



Bu bir MMO yayınıdır

DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL ARAŞTIRILMASI

Tahir KARASU¹

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL ARAŞTIRILMASI

Tahir KARASU

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Tel: 0222 239 37 50 / (3355); Gsm: 0536 663 59 22; E-posta: tkarasu@ogu.edu.tr

ÖZET

Bu araştırmada, dairesel kesitli borularda sürekli, sıkıştırılmayan ve eksenel simetrik gelişen türbülanslı akış için çeşitli Reynolds sayılarında kapsamlı sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Sonlu hacim yöntemini kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Dairesel kesitli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, boru cidarı boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı ve cidar sürtünme katsayısının değişimi için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Sayısal hesaplamaların sonuçları çeşitli deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dairesel kesitli borularda akış, $k-\varepsilon$ türbülans modeli, Hesaplamalar.

ABSTRACT

This paper presents the results of an extensive study of numerical investigation of steady, incompressible and axisymmetric developing turbulent flow in circular-sectioned pipes at several Reynolds numbers. Employing the finite-volume method, a computer program based on the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algorithm has been developed. Numerical solutions of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard high-Reynolds-number $k-\varepsilon$ turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundary, wall-functions are employed. Numerical computations for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, wall-shear stress distribution and variation of coefficient of friction along axisymmetric pipe flow geometry are presented

and compared with various experimental measurements. The results of computational investigation are generally in good agreement with various experimental measurements.

Key Words: Flow in circular-sectioned pipes, k-ε turbulence model, Computations.

1. GİRİŞ

Dairesel kesitli borularda gelişen türbülanslı akış temel akış çalışmalarından birisidir. Bu akış esas itibarıyla girişte sınır-tabaka tipi bir akıştan, akış yönünde aşağı akışta tamamıyla gelişmiş akışa bir geçiştir. Giriş bölgesindeki serbest akış sınır-tabaka tarafından tamamıyla çevrilmiştir. Bu tabaka, laminar ve türbülans mekanizmaları vasıtasıyla momentumun yayınımlı sayesinde boru girişinden artan uzunlukla kalınlıkça büyür. Kalınlıkça genişleyen sınır-tabaka serbest akışı hızlandırmakta ve sonunda sınır-tabaka kendisiyle birleştikten sonra, serbest akış kendi özelliğini kaybeder. Serbest akışın kaybolması akabinde, akış tamamıyla gelişmiş duruma ulaşıncaya kadar hız dağılımında ve türbülansın yapısında daha başka değişiklikler oluşur. Dairesel kesitli borularda gelişen türbülanslı akış mühendislik alanında geniş bir uygulamaya sahiptir. Borularda gelişen türbülanslı akışın davranışının ayrıntılı doğasını hesaplayabilme becerisi, gelişmiş mühendislik teçhizatı tasarımına yol açacaktır. Pratikte türbülanslı boru akışına en çok; uzun boru hatlarında çeşitli sıvı ve gazların taşınmasında, ısı değiştiricilerinde, elektrik jeneratörlerinin soğutma kanallarında, yanma odaları sistemlerinde ve iklimlendirme ile ısıtma sistemlerinde rastlanılır. Literatürde dairesel kesitli borularda türbülanslı akış üzerine pek çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. En çok ilgi çekici çalışmalar arasında olanlar [1]-[26] çalışmalarıdır. Bu araştırmanın ana amacı, dairesel kesitli borularda sürekli, sıkıştırılmayan gelişen türbülanslı akış için, standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modelini [27] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, sayısal hesaplamalar yapmak ve sayısal hesaplamaların sonuçlarını Richman ve Azad [1], Ljus ve diğerleri [2], Chevrin ve diğerleri [3], Hooper ve Musgrove [4], Wenger ve Devenport [5], Saadeh ve diğerleri [6] ile Schildknecht ve diğerlerinin [7] deneysel ölçümleriyle karşılaştırmak ve incelemektir.

2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

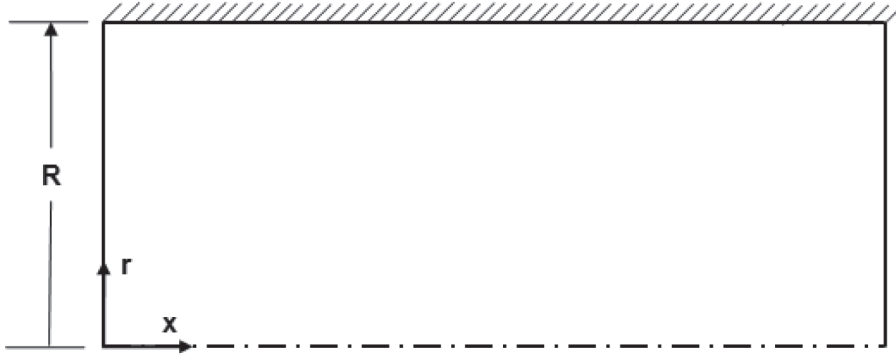
2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1'e ilişkin olarak, dairesel kesitli borularda sürekli, sıkıştırılmayan türbülanslı akışın hesaplanmasında kullanılan matematiksel ve fiziksel model, akışı yöneten hareket denklemlerinin türbülans modeli denklemleriyle beraber aynı anda çözümünü gerektirmektedir. Süreklilik, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı korunumunu gösteren taşınım denklemleri, sürekli durum ve eksenel simetrik silindiriksel koordinatlarda genel bir diferansiyel denklem halinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_{\phi} \quad (1)$$

Burada ϕ genel bir bağımlı değişkendir. u ve v değişkenleri eksenel ve radyal hız bileşenleridir, ρ

akışkanın yoğunluğu, Γ_ϕ taşınım katsayısı, S_ϕ ise kaynak terimidir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli k- ϵ modelidir [27]. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [28, 29]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Silindiriksel koordinat sistemi ve dairesel kesitli boru akış geometrisi.

Tablo 1. Hareket denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler.

