

Dairesel Kesitli Borularda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması

Mehmet Yıldırım

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2009

Numerical Prediction of Turbulent Flow in Circular Pipes

Mehmet Yıldırım

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

June 2009

Dairesel Kesitli Borularda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması

Mehmet Yıldırım

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Termodinamik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Tahir KARASU D.I.C.

Haziran 2009

## ONAY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Yıldırım'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Dairesel Kesitli Borularda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Tahir Karasu

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Tahir Karasu

**Üye** : Doç. Dr. Neşe Öztürk

**Üye** : Y. Doç. Dr. Necati Mahir

**Üye** : Y. Doç. Dr. M. Ertunç Tat

**Üye** : Y. Doç. Dr. Salih Köse

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

# DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞLARIN SAYISAL HESAPLANMASI

**MEHMET YILDIRIM**

## **ÖZET**

Bu tezde dairesel kesitli borularda sürekli sıkıştırılmayan gelişen türbülanslı akışın, sayısal hesaplama sonuçları 8923 ile  $1.78 \times 10^5$  arasında değişen yedi farklı Reynolds sayılarında sunulmuştur. Hibrit yöntemi ile geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum diferansiyel denklemlerinin sayısal çözümleri, kontrol hacme dayanan iteraktif sonlu fark çözüm tekniği kullanılarak sağlanmıştır. Katı cidar yakınındaki bölgede cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Dairesel kesitli borularda çeşitli kesitlerde aksel hız profilleri, simetri ekseni boyunca aksel hızın değişimi, türbülans kinetik enerji profilleri, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri, efektif viskozite profilleri, cidar kayma gerilmesi dağılımları ve cidar sürtünme katsayısı dağılımları için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve literatürdeki deneysel ölçümlerle ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplamaların sonuçları deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler:

Borular, Türbülanslı Akış, k-ε Türbülans Modeli

# NUMERICAL PREDICTION OF TURBULENT FLOW IN CIRCULAR PIPES

MEHMET YILDIRIM

## SUMMARY

In this thesis, steady and incompressible developing turbulent flow in circular pipes has been computed numerically at seven different Reynolds numbers ranging from 8923 to  $1.78 \times 10^5$ . Using the conventional finite volume method with a hybrid scheme, a computer program based on 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  $k$ - $\epsilon$  turbulence model, are obtained using a control volume based iterative finite difference numerical solution technique. Near the solid boundary wall-functions are employed. Numerical simulations for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, dissipation rate of turbulence kinetic energy, effective viscosity, axial variation of centre-line velocity, wall shear stress distribution and skin friction coefficient distribution are presented and compared with experimental measurements reported in the literature. The results of numerical predictions are generally in good agreement with experimental measurements.

Keywords:

Pipes, Turbulent Flow,  $k$ - $\epsilon$  Turbulence Model

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım değerli hocam sayın Prof. Dr. Tahir KARASU D.I.C.'ya teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞLARIN SAYISAL HESAPLANMASI.....	2
2.1. Matematiksel Formülasyon.....	2
2.1.1. Hareket Denklemleri.....	2
2.1.2. Türbülans Modeli.....	3
2.1.3. Cidar Fonksiyonları.....	5
2.2. Sayısal Çözüm Yöntemi.....	7
2.2.1. Genel Diferansiyel Denklem.....	7
2.2.2. İncelenen Fiziksel Durum.....	7
2.2.3. Sınır Koşulları.....	8
2.2.4. Hesaplama Detayları.....	9
2.3. Bulgular ve Tartışma.....	10
2.4. Sonuçlar.....	94
3. SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	95



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2-1 Koordinat sistemi ve dairesel kesitli boru akış geometrisi.....	8
Şekil 2-2 Hooper and Musgrove'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .....	13
Şekil 2-3 Dairesel Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Hooper and Musgrove'ın (1997) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması .....	14
Şekil 2-4 Boruda $x/d = 128.57$ kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profilinin Hooper and Musgrove'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	15
Şekil 2-5 Hooper and Musgrove'ın (1997) borusu boyunca simetri ekseni üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi .....	16
Şekil 2-6 Hooper and Musgrove'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	17
Şekil 2-7 Boruda $x/d = 128.57$ kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Hooper and Musgrove'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	18
Şekil 2-8 Hooper and Musgrove'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	19
Şekil 2-9 Hooper and Musgrove'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi .....	20
Şekil 2-10 Hooper and Musgrove'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	21
Şekil 2-11 Hooper and Musgrove'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi .....	22
Şekil 2-12 Saadeh et al.'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .	25
Şekil 2-13 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması.....	26
Şekil 2-14 Boruda $x/d = 170$ kesitinde hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profilinin Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .....	27
Şekil 2-15 Saadeh et al.'ın (1997) borusu boyunca simetri ekseni üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi .....	28
Şekil 2-16 Saadeh et al.'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	29
Şekil 2-17 Saadeh et al.'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	30
Şekil 2-18 Saadeh et al. (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi.....	31
Şekil 2-19 Saadeh et al.'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	32
Şekil 2-20 Saadeh et al.'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi.....	33

Şekil 2-21 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .....	36
Şekil 2-22 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması.....	37
Şekil 2-23 Boruda $x/d = 240.74$ kesitinde hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profilinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .....	38
Şekil 2-24 Wittmer et al.'ın (1998) borusu boyunca simetri eksenü üzerinde hesaplanan boyutsuz eksenel hızın değışimi .....	39
Şekil 2-25 Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	40
Şekil 2-26 Boruda $x/d = 240.74$ kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	41
Şekil 2-27 Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	42
Şekil 2-28 Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi .....	43
Şekil 2-29 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	44
Şekil 2-30 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değışimi.....	45
Şekil 2-31 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Wenger and Devenport'un (1999) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması.....	47
Şekil 2-32 Boruda $x/d = 240.74$ kesitinde hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profilinin Wenger and Devenport'un (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .....	48
Şekil 2-33 Ljus et al.'ın (2002) dairesel akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	51
Şekil 2-34 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması .....	52
Şekil 2-35 Boruda $x/d = 87$ kesitinde hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profilinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .....	53
Şekil 2-36 Ljus et al.'ın (2002) boru boyunca simetri eksenü üzerinde hesaplanan boyutsuz eksenel hızın değışimi .....	54
Şekil 2-37 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	55
Şekil 2-38 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	56
Şekil 2-39 Ljus et al.'ın (2002) ( $1.3 \times 10^5$ ) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi .....	57
Şekil 2-40 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	58
Şekil 2-41 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değışimi.....	59
Şekil 2-42 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .....	62
Şekil 2-43 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması .....	63
Şekil 2-44 Boruda $x/d = 87$ kesitinde hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profilinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .....	64

Şekil 2-45 Ljus et al.'ın (2002) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değışimi .....	65
Şekil 2-46 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	66
Şekil 2-47 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	67
Şekil 2-48 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi.....	68
Şekil 2-49 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli kış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	69
Şekil 2-50 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değışimi.....	70
Şekil 2-51 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .....	73
Şekil 2-52 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması.....	74
Şekil 2-53 Boruda $x/d = 25$ kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Chevrin et al.'ın (1992) ölçümleriyle karşılaştırılması.....	75
Şekil 2-54 Chevrin et al.'ın (1992) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değışimi .....	76
Şekil 2-55 Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	77
Şekil 2-56 Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	78
Şekil 2-57 Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi.....	79
Şekil 2-58 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	80
Şekil 2-59 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değışimi.....	81
Şekil 2-60 Cole and Glauser'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı .....	84
Şekil 2-61 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması.....	85
Şekil 2-62 Boruda $x/d = 47.9$ kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	86
Şekil 2-63 Cole and Glauser'ın (1998) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değışimi .....	87
Şekil 2-64 Cole and Glauser'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi .....	88
Şekil 2-65 Boruda $x/d = 47.9$ kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	89
Şekil 2-66 Cole and Glauser'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi.....	90
Şekil 2-67 Cole and Glauser'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans viskozite radyal profillerinin gelişimi.....	91

Şekil 2-68 Cole and Glauser'ın(1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı .....	92
Şekil 2-69 Cole and Glauser'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi.....	93

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Çizelge

### Sayfa

<b>Çizelge 2-1</b> Standart k- $\epsilon$ türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri .....	5
<b>Çizelge 2-2</b> Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı .....	10

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$C_f$	: Cidar sürtünme katsayısı ( $=2\tau_w/(\rho u_b^2)$ )
$C_1, C_2, C_\mu$	: Türbülans modeli sabitleri
$d$	: Borunun çapı
$E$	: Logaritmik yasa sabiti ( $E=9.0$ )
$G$	: Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
$k$	: Türbülans kinetik enerji
$k_p$	: Cidara yakın P düğüm noktasındaki kinetik enerji
$p$	: Basınç
$R$	: Borunun yarıçapı
$Re$	: Reynolds sayısı ( $=u_b d/ \nu$ )
$r$	: Radyal koordinat
$S_\phi$	: Taşınım denkleminde kaynak terimi
$U$	: Yerel akış yönü hızı (Yerel aksenal hız)
$U_c$	: Simetri ekseni üzerindeki hız
$U_b$	: Borudaki ortalama hız
$u_p$	: Cidara yakın P düğüm noktasında cidara paralel ortalama hız
$u^+$	: Boyutsuz hız ( $=u_p/u_\tau$ )
$u_\tau$	: Sürtünme hızı ( $=(\tau_w/ \rho)^{1/2}$ )
$\nu$	: Radyal yönde hız bileşeni
$y_p$	: Cidardan, cidara yakın P düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe
$y^+$	: Boyutsuz cidar mesafesi ( $=y_p u_\tau/ \nu$ )
$x$	: Akış yönünde ölçülen mesafe (aksenal koordinat)
$\epsilon$	: Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
$\epsilon_{in}$	: Girişteki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
$\epsilon_p$	: Cidara yakın P düğüm noktasında türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı

$\phi$	: Genel değişken
$\kappa$	: Von Karman sabiti (0.41)
$\mu$	: Laminar dinamik viskozite
$\mu_t$	: Türbülans dinamik viskozite
$\mu_e$	: Efektif viskozite( $\mu_t + \mu$ )
$\mu_{ein}$	: Girişteki efektif viskozite
$\nu$	: Laminar kinematik viskozite ( $=\mu/\rho$ )
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu
$\Gamma_\phi$	: Yayınım mübadele katsayısı
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	: k ve $\epsilon$ 'nin yayınımı için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
$\tau_w$	: Cidar kayma gerilmesi
$\tau_{wd}$	: Tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri

### **Alt İndisler**

### **Açıklama**

$\phi$	: Genel değişken
$k, \epsilon$	: Türbülans kinetik enerji ve onun kaybolma miktarına ait değerler
$p$	: Cidara bitişik P düğüm noktasındaki değerler
$t$	: Türbülans değerleri
$w$	: Cidar değerleri
$\max$	: Maksimum değer
$e$	: Efektif değerler
$in$	: Giriş
$ref$	: Referans

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Dairesel kesitli borulardaki türbülanslı akışlar mühendislik alanında geniş bir uygulama alanına sahip olmasına rağmen, bu akışlar iyi anlaşılmaktan uzaktır. Borularda gelişen türbülanslı akımın davranışının detaylı hesaplanabilmesi, tasarımcıları doğru tasarıma yönlendirecektir. Sıvı ve gazların boru hatlarında taşınması, iklimlendirme ve ısınma sistemleri pratikte türbülanslı boru akışlarının kullanıldığı yerlerdir. Dairesel kesitli borularda türbülanslı akış üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Barbin (1963), Karasu (1993, 1995, 2001), Karasu et al. (1985, 1988), Kikuyama et al.(1983), Kim (1990), Klein (1974), Laufer (1954), Launder and Spalding (1974), Lawn (1971), Lindgren and Chao (1969), Martinuzzi and Pollard (1989), Patankar and Spalding (1972), Patel and Head (1969), Pollard et al. (1989), Reichert and Azad (1976), Richman and Azad (1973), Schildknecht et al. (1979), Spalding (1981), Stephenson (1976), Weir et al. (1974) ile Westerweel et al.'ın (1993) çalışmaları ilgi çekici çalışmalar arasındadır. Bu araştırmanın ana amacı, dairesel kesitli borularda sıkıştırılmayan gelişen türbülanslı akış için standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelinin cidar fonksiyonları sınır koşulu ile beraber kullanarak, sayısal hesaplamasını yapmak ve sayısal hesaplamaların sonuçlarını Hooper and Musgrove (1997), Saadeh et al. (1997), Wittmer et al. (1998), Wenger and Devenport (1999), Ljus et al. (2002), Chevrin (1992) ile Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri ile karşılaştırmaktır.



## BÖLÜM 2

### 2. DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞLARIN SAYISAL HESAPLANMASI

#### 2.1. Matematiksel Formülasyon

##### 2.1.1. Hareket denklemleri

İki-boyutlu, sıkıştırılmayan, sürekli türbülanslı akımı yöneten kısmi diferansiyel denklemler, türbülans gerilmelerinin yerini alan eddy viskozite bağıntılarıyla, şekil 2.1'de gösterilen aksel simetrik silindiriksel koordinatları sisteminde aşağıdaki gibi yazılabilir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0 \quad (2.1)$$

Momentum denklemleri:

x - yönü:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + S_u \quad (2.2)$$

burada:

$$S_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_e r \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

r- yönü:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho uv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho rv^2) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + S_v \quad (2.3)$$

burada:

$$S_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_e r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu_e \frac{v}{r^2}$$

Yukarıdaki denklemlerde “ u ” aksel ( x ) yönde hız bileşeni, “ v ” radyal ( r ) yönde hız bileşenidir. “ ρ “ akışkanın yoğunluğu, “ p “ ise akışkanın basıncıdır.  $S_u$  x-yönü momentum denklemindeki kaynak terimi,  $S_v$  r-yönü momentum denklemindeki kaynak terimidir. Efektif viskozite (  $\mu_e$  ) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (2.4)$$

burada “ $\mu_t$ ” türbülans viskozite ve “  $\mu$  ” laminar viskozitesidir.

### 2.1.2. Türbülans modeli

Bu çalışmada kullanılan Standart k-ε modeli (Launder and Spalding, 1974) eddy viskozitesi kavramını benimsemekte ve eddy viskozitesi zaman ortalaması alınmış türbülans kinetik enerji “k” ile onun kaybolma miktarı “ε”nin değerlerinden aşağıdaki bağıntıya göre tespit etmektedir.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

“k” ve “ε” nun dağılımları aşağıdaki model taşınım denklemlerinin çözülmesinden elde edilmiştir.

Türbülans kinetik enerji “k”:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uk) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r vk) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + S_k \quad (2.6)$$

burada:

$$S_k = G - \rho \varepsilon$$

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı “ε”:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + S_\varepsilon \quad (2.7)$$

burada:

$$S_\varepsilon = \frac{C_1 \varepsilon G}{k} - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k}$$

Launder and Spalding (1974), (2.5)-(2.7) denklemlerinde görülen ampirik sabitler için Çizelge 2.1’de verilen standart değerleri önermiştir.

**Çizelge 2-1** Standart k-ε türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri (Launder and Spalding, 1974)

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Katı cidarlar yakınında türbülans etkileri kaybolur. Kullanılan k-ε türbülans modeli yüksek Reynolds sayılı akışların yalnız tamamıyla türbülanslı bölgelerinde uygulanabilir. Bundan dolayı iç bölgelerle cidar arasındaki aralığı bağlamak için ampirik cidar-fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu çalışmada Launder and Spalding'in (1974) cidar fonksiyonları yakın-cidar akışlarını modellemek için kullanılmıştır.

### 2.1.3. Cidar fonksiyonları

Katı cidarlar yakınında türbülans etkilerinin kaybolmasından dolayı yüksek Reynolds sayısı varsayımlarına dayanan standart türbülans modelleri bu bölgelerde geçerliliklerini kaybeder. Burada Launder and Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları, cidara yakın bölgelerdeki akışların modellenmesi için uygun bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yaklaşımda, cidara yakın bölgelerde aşağıdaki bağıntıların geçerliliği kabul edilmiştir.

$$u^+ = \frac{u_p}{u_\tau} \quad (2.8)$$

$$y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu} \quad (2.9)$$

$$u_\tau = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned}
y^+ < 11.6 \quad \text{için} \quad & u^+ = y^+ \\
y^+ \geq 11.6 \quad \text{için} \quad & u^+ = \left(\frac{1}{\kappa}\right) \ln(Ey^+) \quad (2.11)
\end{aligned}$$

$$k_p = \frac{u_\tau^2}{C_\mu^{1/2}} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_p = \frac{(C_\mu^{3/4} k_p^{3/2})}{\kappa y_p} \quad (2.13)$$

Bu bağıntılar, cidar tabakası içinde kayma gerilmesinin, cidara olan mesafeden bağımsız olduğu esas basitleştirici varsayımı altında geliştirilmiştir. Bu çalışmada, cidar kayma gerilmesinin tespiti için aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır.

$$\tau_w = \begin{cases} \frac{\mu u_p}{y_p} & y^+ < 11.6 \\ \frac{\kappa \rho u_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\ln\left(\frac{E \rho y_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\mu}\right)} & y^+ \geq 11.6 \end{cases} \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde, cidardan “ $y_p$ ” mesafesinde bulunan bir P noktasında cidara paralel hız ( $u_p$ ), türbülans kinetik enerji ( $k_p$ ) ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\varepsilon_p$ ) kullanılır. E sabiti 9.0 ve  $\kappa$  sabiti ise 0.41 olarak alınmıştır. (2.14) denklemiyle verilen cidar kayma gerilmesi, kaynak terimi işlem vasıtası ile momentum denklemleri için bir akım tipi sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Cidara dik olan hız bileşeni için özel bir işlem gerekli değildir.

## 2.2. Sayısal Çözüm Yöntemi

### 2.2.1. Genel diferansiyel denklem

(2.1) - (2.3) ve (2.6) – (2.7) diferansiyel denklemleri aşağıdaki biçimde genel bir diferansiyel denklem halinde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_{\phi} \quad (2.15)$$

yukarıdaki denklem genel bir değişken “ $\Phi$ ” için bir hareket denklemini gösterir. “ $u$ ” yatay ( $x$ ) yönde hız bileşeni, “ $v$ ” dikey ( $r$ ) yönde hız bileşenidir. “ $\rho$ ” akışkanın yoğunluğu, “ $\Gamma_{\phi}$ ” ise taşınım katsayısıdır. Son terim “ $S_{\phi}$ ” kaynak terimidir. Bu terim taşınım ve yayılım terimleri cinsinden ifade edilemeyen terimleri içerir. Bu çalışmada gerekli “ $\Phi$ ” değişkenleri “ $u$ ”, “ $v$ ”, “ $k$ ” ve “ $\epsilon$ ”dur. (2.15)’de verilen denklem eğer “ $\phi$ ” 1’e ve “ $\Gamma_{\phi}$ ” ile “ $S_{\phi}$ ” 0’a eşitlenirse, süreklilik denklemini gösterir. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır (Patankar and Spalding 1972).

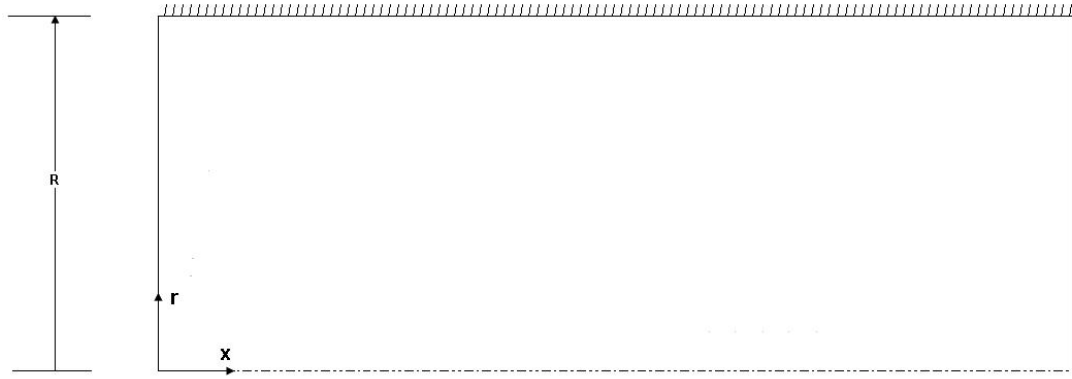
(2.15) kısmi diferansiyel denklemleri, bir elemansel hücre hacmi etrafında integral edilerek sonlu-hacim biçiminde ifade edilirler. Sınır koşullarıyla birlikte, kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu-hacim biçimleri ileri-doğru-ilerleme iteratif sonlu-alan tamamıyla–implisit sayısal çözüm yöntemiyle çözülmüştür, (Spalding, 1981). Bu bilgisayar programında SIMPLE algoritmasının bir türevi kullanılır (Patankar and Spalding 1972).

### 2.2.2. İncelenen fiziksel durum

Türbülanslı akımların sayısal hesaplamaları çeşitli Reynolds sayılarında borularda gelişen türbülanslı akış için yapılmış ve hesaplamalar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Akışkan üniform bir hız profili ile boruya girmekte ve boru boyunca gelişmeye devam etmektedir. Giriş bölgesindeki serbest akım büyüyen sınır tabaka tarafından çevrilmiştir. Sınır tabakası kalınlığının artmasıyla serbest akım hızlanmakta ve boru boyunca sınır tabaka kalınlığı boru yarıçapına ulaştığında serbest akım özelliğini kaybetmektedir. Serbest akımın kaybolmasıyla ve tamamıyla gelişmiş bir akıma ulaşmadan önce, hız dağılımı ile türbülans yapısında daha fazla değişiklikler meydana gelir.

### 2.2.3. Sınır koşulları



**Şekil 2-1** Koordinat sistemi ve dairesel kesitli boru akış geometrisi

Dairesel kesitli borular için kullanılan akış geometrisi Şekil 2.1’de verilmiştir ve burada “R” borunun yarıçapıdır. Dört farklı sınır koşulu uygulanmıştır; giriş düzlemi, çıkış düzlemi, simetri eksenini ve katı cidardır. Katı cidar yakınında akışın özelliklerinin değişimi daha sarp olduğundan momentum ( $u, v$ ) ve skalar ( $k, \epsilon$ ) taşınım işlemleri cidar fonksiyonları yardımıyla modellenmiştir. Bu kavramlar için Launder and Spalding’in (1974) cidar-fonksiyonları uygun bir yaklaşım sağlamaktadır.

Borunun giriş düzleminde bütün büyüklükler için üniform bir profil kabul edilmiştir; yatay ( $x$ ) yönündeki hıza ortalama “ $u_b$ ” değeri verilmiş ve dikey ( $r$ ) yöndeki

hız da sıfır kabul edilmiştir. “k” ve “ε” türbülans büyüklüklerine giriş değerleri vermek için ampirik bağlantılar kullanılmıştır.;  $k = (0.001-0.005)u_b^2$  ve  $\varepsilon = (C_\mu k^{3/2} / 0.03R)$  olarak alınmıştır.

Borunun çıkış düzleminde de tamamıyla gelişmiş bir akış koşulunun sürdüğü kabul edilmiştir; bütün yatay (x) yöndeki türevlerin ihmal edilebileceği ve dikey (r) yöndeki hızın sıfır olduğu kabul edilmiştir.

Borunun ekseni simetri ekseni olarak kabul edilmiştir;  $\left(\frac{\partial \phi}{\partial r}\right) = v = 0$ , “φ” burada “u”, “k” ya da “ε” olabilir.

Boru cidarında hız bileşenleri (u, v) ve türbülans büyüklükleri (k, ε) sıfır kabul edilmiştir. Boru cidarı yakınındaki ağ noktalarında k ve ε'nun değerleri Launder and Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için başlangıç değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

#### 2.2.4. Hesaplama detayları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 Ghz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Kullanılan tüm sayısal ağlar büyük gradyanlı bölgelerde, yani boruda cidar yakınındaki bölgede, daha küçük aralıklarla üniform olmayan bir şekilde düzenlenmiştir. Yatay ve dikey hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Tüm ilgili diğer büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmaktadır. Yakınsamış çözümler elde etmek için iteratif olarak “line-by-line” yöntemi kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama kriteri, tüm hesaplama alanında kütle kalıcı mutlak değerinin toplamı 0.001 değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesidir. Her durum için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ yoğunluklarıyla ağ testleri yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan tüm hesaplamalar ağ bağımsızdır. Çizelge 2.2, her bir durum için hesaplama gereksinimlerinin detaylarını



özetlemiştir. Bu çizelgede “N” bir yakınsamış çözüm elde etmek için yapılmış olan iterasyon sayısı, “T” cpu saniye cinsinden zaman ve “T/N” iterasyon sayısı başına zamandır.

**Çizelge 2-2** Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı

Akış Durumu	Re	Ağ büyüklüğü (x) x (r)	T cpu zamanı (saniye)	N	T/N
Hooper and Musgrove	$1.78 \times 10^5$	40 x 30	4.5625	517	0.008824
Saadeh et al.	$1.5 \times 10^4$	40 x 30	5.953125	660	0.0090198
Wittmer et al.	$10^5$	40 x 30	5.671875	624	0.0090895
Wenger and Devenport	$10^5$	40x 30	5.671875	624	0.0090895
Ljus et al.	$1.3 \times 10^5$	40 x 30	3.906250	452	0.0086421
Ljus et al.	$8.21 \times 10^4$	40 x 30	4.03125	461	0.0087445
Chevrin et al.	8923	40 x 30	2.03125	249	0.0081576
Cole and Glauser	$4.1 \times 10^4$	40 x 30	3.484375	406	0.008582

### 2.3. Bulgular ve Tartışma

Türbülanslı akımların sayısal hesaplamaları çeşitli Reynolds sayılarında borularda gelişen türbülanslı akış için yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Hooper and Musgrove (1997), Saadeh et al. (1997), Wittmer et al. (1998), Wenger and Devenport (1999), Ljus et al. (2002), Chevrin et al. (1992) ve Cole and Glauser’ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır.

Hooper and Musgrove’ın (1997) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.2’de gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından

oluşmuştur. Boru giriş, çıkış, üst cidar yakınında ve simetri ekseni bölgesinde ağ daha sık oluşturulmuştur.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan hız radyal profilleri,  $x/d = 1$ 'den 128.57'e kadar olan aksenal kesitlerde  $Re = 178000$  için şekil 2-3'te Hooper and Musgrove'in (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri, o aksenal kesitteki boru simetri ekseni hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Hooper and Musgrove'un (1997) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

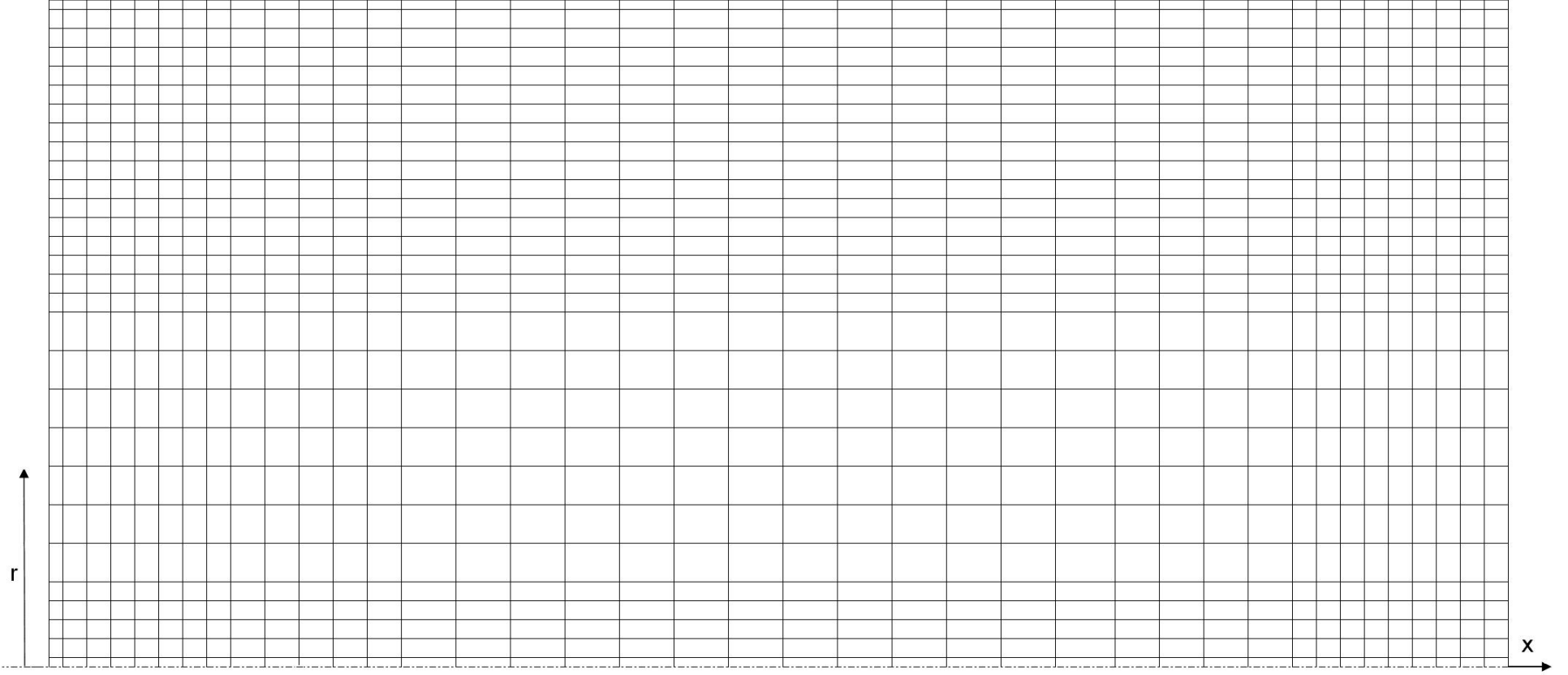
Şekil 2-4'te boruda  $x/d = 128.57$  kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profili Hooper and Musgrove'in (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profili, aksenal kesitte boru simetri ekseni hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Hooper and Musgrove'un (1997) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-5'te Hooper and Musgrove'in (1997) borusunda simetri ekseni boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri ekseni boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

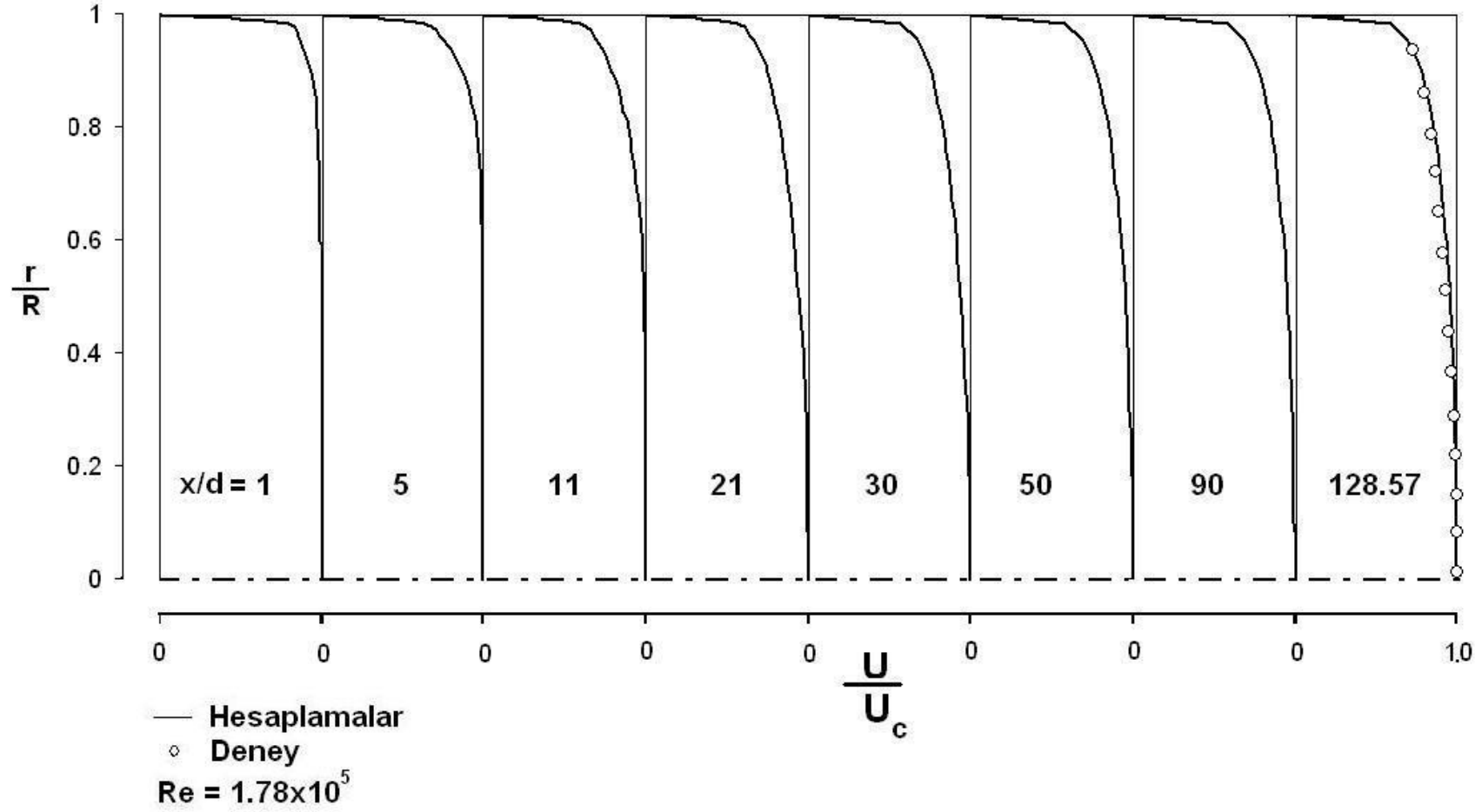
Şekil 2-6'da Hooper and Musgrove'in (1997) borusunda hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak gösterilmiştir. Şekil 2-7'de ise Hooper and Musgrove'in (1997) borusunda hesaplanan ( $x/d = 128.57$ ) türbülans kinetik enerji radyal profili deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere hesaplanan türbülans kinetik enerji profili ile Hooper and Musgrove'in (1997) deneysel ölçümleri arasında iyi bir uyum bulunmaktadır. Bu şekiller, boyutsuz

türbülans kinetik enerji radyal profillerinin boru boyunca nasıl geliştiklerini sergilemektedir.

