

Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Borularda  
Turbulanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

Serdar Tezcan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2009

Numerical Computation Of Turbulent Flow  
In Axisymmetric Sudden Expansions In Pipes

Serdar Tezcan

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

January 2009

Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Borularda  
Turbulanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

Serdar Tezcan

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.

Ocak 2009

## ONAY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Serdar Tezcan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Borularda Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

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

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Tahir KARASU, D.I.C.

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Necati Mahir

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ertunç Tat

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. İrfan Üreyen

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Salih Köse

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışmada, eksenel simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, kompleks çevrintili akışın kapsamlı bir çalışmasının sayısal hesaplama sonuçları sunulmaktadır. Hibrit yöntemiyle geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\varepsilon$  türbülans modeliyle beraber, kütle ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, boru simetri eksenini boyunca eksenel hızın değişimi, geri akışın geometrik yeri ve eksenel simetrik anigenişlemeli boruda cidar kayma gerilmesinin dağılımı için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama sonuçları deneysel bulgularla iyi uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anigenişlemeli boru,  $k-\varepsilon$  modeli, çevrintili akış.

## SUMMARY

In this study, the results of an extensive study of numerical computation of steady, complex turbulent recirculating flow in axisymmetric sudden expansions in pipes are presented. Employing the conventional finite-volume method with a hybrid scheme, 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  $k$ - $\epsilon$  turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall functions are employed. Numerical computations for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, centerline velocity decay, locus of flow reversal and distribution of wall shear stress along axisymmetric sudden expansion flow geometry are presented and compared with experimental measurements. The results of numerical predictions show good agreement with experimental data.

Keywords: Sudden expansion pipe,  $k$ - $\epsilon$  model, recirculating flow.

## TEŐEKKÖR

Yüksek Lisans çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren, her türlü ilgi ve yardımını esirgemeyen değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Tahir KARASU, D.I.C.'ya teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>SUMMARY</b> .....	vi
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xxii
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. EKSENEL SİMETRİK ANİGENİŞLEMELİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL HESAPLANMASI</b> .....	3
2.1. Matematiksel Formülasyon.....	3
2.1.1. Hareket denklemleri.....	3
2.1.2. Türbülans modeli.....	4
2.1.3. Cidar fonksiyonları.....	6
2.2. Sayısal Çözüm Yöntemi.....	7
2.2.1. Genel diferansiyel denklem.....	7
2.2.2. Sınır koşulları.....	8
2.2.3. Hesaplama detayları.....	9
2.3. Bulgular ve Tartışma.....	11
<b>3. SONUÇLAR</b> .....	141
<b>4. KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....	142



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Koordinat sistemi ve anigenişleme geometrisi .....	8
2.2. Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	12
2.3. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Ahmed et al.'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	13
2.4. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Ahmed et al.'ın (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	14
2.5. Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	16
2.6. Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	17
2.7. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Ahmed et al.'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	18
2.8. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan türbülans kinetik enerjinin Ahmed et al.'ın (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	19
2.9. Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	20
2.10. Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	21
2.11. Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	22
2.12. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	24

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.13. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	25
2.14. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	26
2.15. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	27
2.16. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz eksenel hızın Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	28
2.17. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	28
2.18. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	29
2.19. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	29
2.20. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	30
2.21. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Ahmed ve Nejad'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	31
2.22. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.....	32
2.23. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Ahmed ve Nejad'ın (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	33
2.24. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	34

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.25. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	35
2.26. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	36
2.27. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	36
2.28. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	38
2.29. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	39
2.30. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	40
2.31. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	41
2.32. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	42
2.33. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	43
2.34. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri( $u=0$ ).....	44
2.35. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	44
2.36. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	45

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.37. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	45
2.38. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenel hız radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	46
2.39. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	47
2.40. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	50
2.41. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	51
2.42. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusunda $x/h=3$ aksenel mesafesinde hesaplanan boyutsuz aksenel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	52
2.43. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	53
2.44. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	53
2.45. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	54
2.46. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	54
2.47. Escudier ve Smith'in (1999) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	55
2.48. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenel hız radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.49. ksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	57
2.50. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	58
2.51. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	59
2.52. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemesi boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan eksenel hızın değişimi.....	60
2.53. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	60
2.54. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	61
2.55. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	62
2.56. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	63
2.57. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	64
2.58. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	65
2.59. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	66
2.60. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.61. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan eksenel hızın Escudier ve Smith'in (1999) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	68
2.62. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	68
2.63. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	69
2.64. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.....	69
2.65. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	70
2.66. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Stieglmeier et al.'ın (1989) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.....	71
2.67. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Stieglmeier et al.'ın (1989) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.....	72
2.68. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri .....	73
2.69. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	74
2.70. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan eksenel hızın Stieglmeier et al.'ın (1989) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	75
2.70. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	76
2.72. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.73. Tinney et al. (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	77
2.74. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profilleri.....	78
2.75. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.94$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	79
2.76. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.72$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	80
2.77. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.56$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	80
2.78. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.28$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	81
2.79. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.0$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	81
2.80. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	82
2.81. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.....	83
2.82. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	84
2.83. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	85
2.84. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	86