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	$\mu_e = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
v	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_e \frac{v}{r^2}$
k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

Not :

- $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$
- Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir (Launder and Spalding, 1974):
 $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$
- $G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$

2.2. Sınır Koşulları

Şekil 1’e ilişkin olarak, incelenen dairesel kesitli borularda türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıda sunulmuştur. Bütün sayısal hesaplamalar eşdeğer sınır koşulları kullanılarak yapılmıştır. Boru girişinde, tüm büyüklükler için düzgün bir profil kabul edilmiştir. Yani, aksenal hıza (u) ortalama deneysel

hız (u_b) değeri verilmiş, radyal hız (v) ise sıfır kabul edilmiştir. k ve ε türbülans büyüklüklerine düzgün giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani, $k=(0.001-0.005) u_b^2$ ve $\varepsilon=(C_\mu k^{3/2}/0.03R)$, burada u_b borudaki ortalama hızdır, R ise borunun yarıçapıdır. Boru çıkışında, tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, boru çıkış düzlemi giriş düzleminden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde radyal hız sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Boru ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani, $(\partial\phi/\partial r) = v = 0$, ϕ burada u , k ya da ε olabilir. Boru cidarında hız bileşenleri u , v ile türbülans büyüklükleri k ve ε sıfıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ε 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [27] cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için başlangıç değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal araştırmada, sonlu hacim yaklaşımı kullanarak, Patankar'ın [28] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) eşitliğiyle verilen kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemle bir kontrol hacme dayanan sonlu fark metoduyla ayrıklaştırılmıştır. Sınır koşullarıyla bağımlı olarak kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu hacim biçimleri, üç köşegenli matris formuyla birlikte, kolon-kolon çözüm yöntemini kullanarak iteratif olarak çözülmüştür, Spalding [30].

2.4. Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Richman ve Azad'ın [1] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan sayısal ağlar boru cidarı yakınında, giriş bölgesinde ve simetri eksen bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Tüm akış durumları için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ büyüklükleriyle ağ testleri yapılmıştır. Bu araştırmada sunulan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdır. Eksenel ve radyal hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Diğer tüm ilgili büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış bir çözüm elde etmek için kolon-kolon yöntemi iteratif olarak kullanılmıştır. Sayısal kararlılık elde etmek için u , v , k , ε , P ve μ_g için sırasıyla 0.6, 0.6, 0.8, 0.8, 0.5 ve 0.5 gevşetme faktörleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama ölçütü, tüm hesaplama alanında kalıcı kütlelerin mutlak değerlerinin toplamı önceden belirtilen 10^{-5} değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesi ölçütüdür. Tablo 2 tüm akış durumları için hesaplama gereksinimlerinin ayrıntılarını özetlemektedir. Bu tabloda N yakınsamış bir çözüm elde etmek için yapılmış olan iterasyonların sayısıdır. T ise cpu saniye cinsinden zaman ve T/N de iterasyon sayısı başına zamandır.

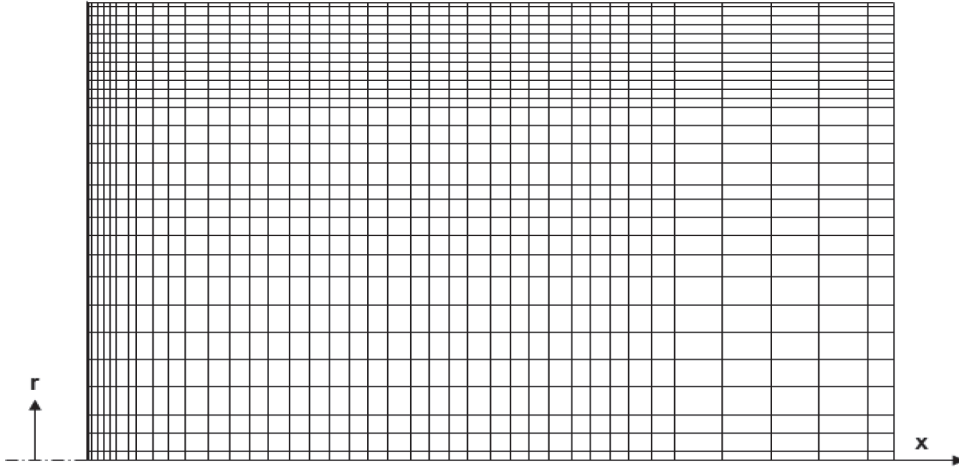
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Buradaki sayısal araştırmada hesaplamalar, dairesel kesitli borularda gelişen türbülanslı akış için dokuz farklı Reynolds sayılarında yapılmış ve sonuçlar Richman ve Azad [1], Ljus ve diğerleri [2],

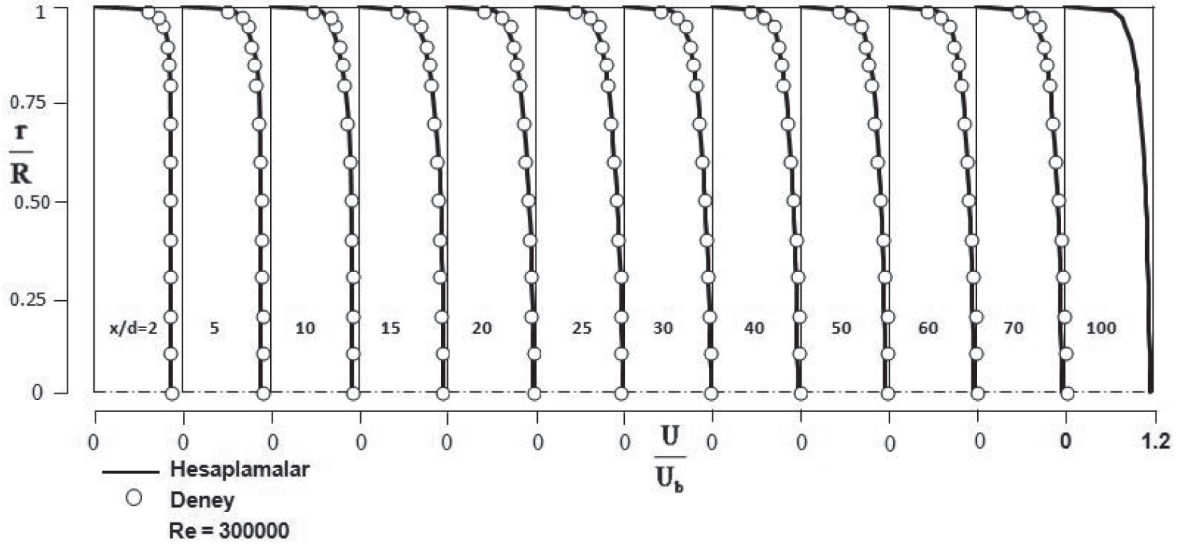
Tablo 2. Akış durumu, Reynolds sayısı, aç büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı.

