-3195.

Barletta, A., Schio, E. R., Comini, G. ve P. D'Agaro, 2008, Conjugate forced convection heat transfer in a

plane channel: Longitudinally periodic regime, *International Journal of Thermal Sciences*, b47, 43-51.

Barletta, A., Schio E. R., Comini, G. ve D'Agaro, P., 2009, Wall coupling effect in channel forced convection with streamwise periodic boundary heat flux variation, *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 699-707.

Barletta, A. ve Zanchini, E., 1995, Laminar forced convection with sinusoidal wall heat flux distribution: axially periodic regime, *Heat and Mass Transfer*, 31, 41-48.

Barletta, A. ve Zanchini, E., 2003, Time-periodic laminar mixed convection in an inclined channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 551-563.

Barletta, A., Zanchini, E., Lazzari, S. ve Terenzi, A., 2008, Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions, *Applied Thermal Engineering*, 28, 1168-1176.

Bilir Ş., 1992, Numerical solution of Graetz problem with axial conduction, *Numerical Heat Transfer*, 21, 493-500.

Bilir Ş., 1995, Laminar flow heat transfer in pipes including two dimensional wall and fluid axial conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(9), 1619-1625.

Bilir, Ş., 2002, Transient conjugated heat transfer in pipes involving two dimensional wall and axial fluid conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (8), 1781-1788.

Bilir, Ş. ve Ateş, A., 2003, Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (14), 2701-2709.

Conti, A., Lorenzini, G. ve Jaluria, Y., 2012, Transient conjugate heat transfer in straight microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 532-7543.

Faghri, M. ve Sparrow, E.M., 1980, Simultaneous Wall and Fluid Axial Conduction in Laminar Pipe-Flow Heat Transfer, *Journal of Heat Transfer*, 102, 58-63.

Fourcher, B. ve Mansouri, K., 1997, An approximate analytical solution to the Graetz problem with periodic inlet temperature, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18:229-235.

Hildebrand, F.B., 1976, Advanced Calculus for Applications, *Prentice-Hall*, 170-111.

Hsu C.J., 1965, Heat transfer in a Round Tube with Sinusoidal Wall Heat Flux Distribution, *A.I. Ch. E Journal*, 11(4), 690-695.

Patankar, S.V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, *McGraw Hill Book Comp.*

Patankar, S.V., Liu, C.H., ve Sparrow, E.M., 1978, The Periodic Thermally Developed Regime in Ducts with Streamwise Periodic Wall Temperature or Heat Flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21, 557-565.

Pearlstein, A.J., ve Dempsey, B.P., 1988, Low Peclet Number Heat Transfer in a Laminar Tube Flow Subjected to Axially Varying Wall Heat Flux, *Journal of Heat Transfer*, 110.3, 796-798.

Quaresma, J.N.N., ve Cotta R.M., 1994, Exact Solutions for Thermally Developing Tube Flow with Variable Wall Heat Flux, *International Communications of Heat and Mass Transfer*, 21(5): 729-742.

Roache, P.J., 1994, Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies, *Transactions of ASME Journal of Fluid Engineering*, 116 (Sept), 405-413.

Shah, R.K. ve London, A.L., 1978, *Laminar flow forced convection in ducts*, Academic Press.

Siegel, R., 1963, Forced Convection in a Channel with Wall Heat Capacity and with Wall Heating Variable with Axial Position and Time, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 6, 607-620.

Sparrow, E.M. ve De Farias, F. N., 1968, Unsteady heat transfer in ducts with time-varying inlet temperature and participating walls, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11, 837-853.

Sucec, J., 2002, Unsteady forced convection with sinusoidal duct wall generation: the conjugate heat transfer problem, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1631-1642.

Vedavarz, A., Kumar S. ve Moallemi M.K, 1994, Significance of non-Fourier Heat Waves in Conduction, *Journal of Heat Transfer*, 116, 221-224.

Zhu, X. W., Zhao, J. Q. ve Zhu, L., 2016, Heat transfer fluctuation in a pipe caused by axially non-uniform heat distribution, *Applied Thermal Engineering*, 103,314-322.

Zniber, K., Oubarra A. ve Lahjomri, J., 2005, Analytical Solution to the Problem of Heat Transfer in an MHD Flow Inside a Channel with Prescribed Sinusoidal Wall Heat Flux, *Energy Conversion and Management*, 46, 1147-1163.



1978 Ermenek doğumlu Aziz Hakan ALTUN, Lisans eğitimini 2000 yılında, yüksek lisansını 2004 yılında ve doktora eğitimini de 2013 yılında Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Halen Selçuk Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.



Ali ATEŞ, lisans eğitimini Makine Mühendisliği Bölümünde, yüksek lisans ve doktora eğitimini Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. Sayısal akışkanlar dinamiği, nümerik ısı transferi ve mühendislikte nümerik hesaplamalar konularında çalışmaktadır. Halen Selçuk Üniversitesi'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.



Ulaş Atmaca, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden 2000 yılında mezun oldu. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 2003 yılında Yüksek Lisansını, 2013 yılında da doktorasını tamamladı. Halen, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilim Dalında Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.



Saim KOÇAK 1961 Konya doğumludur. 1985 yılında lisans eğitimini, 1987 yılında yüksek lisans, 1991 yılında doktora eğitimini tamamlamıştır. Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji Anabilim Dalında Yrd. Doç. Doçent ve 2006 yılından 2018 yılına kadar Profesör olarak çalışmaya devam etmiştir. Halen, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji Anabilim Dalında Profesör olarak çalışmaktadır.



Şefik Bilir, lisans ve yüksek lisans eğitimini 1979 ve 1982 yıllarında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde, doktora eğitimini ise 1989 yılında Selçuk Üniversitesi'nde tamamlamıştır. 1997 yılında doçent, 2003 yılında da profesör unvanı almıştır. Mezuniyeti sonrasında bir süre özel sektörde çalışmış, 1981 yılından 2018 yılına kadar Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nde çalışmıştır. Halen Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilim Dalında görev yapmaktadır.