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.85. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	86
2.86. Cole ve Glauser'ın (1998a) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	87
2.87. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	88
2.88. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	89
2.89. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.93$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	90
2.90. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.70$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	90
2.91. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.46$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	91
2.92. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.23$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	91
2.93. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.0$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	92
2.94. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	92
2.95. Cole ve Glauser'ın (1998a) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	93



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.96 Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	94
2.97 Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	95
2.98. Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	95
2.99. Founti ve Klipfel'in (1998) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	96
2.100. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	97
2.101. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	98
2.102. Founti ve Klipfel'in (1998) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	99
2.103. Founti ve Klipfel'in (1998) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	100
2.104. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	101
2.105. Founti ve Klipfel'in (1998) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri( $u=0$ ).....	102
2.106. Founti ve Klipfel'in (1998) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	102
2.107. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	104

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.108. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	105
2.109. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Pereira and Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	106
2.110. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	107
2.111. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	108
2.112. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	109
2.113. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	110
2.114. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	110
2.115. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	111
2.116. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	111
2.117. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	113
2.118. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	114

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.119. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	115
2.120. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	116
2.121. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksene hızın Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	117
2.122. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	117
2.123. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	118
2.124. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	118
2.125. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	119
2.126. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	120
2.127. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.....	121
2.128. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	122
2.129. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	123
2.130. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	124

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.131. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri( $u=0$ ).....	124
2.132. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	125
2.133. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	125
2.134. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	126
2.135. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	127
2.136. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.....	128
2.137. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	129
2.138. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	130
2.139. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	131
2.140. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	131
2.141. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	132
2.142. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	132

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.143. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.....	134
2.144. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenel hız radyal profillerinin Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	135
2.145. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	136
2.146. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.....	137
2.147. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.....	138
2.148. Aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenel hızın Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	139
2.149. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).....	140
2.150. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.....	140

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1. k- $\epsilon$ türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri.....	5
2.2. Akış durumu, Reynolds sayısı, cpu zamanı ve iterasyon sayısı.....	10

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
$C_1, C_2, C_\mu$	: Türbülans modeli sabitleri
$E$	: Logaritmik yasa sabiti ( $E=9.0$ )
$G$	: Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
$k$	: Türbülans kinetik enerji
$k_p$	: Cidara yakın P düğüm noktasındaki türbülans kinetik enerji
$p$	: Basınç
$Re$	: Reynolds sayısı
$S_\phi$	: Taşınım denklemlerinde kaynak terimi
$U$	: Ortalama akış yönü hızı
$U_c$	: Simetri eksenindeki hız
$U_0, U_{ref}$	: Anigenişlemeli boru girişindeki hız
$U_b$	: Debiden hesaplanan ortalama hız (bulk velocity)
$u_p$	: Cidar yakınında P düğüm noktasında cidara paralel ortalama hız
$u^+$	: Boyutsuz hız ( $=u_p/u_\tau$ )
$u_\tau$	: Sürtünme hızı ( $=\sqrt{\tau_w/\rho}$ )
$u', v', w'$	: Türbülans çalkantıları
$v$	: Ortalama radyal hız
$x$	: Akış yönünde ölçülen mesafe
$x_r$	: Çevrıntili akış bölgesi uzunluğu
$y_p$	: Cidardan cidar yakınındaki P ağ düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe
$y^+$	: Boyutsuz cidar mesafesi ( $=y_p u_\tau/\nu$ )
$C_p$	: Basınç katsayısı ( $=\Delta P/0.5\rho U_b^2$ )
$D$	: Büyük kesitli borunun çapı
$d$	: Küçük kesitli borunun çapı
$R_0$	: Büyük kesitli borunun yarıçapı
$r_{in}$	: Küçük kesitli borunun yarıçapı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$h$	: Basamak yüksekliği
$\varepsilon$	: 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 ( $=\mu + \mu_t$ )
$\nu$	: Laminar kinematik viskozite ( $=\mu / \rho$ )
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu
$\Gamma_\phi$	: Yayınım mübadele katsayısı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	: $k$ ve $\varepsilon$ 'nun yayınım için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
$\tau_w$	: Cidar kayma gerilmesi