Akış Durumu	Re	Aç Büyüklüğü (x) × (r)	T cpu zamanı (saniye)	N İterasyon Sayısı	T / N
Richman ve Azad [1]	300 000	40 × 30	3.015625	222	0.013583
Richman ve Azad [1]	200 000	40 × 30	3.09375	214	0.014456
Ljus ve diğerleri [2]	130 000	40 × 30	3.90625	452	0.0086421
Ljus ve diğerleri [2]	82 100	40 × 30	4.03125	461	0.0087445
Chevrin ve diğerleri [3]	8923	40 × 30	2.03125	249	0.0081576
Hooper ve Musgrove [4]	178 000	40 × 30	4.5625	517	0.0088249
Wenger ve Devenport [5]	100 000	40 × 30	5.671875	624	0.0090895
Saadeh ve diğerleri [6]	15 000	40 × 30	5.953125	660	0.0090198
Schildknecht ve diğerleri [7]	17 250	40 × 30	7.84375	547	0.0143395

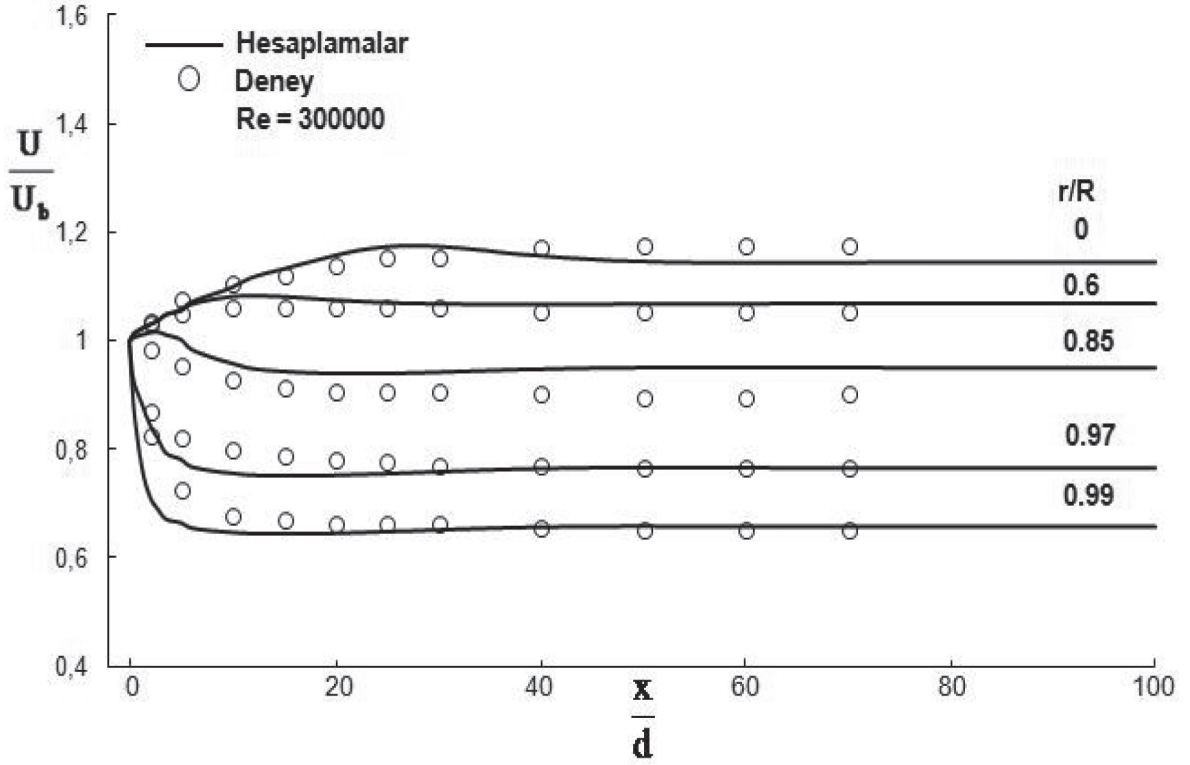
Chevrin ve diğerleri [3], Hooper ve Musgrove [4], Wenger ve Devenport [5], Saadeh ve diğerleri [6] ile Schildknecht ve diğerleri'nin [7] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. İlk önce, çalışma akışkanı olarak hava kullanılan boruda, Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleri hesaplamalarla karşılaştırmaya temel esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Borudaki akışın Reynolds sayıları $Re=3 \times 10^5$ ve $Re=2 \times 10^5$ 'tir ($Re=u_b d/v$, burada u_b borudaki ortalama hızdır). Dairesel kesitli boruda sayısal hesaplama alanı, boru giriş düzleminden aşağı akışta 100 boru çapındaki (d) bir eksenel uzunluğa kadar uzatılmıştır. Şekil 2'de Richman ve Azad'ın [1] akış durumu için kullanılan sayısal aç dağılımı sunulmuştur. Hesaplanan eksenel hız radyal profilleri, boru boyunca boyutsuz olarak u/u_b ve radyal uzunluk r/R cinsinden, $x/d=2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70$ ve 100 eksenel kesitlerde, Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle beraber, Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan eksenel hız radyal profilleri karşılıkları olan deneysellerle çok iyi uyumdadır. Bundan başka bu şekil, boru boyunca eksenel hız radyal profilinin nasıl geliştiğini de göstermektedir. Boru boyunca hesaplanan eksenel hızın değişimi, $r/R=0, 0.6, 0.85, 0.97$ ve 0.99 gibi sabit radyal mesafelerde, Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle birlikte Şekil 4'te sergilenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplamalar deneysel ölçümlerle aynı trendi izlemekte olup oldukça iyi bir uyum vermektedir. Şekil 5, 6 ve 7 Richman ve Azad'ın [1] akış borusu boyunca, sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 3'teki gibi aynı eksenel kesitlerde göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, ortalama hızın karesi u_b^2 , akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{max} ve maksimum efektif viskozite μ_{emax} ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini gözönüne sermektedir. Boru cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} ve eksenel uzunluk x/d cinsinden Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, bu akış durumu için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeri (τ_{wd}) yaklaşık olarak $x/d=78.8$ kesitinde elde edilmiştir. Bu kesitten sonra, cidar kayma gerilmesi tamamıyla sabit kalmaktadır. Görüldüğü üzere, hesaplamalar deneysel ölçümlerle aynı trendi göstermekte olup oldukça iyi bir uyum sergilemektedir. Son olarak, boru cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f = 2\tau_w / \rho u_b^2$) değişimi, x/d cinsinden Şekil 9 da çizilmiştir. Cidar sürtünme katsayısı (C_f) tamamıyla gelişmiş değerine takriben $x/d=78.8$ kesitinde ulaşmıştır. Bu kesitten sonra ise pratik olarak sabit kalmaktadır.