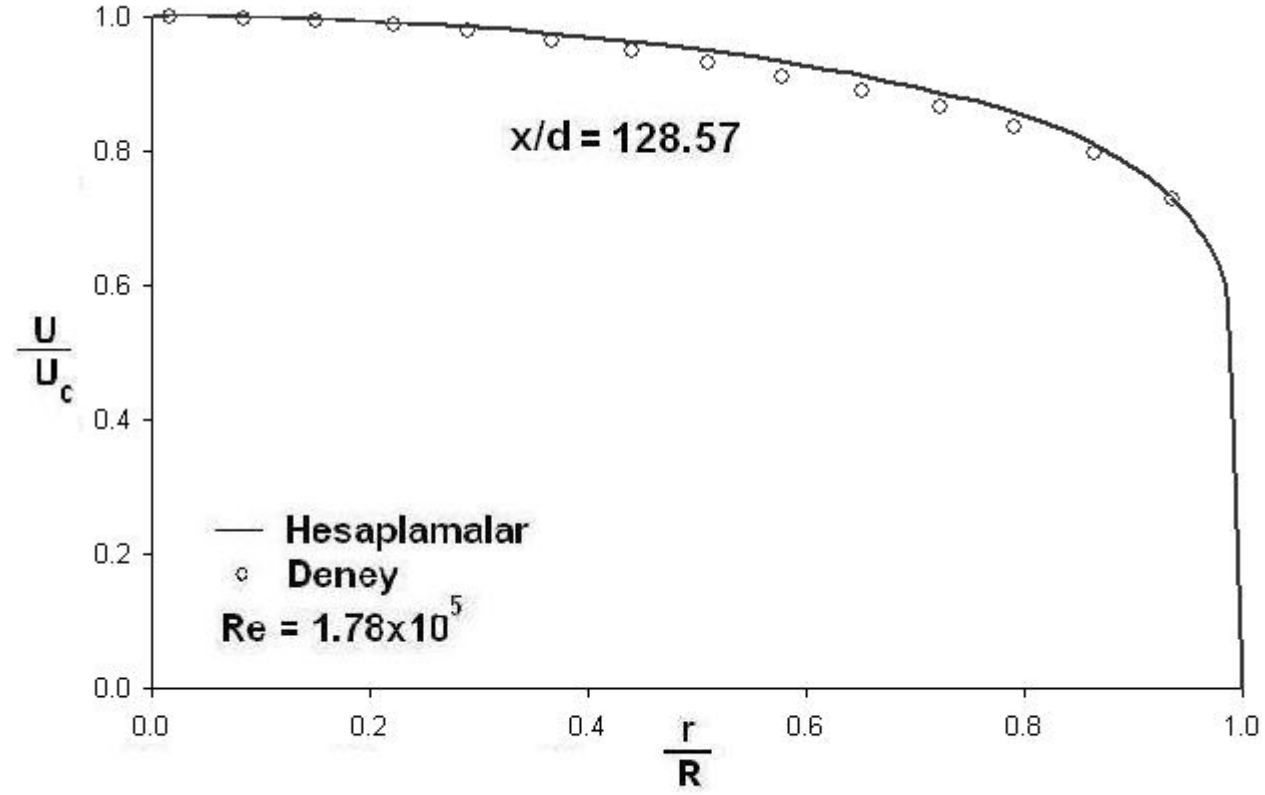
Hooper and Musgrove'in (1997) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden "r/R" olarak şekil 2-8'de, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{e_{in}}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden "r/R" olarak şekil 2-9'da, hesaplanan cidar kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden "x/d" olarak şekil 2-10'da ve son olarak hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f=2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden "x/d" olarak Şekil 2-11'de gösterilmiştir. Şekil 2-8 ile şekil 2-9 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.



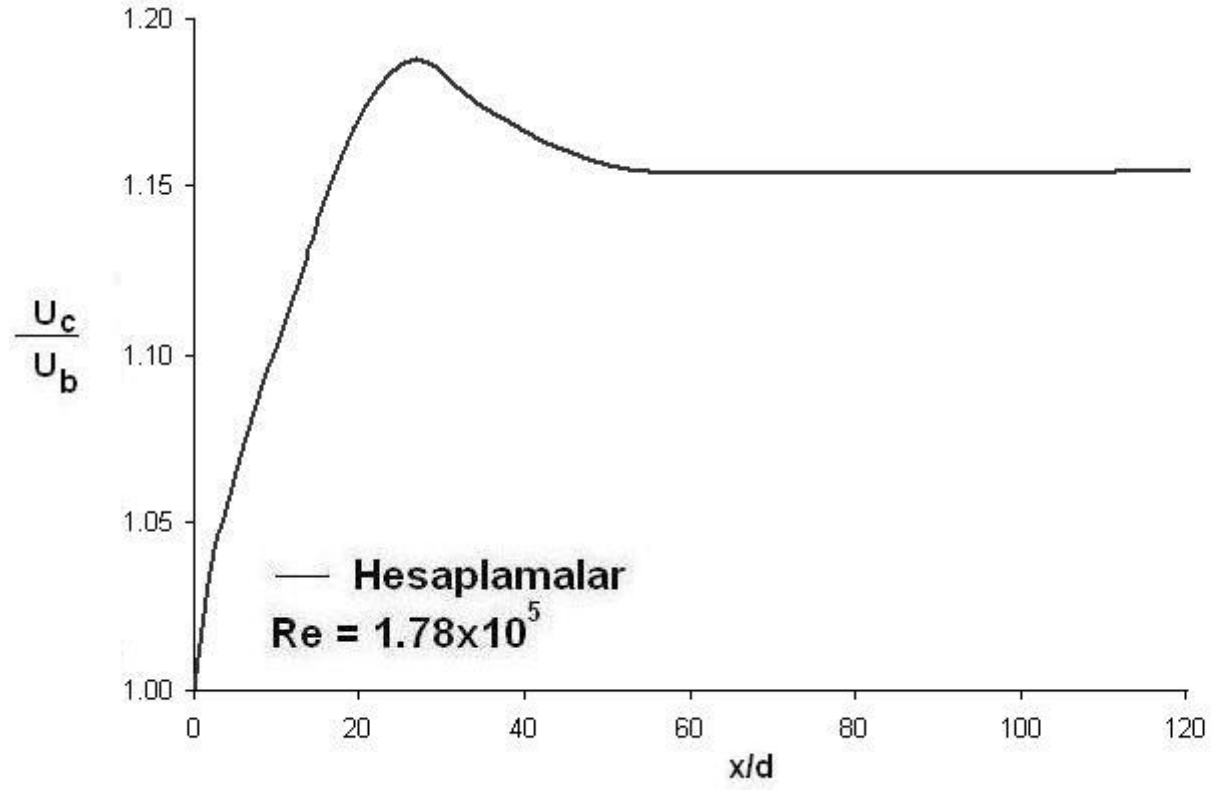
**Şekil 2-2** Hooper and Musgrove'in (1997) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı



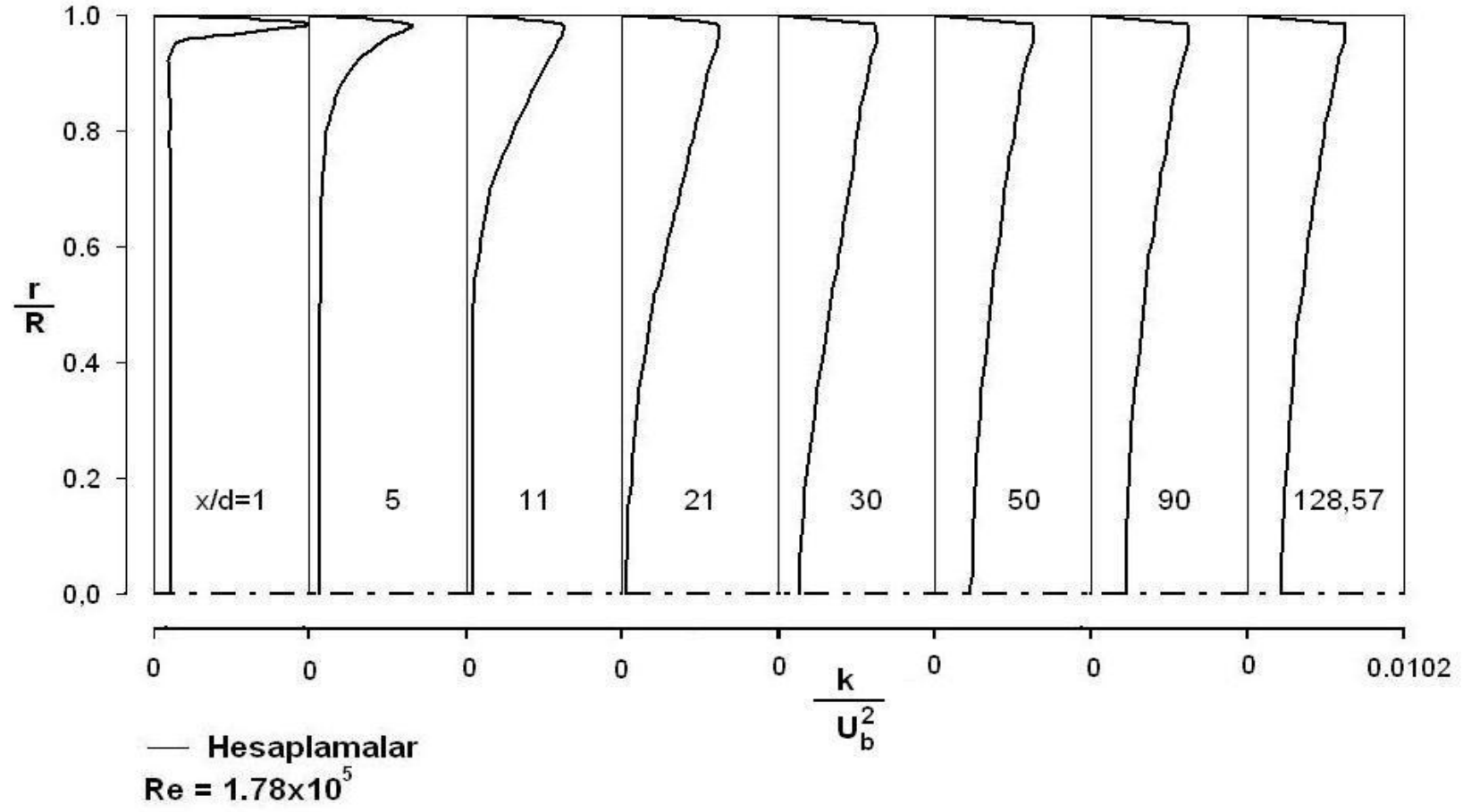
Şekil 2-3 Dairesel Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Hooper and Musgrove'ın (1997) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



Şekil 2-4 Boruda  $x/d = 128.57$  kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profilinin Hooper and Musgrove'in (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması

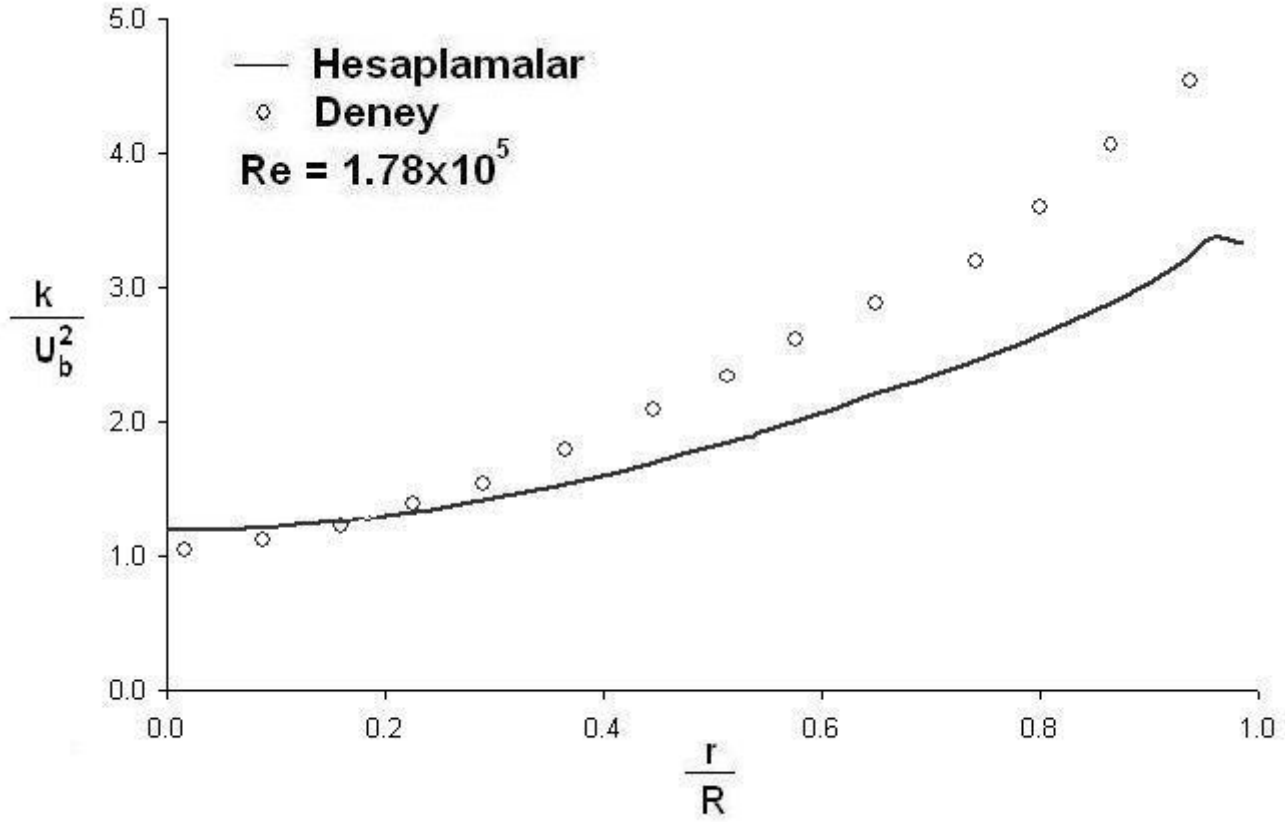


Şekil 2-5 Hooper and Musgrove'in (1997) borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi

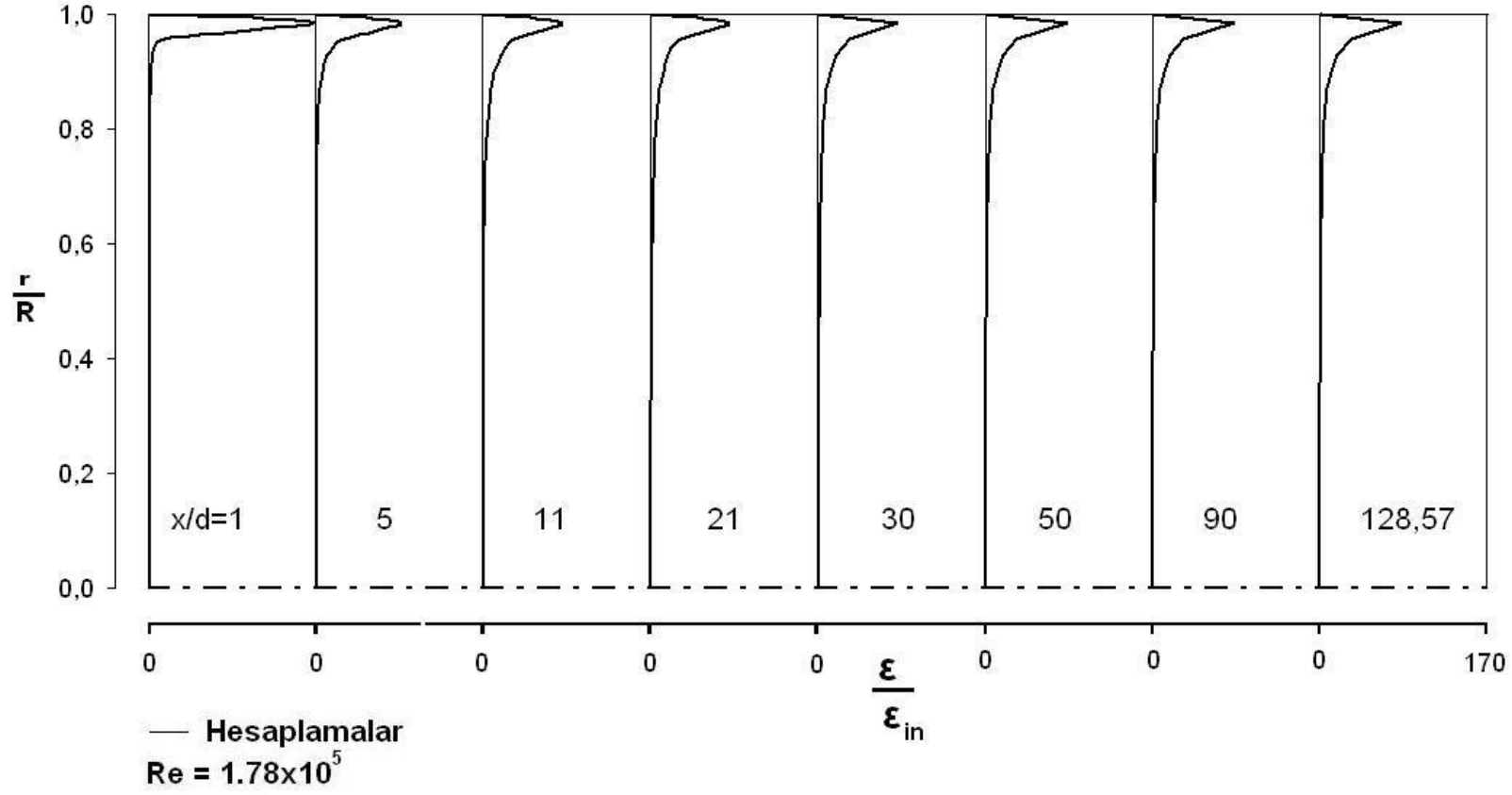


Şekil 2-6 Hooper and Musgrove'nin (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi

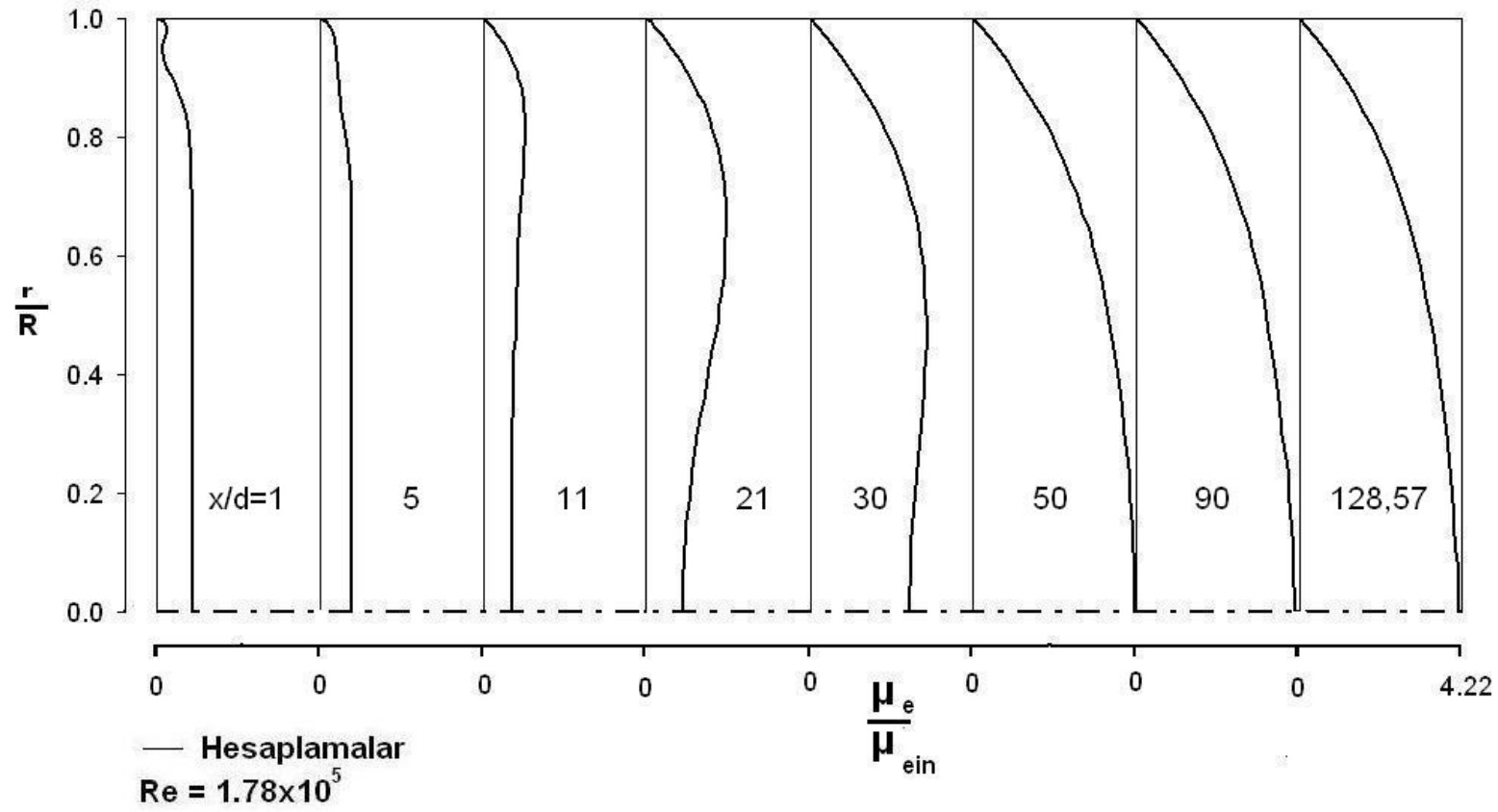




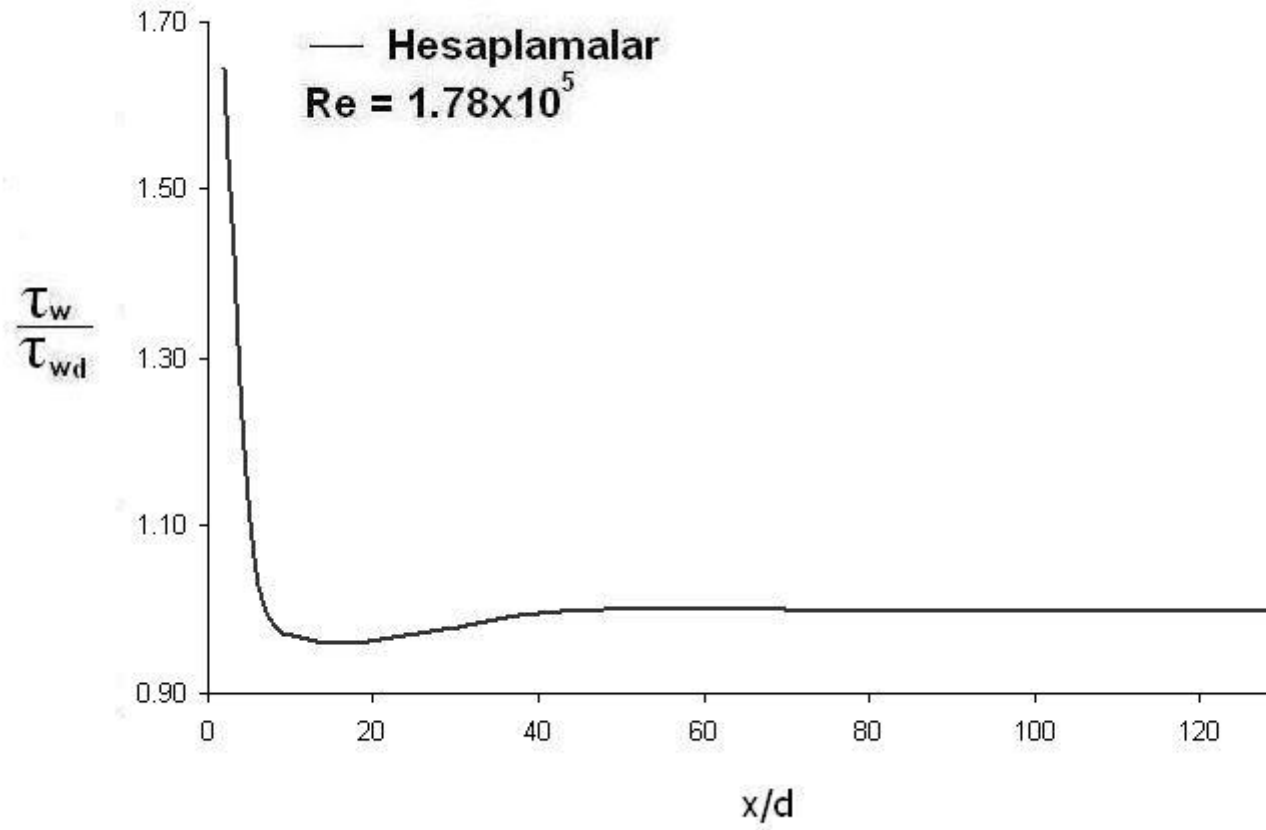
**Şekil 2-7** Boruda  $x/d = 128.57$  kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Hooper and Musgrove'nin (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması



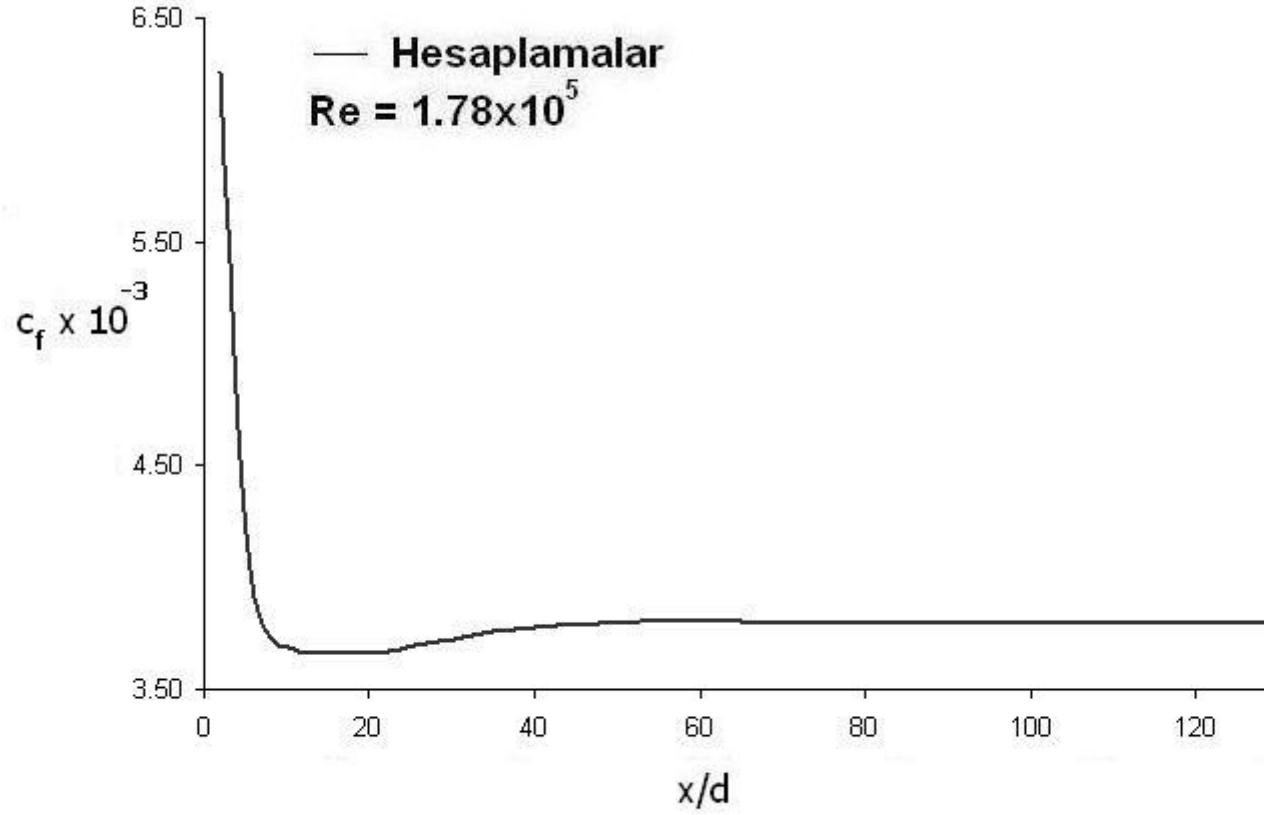
Şekil 2-8 Hooper and Musgrove'nin (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-9 Hooper and Musgrove'in (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-10 Hooper and Musgrove'in (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-11 Hooper and Musgrove'nin (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi

Saadeh et al.'ın (1997) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.12'de gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş, üst cidar yakınında ve simetri eksenini bölgesinde ağ daha sık oluşturulmuştur.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan hız radyal profilleri,  $x/d = 1$ 'den 320'e kadar olan aksel kesitlerde  $Re = 15000$  için şekil 2-13'te Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksel hız radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksel hız profili ile Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-14'te boruda  $x/d = 170$  kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksel hız radyal profili, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksel hız profili ile Saadeh et al. (1997) deneysel ölçümleri arasında iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-15'te Saadeh et al.'ın (1997) türbülanslı borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri eksenini boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

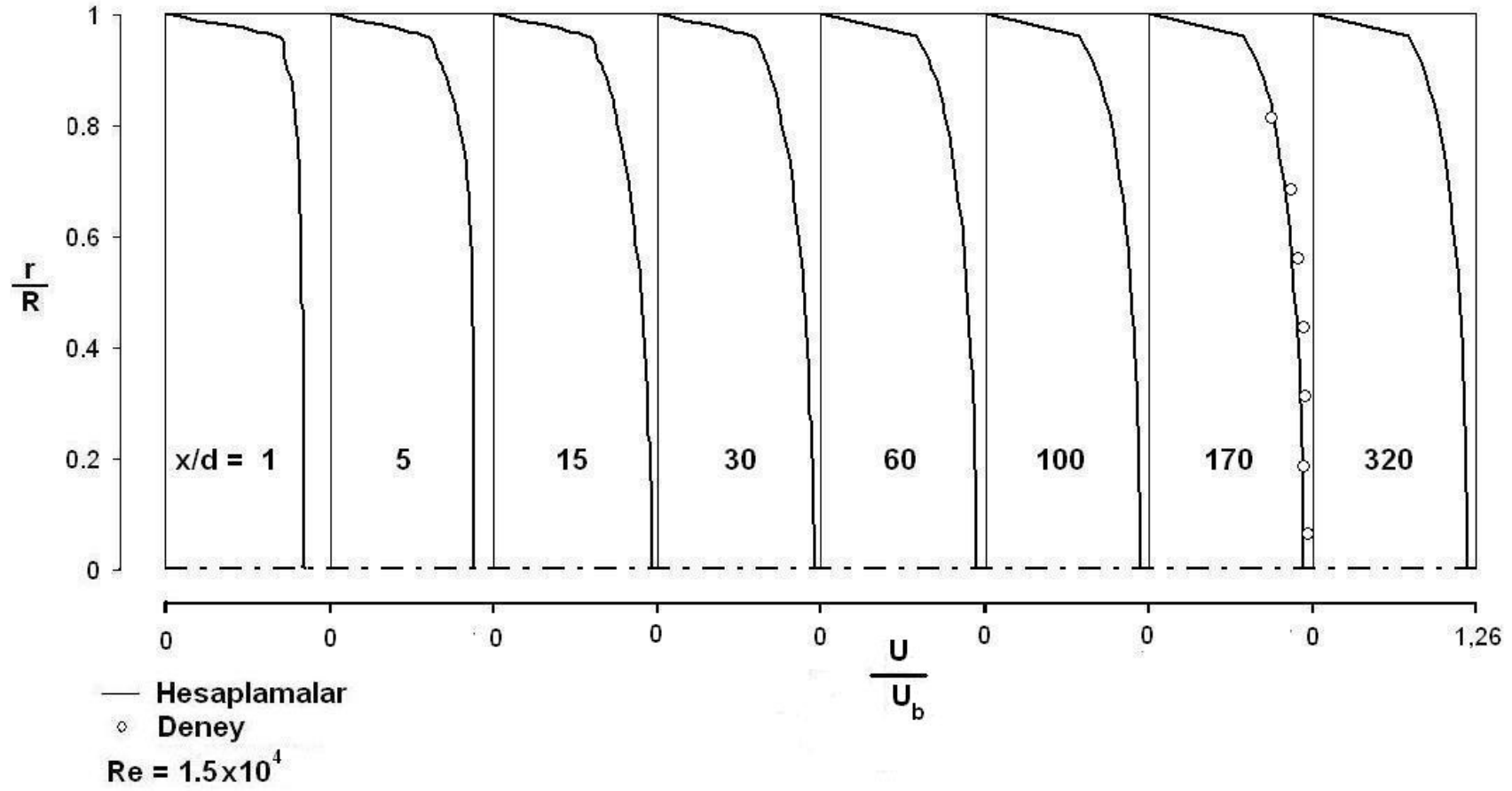
Saadeh et al.'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-16'da, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-17'de, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{e, in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak

şekil 2-18’de, hesaplanan cidar kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “x/d” olarak Şekil 2-19’da, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f=2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden x/d olarak şekil 2-20’de gösterilmiştir. Şekil 2-17 ile şekil 2-18 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca gelişimini sergilemektedir.