<u>Alt İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
$\phi$	: Genel değişken
$k, \varepsilon$	: 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
$r$	: Dolaşım ya da çevrinti
$in$	: Giriş
$ref$	: Referans



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Eksenel simetrik anigenişlemeli bir borudaki türbülanslı akış, hem bu tip kompleks çevrintili türbülanslı akışların incelenmesinde bir temel teşkil etmesinden dolayı, hem de pratiksel öneminden dolayı büyük bir dikkati üzerine çekmiştir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bu akış alanı çok karmaşık olup bir potansiyel göbek, türbülans seviyeleri yüksek eğri bir serbest kayma tabakası, birincil bir çevrintili akış bölgesi ve basamağın çok yakınında ikincil bir çevrintili akış bölgesinden oluşmuştur. Cidarda kayma tabakasının birleşmesinden sonra, akış eksenel simetrik anigenişlemeli boru boyunca ilerleyerek gelişmektedir.

Eksenel simetrik anigenişlemeli bir borudaki kompleks çevrintili türbülanslı akış üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. Gould et al. (1990), bu akıştaki eksenel ile radyal hızların, Reynolds gerilmelerinin ve üçlü çarpımların lazer Doppler hızölçerle (LDH) yapılan deney sonuçlarını sunmuşlardır. Durret et al. (1988), bir eksenel simetrik anigenişleme akışında LDH ile yapılan eksenel ve radyal hızların, türbülans çalkantılarının, Reynolds gerilmesi ile türbülans kinetik enerjisinin ölçümlerini bildirmiştir. Favaloro et al. (1991), çevrintili akış bölgesinde LDH’yi kullanarak, eksenel hız, kinetik enerji ölçümleri yapmıştır. Karasu (1995, 2001, 2008),  $k-\epsilon$  türbülans modelini kullanarak geliştirdiği programla eksenel simetrik anigenişlemeli borularda türbülanslı akışın sayısal hesaplamalarını yapmış ve deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Ahmed et al. (1992), Ahmed ve Nejad (1992), Ahmed ve Abidogun (1997), anigenişlemeli boru şeklindeki bir yanma odasında, dönmeli ve dönmesiz türbülanslı akıştaki LDH ile ölçülen türbülans hızları, normal ve kayma Reynolds gerilmelerini ve üçlü çarpımları sunmuşlardır. Cole ve Glauser (1998a, 1998b), Tinney et al. (2006), birçok sabit radyal ve eksenel mesafelerde türbülans büyüklüklerini sıcak-tel anemometresi kullanarak ölçmüş ve akış alanını değişik yönleriyle ele almıştır. Founti ve Klipfel (1998), bu tip akışlara katı parçacık salınımının etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Stieglmeier et al. (1989), değişik genişleme açıları için büyük çaplı borudaki türbülanslı akışı incelemiştir. Poole ve Escudier (2003), Escudier ve Smith (1999), Pereira ve Pinho (2000, 2002), Castro ve Pinho (1995), Newtoniyen ve

Newtoniyen olmayan akışkanlar için değişik Reynolds sayılarında aksenal hız, türbülans çalkantıları ve anigenişlemeli boru boyunca cidar statik-basınç katsayısı değişimlerini ölçen deneyler yapmışlardır.

Bu çalışmada, Ahmed et al. (1992), Ahmed ve Nejad (1992), Ahmed ve Abidogun (1997), Cole ve Glauser (1998a), Tinney et al. (2006), Founti ve Klipfel (1998), Stieglmeier et al. (1989), Poole ve Escudier (2003), Escudier ve Smith (1999), Pereira ve Pinho (2000, 2002), Castro ve Pinho'nun (1995), deneysel ölçümlerinden yararlanılmıştır. On altı farklı akış durumu için sayısal hesaplamalar yapılmış ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, Launder ve Spalding'in (1974) standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelini cidar-fonksiyonları sınır koşulu ile kullanarak aksenal simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, kompleks çevrıntili türbülanslı akışın sayısal hesaplamalarını yapmak ve bu sayısal hesaplamaların doğruluğunu test etmek amacıyla literatürdeki deneysel ölçümlerle mukayese etmektir.