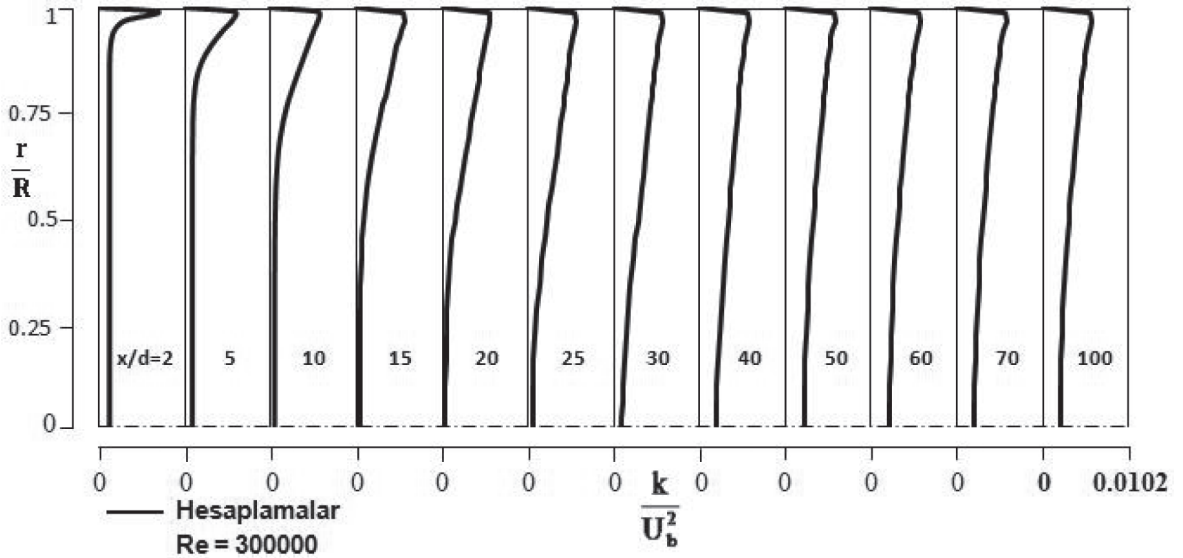
Şekil 2. Richman ve Azad'ın [1] dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



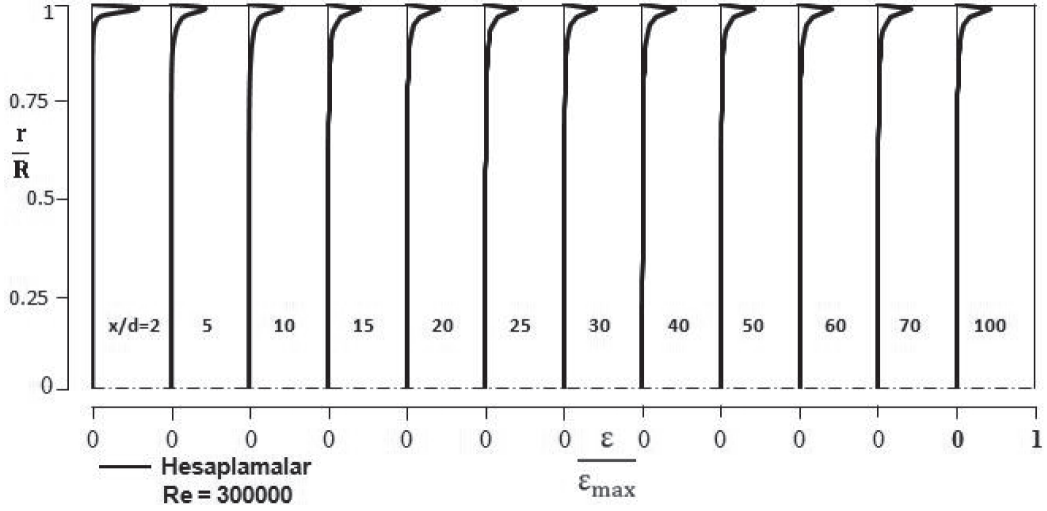
Şekil 3. Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



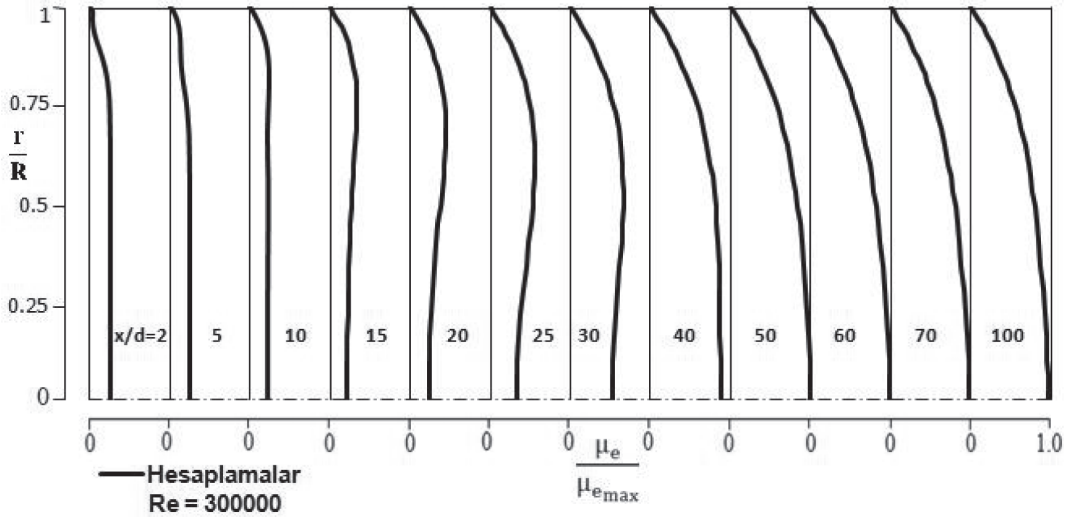
Şekil 4. Boru boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız değişiminin Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



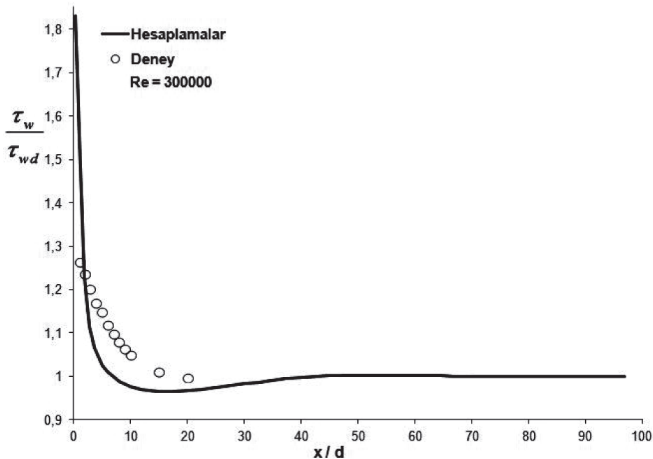
Şekil 5. Richman ve Azad'ın [1] akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