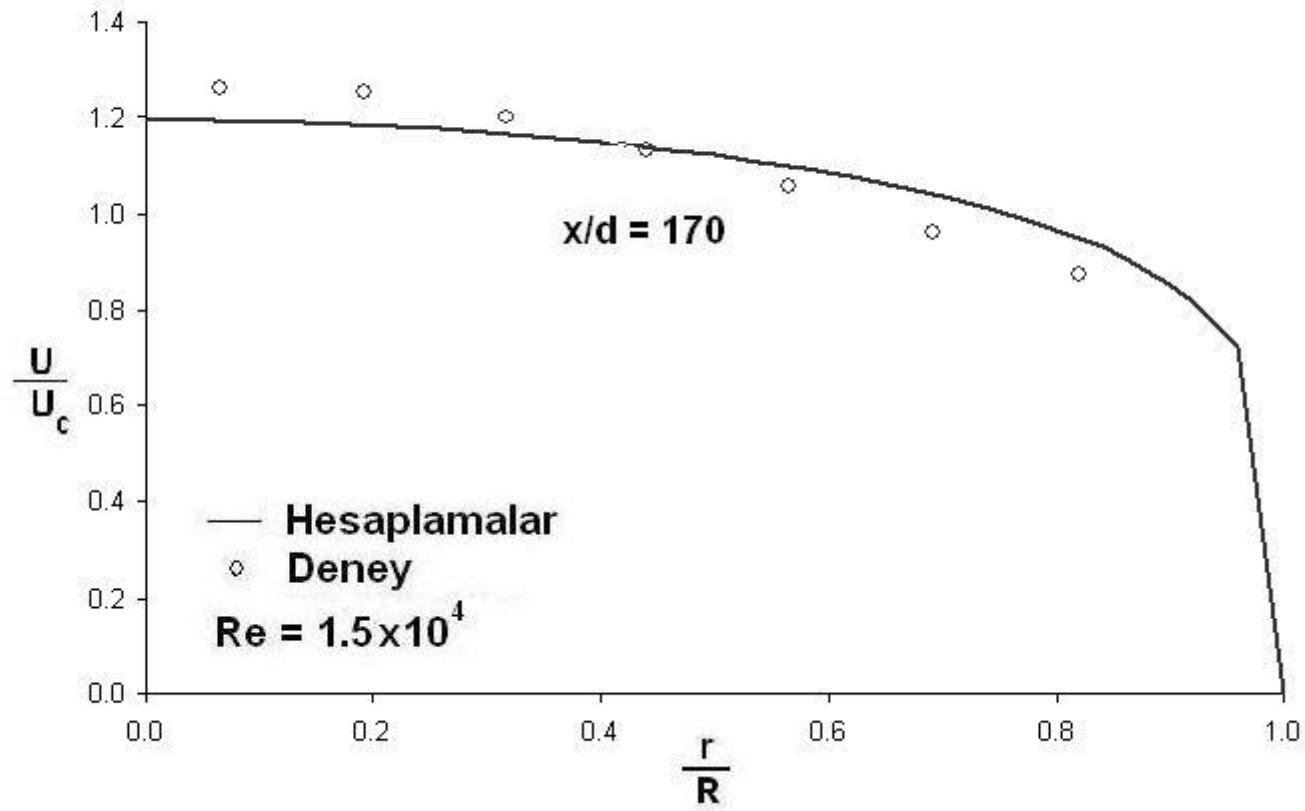


Şekil 2-12 Saadeh et al.'m (1997) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı

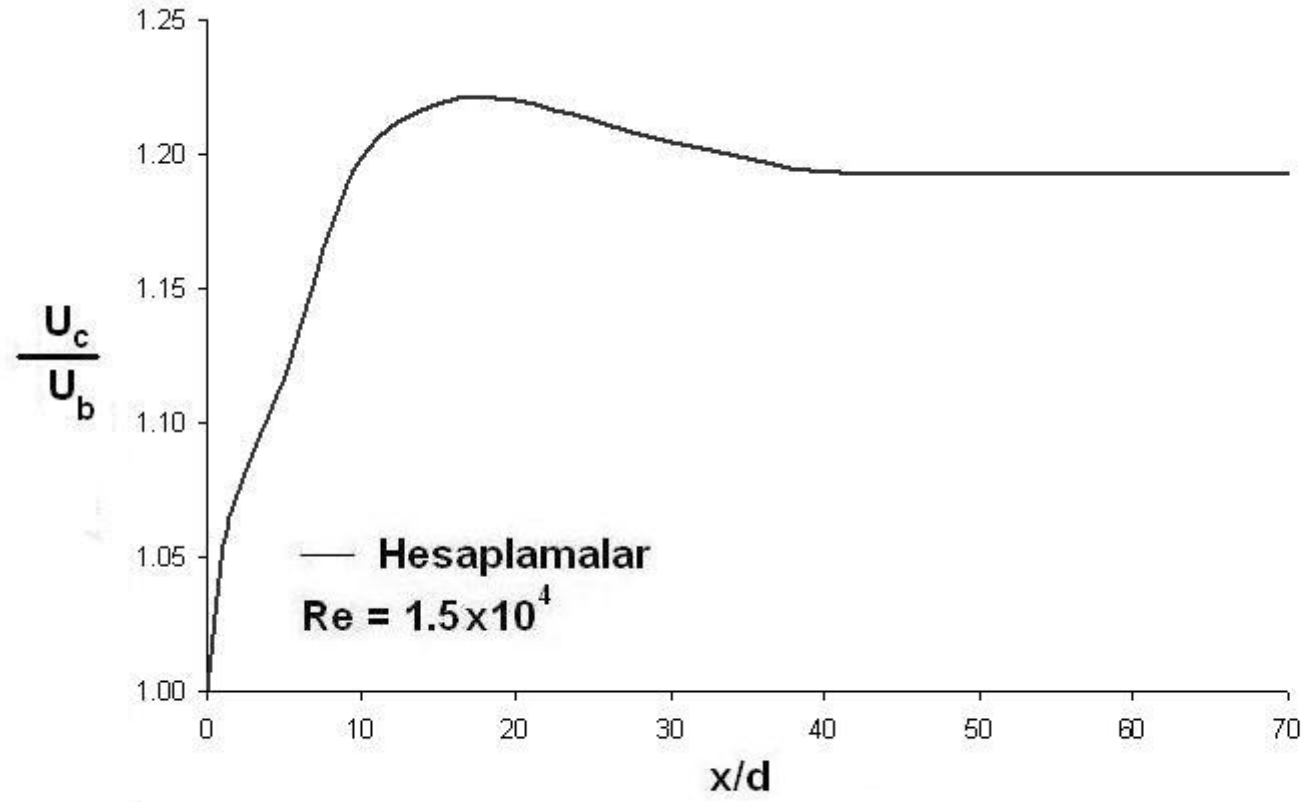




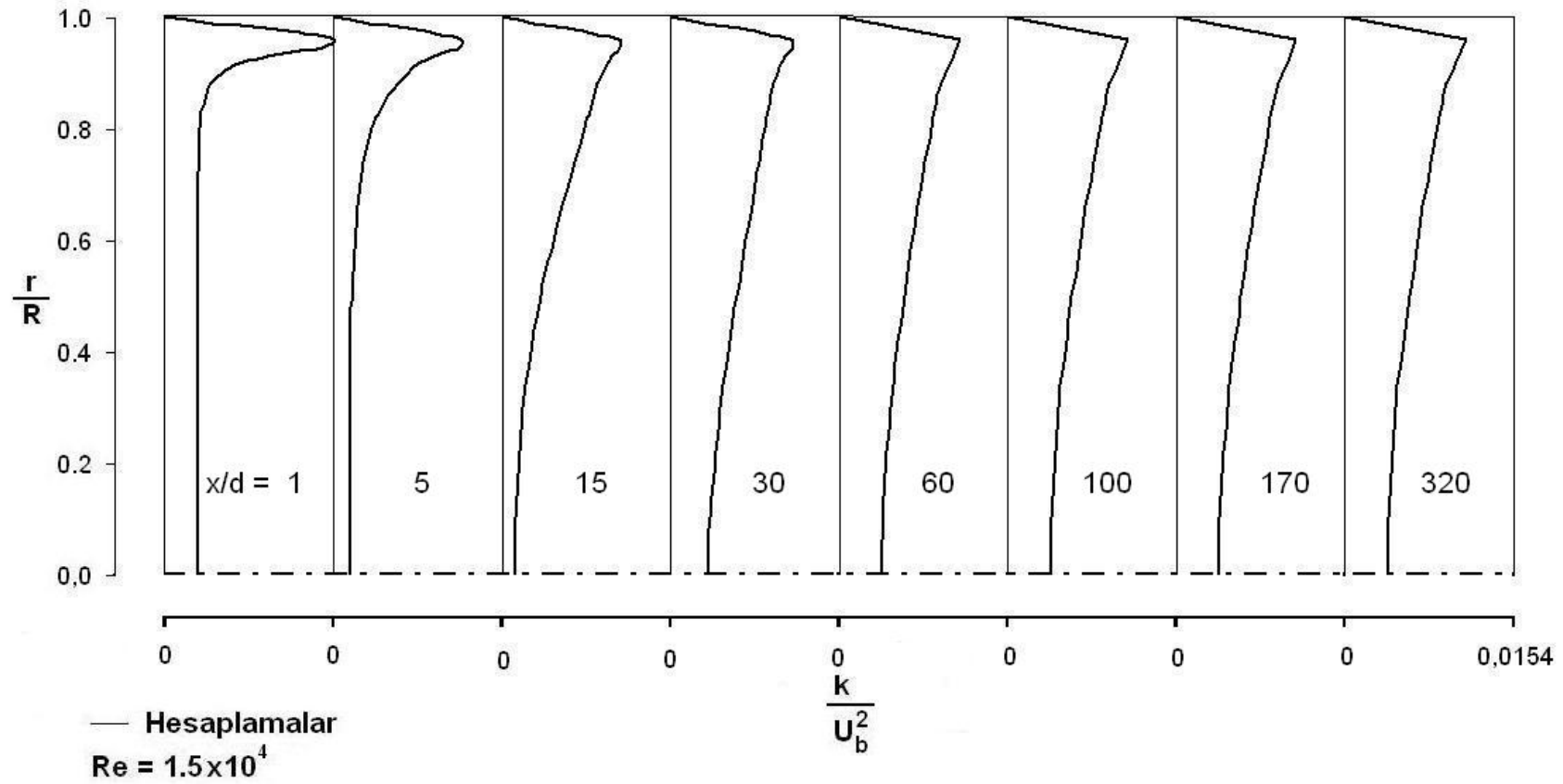
Şekil 2-13 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



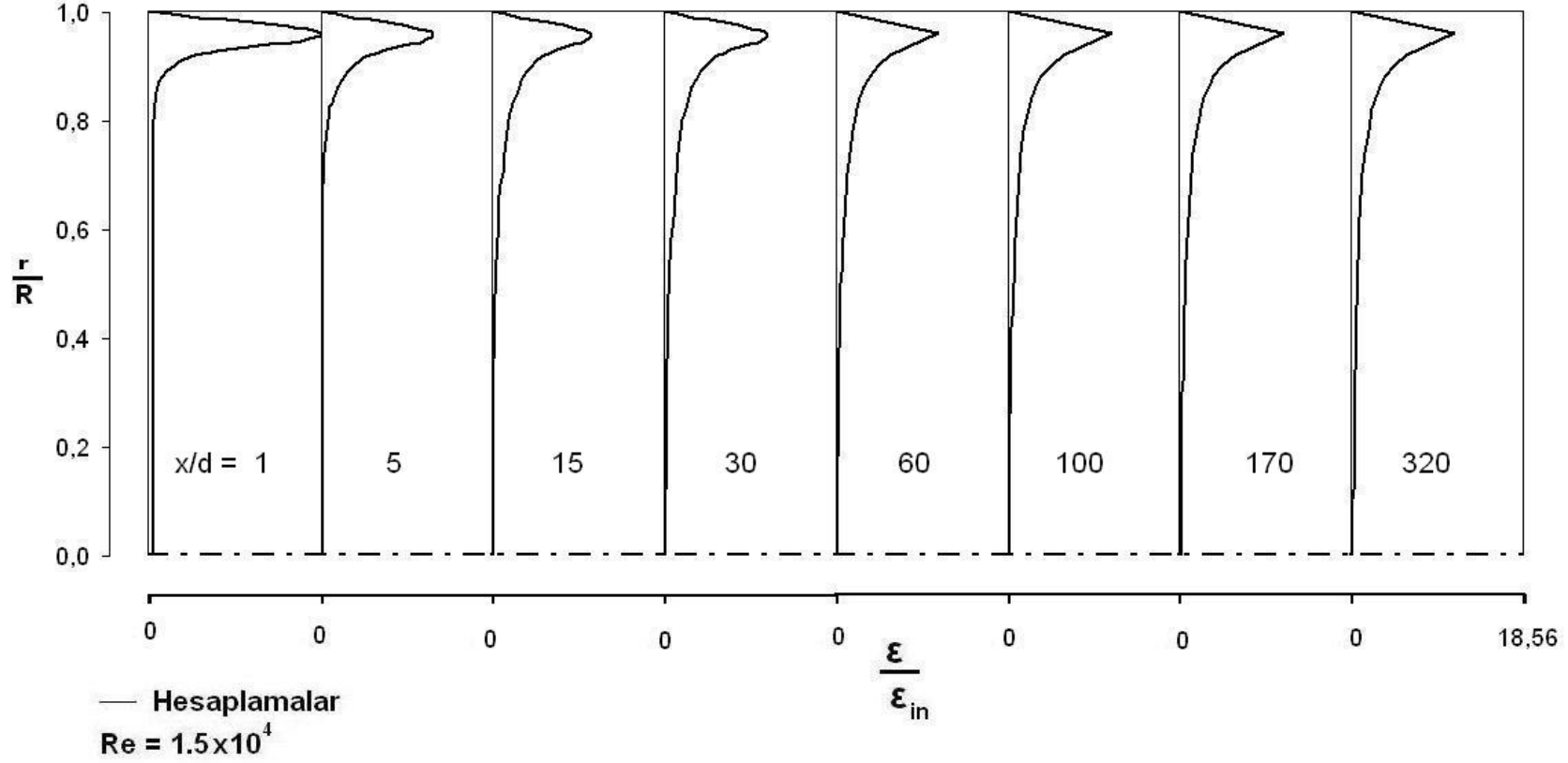
Şekil 2-14 Boruda  $x/d = 170$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Saadeh et al.'ın (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması



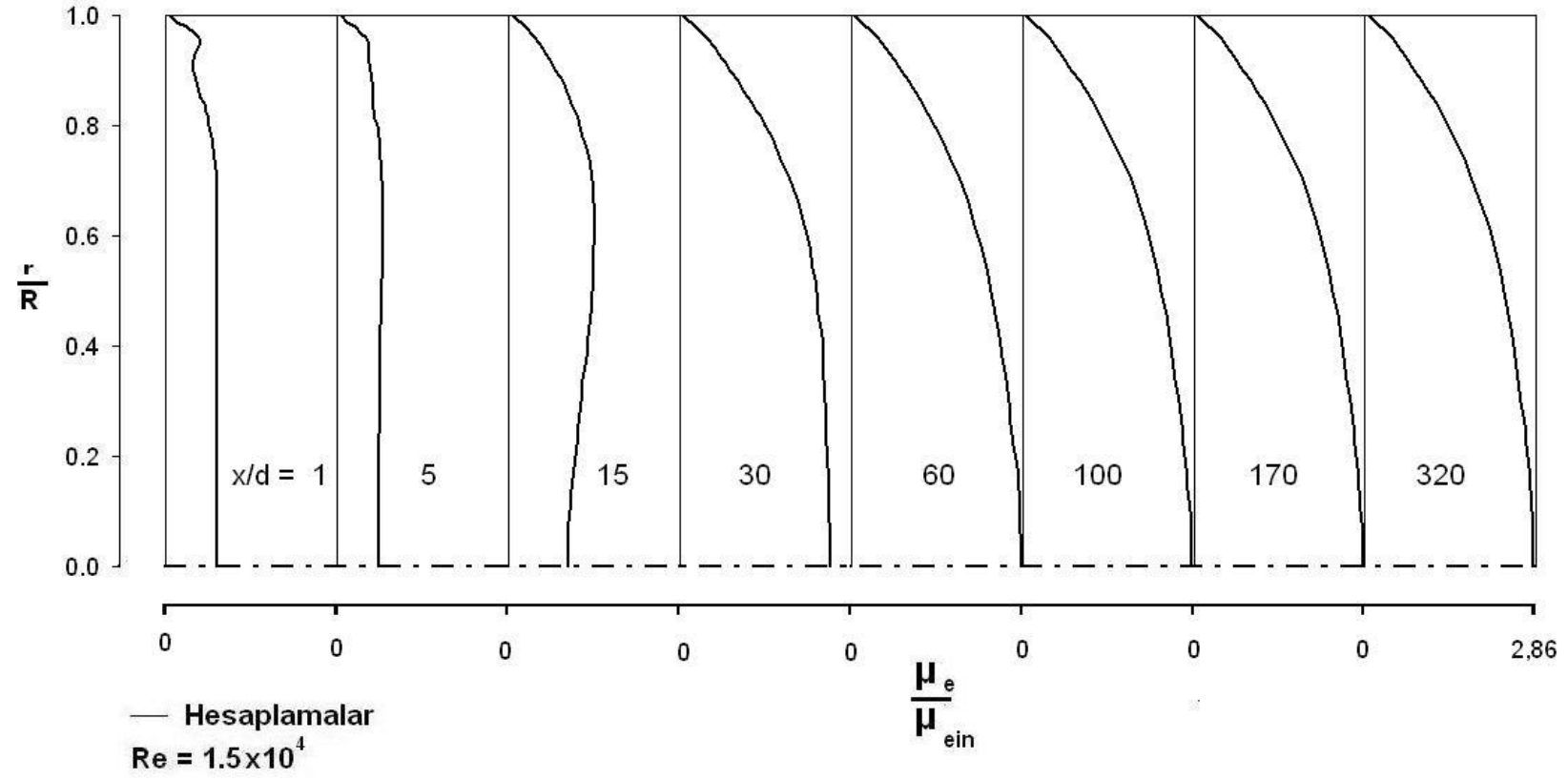
Şekil 2-15 Saadeh et al.'in (1997) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksinel hızın değişimi



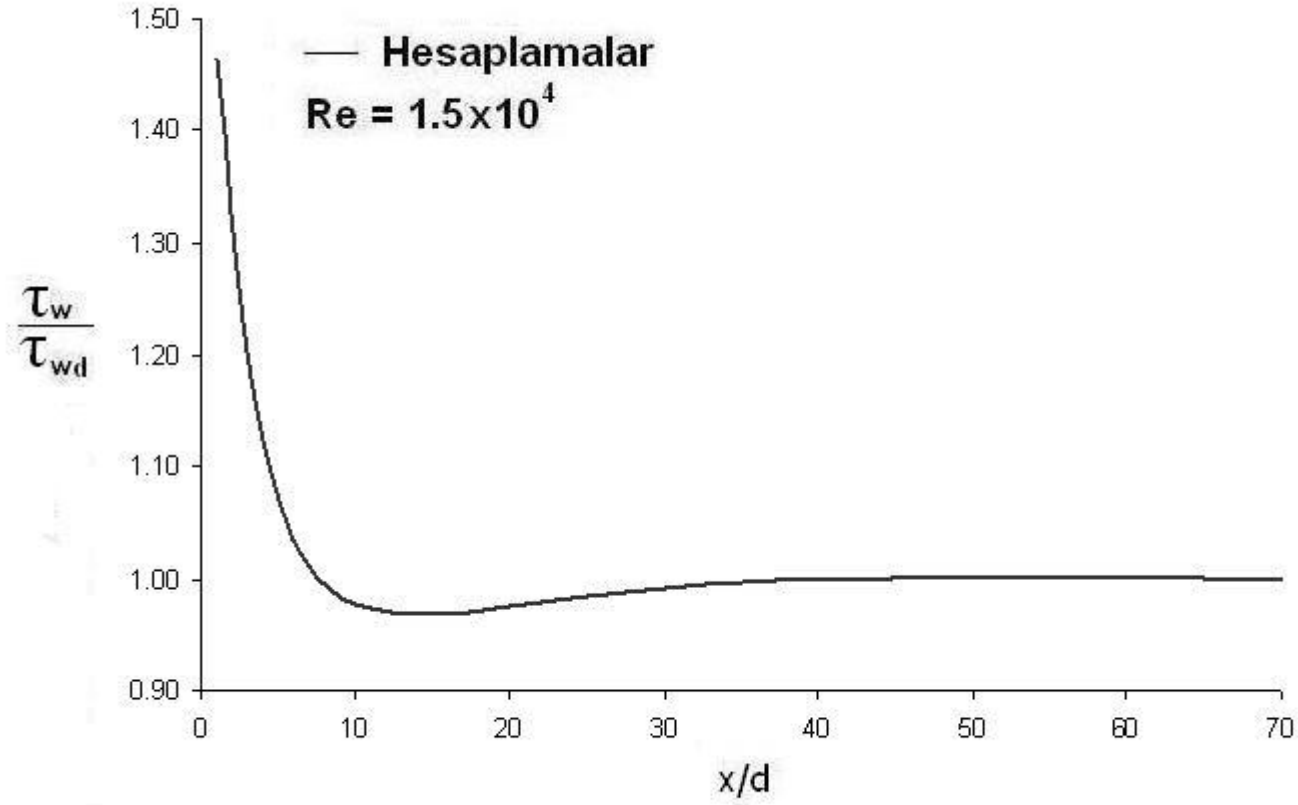
Şekil 2-16 Saadeh et al.'ın (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi



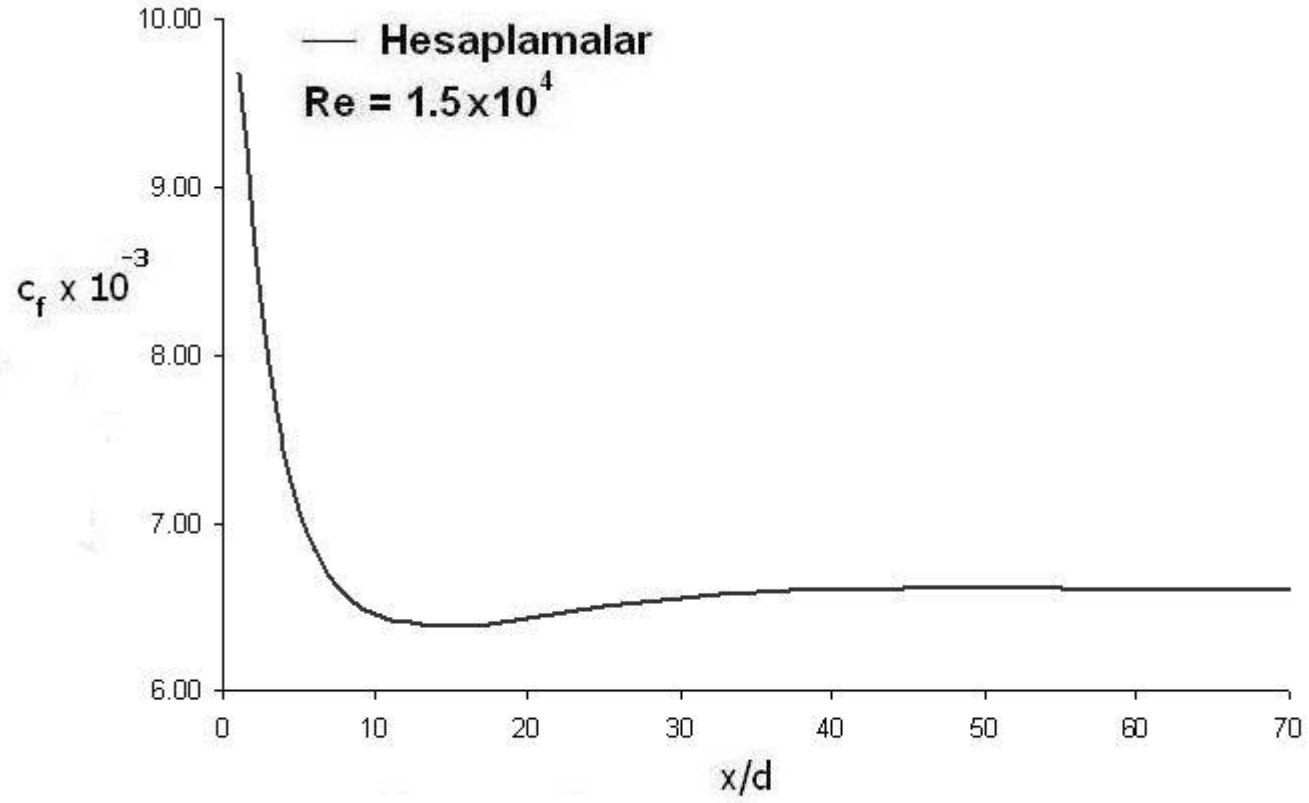
Şekil 2-17 Saadeh et al.'in (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-18 Saadeh et al. (1997) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



**Şekil 2-19** Saadeh et al.'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-20 Saadeh et al.'ın (1997) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi



Wittmer et al.'ın (1998), akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.21'de gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş, üst cidar yakınında, simetri eksenini civarında ve çıkış bölgesinde ağ daha sık oluşturulmuştur.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 3$ 'den 240.74'e kadar olan aksinel kesitlerde  $Re = 100000$  için şekil 2-22'de Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksinel hız radyal profilleri, o aksinel kesitteki boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksinel hız profili ile Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

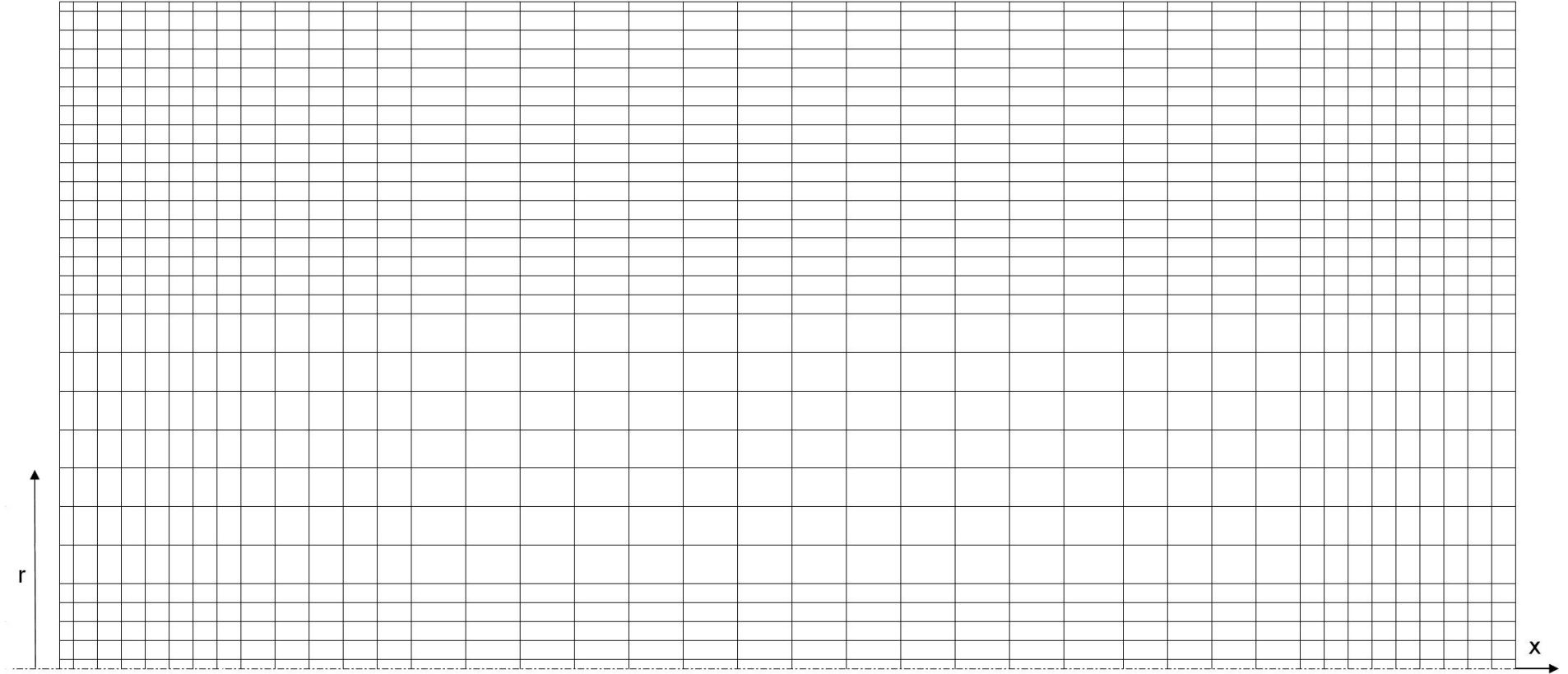
Şekil 2-23'te boruda  $x/d = 240.74$  kesitinde hesaplanan aksinel hız radyal profili Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksinel hız radyal profili, o aksinel kesitinde boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksinel hız profili ile Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-24'te Wittmer et al.'ın (1998) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksinel hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri eksenini boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

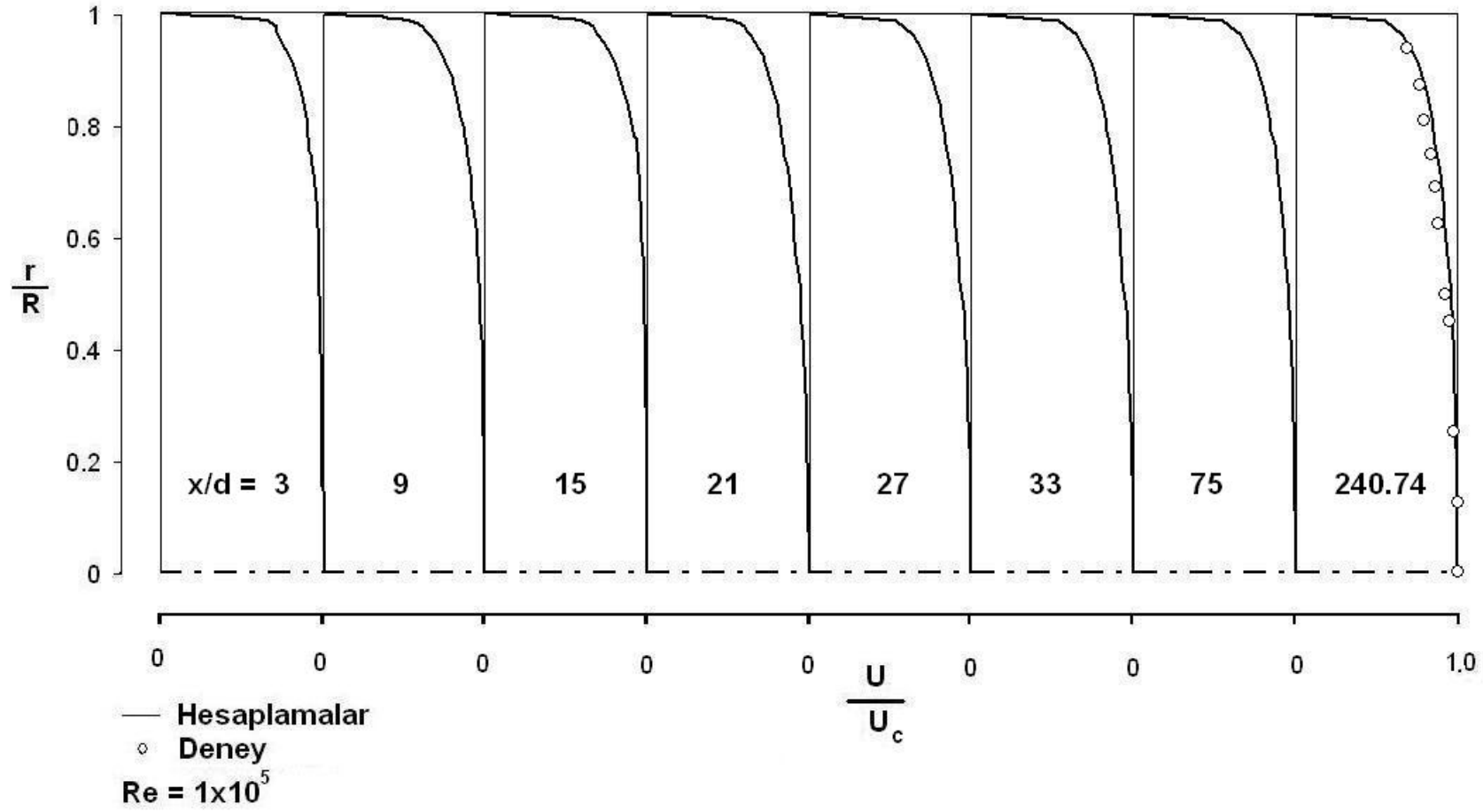
Şekil 2-25'te Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak gösterilmiştir. Şekil 2-26'da ise Wittmer et al.'ın (1998) borusunda hesaplanan ( $x/d = 240.74$ ) türbülans kinetik enerji radyal profili deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere hesaplanan türbülans kinetik enerji profili ile Wittmer et al.'ın (1998)

deneysel ölçümleri arasında uyum bulunmaktadır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin boru boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.

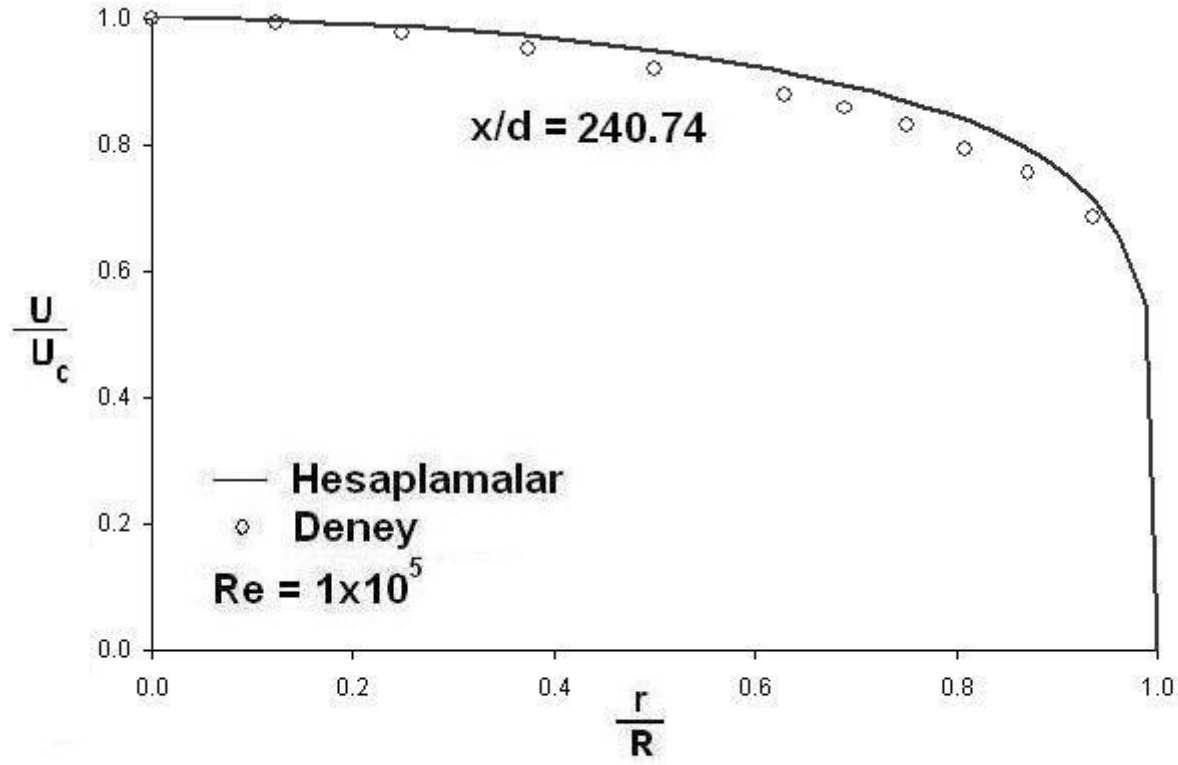
Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-27’de, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{e, in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-28’de, hesaplanan cidar kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak şekil 2-29’da ve hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f=2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak Şekil 2-30’da gösterilmiştir. Şekil 2-27 ile şekil 2-28 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.