## BÖLÜM 2

### EKSENEL SİMETRİK ANİGENİŞLEMELİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL HESAPLANMASI

#### 2.1. Matematiksel Formülasyon

##### 2.1.1. Hareket Denklemleri

Eksenel simetrik anigenişlemelerde sürekli, sıkıştırılmayan, türbülanslı akışı yöneten kısmi diferansiyel denklemler, türbülans gerilmelerinin yerini alan eddy viskozite bağıntılarıyla, Şekil 2.1'de gösterilen eksenel simetrik silindiriksel koordinatlar 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 ;

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

r - yönü :

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

burada ;

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

Yukarıdaki denklemlerde u ve v sırasıyla aksel (x) ve radyal (r) yönlerindeki hız bileşenleridir.  $\rho$  akışkanın yoğunluğu, p ise basıncıdır.  $S_u$  ve  $S_v$  sırasıyla x-yönü ve r-yönü momentum denklemlerindeki kaynak terimleridir. Efektif viskozite  $\mu_e$  aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

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

Burada  $\mu$  ve  $\mu_t$  sırasıyla laminar ve türbülans viskozitelerdir.

### 2.1.2. Türbülans modeli

Bu çalışmada kullanılan Launder ve Spalding'in (1974) standart yüksek Reynolds sayılı k- $\varepsilon$  modeli, eddy viskozitesi kavramını benimsemektedir. Eddy viskozitesi, zaman ortalaması alınmış türbülans kinetik enerji k ile onun kaybolma miktarı  $\varepsilon$ 'nin değerlerinden aşağıdaki eşitliğe göre bulunabilir.

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

k ve  $\varepsilon$ 'nin dağılımları aşağıdaki model taşınım denklemlerinin çözülmesiyle bulunmuştur.

Türbülans kinetik enerji k :

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

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  $\varepsilon$  :

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

burada ;

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

Yukarıdaki (2.5)-(2.7) denklemlerinde görülen ampirik sabitler için Launder ve Spalding (1974) tarafından önerilen standart değerler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Standart k- $\varepsilon$  türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri

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

Standart k- $\varepsilon$  türbülans modeli yüksek Reynolds sayılı akışların yalnız tamamıyla türbülanslı bölgelerinde uygulanabilir. Katı cidarlar yakınında türbülans etkileri kaybolur. Bu yüzden iç bölgelerle cidar arasındaki aralığı birbirine bağlamak

için ampirik cidar fonksiyonları kullanılır. Bu çalışmada, yakın-cidar akışlarını modellemek için Launder ve Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları kullanılmıştır.

### 2.1.3. Cidar fonksiyonları

Yakın cidar akışlarının modellenmesi için Launder ve Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları yöntemine göre cidar tabakasında aşağıdaki bağıntıların geçerliliği kabul edilmiştir.

$$\begin{aligned} y^+ < 11.6 \text{ için} \quad u^+ &= y^+ \\ y^+ \geq 11.6 \text{ için} \quad u^+ &= \left( \frac{1}{\kappa} \right) \ln(Ey^+) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$k_p = u_\tau^2 / c_\mu^{1/2} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_p = (c_\mu^{3/4} k_p^{3/2}) / (\kappa y_p) \quad (2.10)$$

ve

$$u^+ = u_p / u_\tau$$

$$y^+ = y_p u_\tau / \nu$$

$$u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2} .$$

Yukarıdaki bağıntılar, cidar tabakası içinde kayma gerilmesinin, cidara olan uzaklıktan bağımsız olduğu varsayımı altında türetilmiştir. Bu çalışmada, cidar kayma gerilmesi aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau_w = \begin{cases} \frac{\mu u_p}{y_p} & y^+ < 11.6 \text{ için} \\ \frac{\kappa \rho u_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\ln(E \rho y_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} / \mu)} & y^+ \geq 11.6 \text{ için} \end{cases} \quad (2.11)$$

Bu denklemlerdeki,  $u_p$ ,  $k_p$ ,  $\varepsilon_p$  sırasıyla, cidardan bir  $y_p$  mesafesinde cidar yakınında bir P noktasında cidara paralel hız, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı değerleridir. E ve  $\kappa$  sabitleri sırasıyla 9.0 ve 0.41 alınır. (2.11) denkleminde verilen cidar kayma gerilmesi, kaynak terimi işlemi vasıtasıyla momentum denklemleri için bir akım tipi sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Cidara dik bir hız bileşeni için özel bir işlem gerekli değildir.