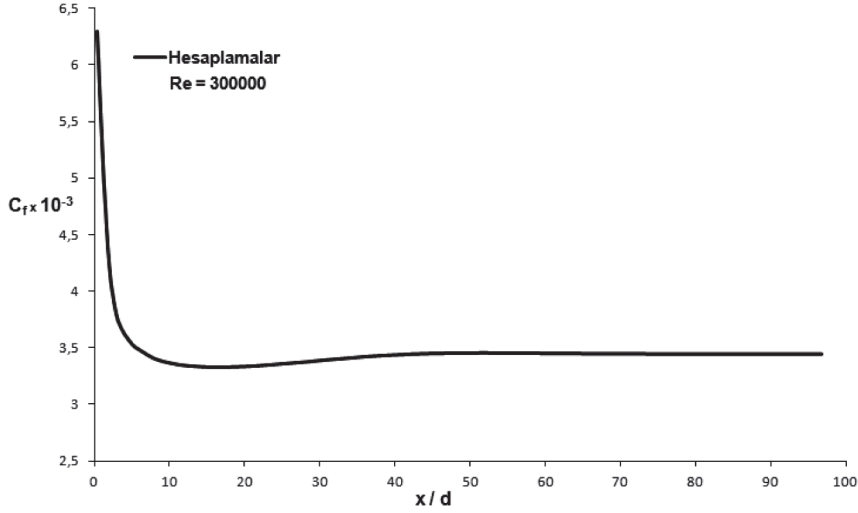
Şekil 6. Richman ve Azad'ın [1] akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 7. Richman ve Azad'ın [1] akış borusu boyunca hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri.



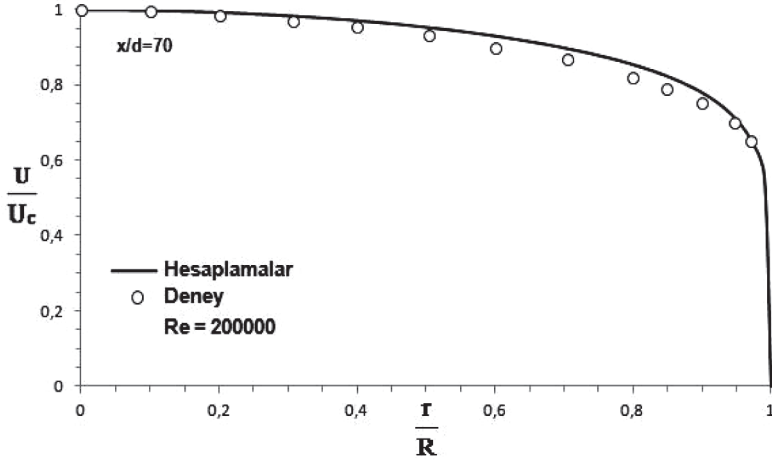
Şekil 8. Boru cidarı boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.



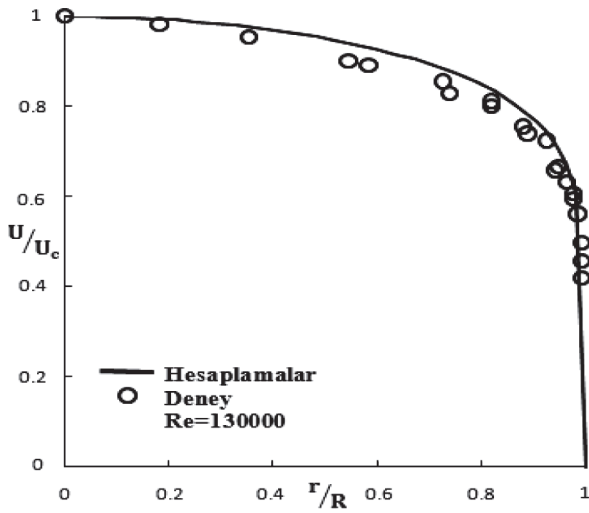
Şekil 9. Richman ve Azad'ın [1] dairesel kesitli akış borusu cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi.

Re=2x10⁵ için boruda hesaplanan radyal aksel hız profili, boyutsuz olarak u/u_c ve radyal uzunluk r/R cinsinden $x/d=70$ aksel kesitinde, Richman ve Azad'ın [1] deneysel bulgularıyla Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Burada aksel hız, simetri eksenini üzerindeki hız (u_c) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan hız profili deneysel bulgularla çok iyi bir uyum göstermektedir. Şekil 11 ve 12'de, çalışma akışkanı olarak hava kullanılan boruda, sırasıyla, Re=1.3x10⁵ ve Re=82100 Reynolds sayıları için hesaplanan aksel hız radyal profili, boyutsuz olarak u/u_c ve radyal uzunluk r/R cinsinden $x/d=87$ aksel kesitinde, Ljus ve diğerlerinin [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan hız profili deneysel ölçümlerle iyi uyum içindedir. Çalışma akışkanı olarak gliserin kullanılan boruda, Re=8923 için $x/D=25$ kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili, Chevrin ve diğerleri'nin [3] deneysel ölçümleriyle Şekil 13'te gözönüne serilmiştir. Görüldüğü üzere, hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasında çok iyi bir uyum elde edilmiştir. Şekil 14'te, çalışma akışkanı olarak hava kullanılan boruda, Re=1.78x10⁵ için $x/D=128.57$ aksel kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili, Hooper ve Musgrove'nin [4] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılan boruda, Re=1x10⁵ için $x/d=240.7$ aksel kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili, Wenger ve Devenport'un [5] deneysel ölçümleriyle Şekil 15'te karşılaştırılmış ve mükemmel bir uyum gözlerönüne serilmiştir. Şekil 16'da, çalışma akışkanı olarak su kullanılan boruda, Re=1.5x10⁴ için $x/D=170$ aksel kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili, Saadeh ve diğerleri'nin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve çok iyi bir uyum ortaya çıkmıştır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılan boruda, Re=17250 için $x/d=190$ aksel kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili, Schildknecht ve diğerleri'nin [7] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 17'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasında çok iyi bir uyum gözlenmektedir. Hesaplanan radyal türbülans kinetik enerji profili ve onun Schildknecht ve diğerleri'nin [7] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak k/u_b^2 ve radyal uzunluk r/R cinsinden $x/d=190$ kesitinde Şekil 18'de çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan radyal türbülans kinetik enerji dağılımı kesit boyunca artmaktadır. Bu durum deneysel ölçümlerle teyit edilmiştir. Bununla beraber, boru göbek bölgesinde hesaplamalar

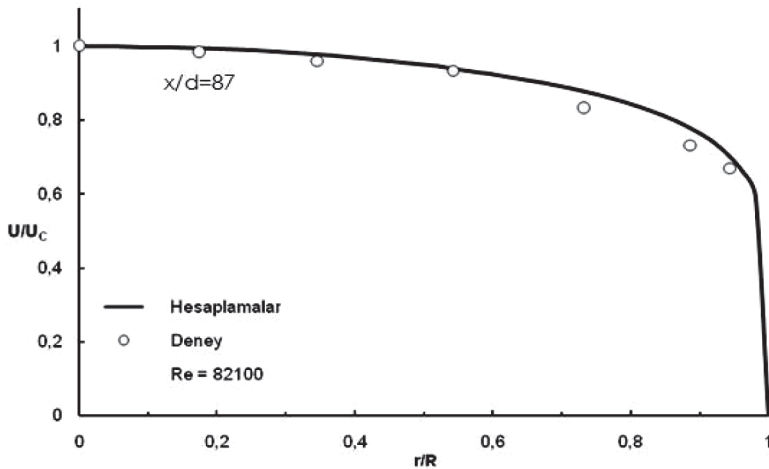
deneysel ölçümlerin biraz üstünde kalırken, borunun ikinci yarısında ve cidara yakın bölgede ise deneysel ölçümlerin altında kalmaktadır. Buna rağmen, hesaplamalar deneysel ölçümlerle aynı trendi göstermektedir. Hesaplamalarda araştırılan türbülanslı boru akışları için tamamıyla gelişmiş aksenal hız radyal profili $x/d=70$ ile 80 aksenal kesitleri arasında elde edilmiştir.