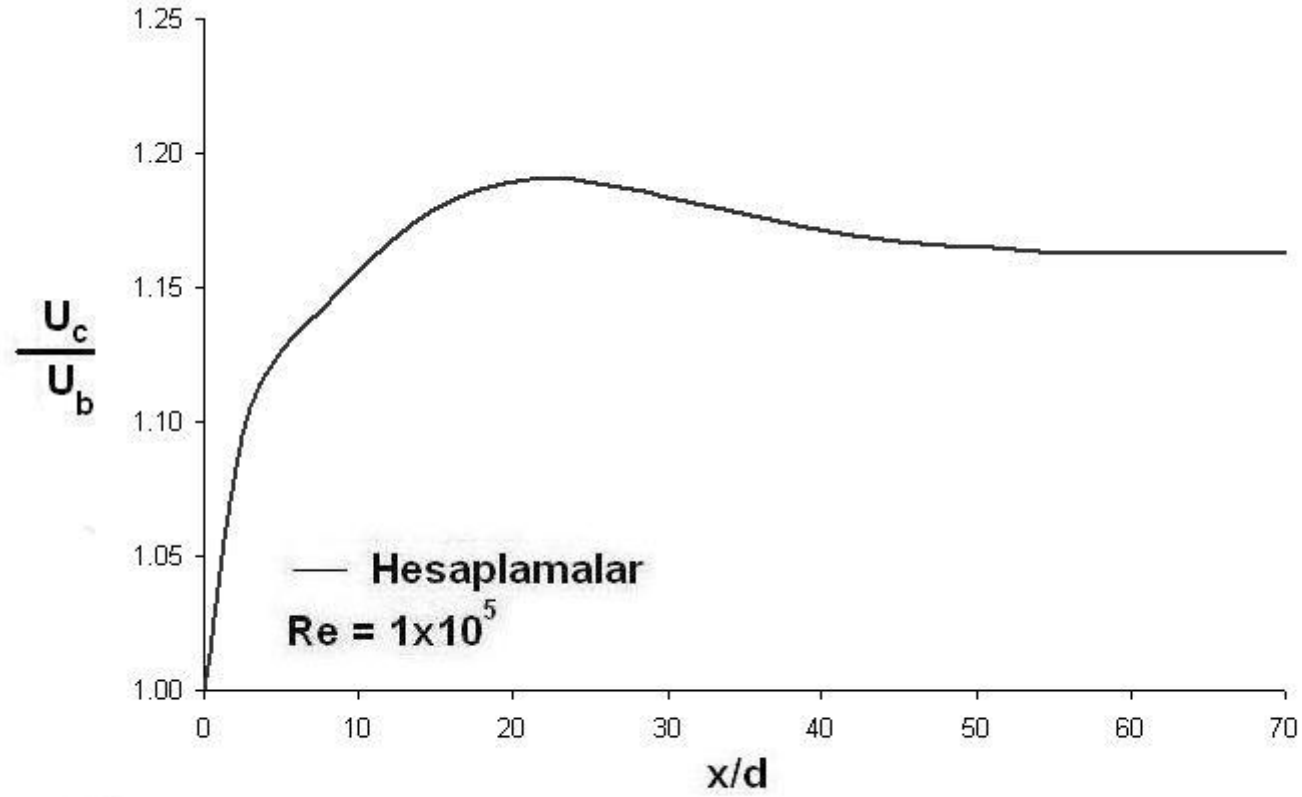
Şekil 2-21 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı



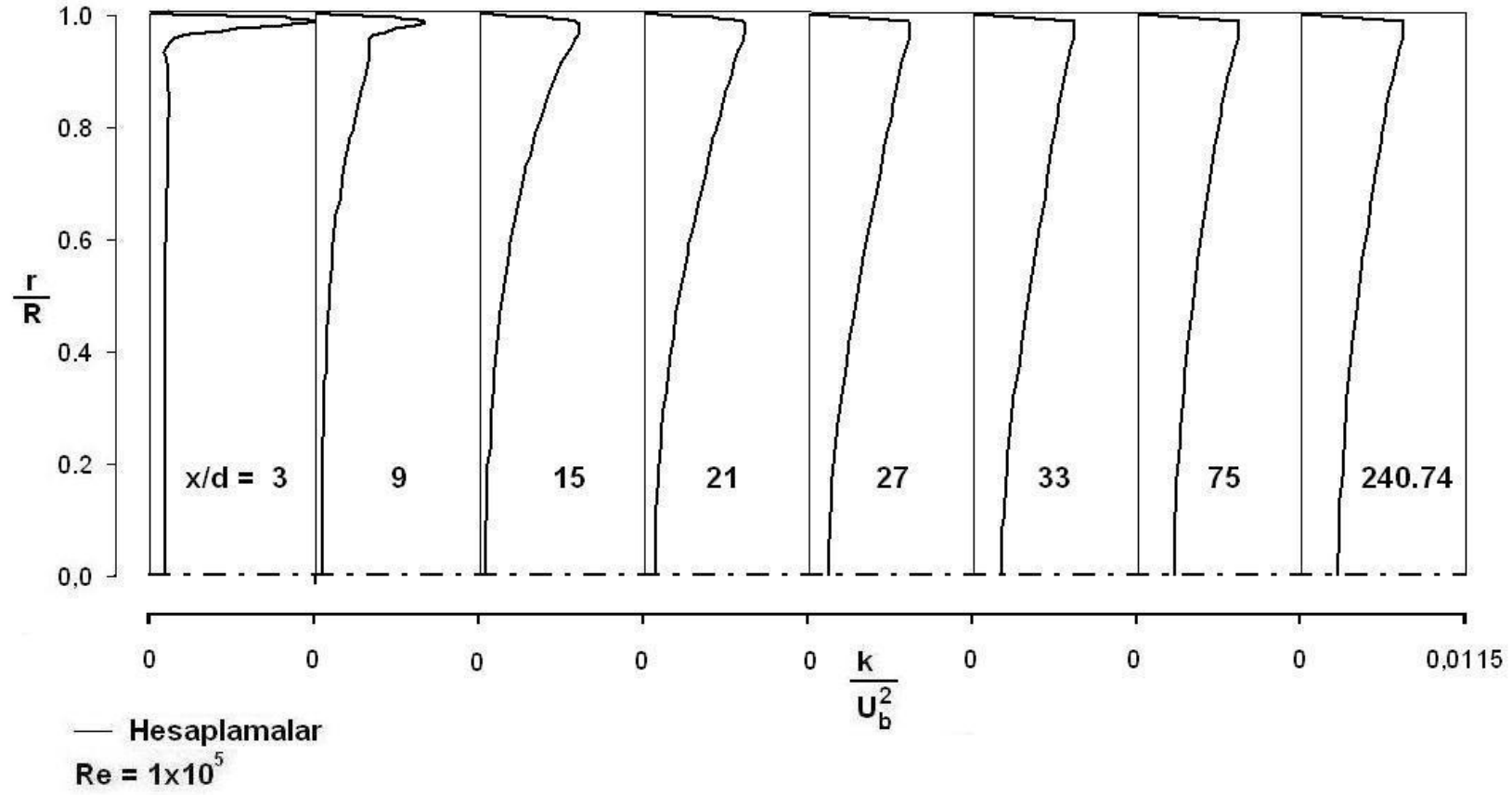
Şekil 2-22 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



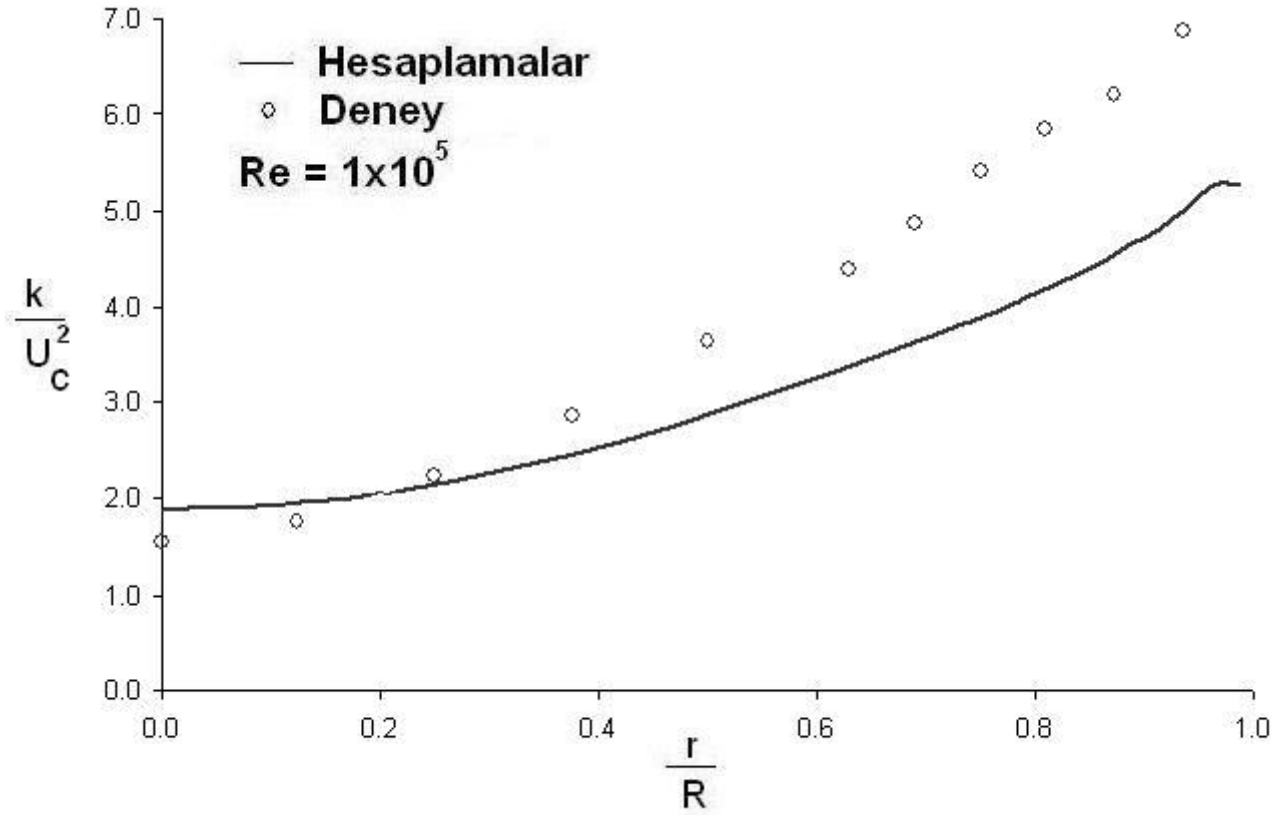
Şekil 2-23 Boruda  $x/d = 240.74$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması



Şekil 2-24 Wittmer et al.'ın (1998) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değışimi

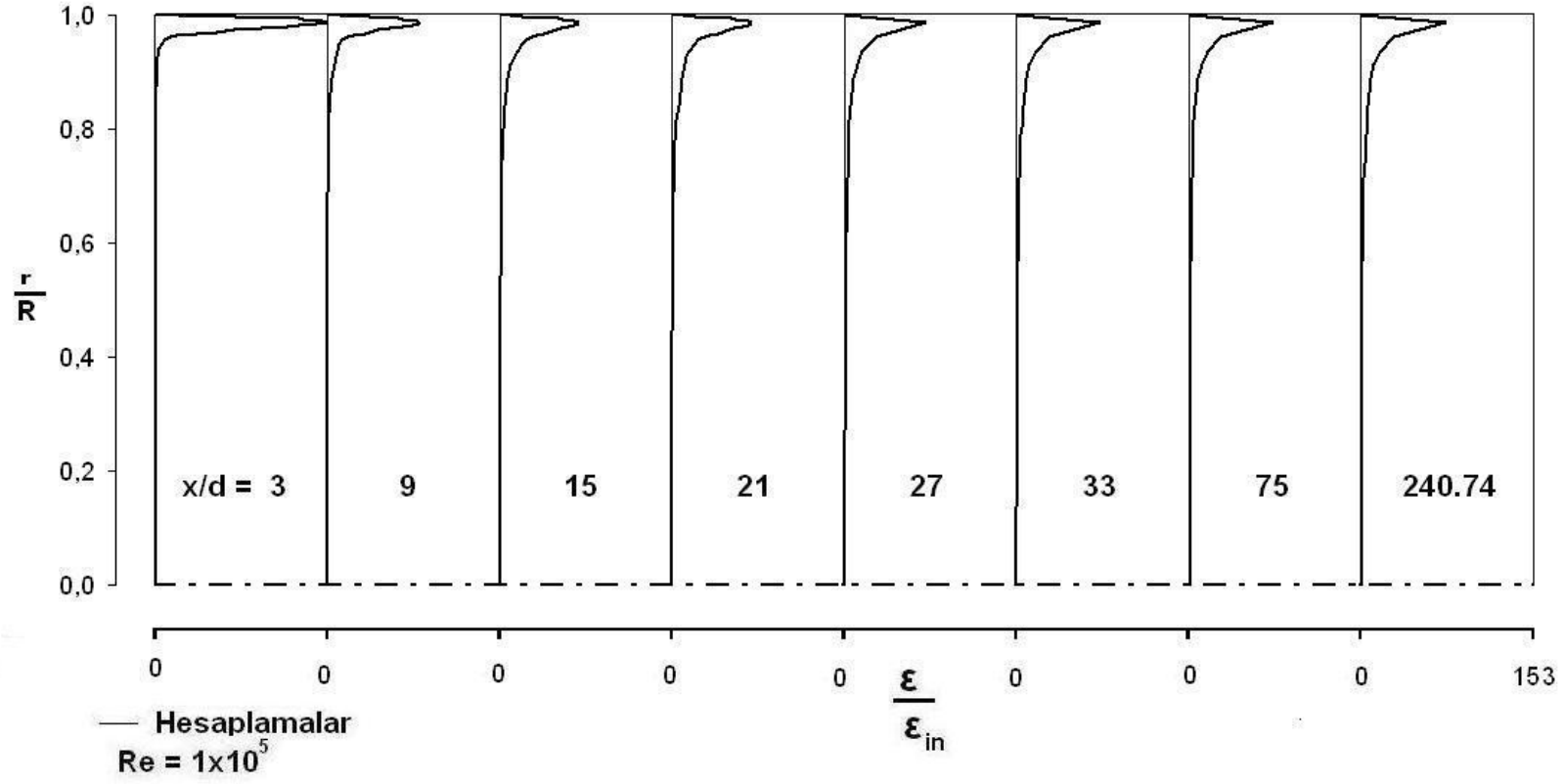


Şekil 2-25 Wittmer et al.'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi

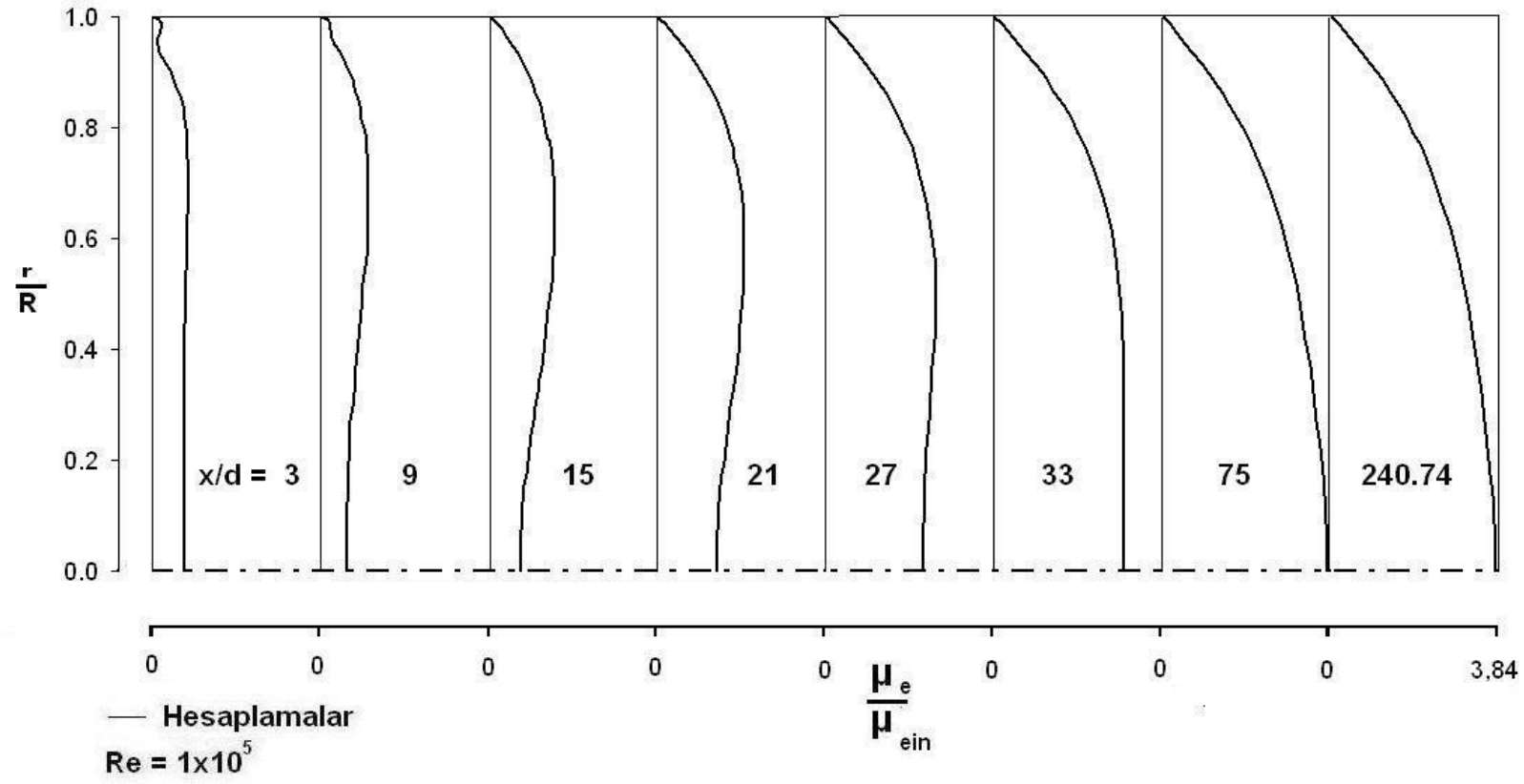


**Şekil 2-26** Boruda  $x/d = 240.74$  kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Wittmer et al.'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması

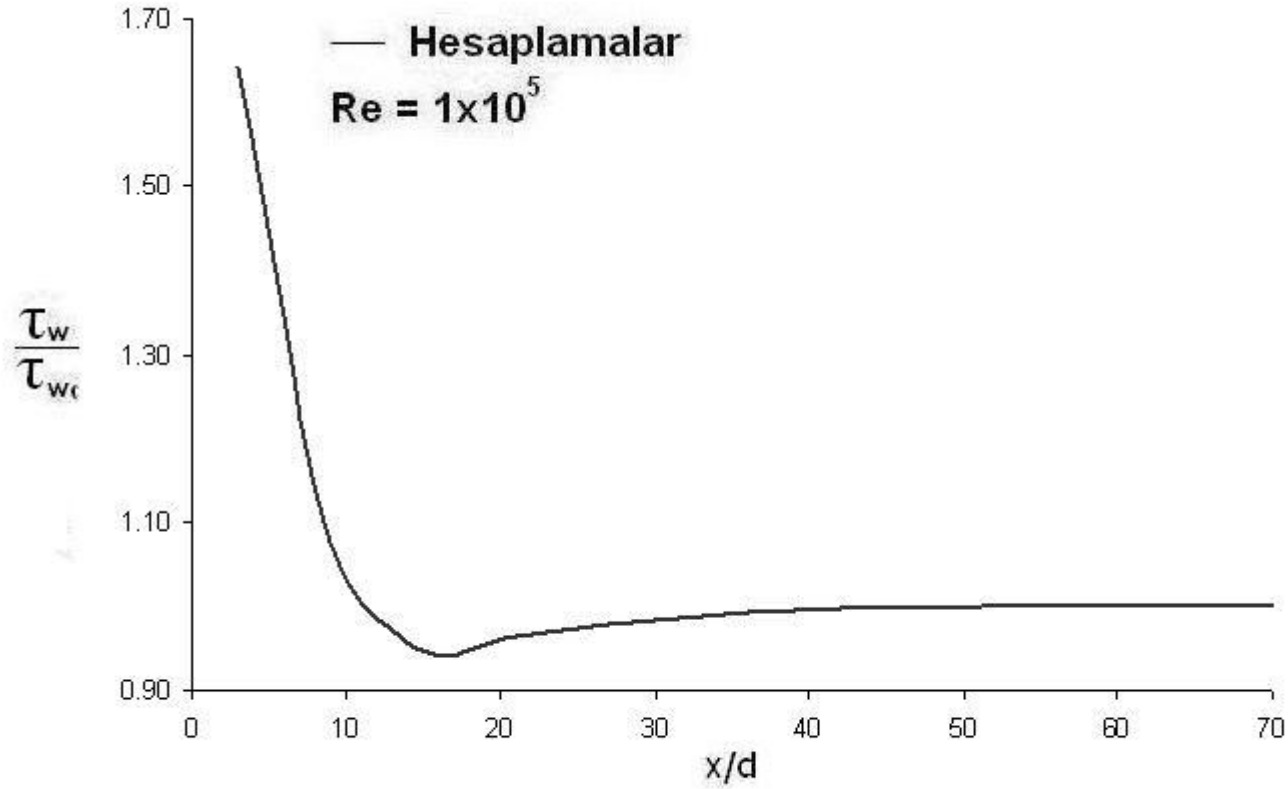




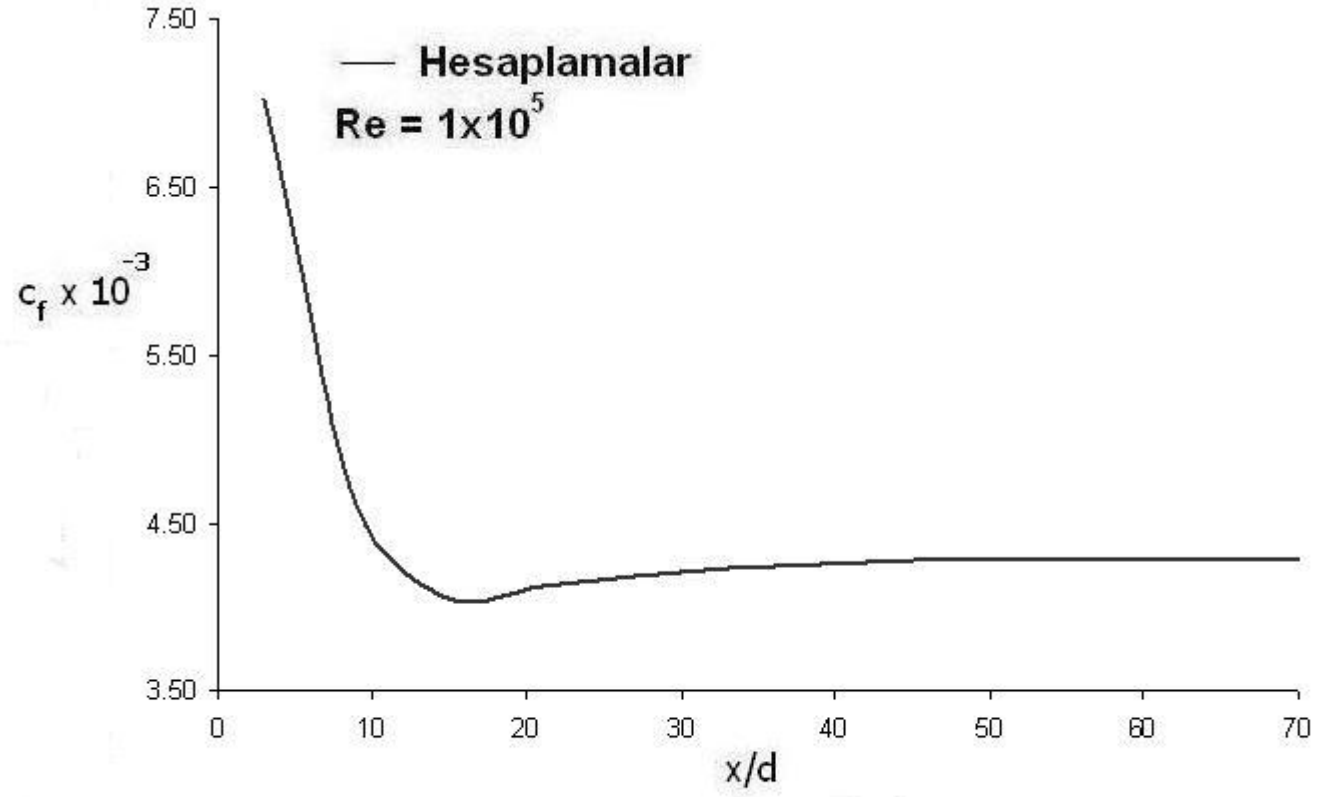
Şekil 2-27 Wittmer et al.'in (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-28 Wittmer et al.'in (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-29 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı

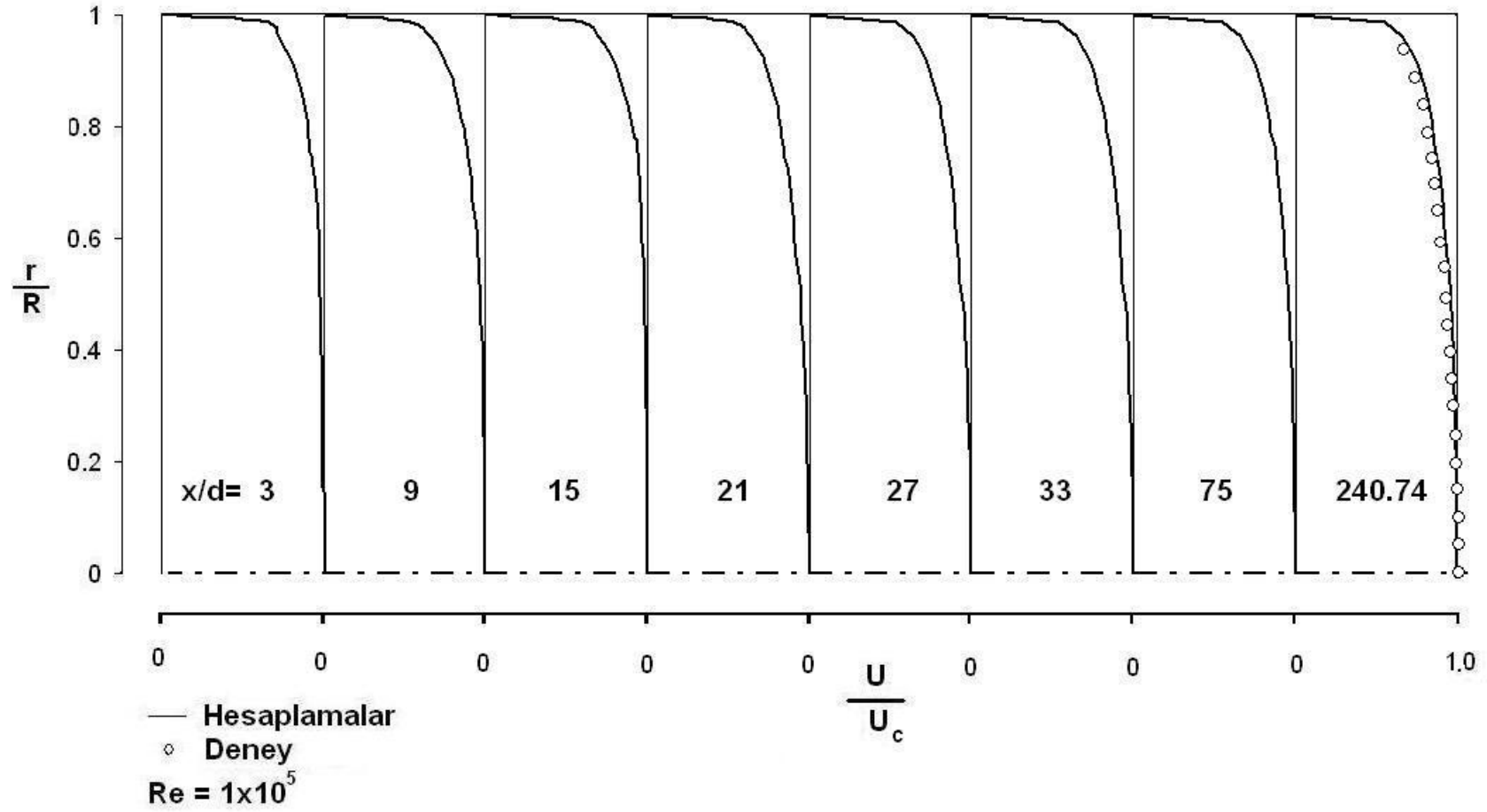


Şekil 2-30 Wittmer et al.'ın (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi

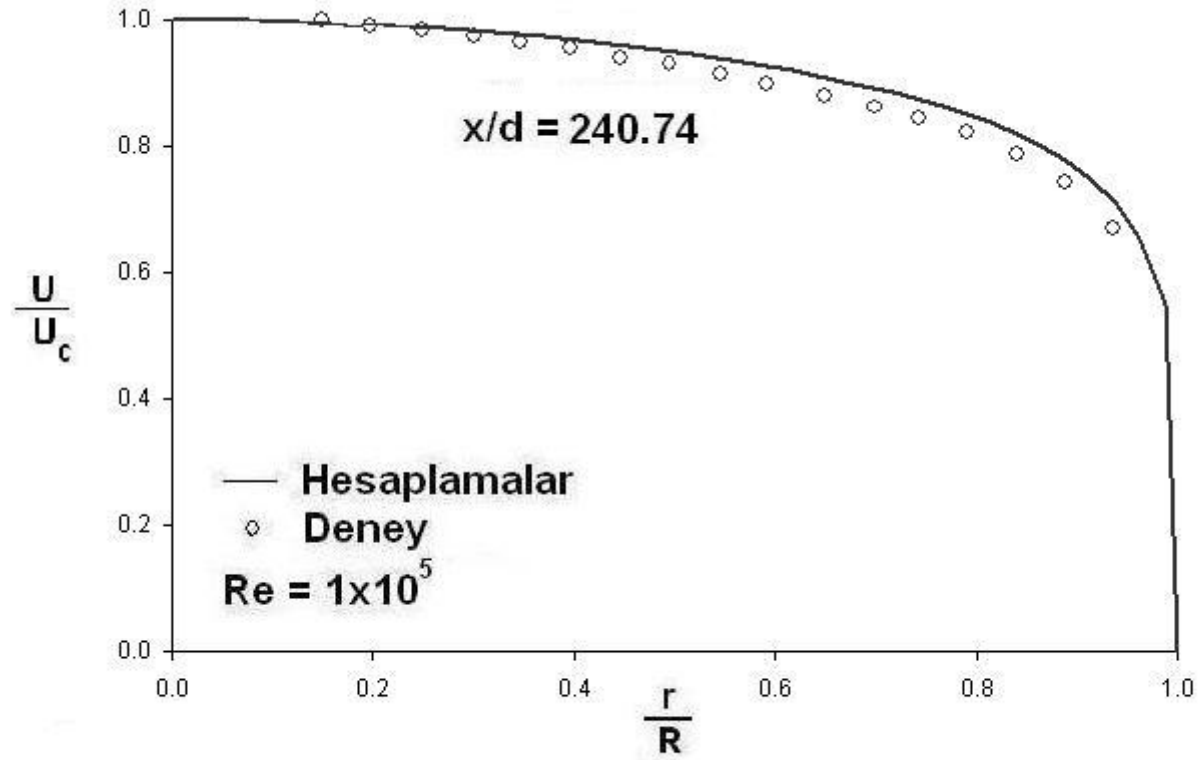
Wenger and Devenport (1999) için akış durumu ve borunun fiziksel özellikleri Wittmer et al.'ın (1998) akış durumu ve borunun fiziksel özellikleri ile tamamen aynıdır. Wittmer et al.'dan (1998) farklı olan tarafı ölçüm noktaları ve sonuçlarıdır. Bu sebeple Wittmer et al. (1998) için gösterdiğimiz ağ dağılımı, boru simetri eksenini boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hızın değişimi, türbülans kinetik enerji radyal profilleri, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri, efektif viskozite radyal profilleri ve cidar kayma gerilmesi dağılımı için verilen grafikler Wenger and Devenport (1999) için de ortaktır. Önceki bölümde bu grafikler değerlendirildiği için bu bölümde incelenmeyecektir.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış geometrisi için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 3$ 'den 240.74'e kadar olan aksel kesitlerde  $Re = 100000$  için Şekil 2-31'de Wenger and Devenport'un (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksel hız radyal profilleri, o aksel kesitteki boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksel hız profili ile Wenger and Devenport'un (1999), deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-32'de boruda  $x/d = 240.74$  kesitinde hesaplanan aksel hız radyal profili Wenger and Devenport'un (1999), deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksel hız radyal profili, o aksel kesitinde boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksel hız profili ile Wenger and Devenport'un (1999), deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.