## 2.2. Sayısal çözüm yöntemi

### 2.2.1. Genel diferansiyel denklem

(2.1)-(2.3) diferansiyel denklemleriyle (2.6)-(2.7) diferansiyel denklemleri aşağıdaki gibi genel bir diferansiyel denklem şeklinde ifade edilirse;

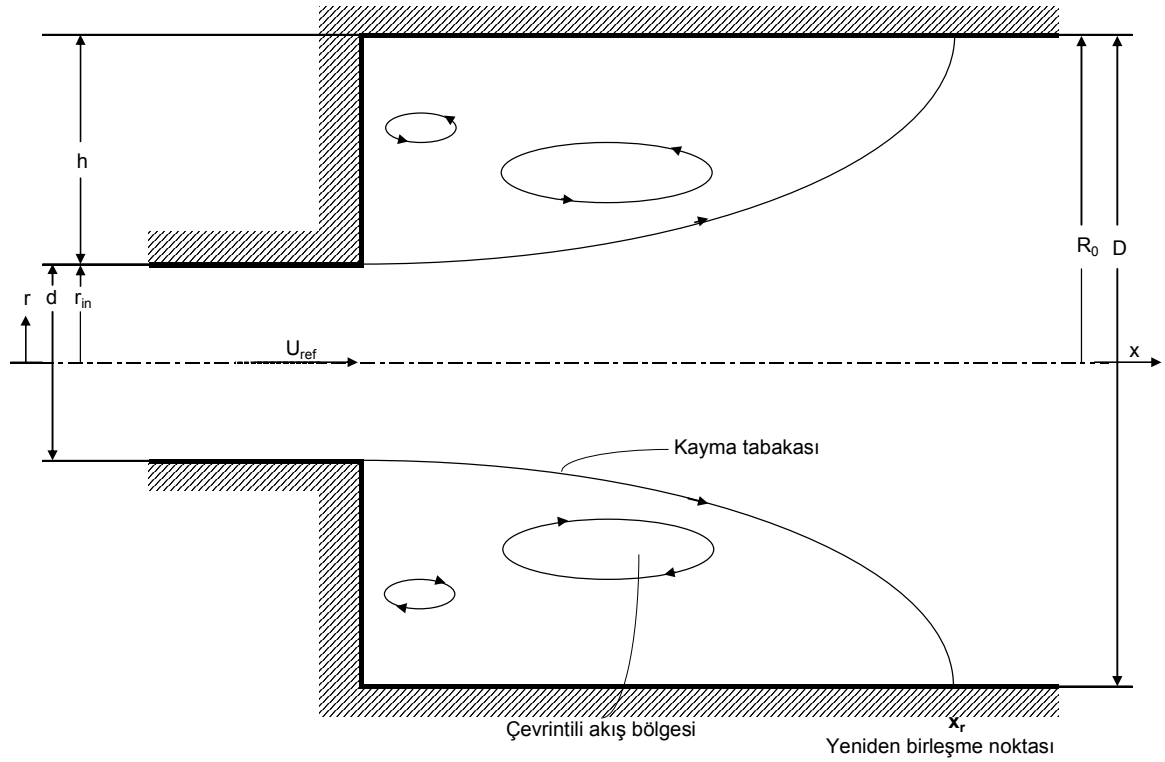
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_{\phi} \quad (2.12)$$

halini alır. Bu denklem genel bir değişken  $\phi$  için bir hareket denklemini gösterir.  $u$  ve  $v$  değişkenleri sırasıyla aksel ( $x$ ) ve radyal ( $r$ ) yönlerindeki hız bileşenleridir.  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $\Gamma_{\phi}$  ise taşınım katsayısıdır. Son terim  $S_{\phi}$ , kaynak terimidir. Burada  $\phi$  değişkenleri sırasıyla  $u$ ,  $v$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$ 'dir.  $\phi$  değişkeni bir,  $\Gamma_{\phi}$  ve  $S_{\phi}$  sıfıra eşitlenirse genel diferansiyel denklem süreklilik denklemine dönüşür. Basınç ise basınç düzeltme denkleminde elde edilir ( Patankar, 1980).

Sonlu-hacim metodu kullanılarak, Patankar ve Spalding'in SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Genel kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemiyle bir kontrol hacme dayanan sonlu-fark metoduyla ayrıştırılmıştır. Sınır koşulları ile beraber, kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu hacim biçimleri, üç köşegenli matris şekliyle birlikte, kolon-kolon (line-by-line) çözüm yöntemini kullanarak iteratif olarak çözülmüştür.

### 2.2.2. Sınır koşulları

Eksenel simetrik anigenişlemeli borulardaki akış geometrisi Şekil 2.1’de gösterildiği gibidir. Burada  $h$  basamak yüksekliği,  $D$  büyük kesitli borunun,  $d$  ise küçük kesitli borunun çapıdır.  $U_{ref}$  anigenişleme girişinde ölçülen referans hızdır.