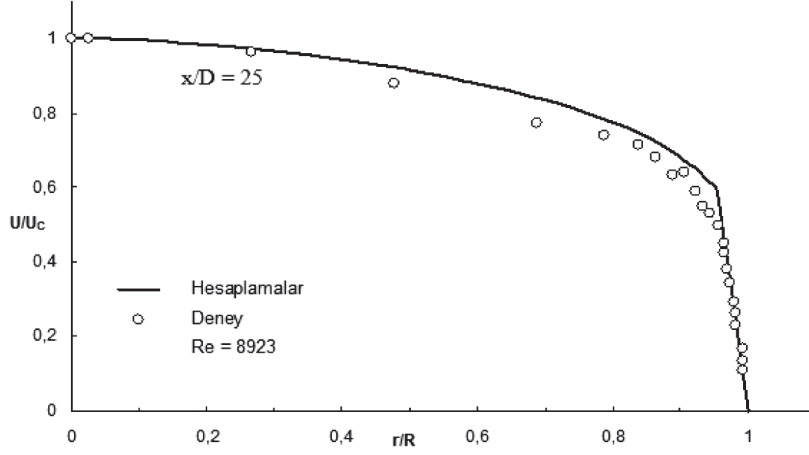
Şekil 10. Boruda $x/d=70$ kesitinde hesaplanan radyal aksenal hız profilinin Richman ve Azad'ın [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



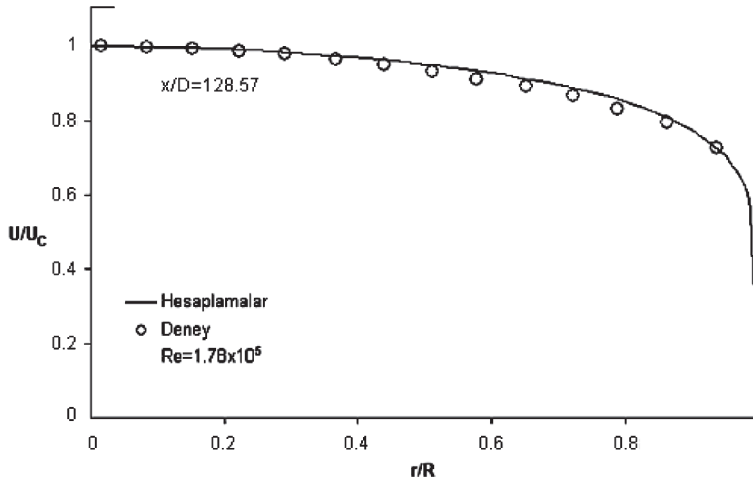
Şekil 11. Boruda $x/d=87$ kesitinde hesaplanan radyal aksenal hız profilinin Ljus ve diğerlerinin [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



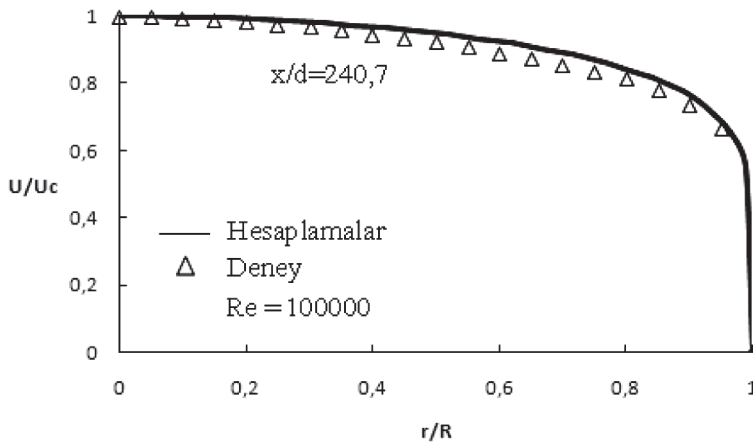
Şekil 12. Boruda $x/d=87$ kesitinde hesaplanan radyal aksenal hız profilinin Ljus ve diğerlerinin [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



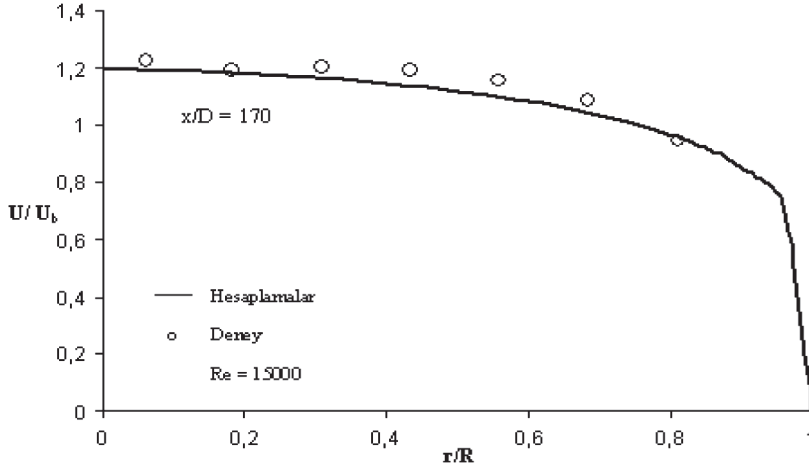
Şekil 13. Boruda $x/D=25$ kesitinde hesaplanan radyal aksel hız profilinin Chevrin ve diğerleri'nin [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