Şekil 2-31 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Wenger and Devenport'un (1999) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



Şekil 2-32 Boruda  $x/d = 240.74$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Wenger and Devenport'un (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması

Ljus et al.'ın (2002) ( $Re=1.3 \times 10^5$ ) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.33'te gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş ve üst cidar yakınındaki bölgesinde ağ daha sık oluşturulmuştur.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 0.6$ 'dan 87'e kadar olan aksenal kesitlerde  $Re = 130000$  için şekil 2-34'te Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

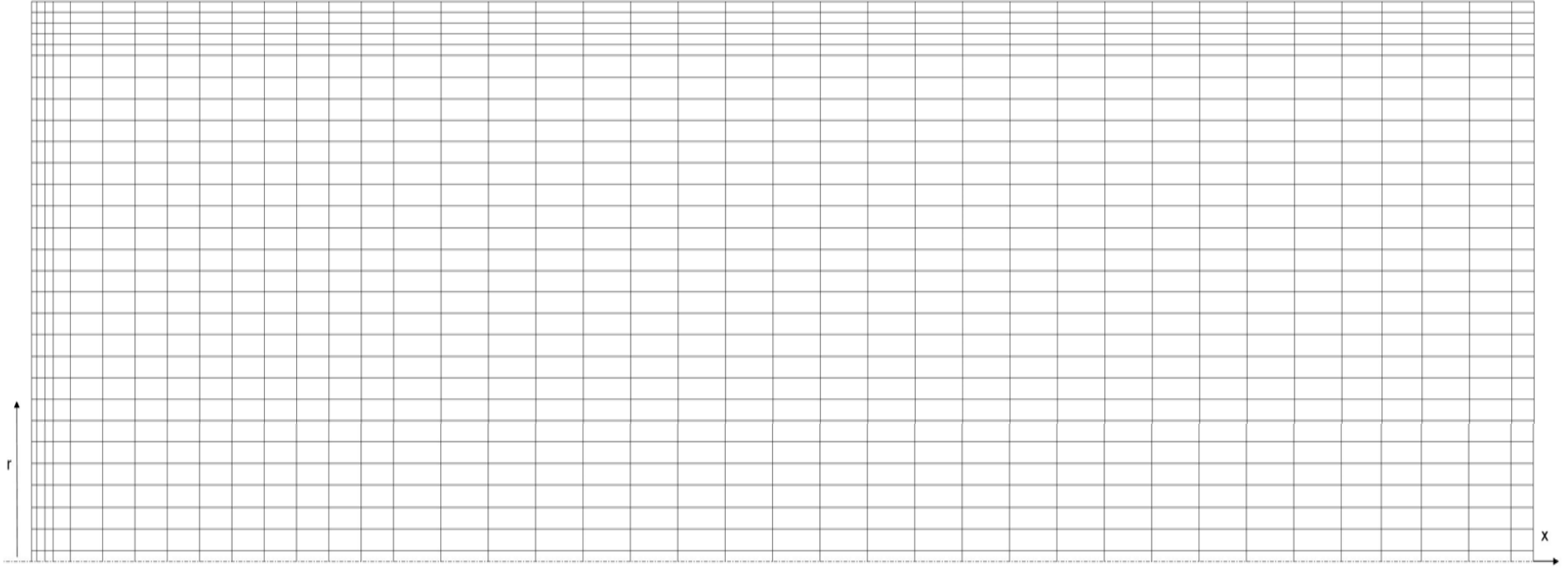
Şekil 2-35'te boruda  $x/d = 87$  kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profili Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profili, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-36'da Ljus et al.'ın (2002) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri eksenini boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

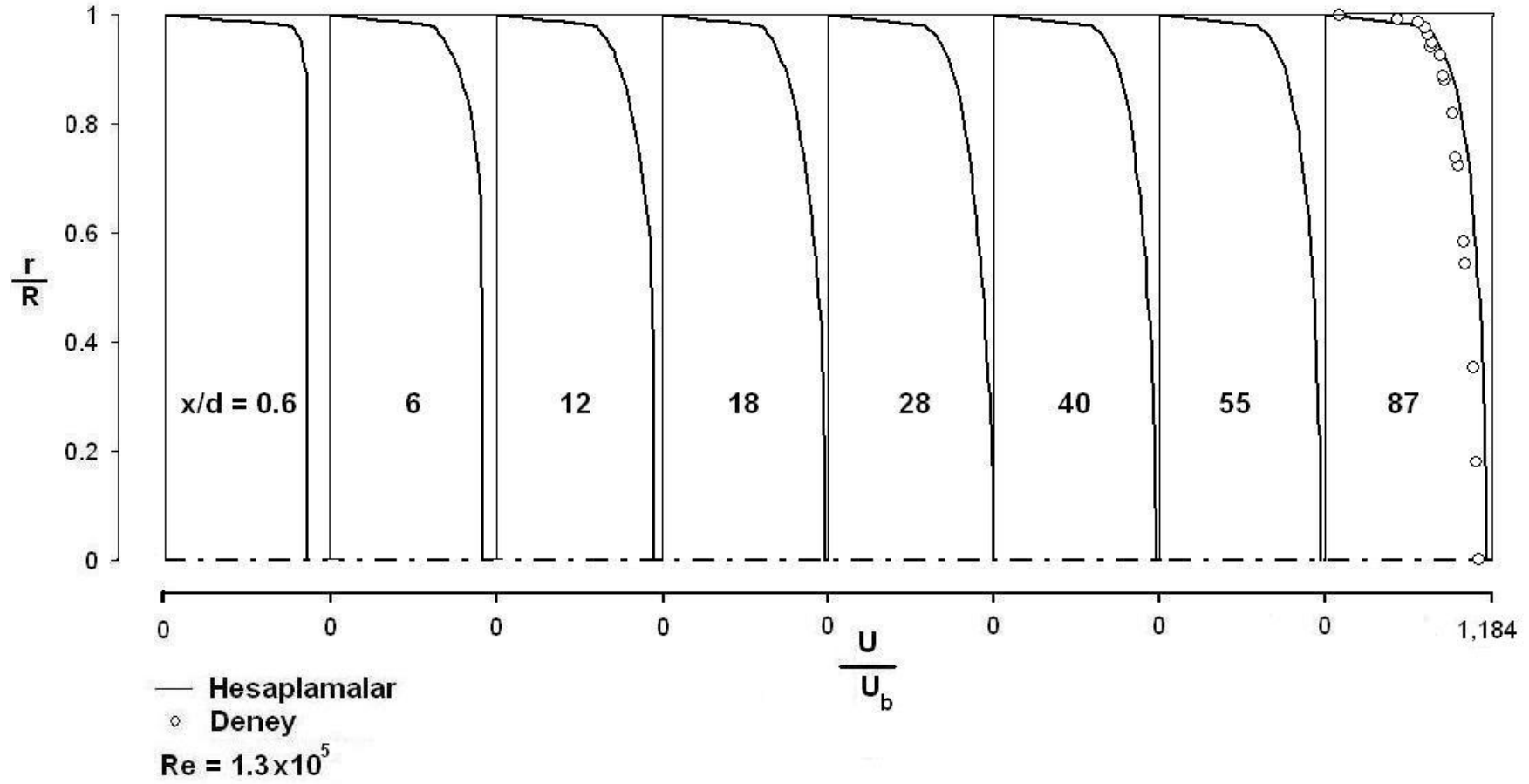
Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-37'de, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-38'de, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri boru giriş düzlemindeki efektif viskozite



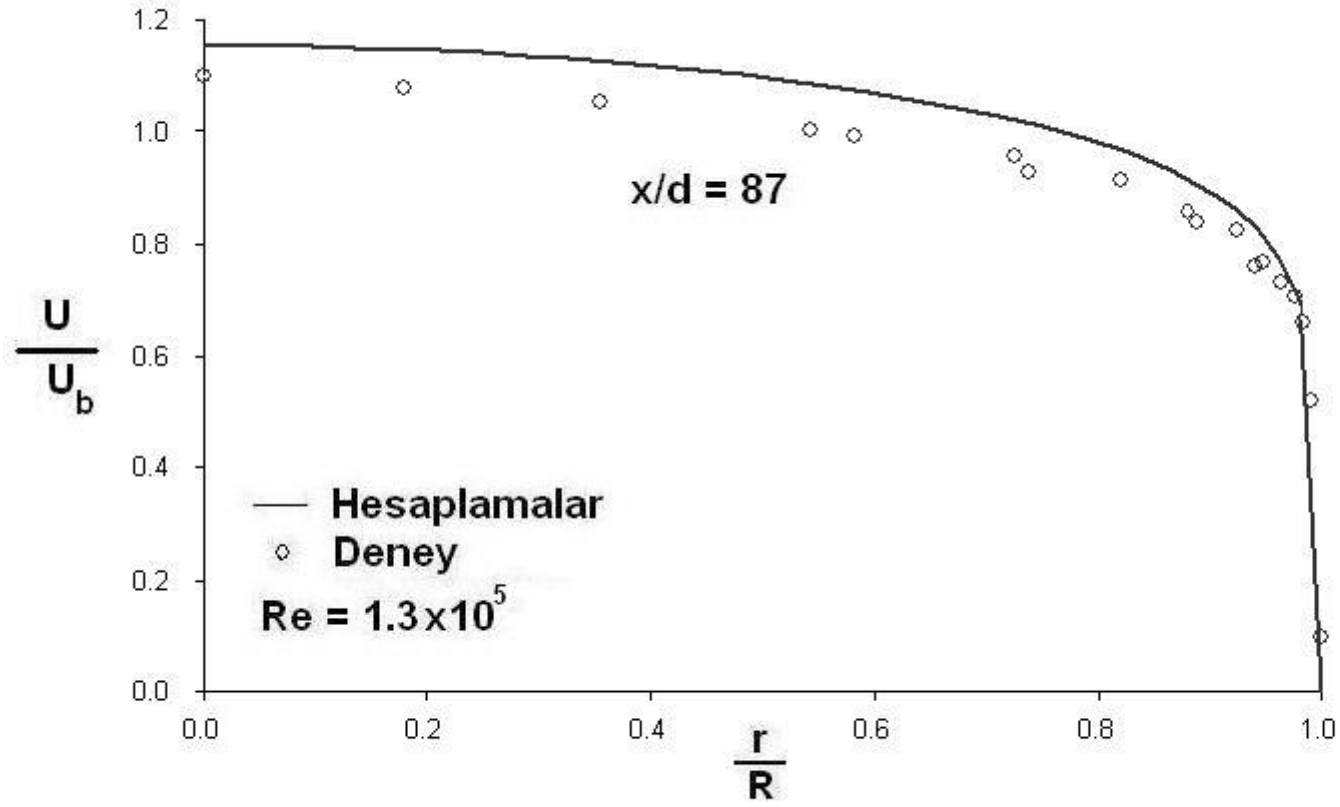
( $\mu_{\text{ein}}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-39’da, hesaplanan cidar kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi ( $\tau_{\text{wd}}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak şekil 2-40’da, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f = 2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden şekil 2-41’de gösterilmiştir. Şekil 2-38 ile şekil 2-39 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca gelişimini sergilemektedir.



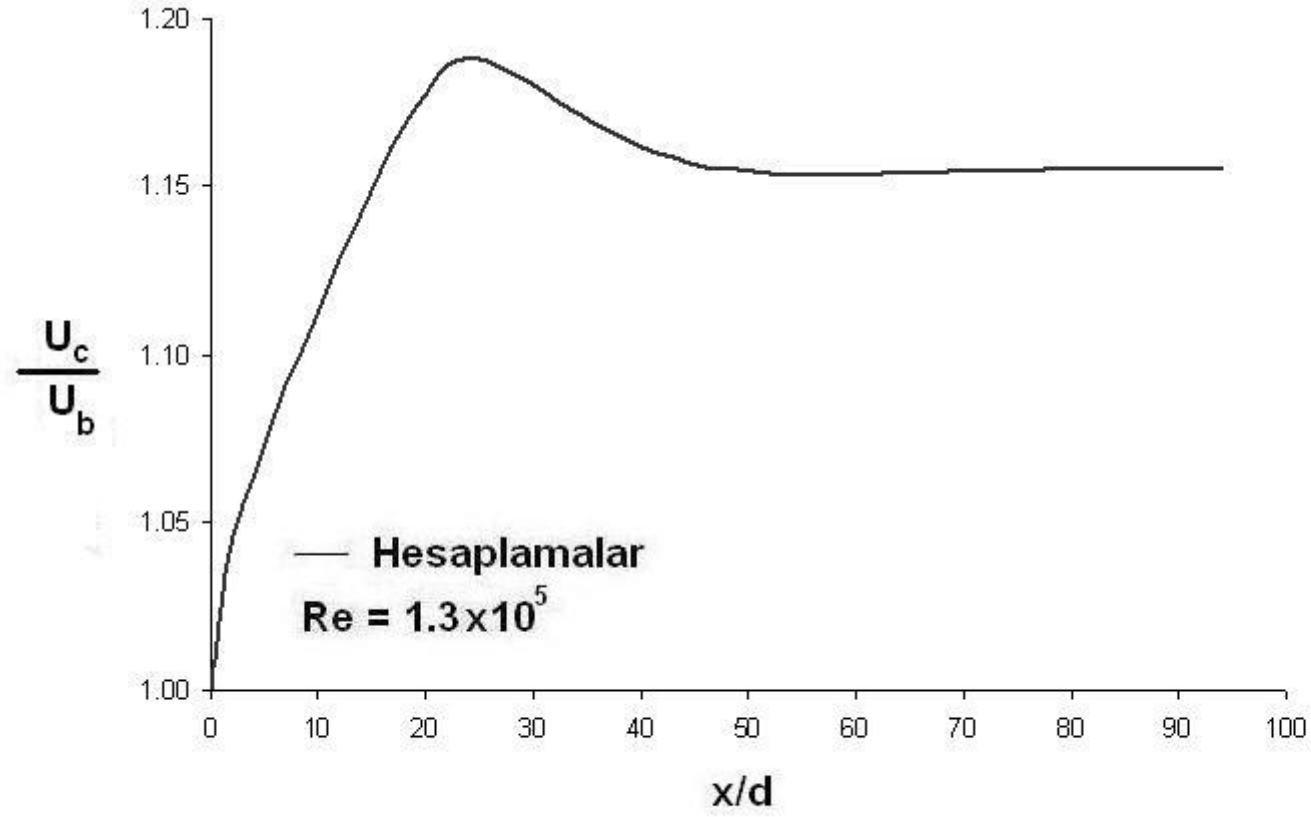
Şekil 2-33 Ljus et al.'in (2002) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı



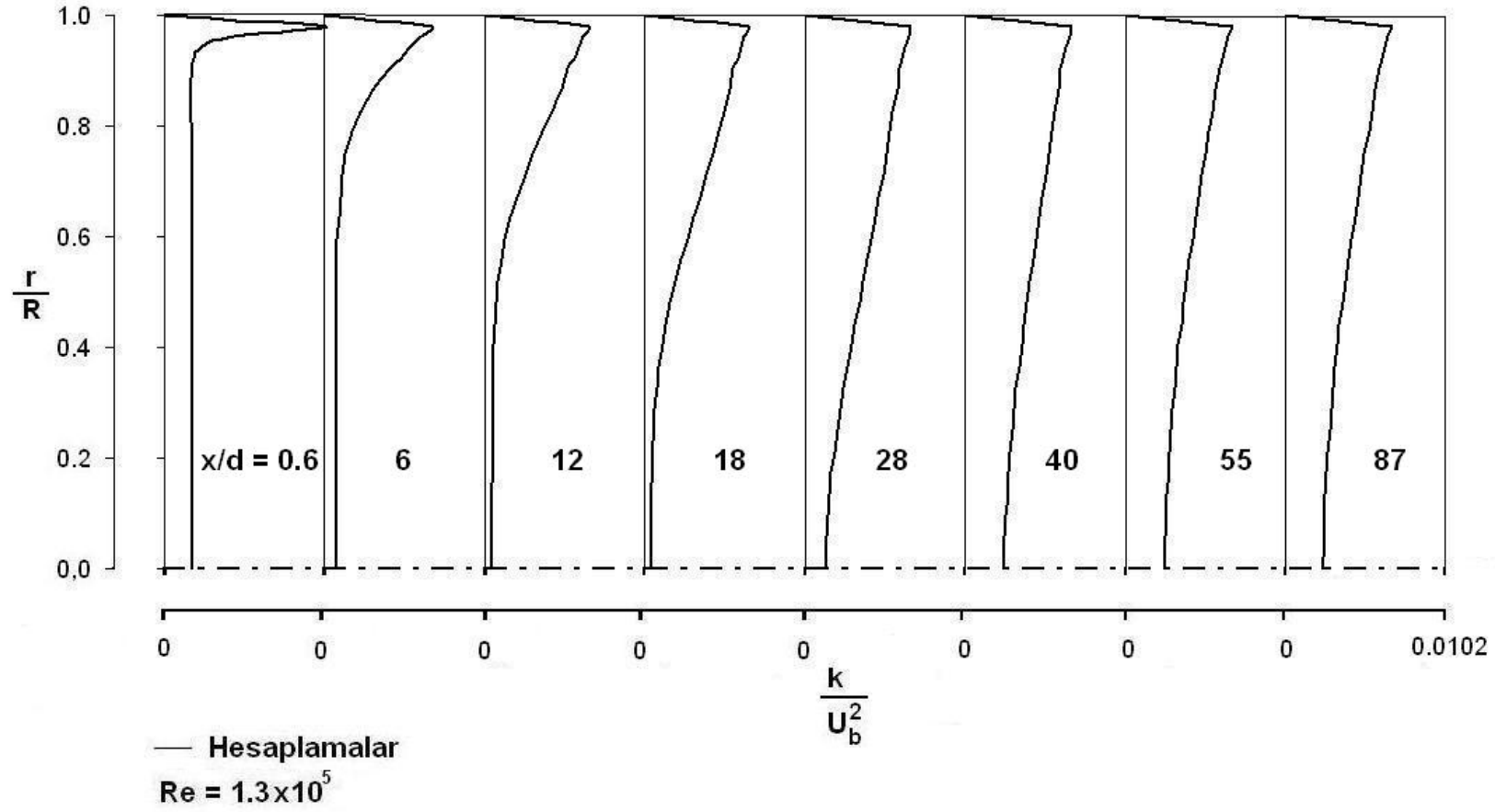
Şekil 2-34 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



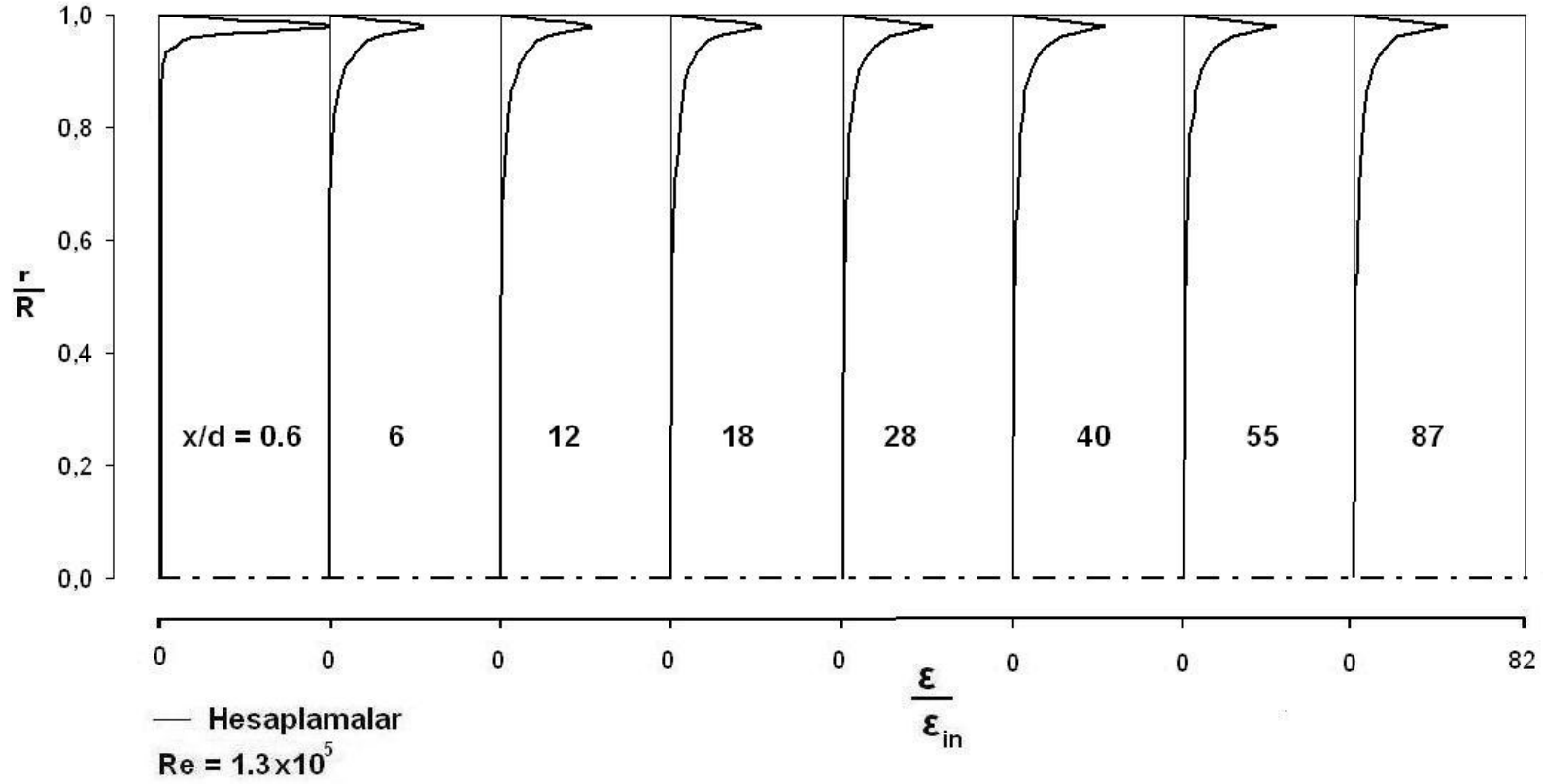
Şekil 2-35 Boruda  $x/d = 87$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması



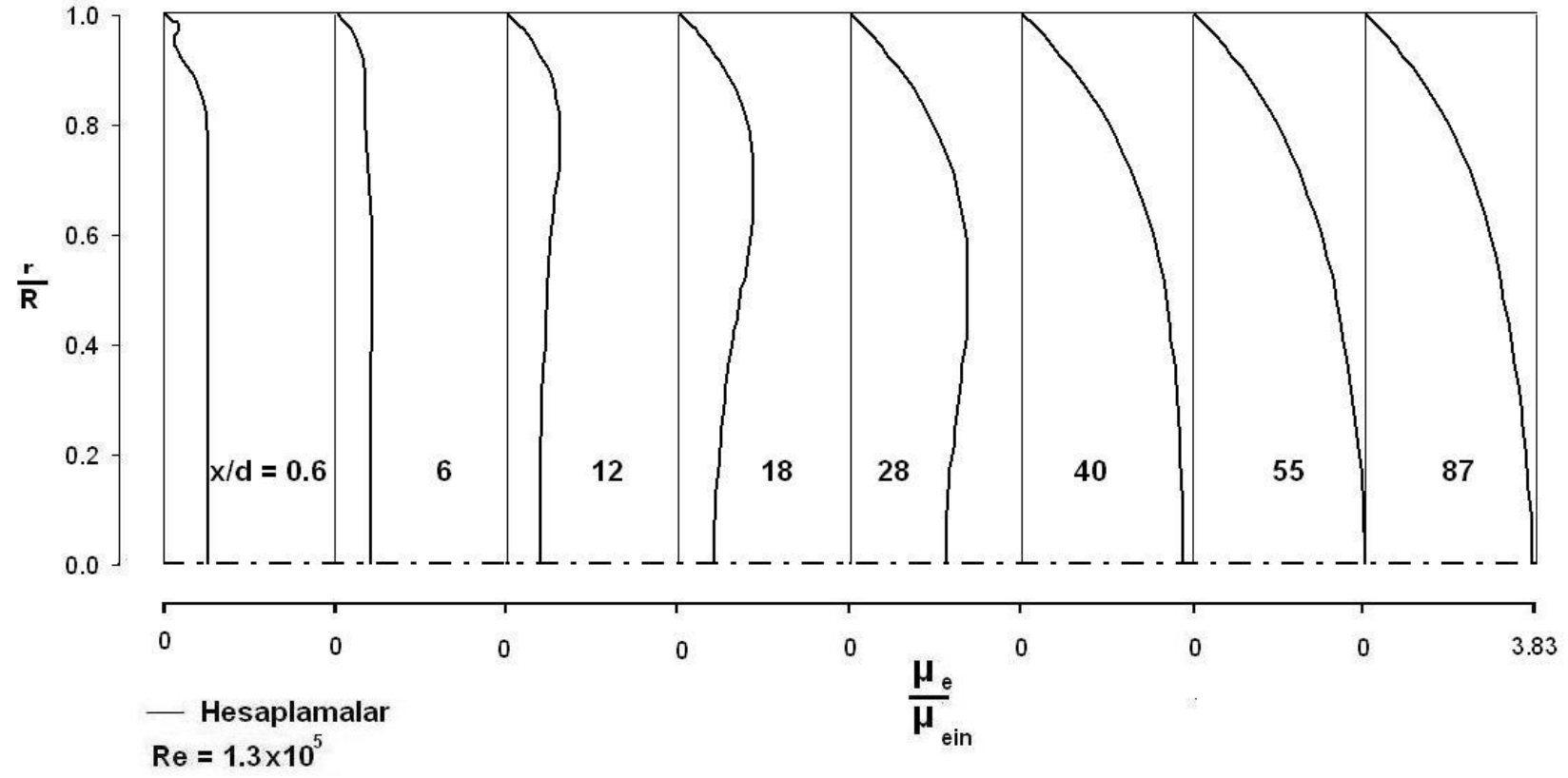
Şekil 2-36 Ljus et al.'ın (2002) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değişimi



Şekil 2-37 Ljus et al.'in (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi

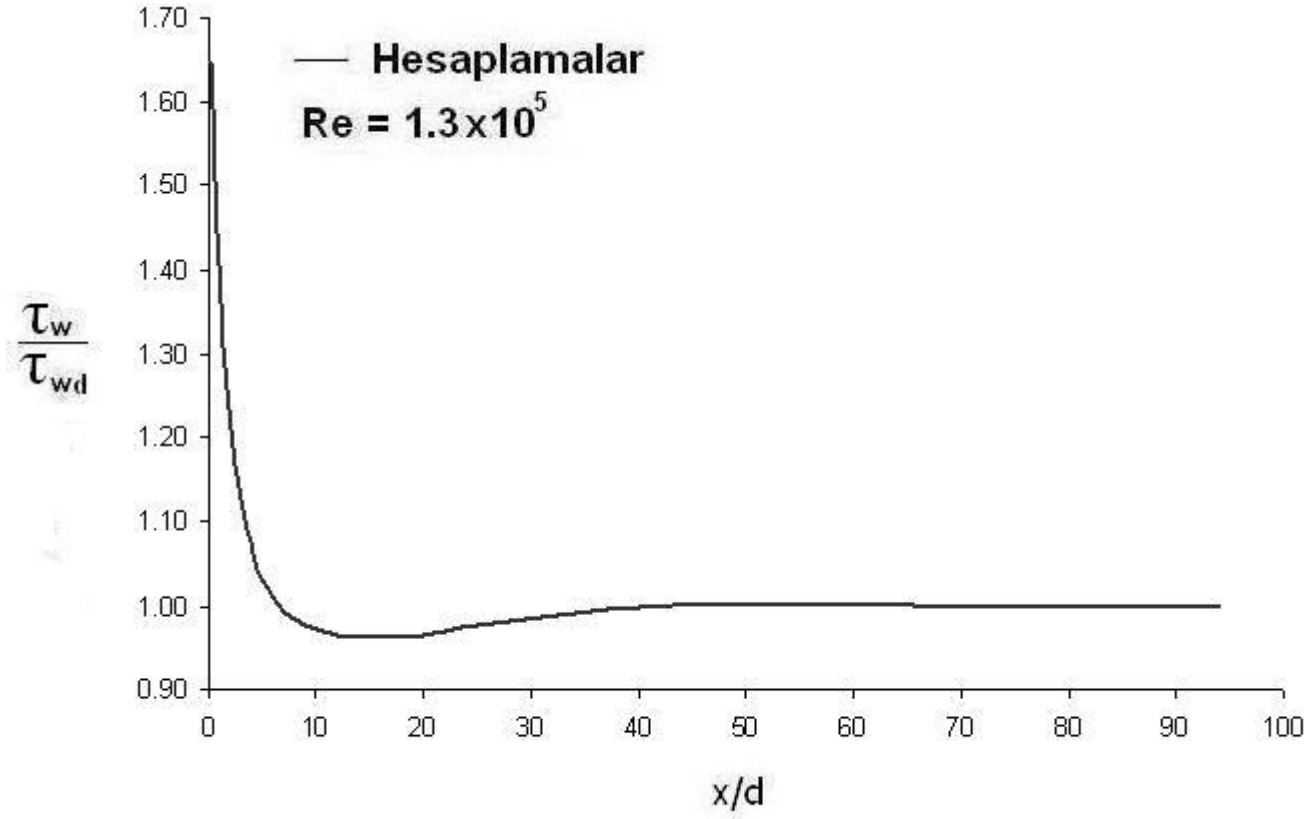


Şekil 2-38 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi

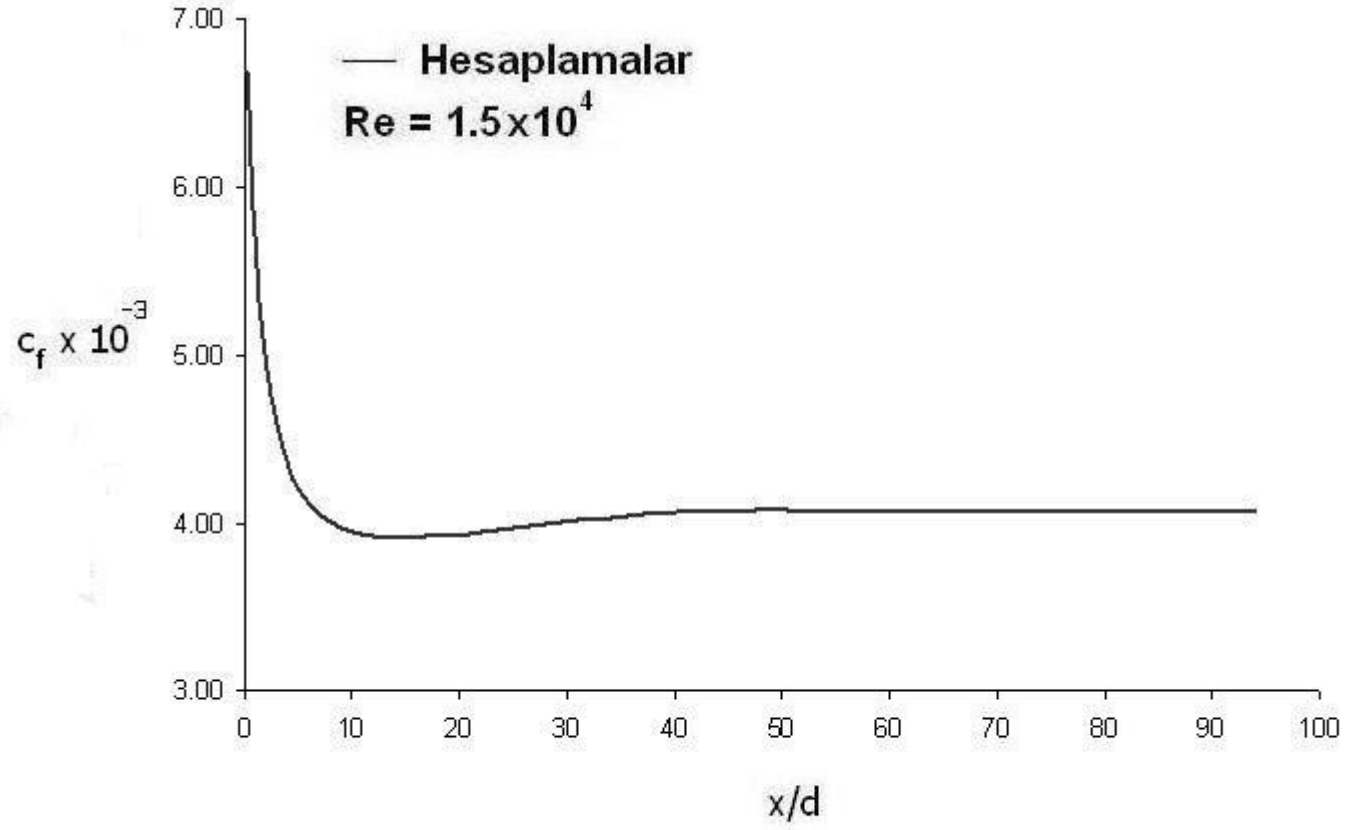


Şekil 2-39 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi





Şekil 2-40 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-41 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi

Ljus et al.'ın (2002), ( $Re=8.21 \times 10^4$ ) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.42'de gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş ve üst cidar yakınındaki bölgede ağ daha sık oluşturulmuştur.

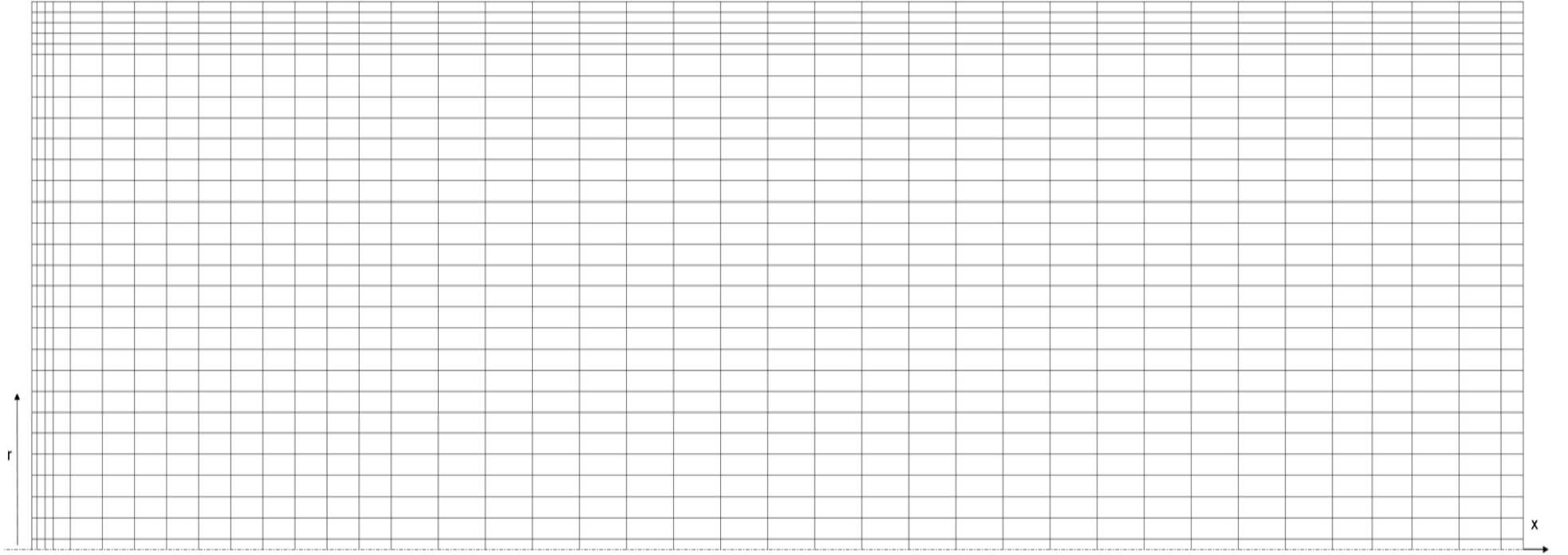
Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 0.6$ 'dan 87'e kadar olan aksenal kesitlerde  $Re = 82100$  için şekil 2-43'te Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-44'te boruda  $x/d = 87$  kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profili Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profili boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_b$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

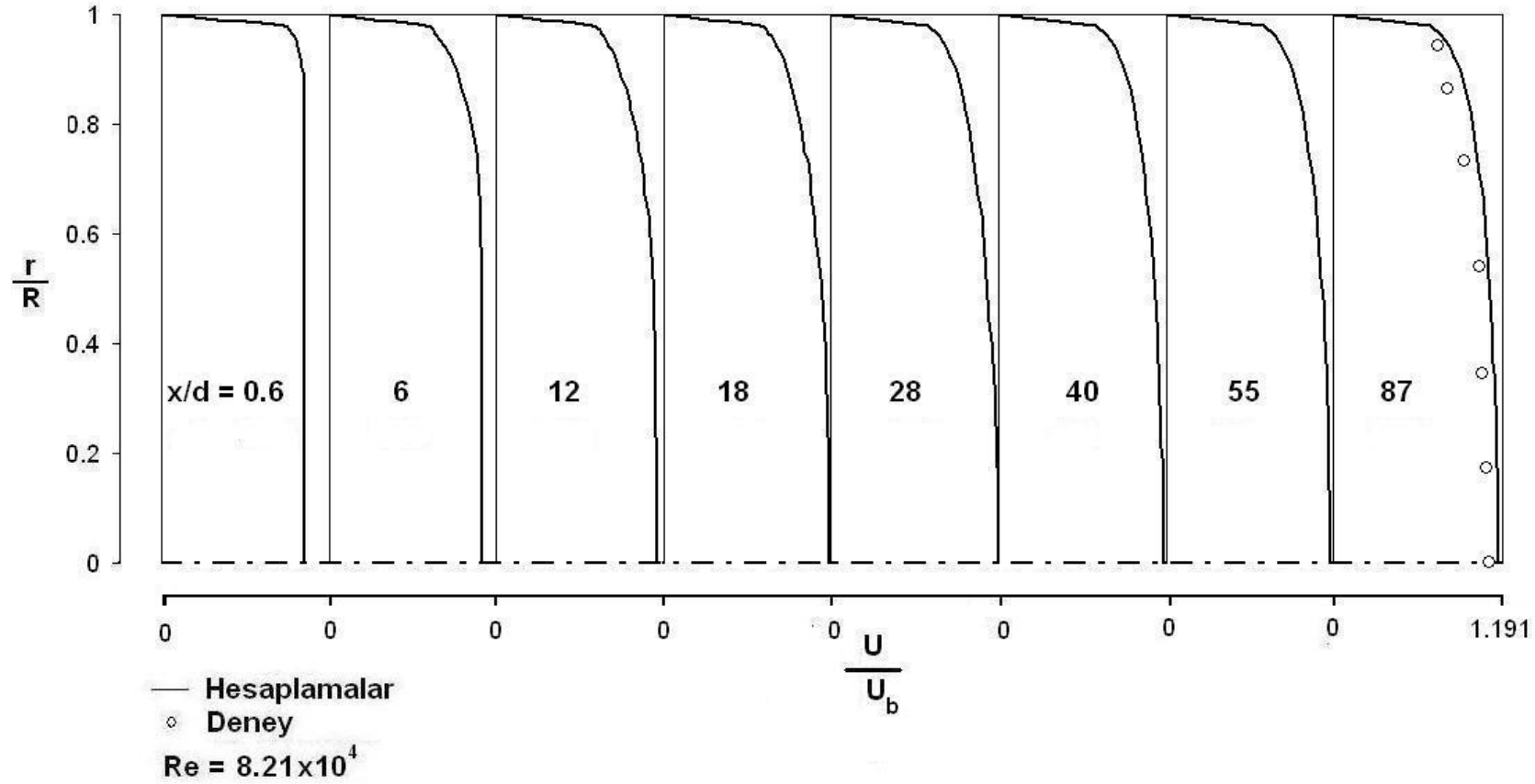
Şekil 2-45'de Ljus et al.'ın (2002) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri eksenini boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-46'da, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak şekil 2-47'de, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{e, in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak

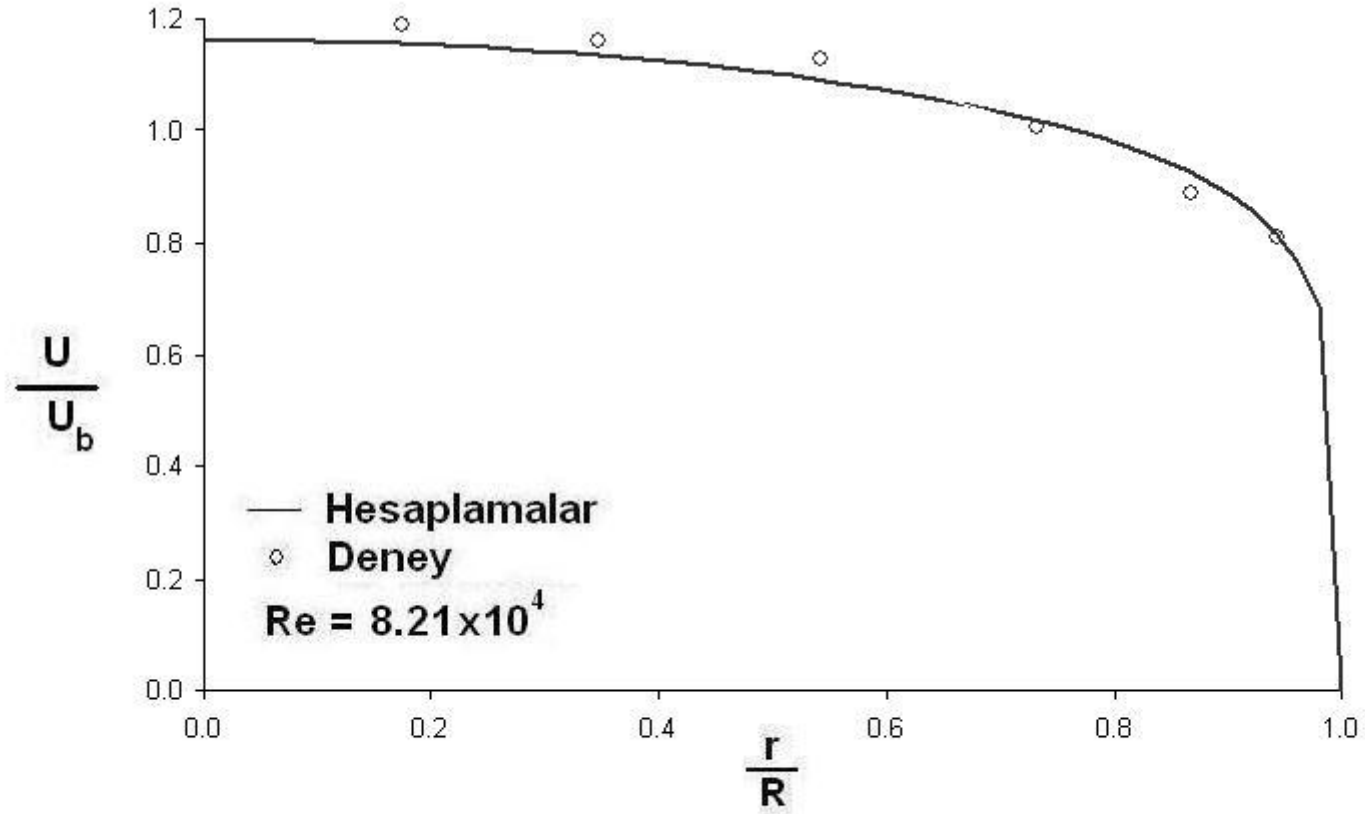
şekil 2-48'de, hesaplanan cidar kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden "x/d" olarak şekil 2-49'da, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f=2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden "x/d" olarak şekil 2-50'de gösterilmiştir. Şekil 2-47 ile şekil 2-48 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini göz önüne sermektedir.