Şekil 2.1. Koordinat sistemi ve anigenişleme akış geometrisi

Akış alanı, basamaktan aşağı akışta türbülans seviyeleri yüksek eğri bir serbest kayma tabakası, birincil bir çevrintili akış bölgesi ve basamağın çok yakınında ikincil bir çevrintili akış bölgesinden oluşmuştur. Cidarda kayma tabakasının birleşmesinden sonra, akış eksenel simetrik anigenişlemeli boru boyunca ilerleyerek gelişmektedir.

Bu çalışmada, Ahmed et al. (1992), Ahmed ve Nejad (1992), Ahmed ve Abidogun (1997), Cole ve Glauser (1998a), Tinney et al. (2006), Founti ve Klipfel (1998), Stieglmeier et al. (1989), Poole ve Escudier (2003), Escudier ve Smith (1999), Pereira ve Pinho (2000, 2002) ve Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümlerinden yararlanılmıştır. On altı farklı Reynolds sayısında akış durumu için sayısal



hesaplamalar yapılmıştır. Giriş koşulu olarak, anigenişleme borusunun girişinde deneysel olarak ölçülen aksenal hızın ve türbülans kinetik enerjinin radyal dağılımı esas alınmış ve radyal hız sifira eşit kılınmıştır. Bazı sayısal analizlerde, ilgili makalelerde bildirilen düzgün (uniform) aksenal giriş hızı ölçümleri giriş koşulu olarak alınmıştır. Giriş türbülans kinetik enerji dağılımı bildirilmemişse türbülans kinetik enerji seviyesi belirlenmiş ve ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani,  $k=(0.002-0.005)U_0^2$  (ya da  $U_{ref}^2$ ) ve  $\varepsilon = (C_\mu k^{3/2} / 0.03R_0)$ , burada  $U_0$  veya  $U_{ref}$  büyük çaplı borunun girişinde küçük çaplı borudaki simetri akseni üzerindeki hızdır,  $R_0$  ise büyük çaplı borunun yarıçapıdır. Çıkışta tamamıyla gelişmiş akım koşullarının oluştuğu kabulünü yapabilmek için, çıkış düzlemi çevrintili akış bölgesinden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde radyal hız sifir kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyantlarının sifir olduğu varsayılmıştır. Anigenişleme borusu akseninde simetri kabul edilmiştir. Yani,  $(\partial\phi / \partial r) = v = 0$ ,  $\phi$  burada  $u$ ,  $k$ , veya  $\varepsilon$  olabilir.

Üst ve basamak cidarlarında hız bileşenleri  $u$ ,  $v$  ile türbülans büyüklükleri  $k$  ve  $\varepsilon$  sifira eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında  $k$  ve  $\varepsilon$ 'nin değerleri Launder ve Spalding'in (1974) cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Başlangıç değerleri, sayısal ıraksamaya neden olmamak için tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak seçilmiştir.

### 2.2.3. Hesaplama ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.6 Ghz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Kullanılan tüm sayısal ağlar, aksenal simetrik anigenişlemeli borunun cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Aksenal ve radyal hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Diğer tüm ilgili büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış çözüm elde etmek için kolon-kolon yöntemi iteratif olarak kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak, tüm hesaplama alanında kalıcı kütleinin mutlak değerinin toplamının 0.001'den küçük olması seçilmiş bu durumda iterasyon

durdurulmuştur. Her akış durumu için ağ testleri yapılarak ağ-bağımsız hesaplamalar elde edilmiştir.

Tablo 2.2 her akış durumunun hesaplama detaylarını göstermektedir. Bu tabloda N yakınsamış çözüme ulaşılan iterasyon sayısıdır, T ise saniye cinsinden cpu zamanı ve T/N ise iterasyon başına zamandır.