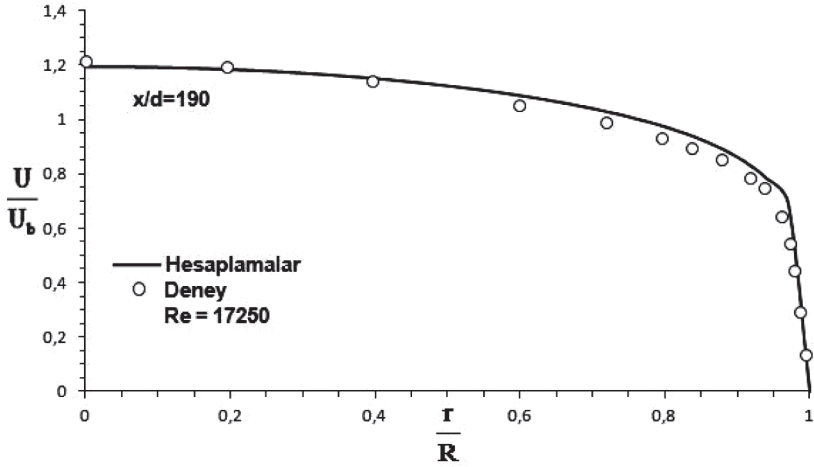
Şekil 14. Boruda $x/D=128.57$ kesitinde hesaplanan radyal aksel hız profilinin Hooper ve Musgrove'nin [4] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



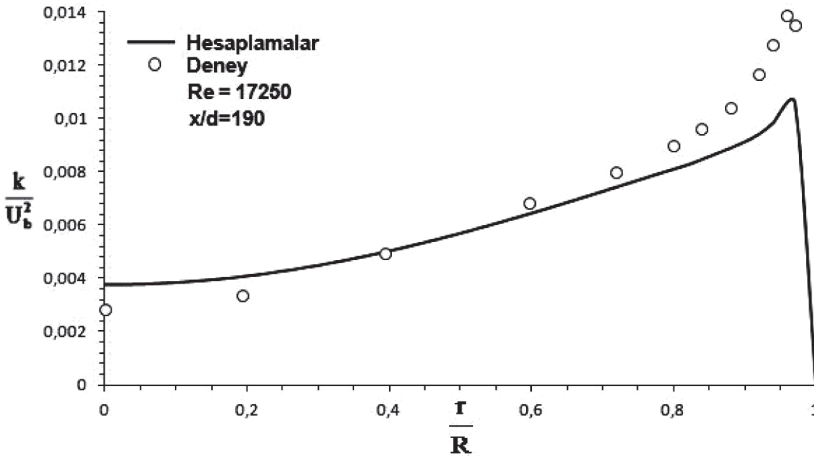
Şekil 15. Boruda $x/d=240.7$ kesitinde hesaplanan radyal aksel hız profilinin Wenger ve Devenport'un [5] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 16. Boruda $x/D=170$ kesitinde hesaplanan radyal aksenal hız profilinin Saadeh ve diğerleri'nin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 17. Boruda $x/d=190$ kesitinde hesaplanan radyal aksenal hız profilinin Schildknecht ve diğerleri'nin [7] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 18. Boruda $x/d=190$ kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Schildknecht ve diğerleri'nin [7] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Bu araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Dairesel kesitli borularda gelişen türbülanslı akış dokuz farklı Reynolds sayıları için, standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modelini kullanarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar'ın [28] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Dokuz farklı dairesel kesitli borulardaki türbülanslı akış için standart k-ε türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. k-ε türbülans modeline dayanan eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite, cidar kayma gerilmesi ve cidar sürtünme katsayısının dağılımları boru boyunca hesaplanmış, literatürde bildirilen çeşitli deneysel ölçümlerle ayrıntılı olarak karşılaştırılmış ve genel olarak iyi uyumda oldukları bulunmuştur. Hesaplamalarda araştırılan türbülanslı boru akışları için tamamıyla gelişmiş eksenel hız radyal profili $x/d=70$ ile 80 eksenel kesitleri arasında elde edilmiştir.

5. SEMBOLLER

- C_1, C_2, C_μ : Türbülans modeli sabitleri
 C_f : Cidar sürtünme katsayısı [$C_f = 2\tau_w / \rho u_b^2$]
 d, D : Borunun çapı
 E : Logaritmik yasa sabiti ($E=9.0$)
 G : Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
 k : Türbülans kinetik enerji
 P : Basınç
 r : Akışa dik yönde ölçülen mesafe (radyal mesafe)
 R : Borunun yarıçapı
 Re : Reynolds sayısı
 S_ϕ : Taşınım denklemlerinde kaynak terimi
 U : Akış yönü hızı (eksenel hız bileşeni)
 U_c : Simetri eksenindeki hız
 U_b : Debiden hesaplanan ortalama hız (bulk velocity)
 u_p : Cidar yakınında P düğüm noktasında cidara paralel ortalama hız
 u_τ : Sürtünme hızı ($= \sqrt{\tau_w/\rho}$)
 u^+ : Boyutsuz hız ($= u_p/u_\tau$)
 u', v', w' : Türbülans çalkantıları
 v : Radyal hız bileşeni
 x : Akış yönünde ölçülen mesafe (eksenel mesafe)
 y_p : Cidardan, cidar yakınındaki P ağ düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe
 y^+ : Boyutsuz cidar mesafesi ($= y_p u_\tau / \nu$)
 ε : Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
 ϕ : Genel değişken
 κ : von Karman sabiti ($=0.41$)
 μ : Laminar dinamik viskozite
 μ_t : Türbülans dinamik viskozite

- μ_e : Efektif viskozite ($=\mu+\mu_t$)
 ν : Laminar kinematik viskozite ($=\mu/\rho$)
 ρ : Akışkanın yoğunluğu
 Γ_ϕ : Yayınım mübadele katsayısı
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: k ve ϵ 'nin yayınımları için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
 τ_w : Cidar kayma gerilmesi
 τ_{wd} : Tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri