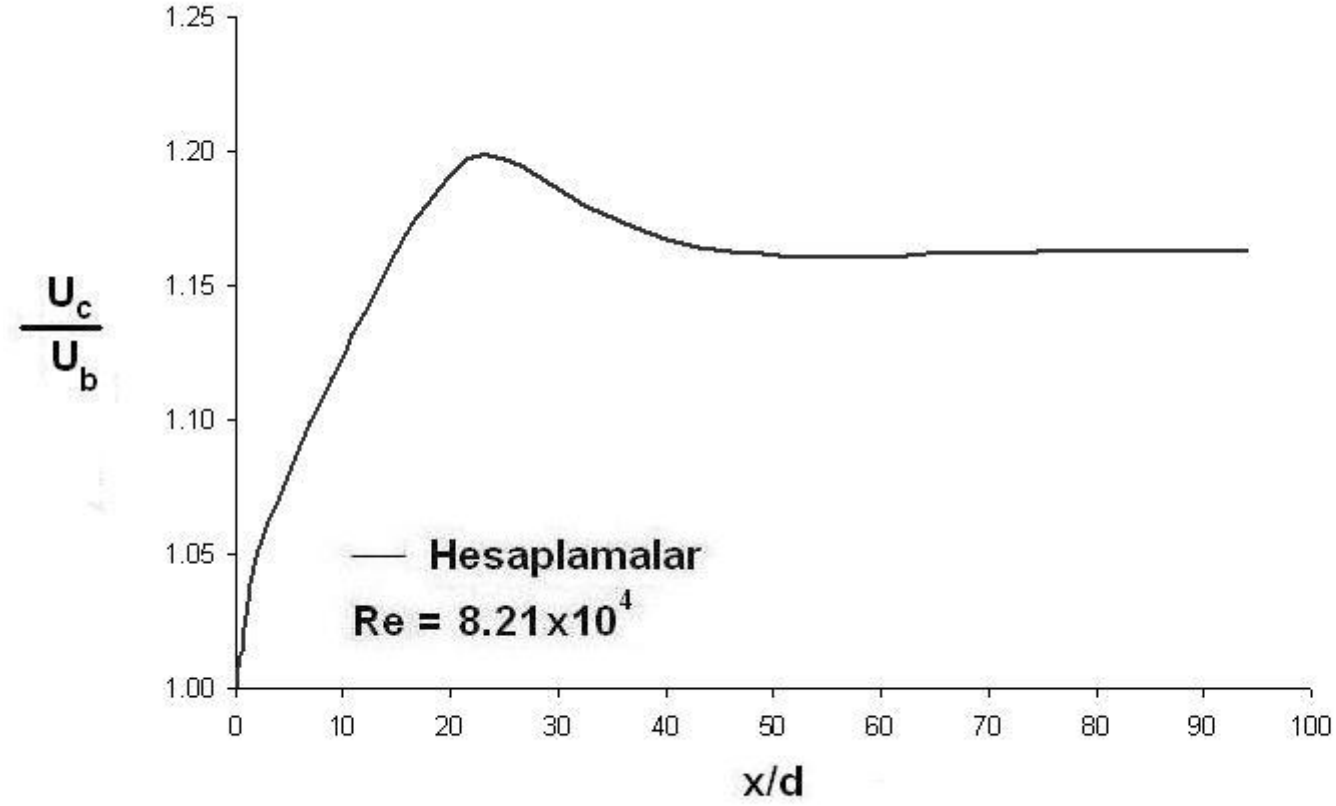
Şekil 2-42 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı



Şekil 2-43 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması

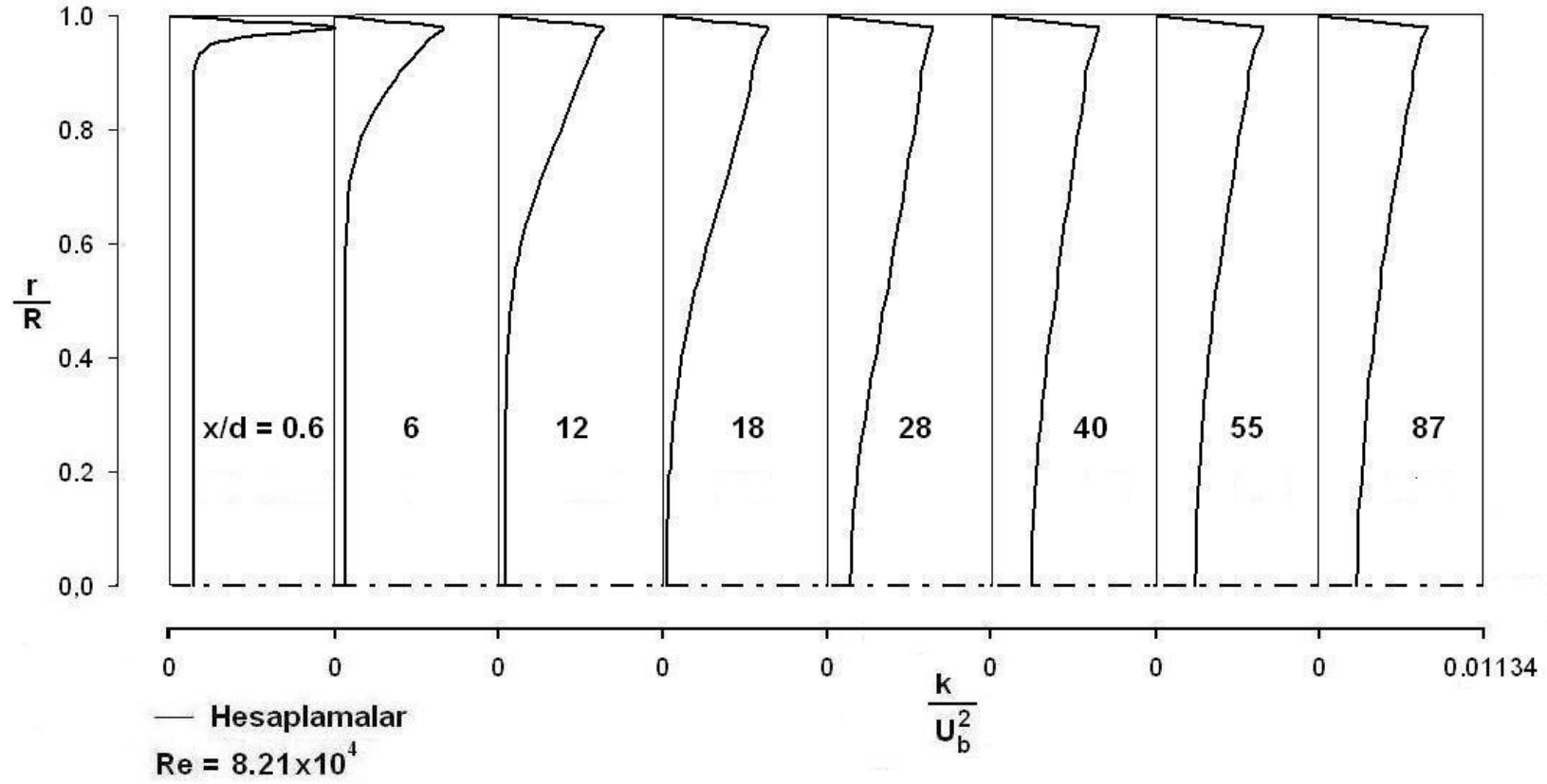


Şekil 2-44 Boruda  $x/d = 87$ kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Ljus et al.'ın (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması

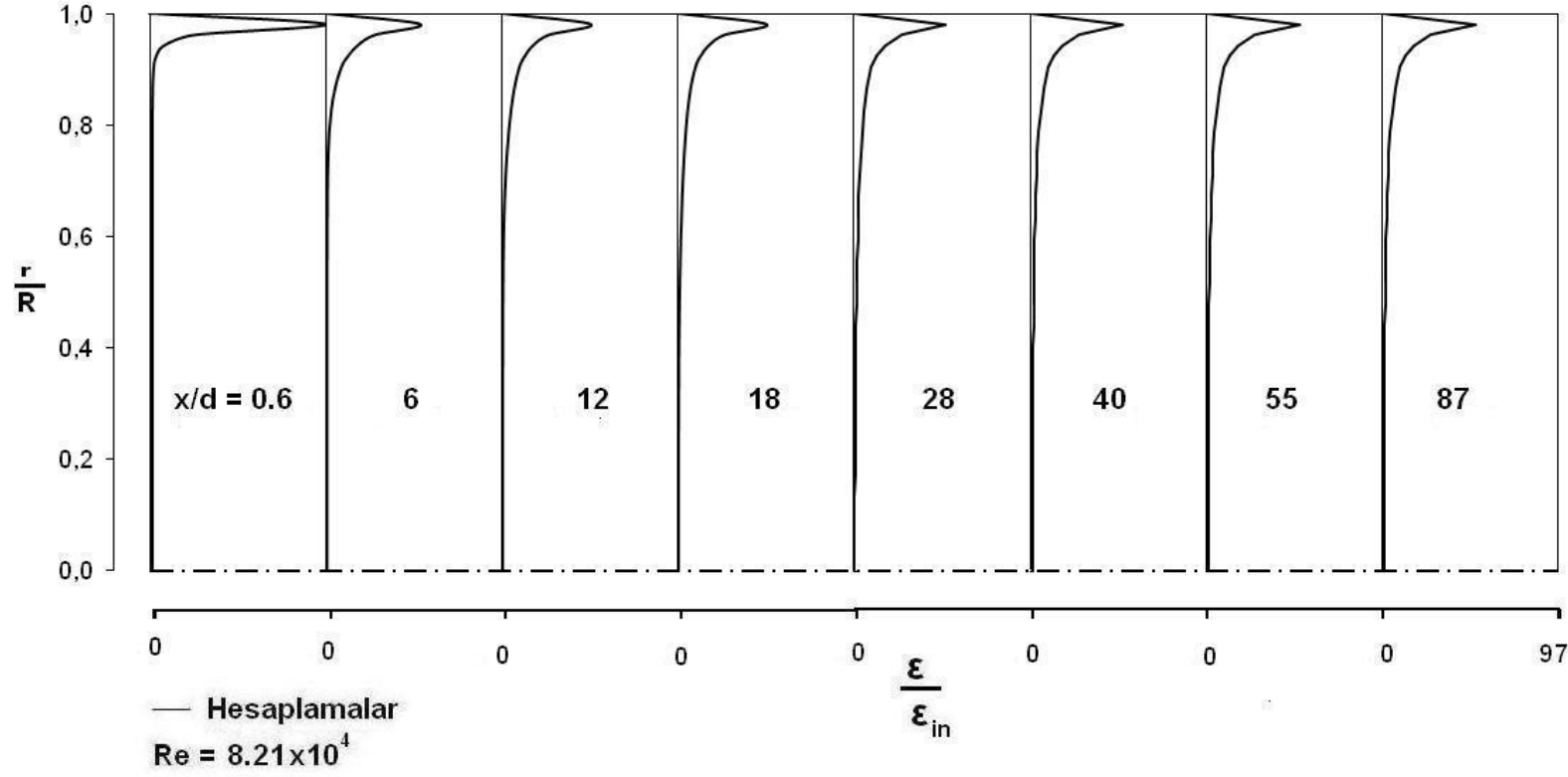


Şekil 2-45 Ljus et al.'ın (2002) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksel hızın değişimi

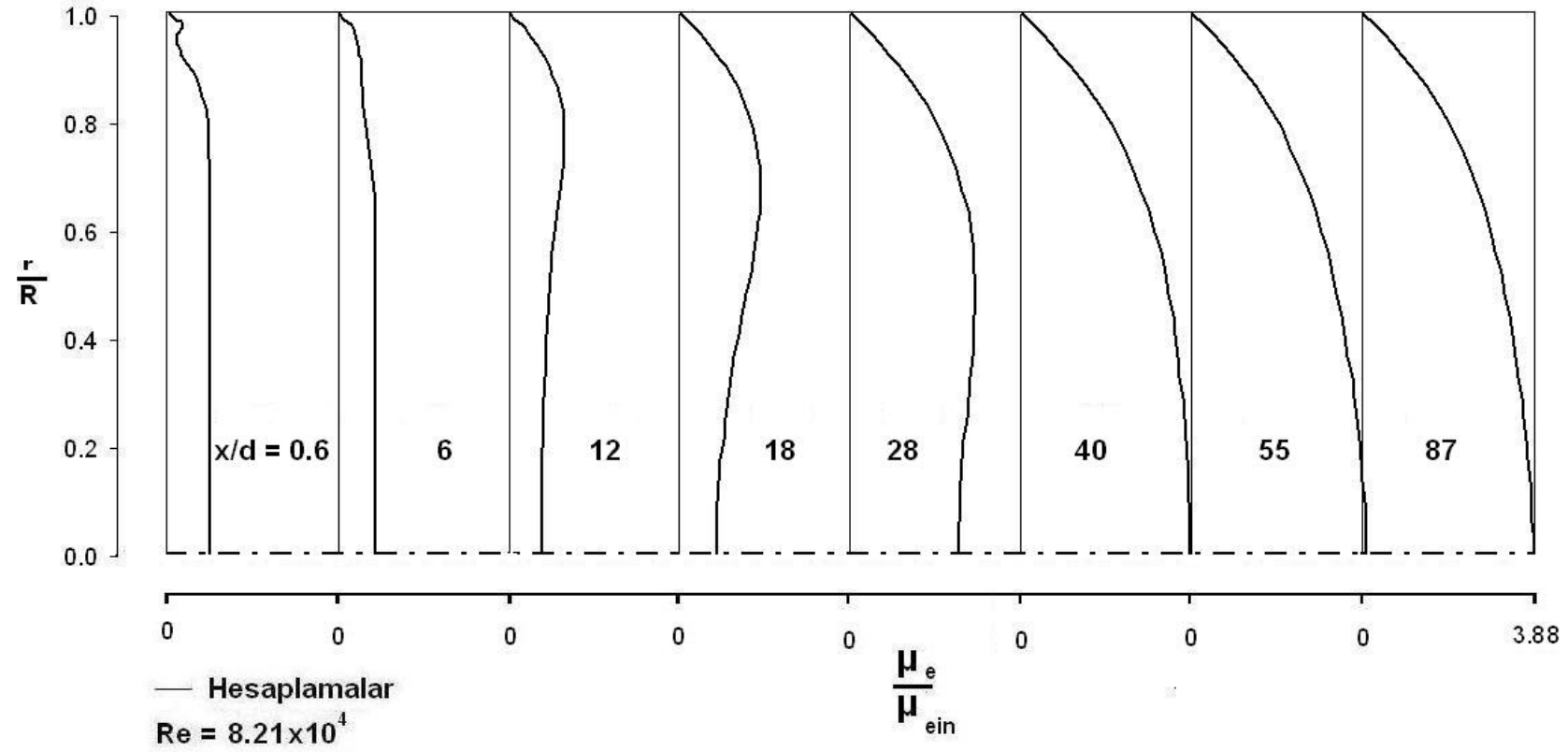




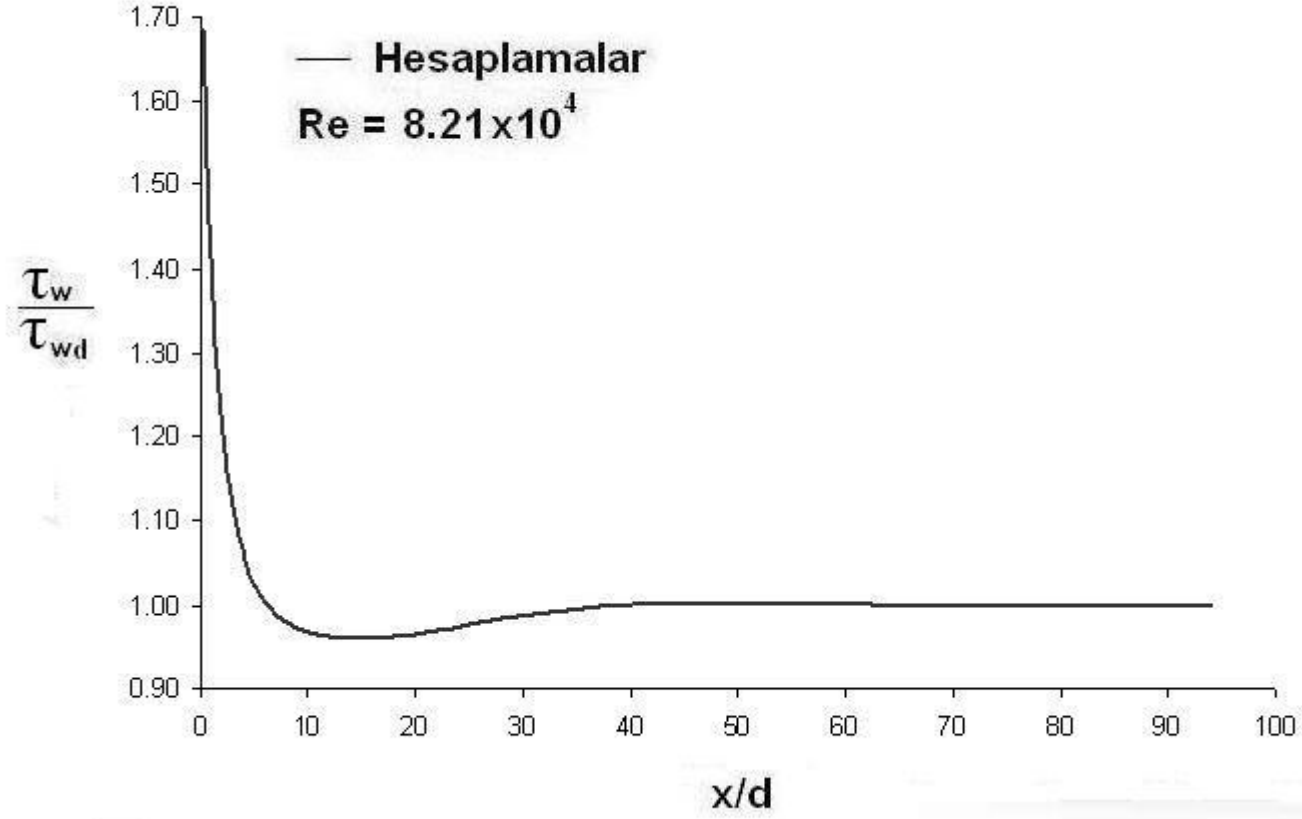
Şekil 2-46 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi



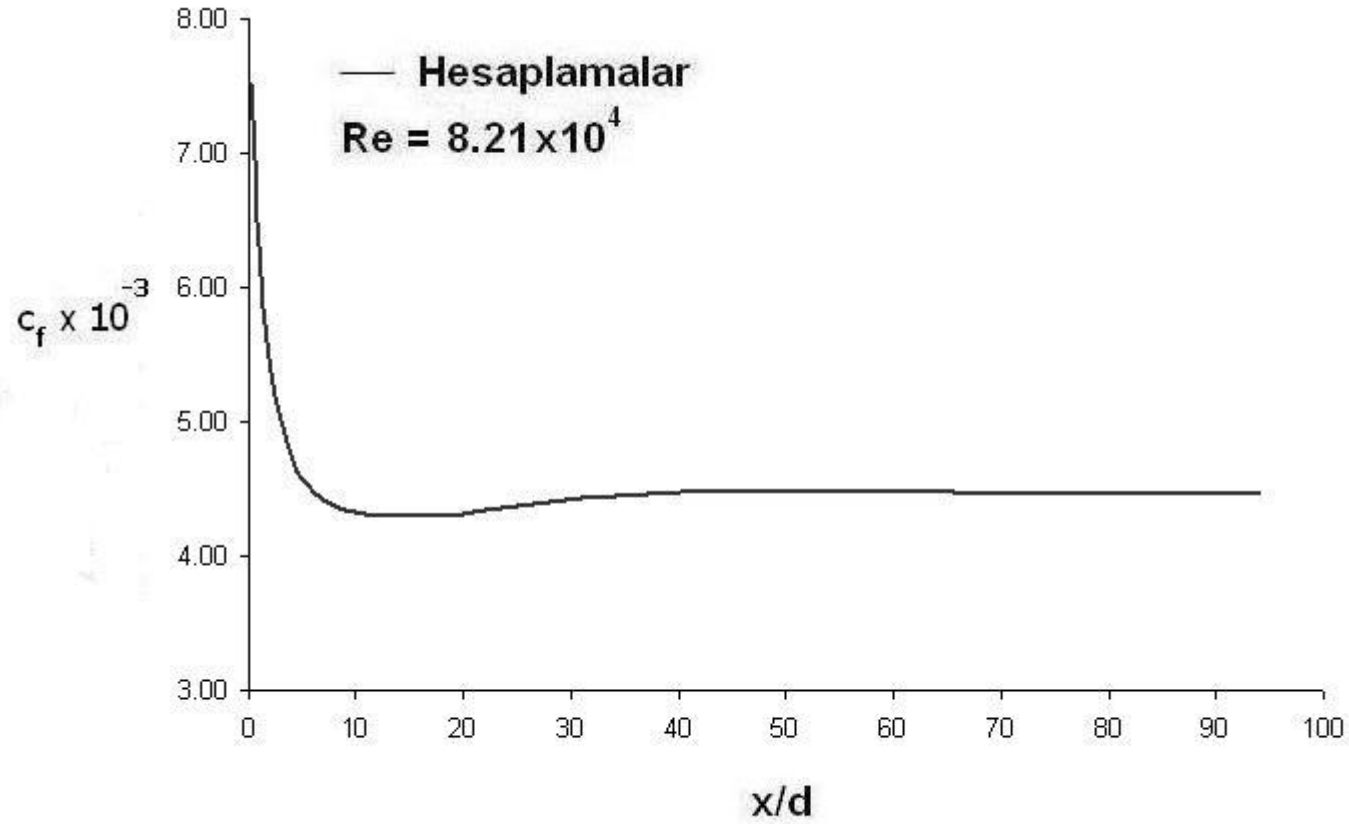
Şekil 2-47 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-48 Ljus et al.'ın (2002) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-49 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-50 Ljus et al.'ın (2002) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi

Chevrin et al.'ın (1992) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.51'de gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş ve üst cidar yakınındaki bölgede ağ daha sık oluşturulmuştur.

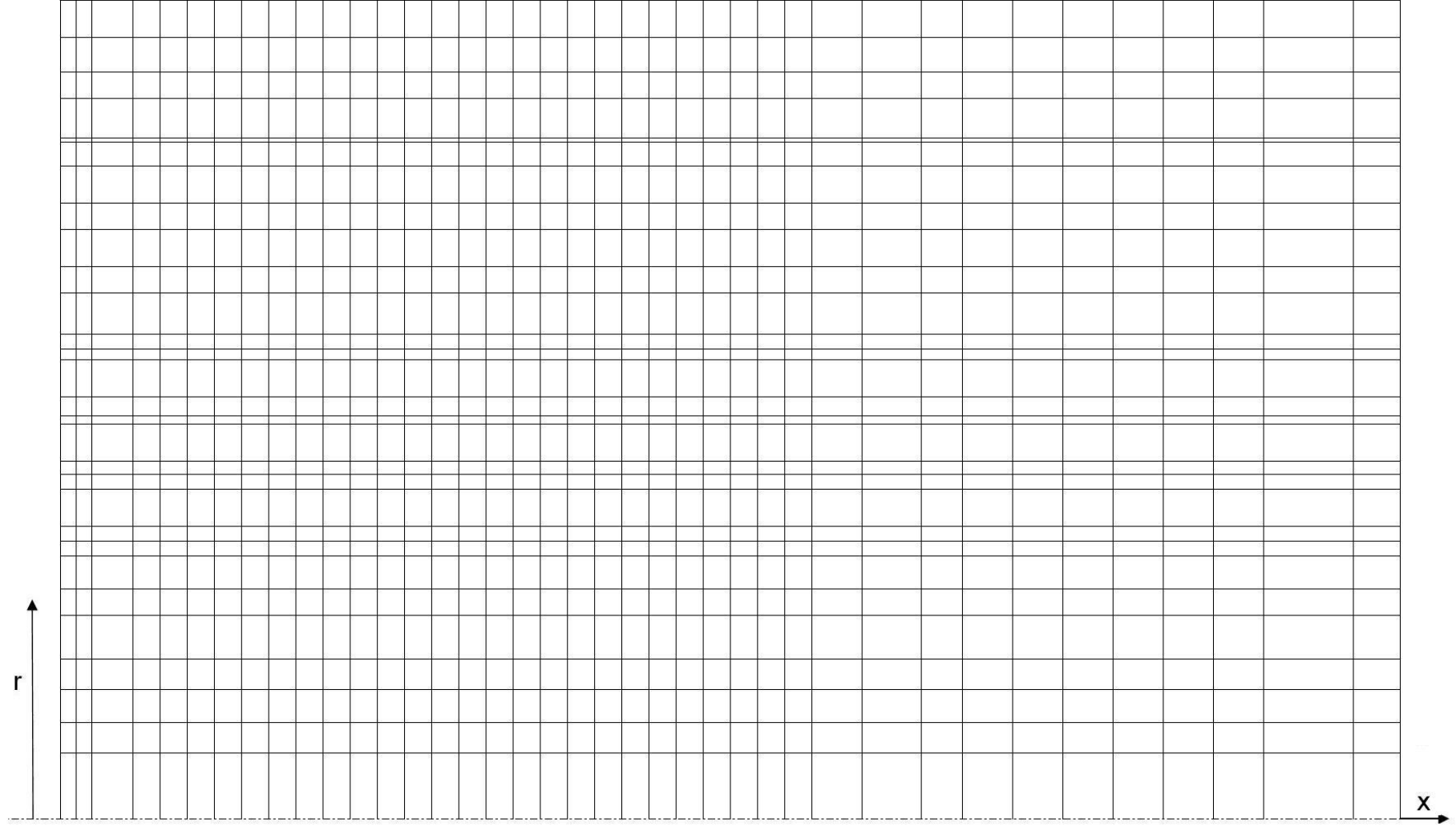
Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 0.6$ 'dan 26.66'ya kadar olan aksenal kesitlerde  $Re = 8923$  için şekil 2-52'de Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri, o aksenal kesitinde boru simetri ekseni hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-53'te boruda  $x/d = 25$  kesitinde hesaplanan aksenal hız radyal profili Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksenal hız radyal profili, o aksenal kesitinde boru simetri ekseni hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksenal hız profili ile Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-54'te Chevrin et al.'ın (1992) borusu boyunca simetri ekseni üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri ekseni boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur. Grafikten de anlaşıldığı üzere Chevrin et al.'ın (1992) deney için seçtiği boru boyu akışın dengeye gelmesi için yeterli uzunlukta değildir.

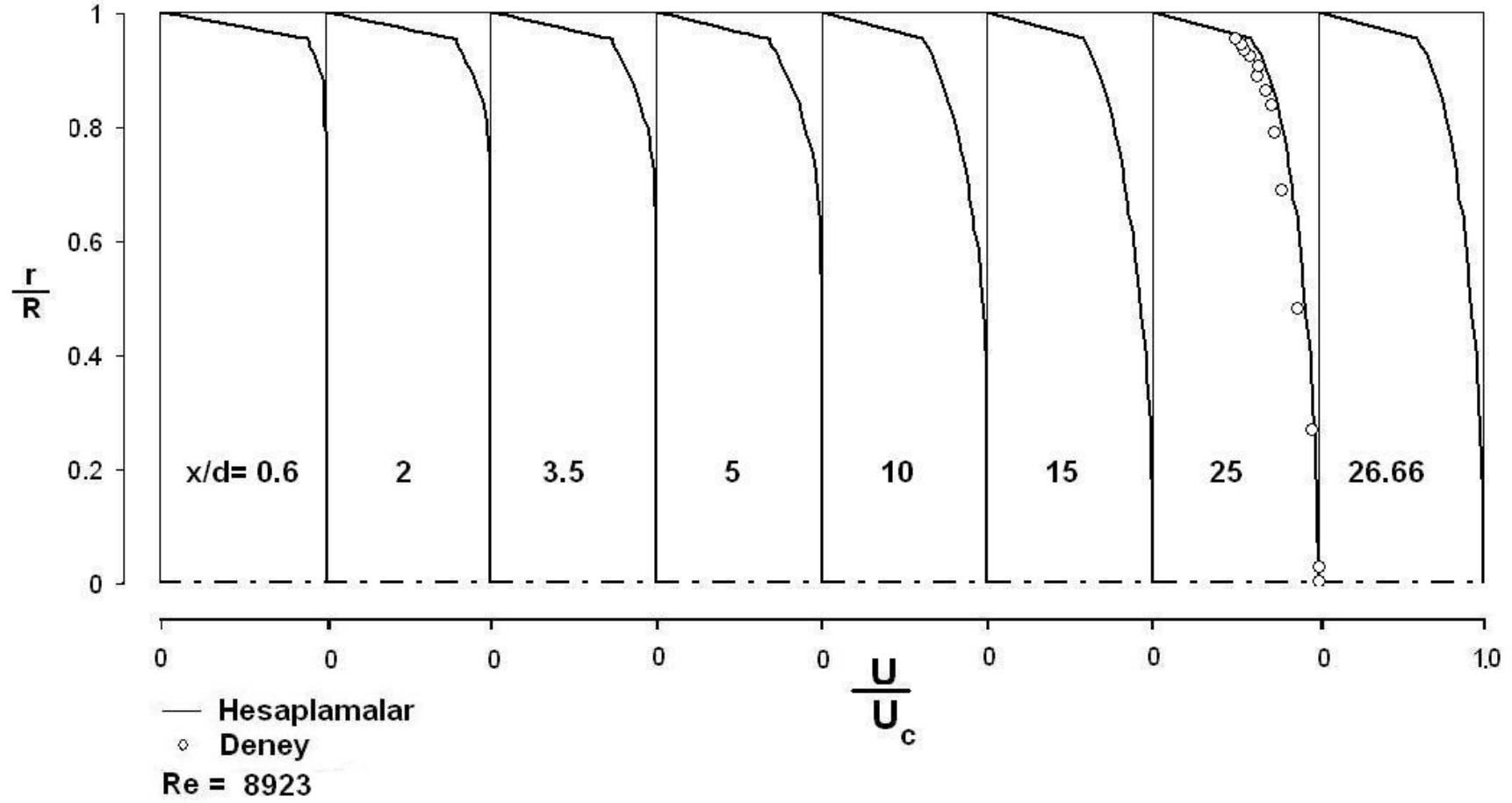
Şekil 2-55'te Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, dairesel kesitli boruda akış geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı da gelişmektedir.

Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-56’da, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{ein}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-57’de, hesaplanan cidar kayma gerilmesi boru çıkış düzlemindeki cidar kayma gerilmesi ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden  $x/d$ ” olarak şekil 2-58’de ve hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f = 2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak şekil 2-59’da gösterilmiştir. Şekil 2-56 ile şekil 2-57 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.