Tablo 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
Ahmed et al. (1992)	125000	40 x 30	4.578	357	0.01282
Ahmed ve Abidogun (1997)	115000	40 x 30	5.063	362	0.01398
Ahmed ve Nejad (1992)	118000	40 x 30	5.094	356	0.01431
Poole ve Escudier (2003)	120000	40 x 30	6.875	524	0.01312
Poole ve Escudier (2003)	30000	40 x 30	6.875	520	0.01322
Escudier ve Smith (1999)	152000	40 x 30	5.063	350	0.01446
Escudier ve Smith (1999)	26000	40 x 30	4.984	348	0.01432
Stieglmeier et al. (1989)	15600	40 x 30	5.359	393	0.01364
Tinney et al. (2006)	54000	40 x 30	7.609	481	0.01582
Cole ve Glauser (1998a)	41000	40 x 30	9.641	836	0.01153
Founti ve Klipfel (1998)	56000	40 x 30	5.219	413	0.01264
Pereira ve Pinho (2000)	135000	40 x 30	6.422	465	0.01381
Pereira ve Pinho (2000)	50300	40 x 30	6.922	490	0.01413
Pereira ve Pinho (2002)	134000	40 x 30	6.703	538	0.01246
Pereira ve Pinho (2002)	50400	40 x 30	8.172	630	0.01297
Castro ve Pinho (1995)	178000	40 x 30	5.469	376	0.01454

### 2.3. Bulgular ve Tartışma

Bu tezde, yukarıdaki tabloda sıralandığı gibi on altı değişik Reynolds sayısı için aksenal simetrik anigenişlemeli bir boruda türbülanslı akış için sayısal hesaplamalar yapılmış ve bildirilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

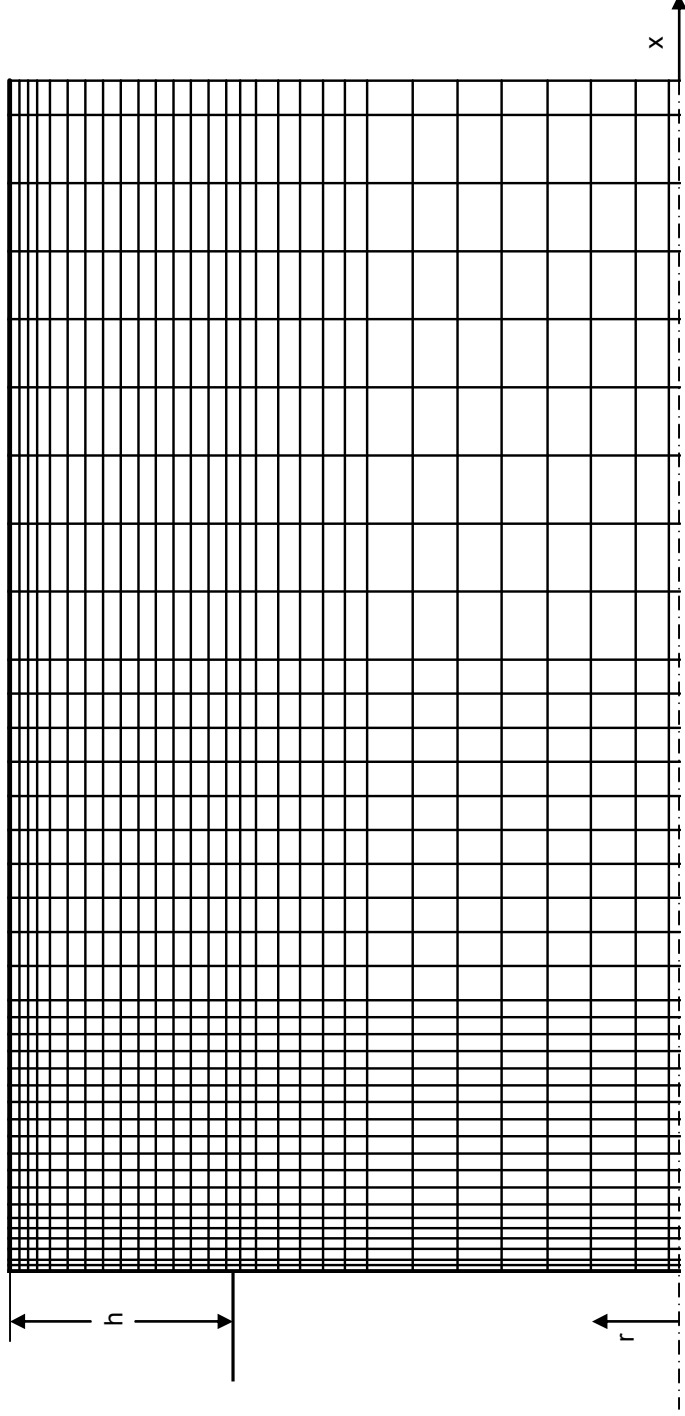
İlk olarak ele alınan Ahmed et al.'ın (1992) akış durumu için oluşturulan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Bu ağ,  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık oluşturulmuştur.

Eksenel simetrik anigenişlemeli boru  $D/d=1.5$  genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı 125000 olarak bildirilmiştir ( $Re=U_{ref} d / \nu$ , burada  $U_{ref}$  girişte simetri eksenindeki hızdır ve değeri 19.2 m/s dir). Çalışma akışkanı havadır.