6. KAYNAKLAR

- [1] RICHMAN, J. W., and AZAD, R. S., “Developing Turbulent Flow in Smooth Pipes”, Appl. Sci. Res., 28, pp. 419-441, 1973.
- [2] LJUS, C., JOHANSSON, B., and ALMSTEDT, A. E., “Turbulence Modification by Particles in a Horizontal Pipe Flow”, Int. J. Multiphase Flow, 28, pp. 1075-1090, 2002.
- [3] CHEVRIN, P. A., PETRIE, H. L., and DEUTSCH, S., “The Structure of Reynolds Stress in the Near-Wall Region of a Fully Developed Turbulent Pipe Flow”, Experiments in Fluids, 13, pp. 405-413, 1992.
- [4] HOOPER, J. D., and MUSGROVE, A. R., “Reynolds Stress, Mean Velocity, and Dynamic Static Pressure Measurement by a Four-Hole Pressure Probe”, Experimental Thermal and Fluid Science, 15, pp. 375-383, 1997.
- [5] WENGER, C. W., and DEVENPORT, W. J., “Seven-Hole Pressure Probe Calibration Method Utilizing Look-Up Error Tables”, AIAA Journal, 37(6), pp. 675-679, 1999.
- [6] SAADEH, M., STRAUSS, K., and SCHNEIDER, T., “A Combined Piv/Lif-System for the Measurement of Heterogeneous Drag Reduction Effects in a Pipe-Flow”, Experiments in Fluids, 22, pp. 292-299, 1997.
- [7] SCHILDKNECHT, M., MILLER, J. A., and MEIER, G. E. A., “The Influence of Suction on the Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow”, J. Fluid Mech., 90, pp. 67-107, 1979.
- [8] WITTMER, K. S., DEVENPORT, W. J., and ZSOLDOS, J. S., “A Four-Sensor Hot-Wire Probe System for Three-Component Velocity Measurement”, Experiments in Fluids, 24, pp. 416-423, 1998.
- [9] BARBIN, A. J., and JONES, J. B., “Turbulent Flow in the Inlet Region of a Smooth Pipe”, J. Basic Engrg., Trans. ASME, 29, pp. 29-34, 1963.
- [10] DEN TOONDER, J. M. J., and NIEUWSTADT, F. T. M., “Reynolds Number Effects in Turbulent Pipe Flow for Low to Moderate Re”, Phys. Fluids, 9, pp. 3398-3409, 1997.
- [11] EGGELS, J. G. M., UNGER, F., WEISS, M. H., WESTERWEEL, J., ADRIAN, R. J., FRIEDRICH, R., and NIEUWSTADT, F. T. M., “Fully Developed Turbulent Pipe Flow: A Comparison Between Direct Numerical Simulation and Experiment”, J. Fluid Mech., 268, pp. 175-209, 1994.
- [12] ELKINS, C. J., MARKL, M., PELC, N., and EATON, J. K., “4D Magnetic Resonance Velocimetry for Mean Velocity Measurements in Complex Turbulent Flows”, Experiments in Fluids, 34, pp. 494-503, 2003.
- [13] ELKINS, C. J., MARKL, M., IYENGAR, A., WICKER, R., and EATON, J. K., “Full-Field Velocity and Temperature Measurements Using Magnetic Resonance Imaging in Turbulent Complex Internal Flows”, Int. J. Heat Fluid Flow, 25, pp. 702-710, 2004.

- [14] HRENYA, C. M., BOLIO, E. J., CHAKRABARTI, D., and SINCLAIR, J. L., "Comparison of Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Turbulence Models in Predicting Fully Developed Pipe Flow", *Chemical Engineering Science*, 50(12), pp. 1923-1941, 1995.
- [15] KIKUYAMA, K., MURAKAMI, M., and NISHIBORI, K., "Development of Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer in an Axially Rotating Pipe", *J. of Fluids Eng.*, 105, pp. 154-160, 1983.
- [16] LAWN, C. J., "The Determination of the Rate of Dissipation in Turbulent Pipe Flow", *J. Fluid Mech.*, 48, pp. 477-505, 1971.
- [17] LAI, J. C. S., and YANG, C. Y., "Numerical Simulation of Turbulence Suppression: Comparisons of the Performance of Four $k-\epsilon$ Turbulence Models", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 18(6), 575-584, 1997.
- [18] LAUFER, J., "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow", NACA Report 1174, 1954.
- [19] KARASU, T., "Numerical Prediction of Incompressible Turbulent Swirling Flows in Circular-Sectioned Ducts and Annuli", Ph.D. Thesis, University of London, 1981.
- [20] KARASU, T., "Numerical Prediction of Turbulent Flow in Circular Pipes", 9th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Atlanta, Georgia, USA, Proceedings Book, Vol. 9, Part 2, pp. 1329-1339, 1995.
- [21] KARASU, T., CHOUDHURY, P. R., and GERSTEIN, M., "Upwind ve Hybrid Diskritizasyon Metotları ile $k-\epsilon$ Türbülans Modelini Kullanarak Bazı Türbülanslı Akışların Hesaplanması", *Doğa Bilim Dergisi*, 9 (B), ss. 218-234, 1985.
- [22] KARASU, T., "Numerical Prediction of Turbulent Recirculating Flow Through Axisymmetric Sudden Expansions", 10th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, 21st –25th July 1997, Swansea, U.K., Proceedings Book, Vol. 10, pp. 357-368, 1997.
- [23] KARASU, T., "Numerical Solution of Turbulent Flow with Heat Transfer in an Annulus with Rotating Inner Cylinder", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 12, No. 3, pp. 250-272, 1988.
- [24] KARASU, T., "Düzlemsel Simetrik Anigenişlemelerde Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması", UTES'13, 9.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 25-28 Aralık 2013, Konya, Bildiriler Kitabı, ss. 768-778, 2013.
- [25] KARASU, T., "Numerical Investigation of Developing Turbulent Flow Between Two Parallel Plates", IATS'13, 7th International Advanced Technologies Symposium, 30th October-1st November 2013, Istanbul, Turkey, Proceedings Book, pp. 49-56, 2013.
- [26] WESTERWEEL, J., DRAAD, A. A., VAN DER HOEVEN, J. G. Th. and VAN OORD, J., "Measurement of Fully-Developed Turbulent Pipe Flow with Digital Particle Image Velocimetry", *Experiments in Fluids*, 20, pp. 165-177, 1996.
- [27] LAUNDER, B. E., and SPALDING, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng*, 3, pp. 269-289, 1974.
- [28] PATANKAR, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Chapters 5 and 6, 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, DC, 1980.
- [29] PATANKAR, S. V., and SPALDING, D. B., "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.
- [30] SPALDING, D. B., "A General-Purpose Computer Program for Multi-Dimensional One-and-Two Phase Flow", *Math. Comput. Simulation*, XXIII, pp. 267-276, 1981.



ÖZGEÇMİŞ

Prof. Dr. Tahir KARASU

1950 yılı Eskişehir doğumludur. D.I.C. (Diploma of Imperial College), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, İngiltere; M.Sc., The University of Birmingham, Birmingham, İngiltere ve Ph.D., The University of London, London, İngiltere, derecelerini aldı. 1982-1983 yıllarında Amerika Birleşik Devletlerinde Kaliforniya'da Los Angeles'ta University of Southern California'da postdoktoral araştırmacı olarak çalıştı. 1981-1986 yıllarında Uludağ Üniversitesi'nde, 1986-1988 yıllarında Çukurova Üniversitesi'nde ve 1988-1993 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde çalıştı. 1984'te doçent, 1995'te profesör oldu. 1993 yılından beri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Termodinamik Anabilim Dalı Başkanlığı'nı yapmakta olan Prof. Dr. Tahir Karasu İngilizce bilmekte ve ağırlıklı olarak Akışkanlar Mekaniği, Termodinamik, Isı Transferi, Türbülans, Sayısal Akışkanlar Dinamiği ve Sayısal Isı Transferi alanlarında çalışmaktadır.