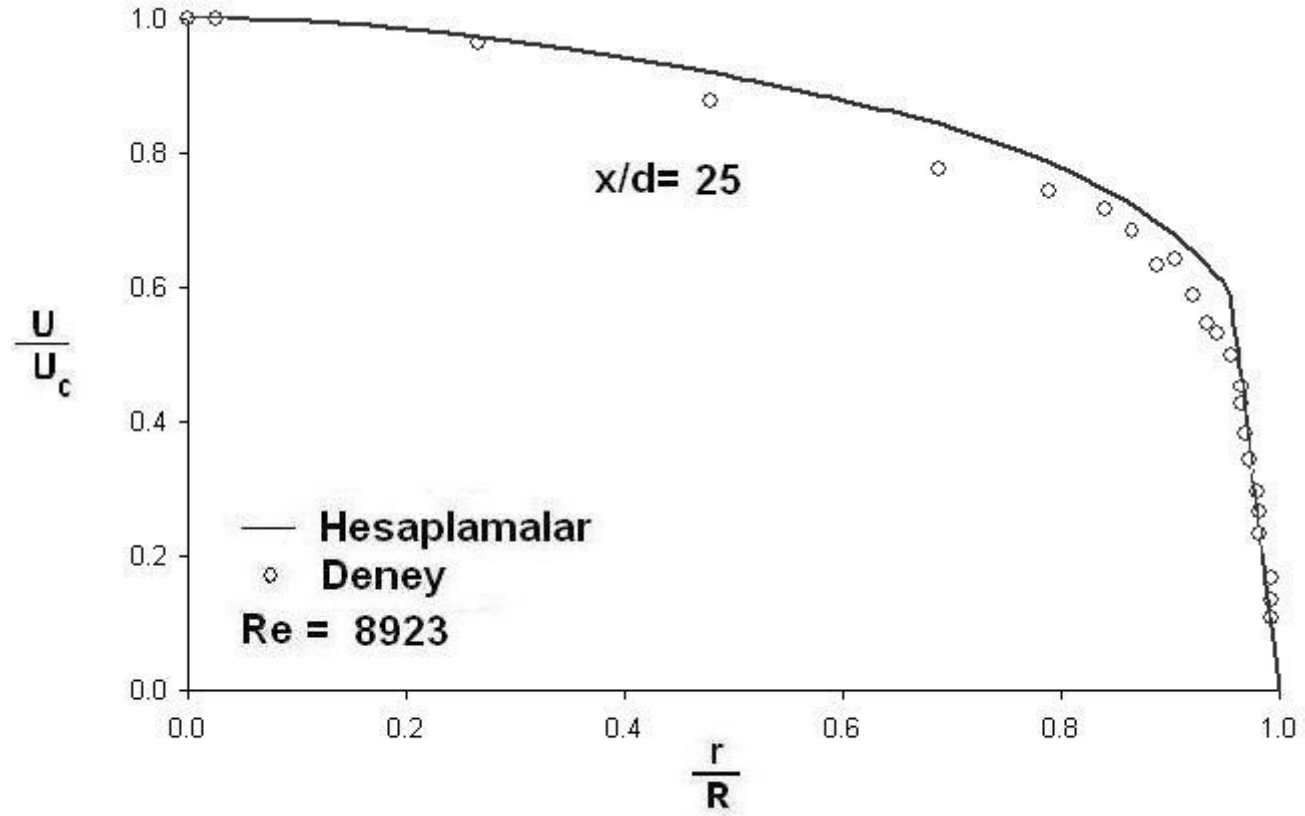


Şekil 2-51 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı

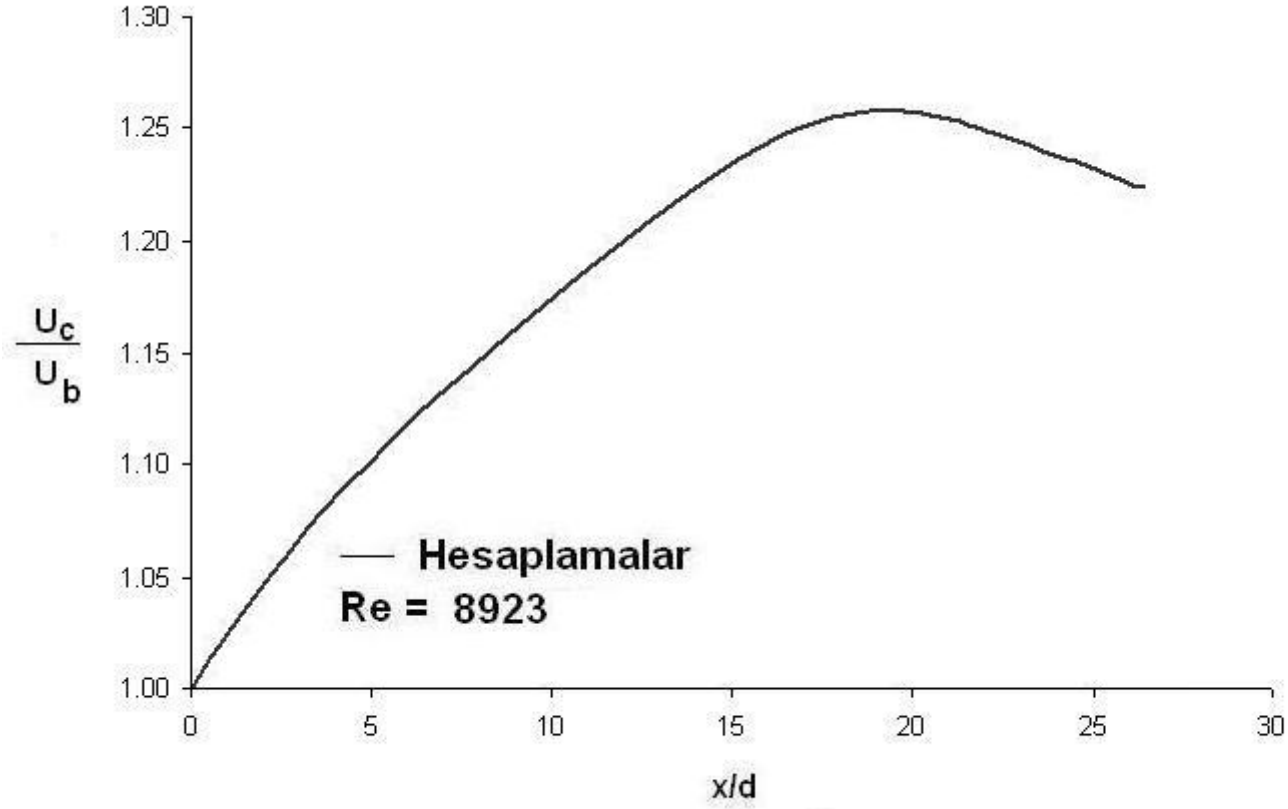




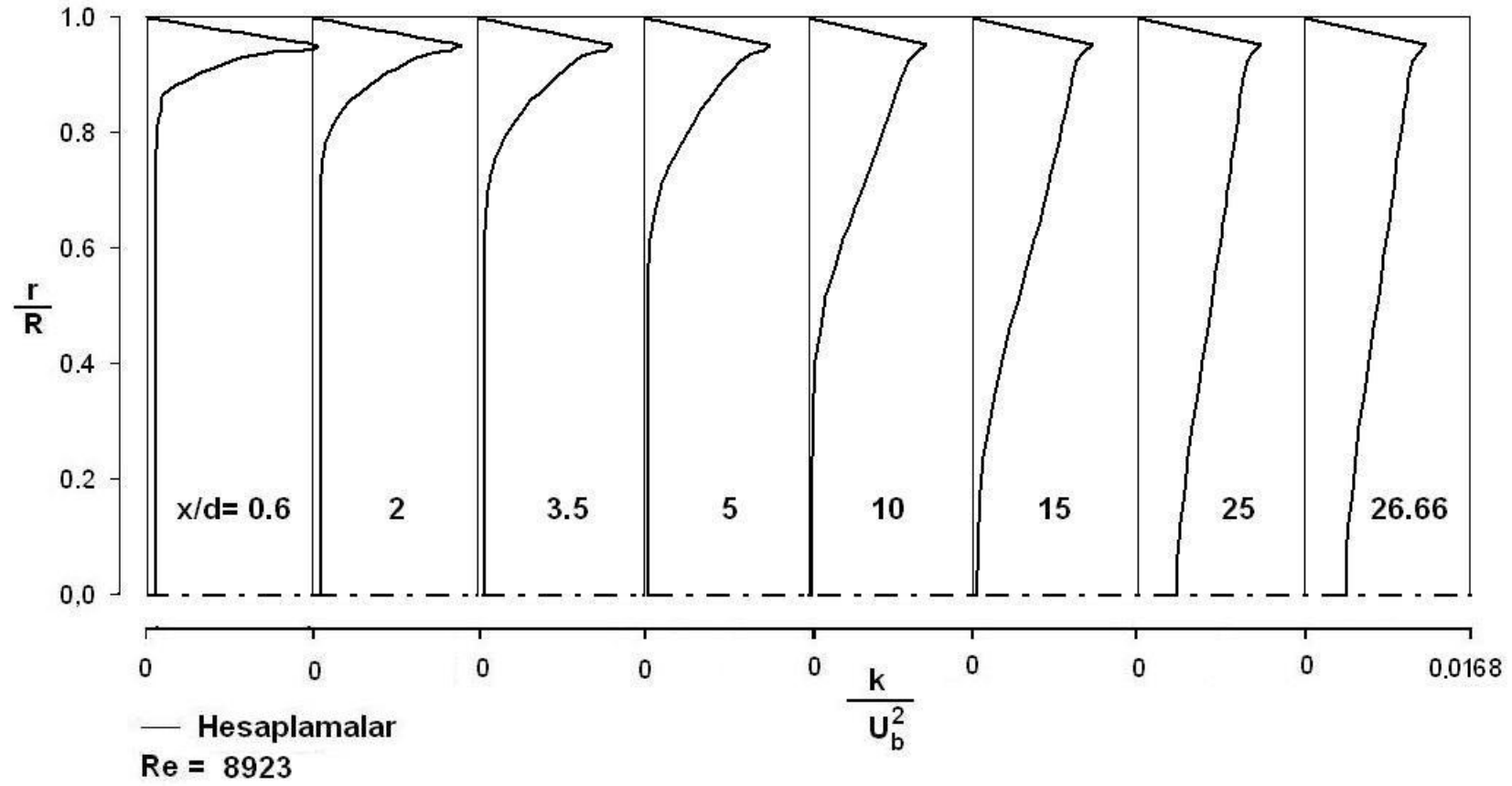
Şekil 2-52 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



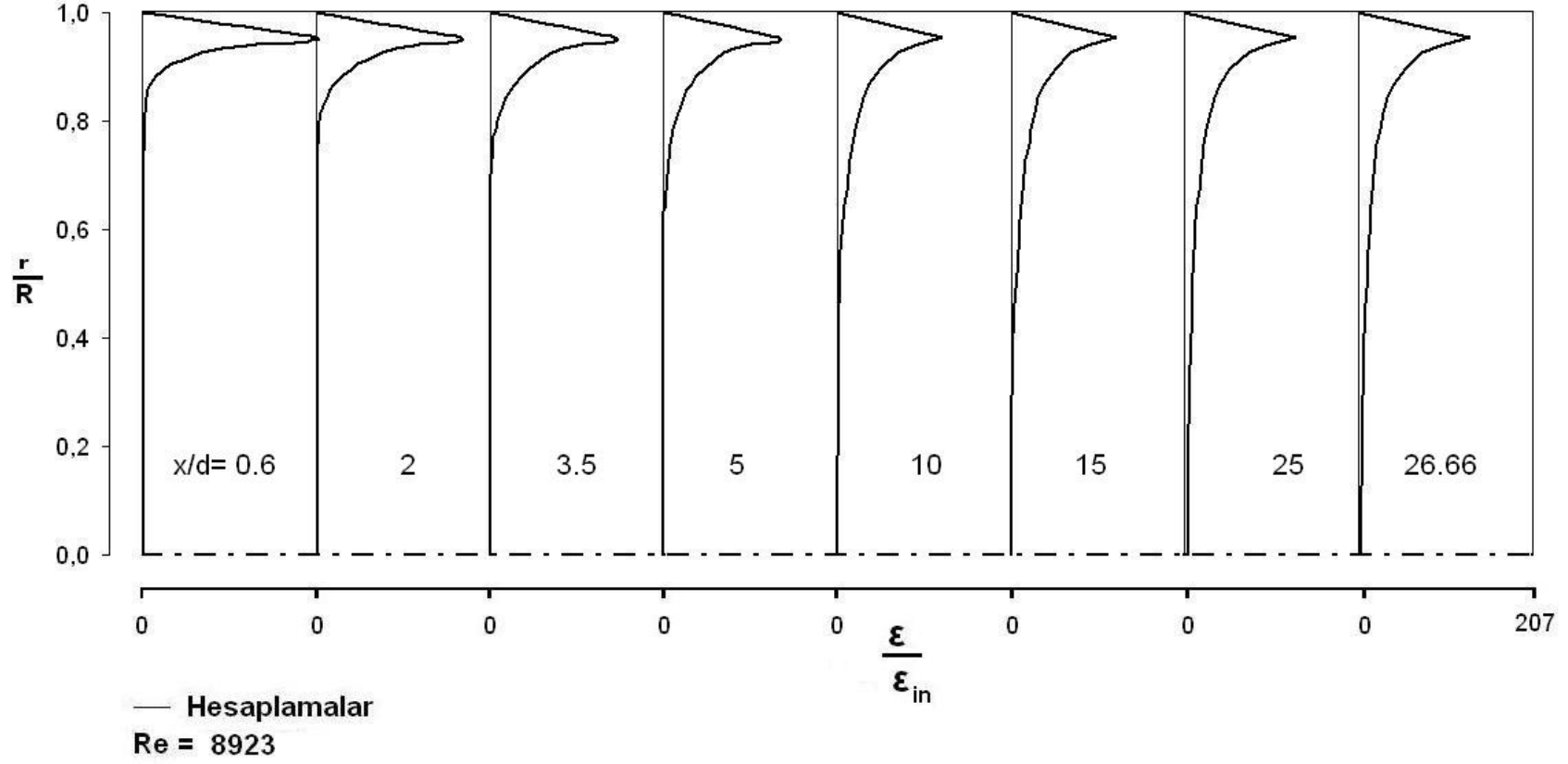
Şekil 2-53 Boruda  $x/d = 25$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Chevrin et al.'ın (1992) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması



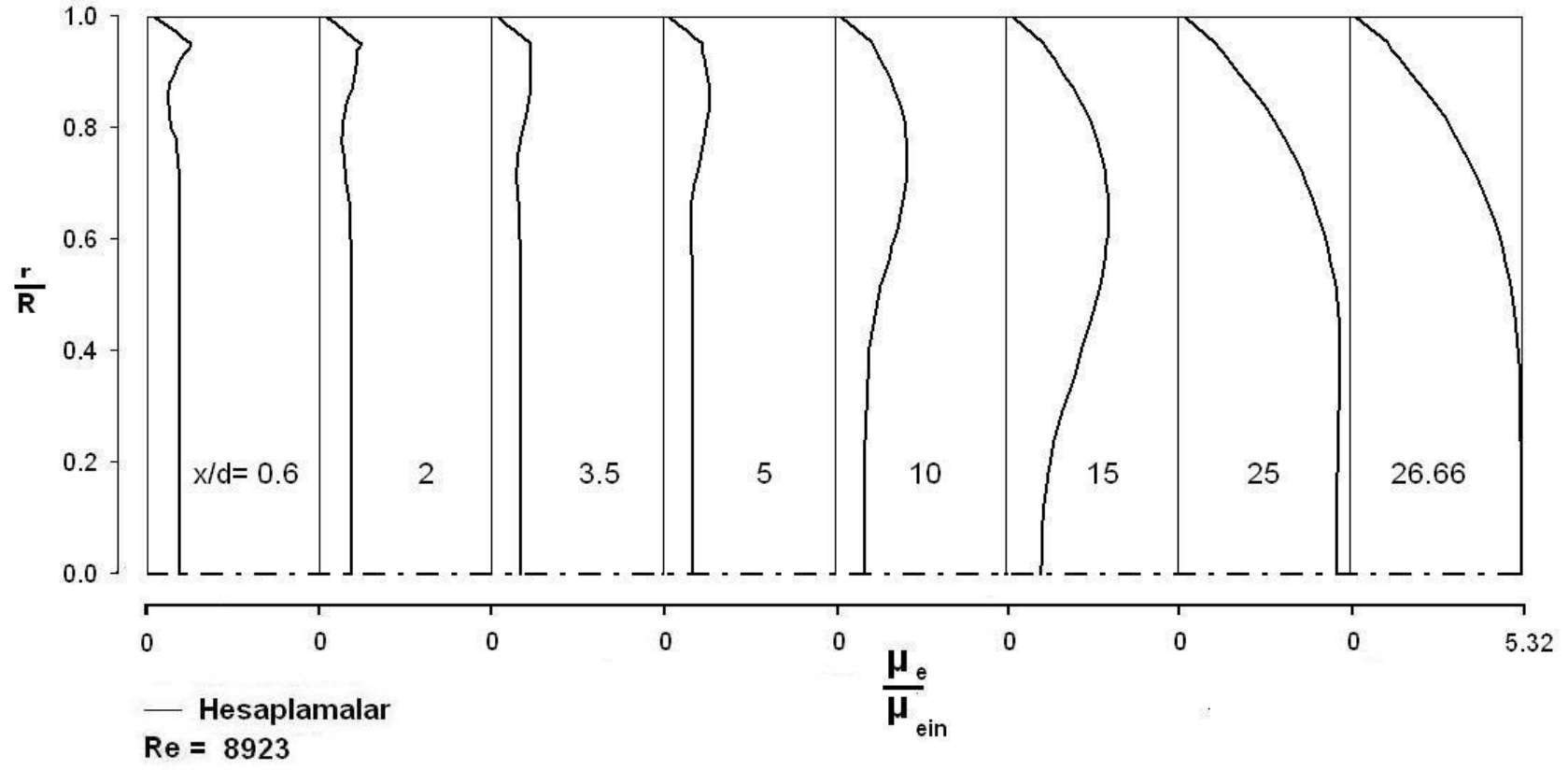
Şekil 2-54 Chevrin et al.'ın (1992) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değişimi



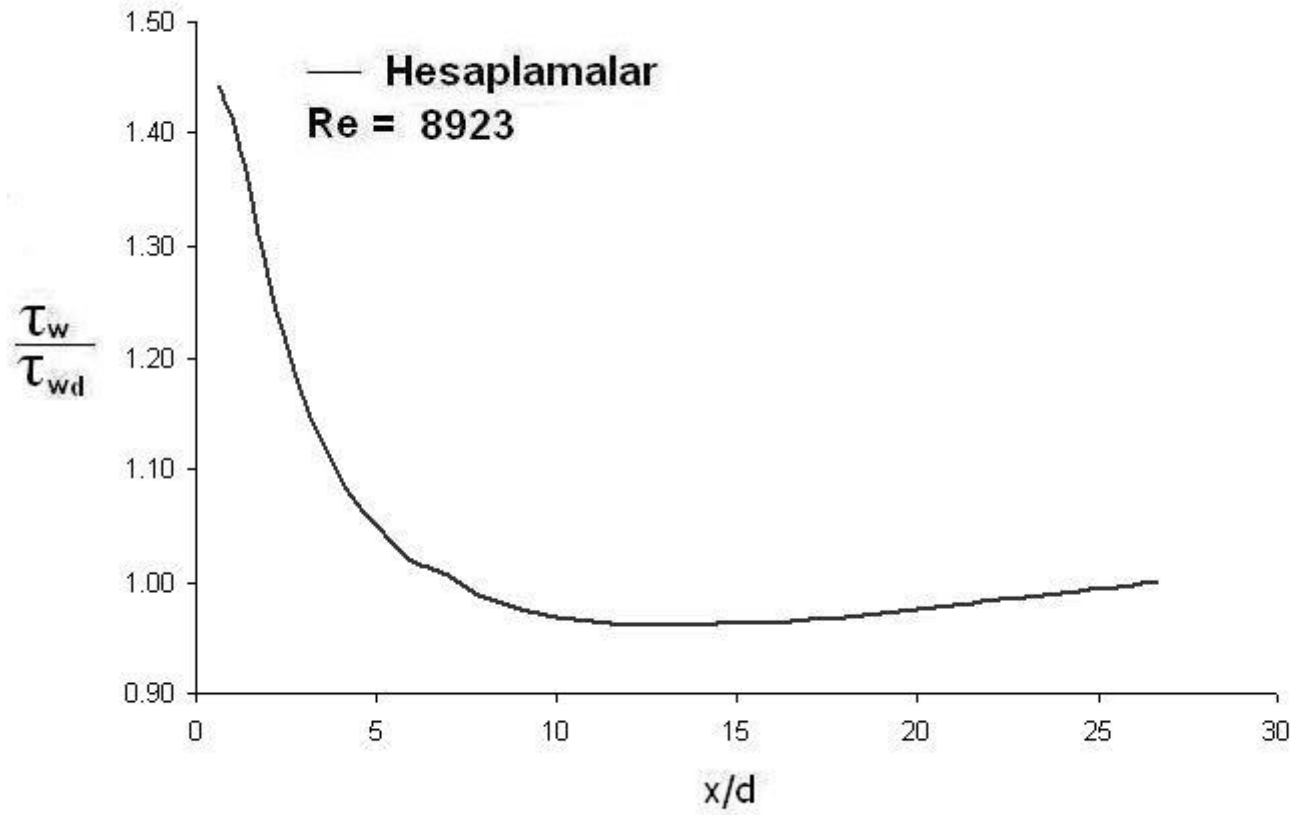
Şekil 2-55 Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi



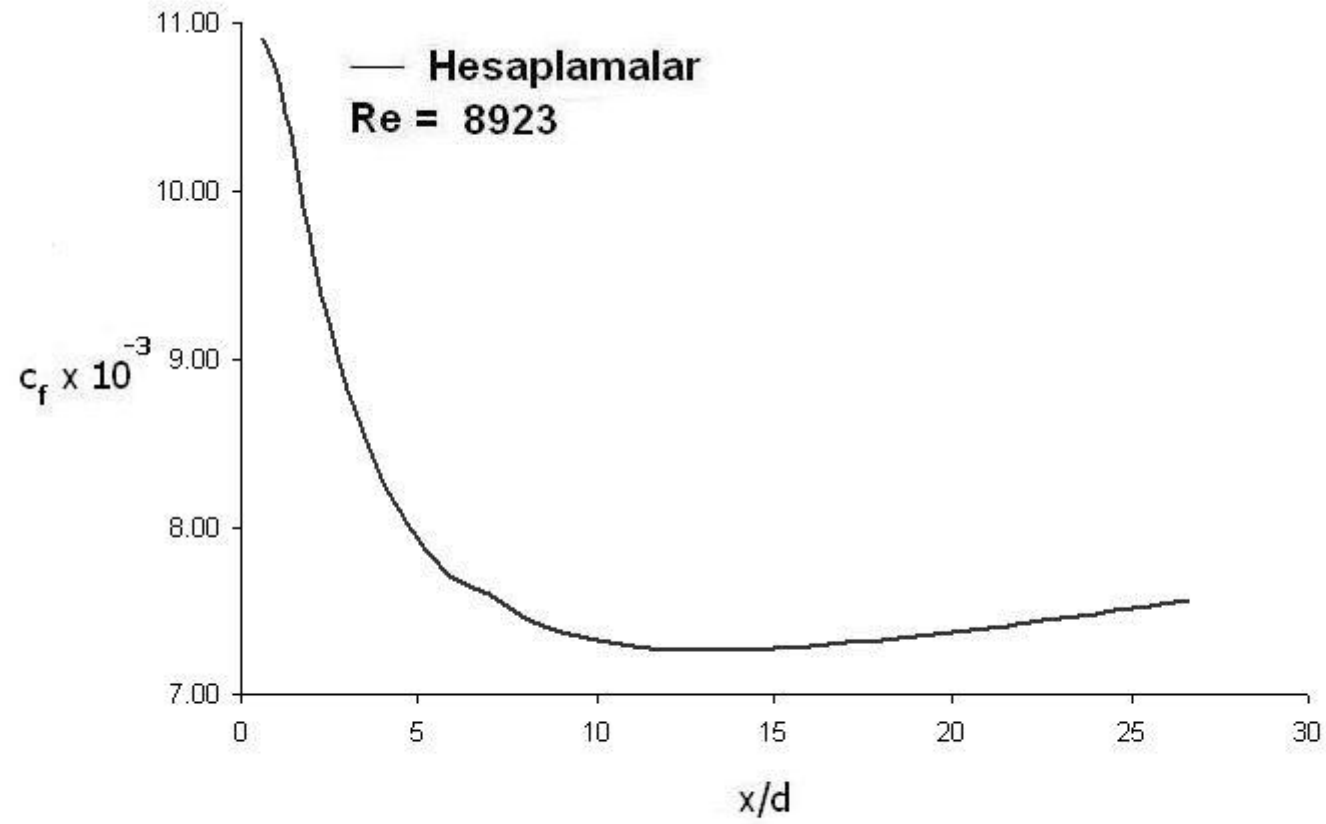
Şekil 2-56 Chevrin et al.'ın (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-57 Chevrin et al.'in (1992) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-58 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-59 Chevrin et al.'ın (1992) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi



Cole and Glauser'ın (1998) akış durumu için oluşturulan ağ dağılımı şekil 2.60'da gösterilmiştir. Ağ x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından oluşmuştur. Boru giriş, çıkış, üst cidar yakını ve simetri eksenini bölgesinde ağ daha sık oluşturulmuştur.

Dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için hesaplanan radyal hız profilleri,  $x/d = 1$ 'den 47.9'a kadar olan aksinel kesitlerde  $Re = 41000$  için şekil 2-61'de Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksinel hız radyal profilleri, o aksinel kesitinde boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksinel hız profili ile Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

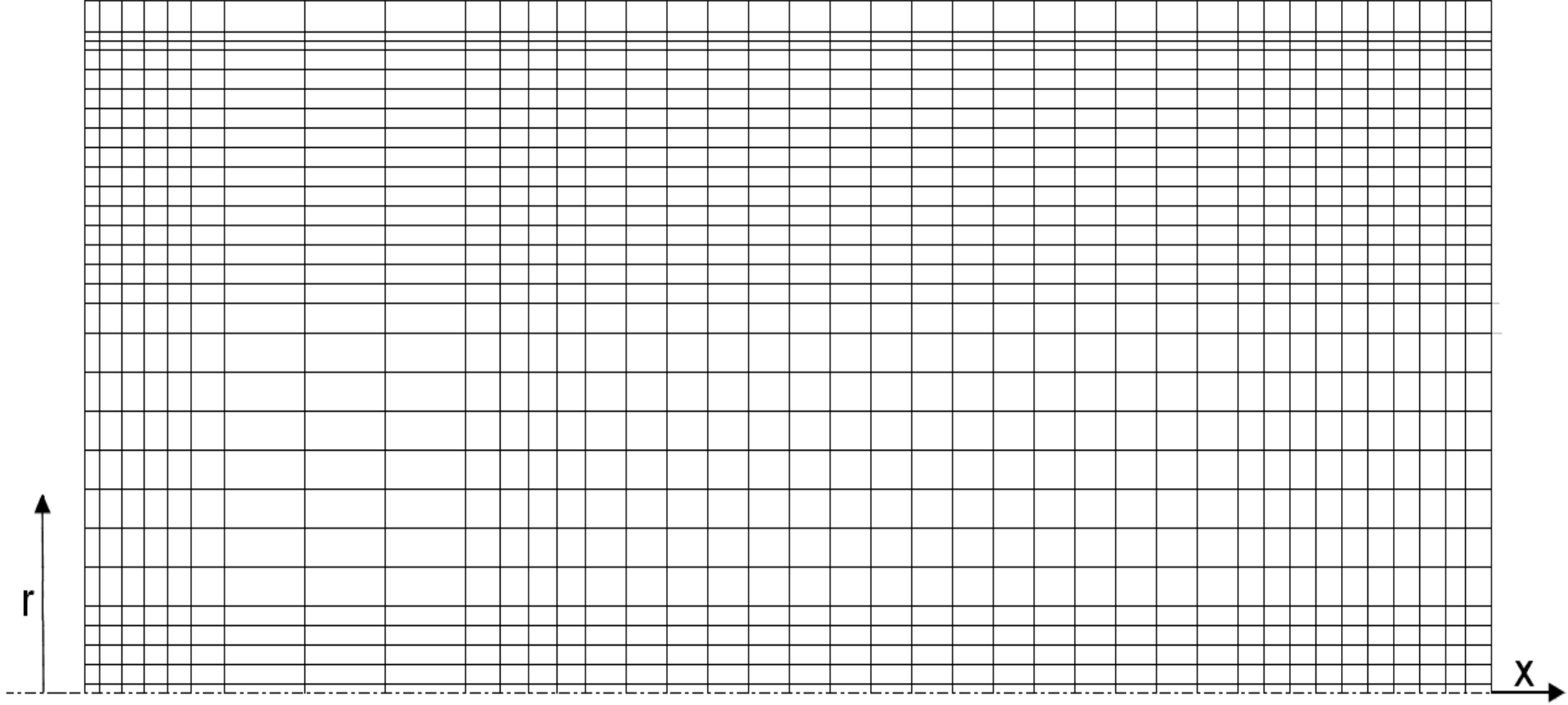
Şekil 2-62'de boruda  $x/d = 47.9$  kesitinde hesaplanan aksinel hız radyal profili Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan aksinel hız radyal profili, o aksinel kesitinde boru simetri eksenini hızı ( $U_c$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U/U_c$ " ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi hesaplanan aksinel hız profili ile Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 2-63'te Cole and Glauser'ın (1998)) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksinel hızın değişimi gösterilmektedir. Simetri eksenini boyunca hesaplanan hız, boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız ( $U_b$ ) ile boyutsuzlaştırılarak " $U_c/U_b$ " ve boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden " $x/d$ " olarak sunulmuştur.

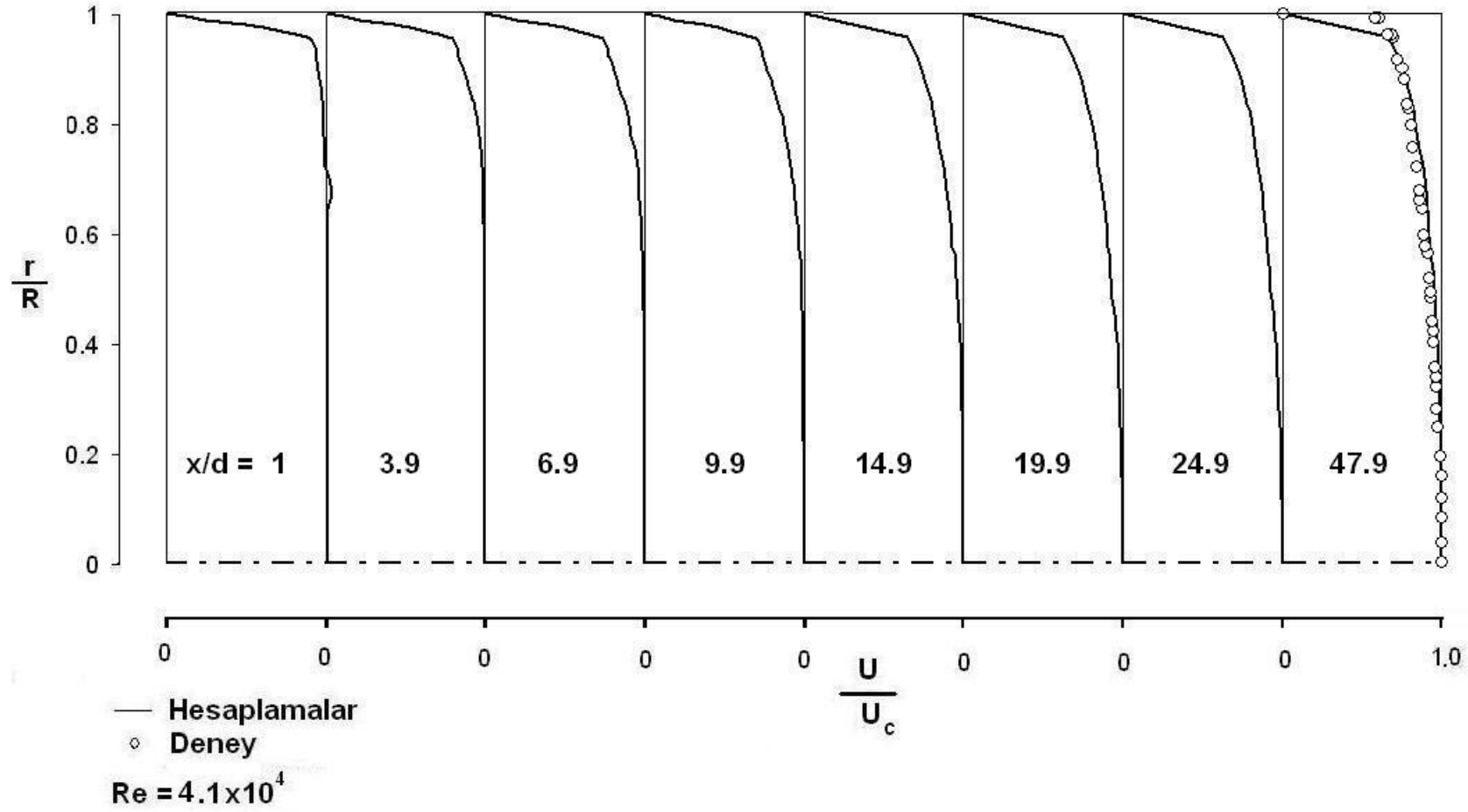
Şekil 2-64'te Cole and Glauser'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri boru giriş düzlemindeki ortalama üniform hız'ın ( $U_b$ ) karesi ile boyutsuzlaştırılmış ve radyal mesafe cinsinden " $r/R$ " olarak gösterilmiştir. Şekil 2-65'te ise Cole and Glauser'ın (1998) borusunda hesaplanan ( $x/d = 47.9$ ) türbülans kinetik enerji radyal profili, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Şekilden

görüldüğü üzere hesaplanan türbülans kinetik enerji profili ile Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri arasında makul bir uyum bulunmaktadır.

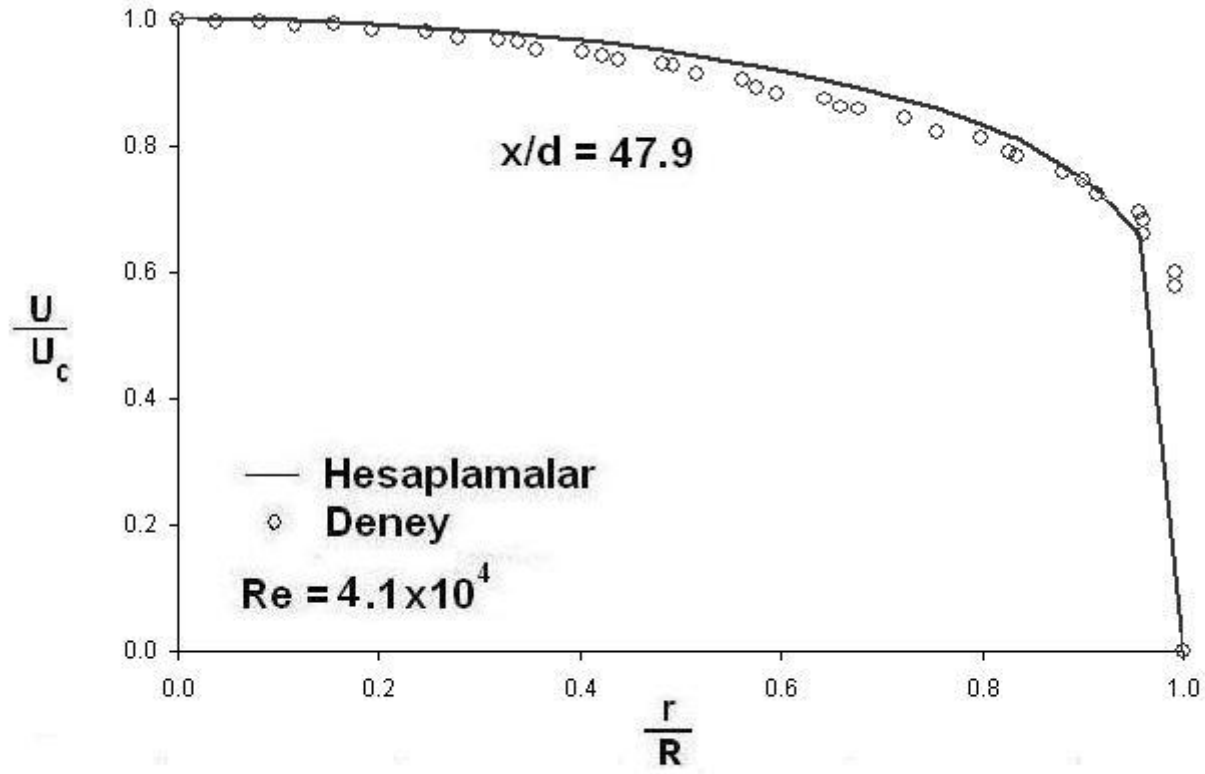
Cole and Glauser'ın (1998) akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, boru giriş düzlemindeki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ( $\epsilon_{in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-66’da, hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri, boru giriş düzlemindeki efektif viskozite ( $\mu_{e, in}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak ve radyal mesafe cinsinden “ $r/R$ ” olarak şekil 2-67’de, hesaplanan cidar kayma gerilmesi boru çıkış düzlemindeki cidar kayma gerilmesi ( $\tau_{wd}$ ) ile boyutsuzlaştırılarak boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak şekil 2-68’de ve hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f = 2\tau_w/(\rho u_b^2)$ ) boru boyunca değişimi boru çapı cinsinden “ $x/d$ ” olarak şekil 2-69’da gösterilmiştir. Şekil 2-66 ile şekil 2-67 sırasıyla boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri ile boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin akış borusu boyunca gelişimini göstermektedir.



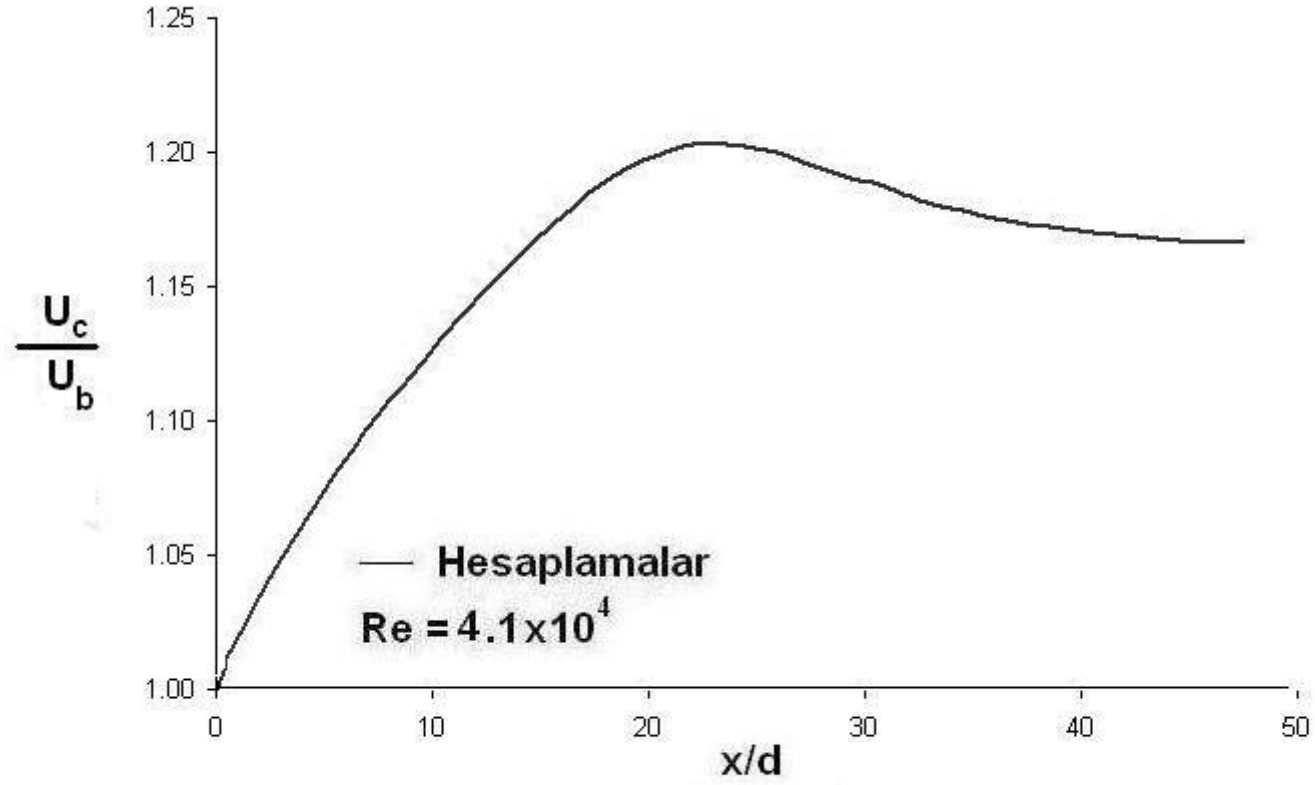
Şekil 2-60 Cole and Glauser'in (1998) dairesel kesitli akış borusu için sayısal ağ dağılımı



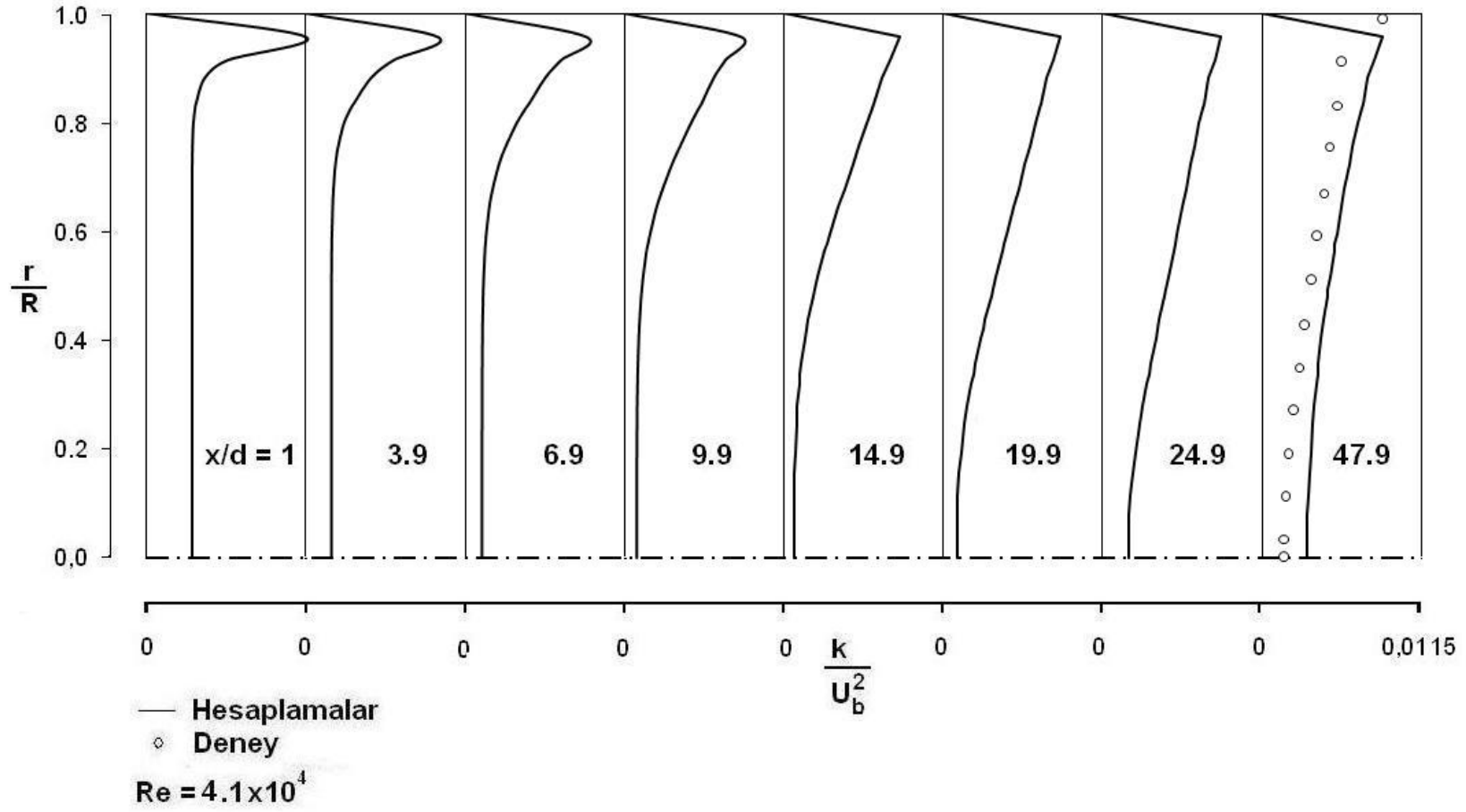
Şekil 2-61 Boru boyunca hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleri ile karşılaştırılması



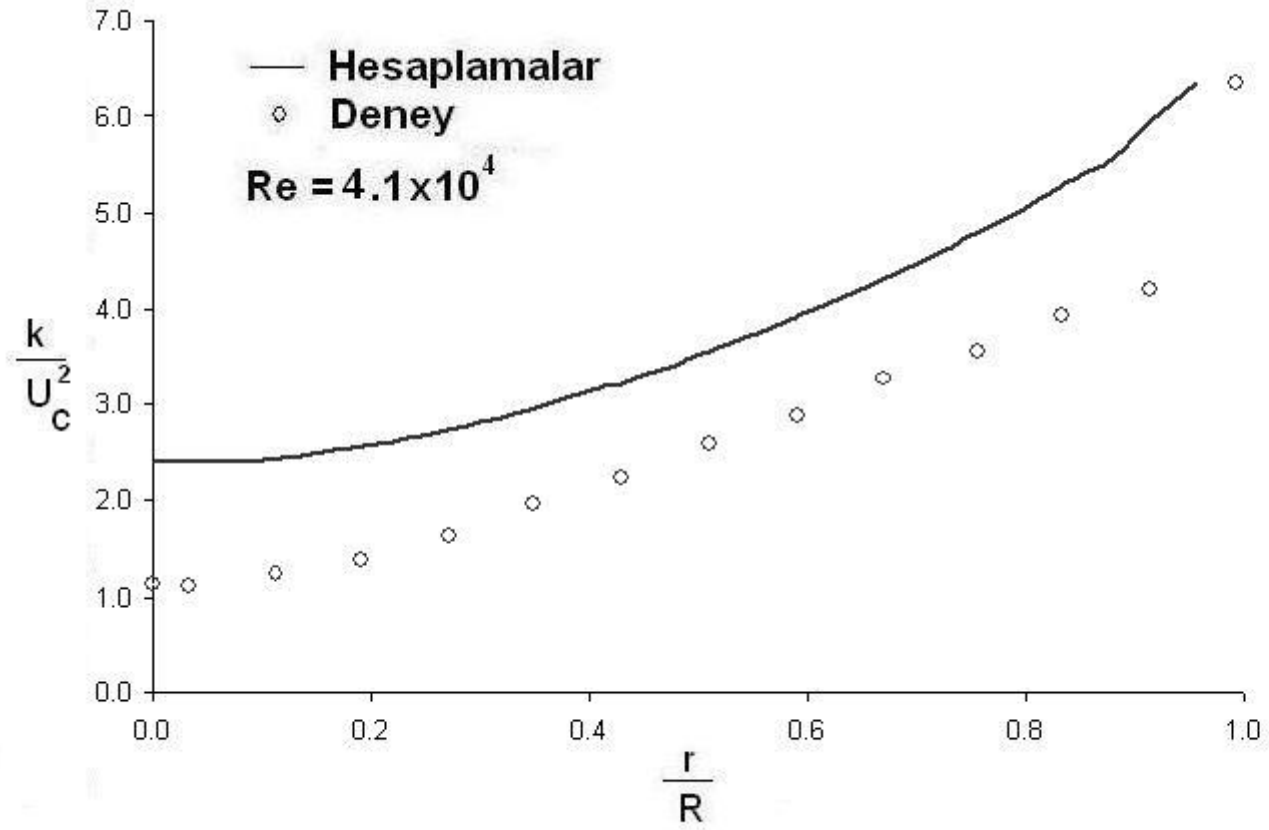
Şekil 2-62 Boruda  $x/d = 47.9$  kesitinde hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profilinin Cole and Glauser'in (1998) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması



Şekil 2-63 Cole and Glauser'in (1998) borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan boyutsuz aksenal hızın değışimi

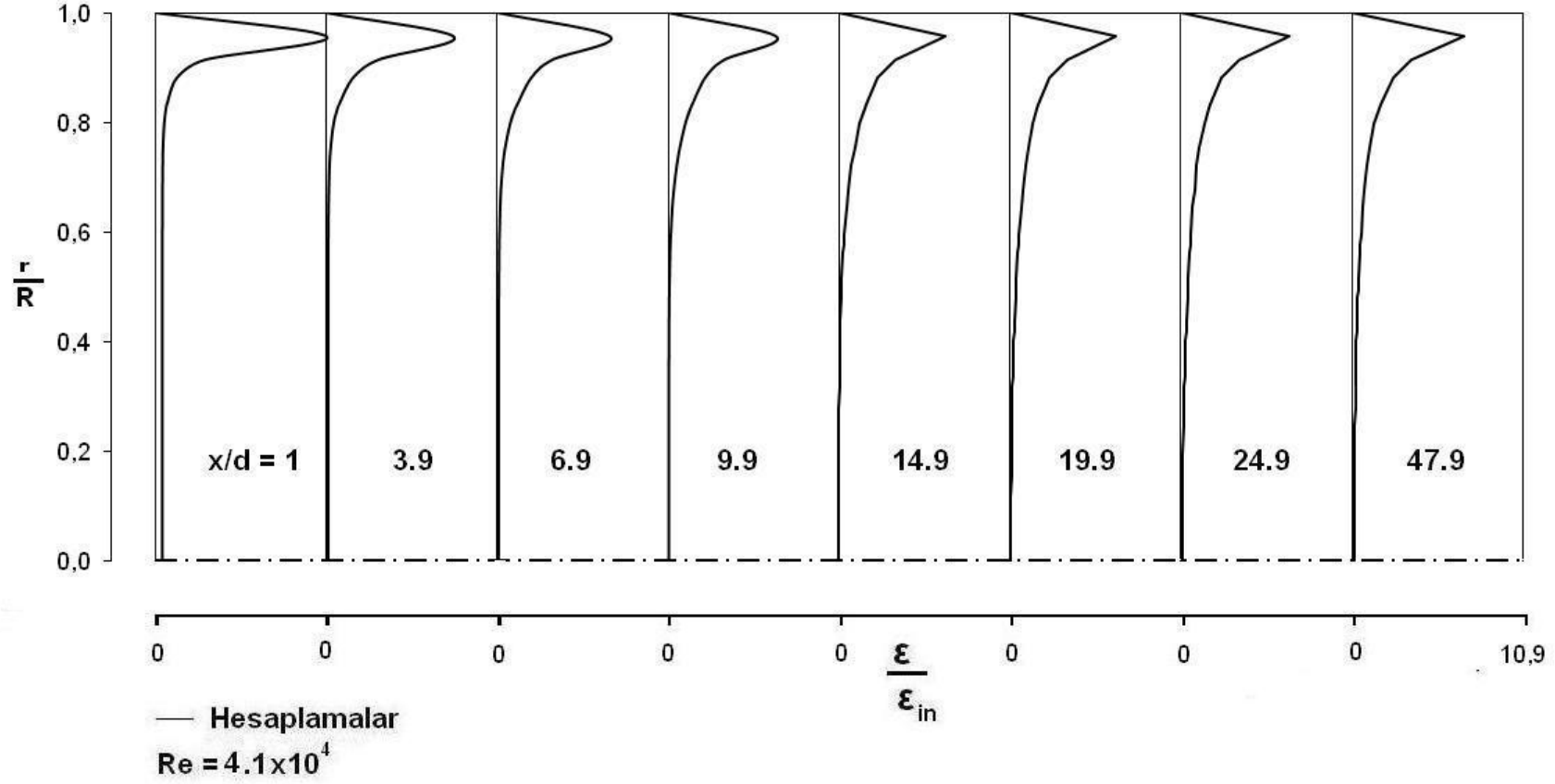


Şekil 2-64 Cole and Glauser'in (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin gelişimi

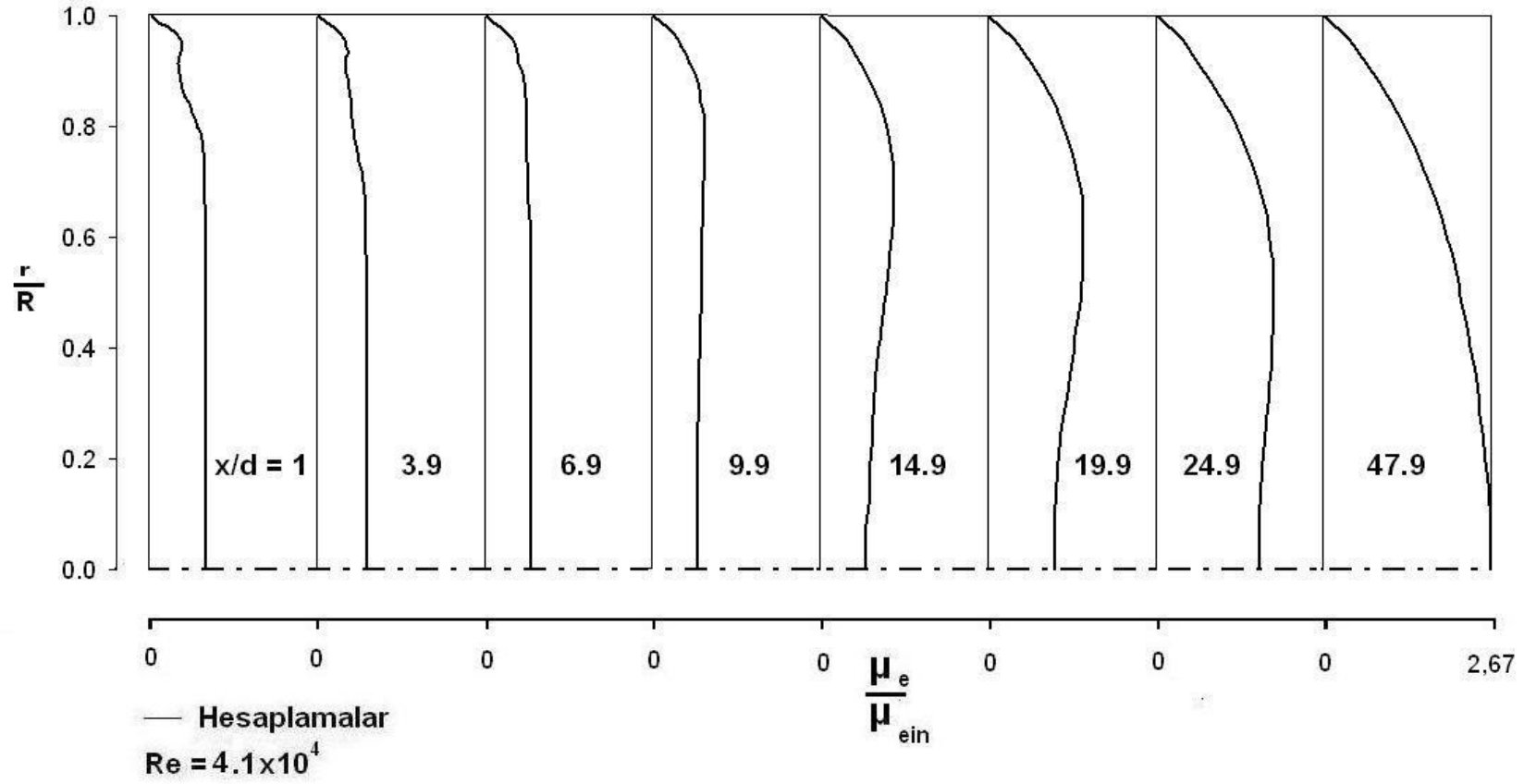


**Şekil 2-65** Boruda  $x/d = 47.9$  kesitinde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilinin Cole and Glauser'ın (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması

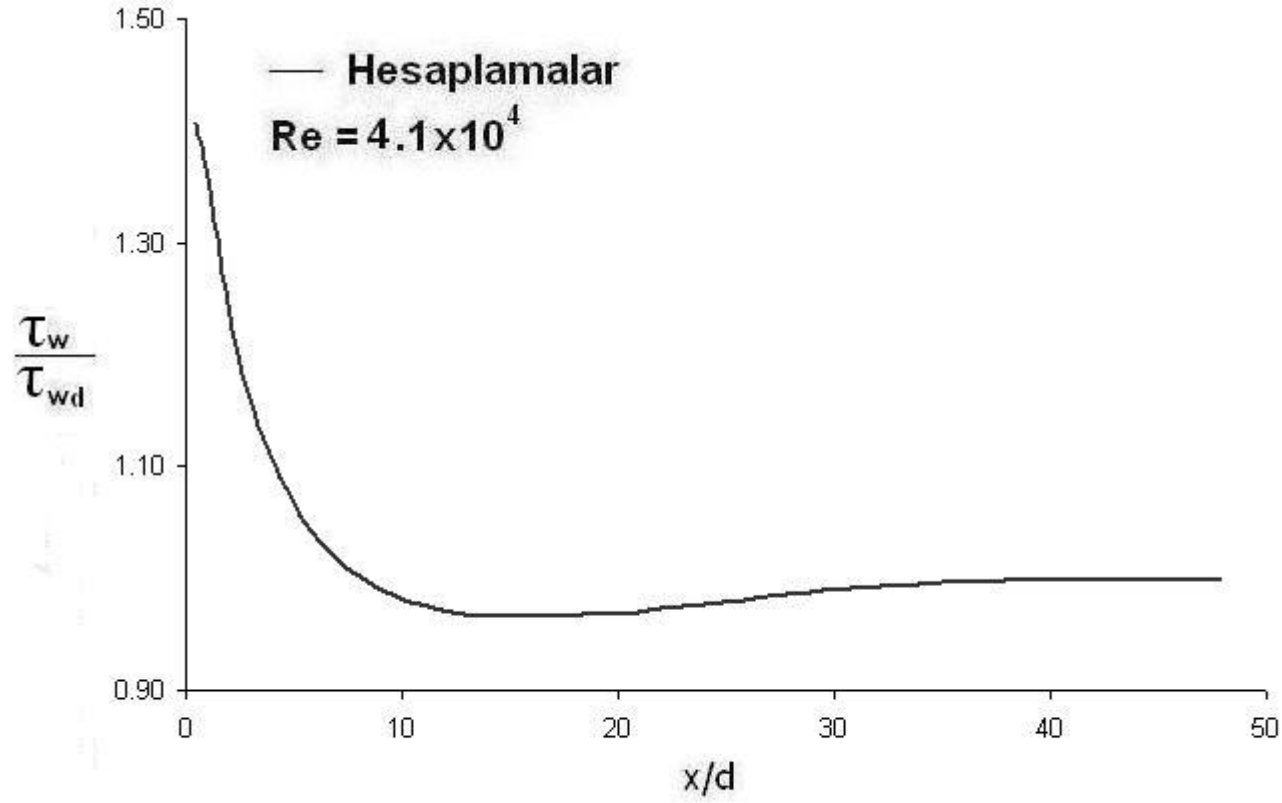




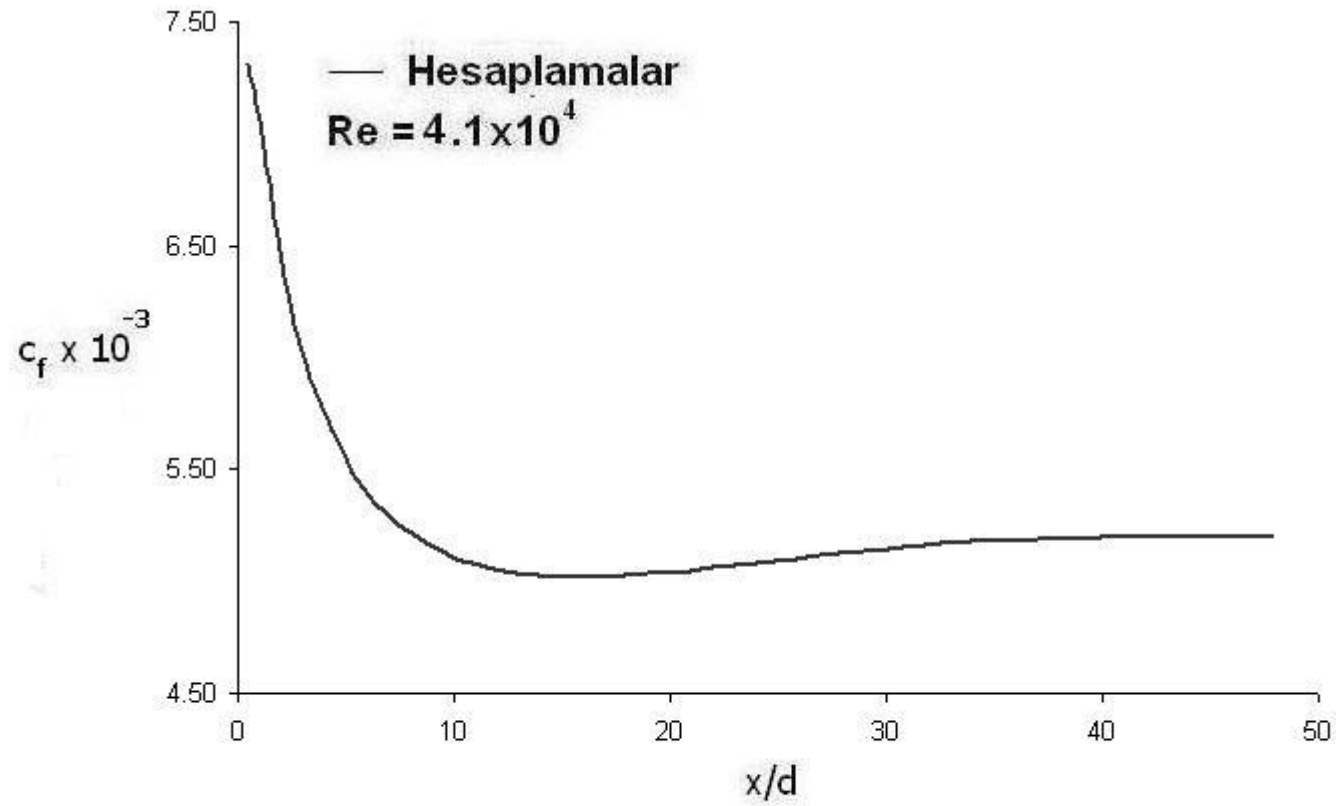
Şekil 2-66 Cole and Glauser'in (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-67 Cole and Glauser'in (1998) akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi



Şekil 2-68 Cole and Glauser'in(1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin dağılımı



Şekil 2-69 Cole and Glauser'in (1998) dairesel kesitli akış borusu boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi

## 2.4. Sonuçlar

Dairesel kesitli borularda sürekli sıkıştırılmayan gelişen türbülanslı akış,  $Re=8923$  ile  $Re=1.78 \times 10^5$  arasında değişen yedi farklı Reynolds sayısı için standart yüksek Reynolds sayılı k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Hibrit yöntemi ile geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Yedi farklı dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için standart yüksek Reynolds sayılı k- $\epsilon$  türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. Standart k- $\epsilon$  türbülans modeline dayanan aksenal hızın ve türbülans kinetik enerji radyal profilinin hesaplanmış değerleri literatürde bildirilen çeşitli ölçülmüş değerler ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak dairesel kesitli borularda türbülanslı akış için türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, boru boyunca simetri akseni üzerinde hesaplanan aksenal hızın değişimi, cidar kayma gerilmesi ve cidar sürtünme katsayısı dağılımı hesapları sunulmuştur.

Dairesel kesitli borularda türbülanslı akış için hesaplanan ve ölçülen hız profilleri ve türbülans kinetik enerji profilleri aynı trendi göstermektedir ve genel olarak deneysel ölçümlerle iyi bir uyum içerisinde-dirler.

## BÖLÜM 3

### 3. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu çalışmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

Dairesel kesitli borularda sürekli sıkıştırılmayan gelişen türbülanslı akış,  $Re=8923$  ile  $Re=1.78 \times 10^5$  arasında değişen yedi farklı Reynolds sayısı için standart yüksek Reynolds sayılı k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Hibrit yöntemi ile geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Yedi farklı dairesel kesitli boruda türbülanslı akış için standart yüksek Reynolds sayılı k- $\epsilon$  türbülans modelinin performansı araştırılmıştır.

Standart k- $\epsilon$  türbülans modeline dayanan aksel hızın ve türbülans kinetik enerji radyal profilinin hesaplanmış değerleri literatürde bildirilen çeşitli ölçülmüş değerler ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak dairesel kesitli borularda türbülanslı akış için türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, boru boyunca simetri ekseni üzerinde hesaplanan aksel hızın değişimi, cidar kayma gerilmesi ve cidar sürtünme katsayısı dağılımı hesapları yapılmış ve sunulmuştur.

Dairesel kesitli borularda türbülanslı akış için hesaplanan ve ölçülen hız profilleri ve türbülans kinetik enerji profilleri aynı trendi göstermektedir ve genel olarak deneysel ölçümlerle iyi bir uyum içerisindedirler.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Barbin, A.J. and Jones, J.B., 1963, Turbulent Flow in the Inlet Region of a Smooth Pipe, *J. Basic Engrg.*, Trans. ASME, 29, 29-34.
- Chevrin, P.A., Petrie, H.L., and Deutsch, S., 1992, The Structure of Reynolds Stress in the Near-Wall Region of a Fully Developed Turbulent Pipe Flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 13, 405-413.
- Cole, D.R., and Glauser, M.N., 1998, Flying Hot-Wire Measurements in an Axisymmetric Sudden Expansion, *Exp. Ther. Fluid Sci.*, Vol. 18, 150-167.
- Hooper, J.D., and Musgrove, A.R, 1997, Reynolds Stress, Mean Velocity and Dynamic Static Pressure Measurement by a four-Hole Pressure Probe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15, 375-383.
- Karasu, T., 1993, Dairesel Kesitli Borularda Türbülanslı Akımın Sayısal Benzetişimi, VIII.Ulusal Mekanik Kongresi, Antalya, 371-380.
- Karasu, T. 1993, Numerical Computation of Turbulent Flow in Pipes, *Doğa-Tr. J. Of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 17, 29-38.
- Karasu, T. 1995, Numerical Prediction of Turbulent Flow in Circular Pipes, 9th International Conference on Numerical Methods on Laminar and Turbulent Flow, Atlanta, Georgia, U.S.A., 9, 1329-1339.
- Karasu, T., 2001, Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Borularda Kompleks Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması, II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, 383-394.
- Karasu T., Choudhury, P.R., ve Gerstein, M., 1985, Upwind ve Hybrid Diskritizasyon Metotları ile  $k-\epsilon$  Türbülans Modelini Kullanarak Bazı Türbülanslı Akışların Hesaplanması, *Doğa Bilim Dergisi*, Seri B, Cilt 9, 218-234.
- Karasu T., Choudhury, P.R., ve Gerstein, M., 1988, Prediction of Some Turbulent Flows Using Upwind and Hybrid Discretisation Schemes and the Two-Equation Turbulence Model, *Proc. 4th Miami International Symposium on Multi-Phase Transport and Particulate Phenomena*, Miami Beach, Florida, U.S.A. 5, 105-124.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Kikuyama, K., Murakami, M., and Nishibori, K., 1983, Development of Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer in an Axially Rotating Pipe, *J. Of Fluids Eng.*, Vol. 105, 154-160.
- Kim, S.W., 1990, Near-Wall Turbulence Model and Its Application to Fully Developed Turbulent Channel and Pipe Flows, *Numerical, Heat Transfer*, 17, part B, 101-122.
- Klein, A., 1981, Review: Turbulent Developing Pipe Flow, *J. Fluids Engng.*, 103, 242-249.
- Laufer, J., 1954, The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, NACA Report 1174.
- Lauder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Comp. Meth. Appl. Engng.*, 3, 269-289.
- Lawn, C.J., 1971, The Determination of the Rate of Dissipation in Turbulent Pipe Flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, 477-505.
- Lindgren, E. R., Chao, J., 1969, Average Velocity Distribution of Turbulent Pipe Flow with Emphasis on the Viscous Sublayer, *Phys. Fluids*, 12, 1364-1371.
- Ljus, C., Johansson, B, and Almstedt, A.E. 2002, Turbulence Modification by Particles in a Horizontal Pipe Flow, *Int. J. Of Multiphase Flow*, 28, 1075-1090.
- Martinuzzi, R., Pollard, A., 1989, Comparative Study of Turbulence Models in Predicting Turbulent Pipe Flow. Part I: Algebraic Stress and k- $\epsilon$  Models, *AIAA Journal*, 27, 29-36.
- Patankar, S.V., and Spalding, D.B., 1972, A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 1787-1806.
- Patel, V.C., and Head, M.R. 1969, Some Observations on Skin Friction and Velocity Profiles in Fully Developed Pipe and Channel Flows, *J. Fluid Mech.*, 38, 181-201.
- Pollard, A., Savill, A.M., Thomann, H., 1989, Turbulent Pipe Flow Manipulation: Some Experimental and Computational Results for Single Manipulator Rings, *Appl. Sci. Res.*, 46, 281-290.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Reichert, J.K., Azad, R. S., 1976, Nonasymptotic Behavior of Developing Turbulent Pipe Flow, *Canadian J. Phys.*, 54, 268-278.
- Richman, J. W., Azad, R. S., 1973, Developing Turbulent Flow in Smooth Pipes. *Appl. Sci. Res.*, 28, 419-441.
- Saadeh, M., Strauss, K., and Schneider, T., 1997, A Combined PIV/LIF System for the Measurement of Heterogeneous Drag Reduction Effects in a Pipe-flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 22, 292-299.
- Schildknecht, M., Miller, J.A., and Meier, G.E.A., 1979, The Influence of Suction on the Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 90, 67-107.
- Spalding, D.B., 1981, A General-Purpose Computer Program for Multi-Dimensional One-and-Two Phase Flow, *Math. Comput. Simulation*, XXIII, 267-276.
- Stephenson, P.L., 1976, A theoretical Study of Heat Transfer in Two-Dimensional turbulent Flow in a Circular Pipe and Between Parallel and Diverging Plates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19, 413-423.
- Weir, J., Priest, A.J. and Sharan, V.K., 1974, Research Note: The Effect of Inlet Disturbances on Turbulent Pipe Flow, *J. Mech. Eng. Sci.*, 16, No. 3, 211-213.
- Wenger, C.W. and Devenport, W.J. 1999, Seven-Hole Pressure Probe Calibration Method Utilizing Look-Up Error Tables, *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 6, 675-679.
- Westerweel, J., Draad, A.A., van der Hoeven, J.G. Th., and van Oord, J., 1996, Measurement of Fully Developed Turbulent Pipe Flow With Digital Particle Image Velocimetry, *Experiments in Fluids*, 20, 165-177.
- Wittmer, K.S., Devenport, W.J., and Zsoldos, J.S., 1998, A Four-Sensor Hot-Wire Probe System for Three-Component Velocity Measurement, *Experiments in Fluids*, 24, 416-423.