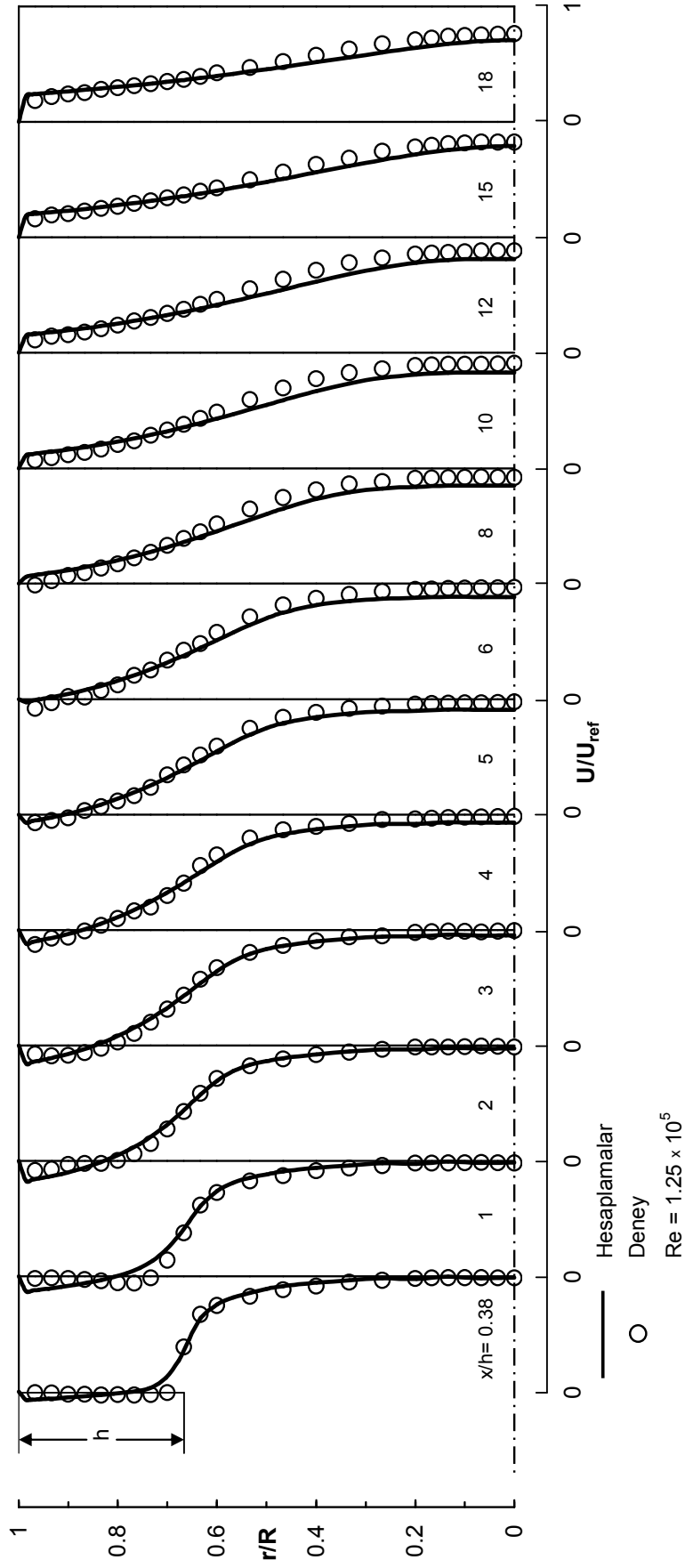
Anigenişlemeli boruda hesaplama alanı, giriş düzleminden aşağı akışta 35 basamak yüksekliğinde ( $h$ ) bir aksenal mesafeye kadar uzatılmıştır. Deneysel veriler  $x/h=0.38$ 'den  $x/h=18$ 'e kadar olan 12 aksenal kesitte bildirildiğinden, sayısal hesaplamalar yalnızca bu aralıktaki kesitlerdeki ölçümler ile karşılaştırılabilmiştir.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Ahmed et al.'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Hesaplanan aksenal hız değerleri girişteki referans hız ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 2.3'ten görüldüğü üzere, hesaplanan aksenal hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum vardır. Akış tutunma uzunluğu yaklaşık olarak  $x_t=6.62h$  hesaplanmıştır. Oysa, deneysel akış tutunma uzunluğu  $x_t=8h$  olarak bildirilmiştir.

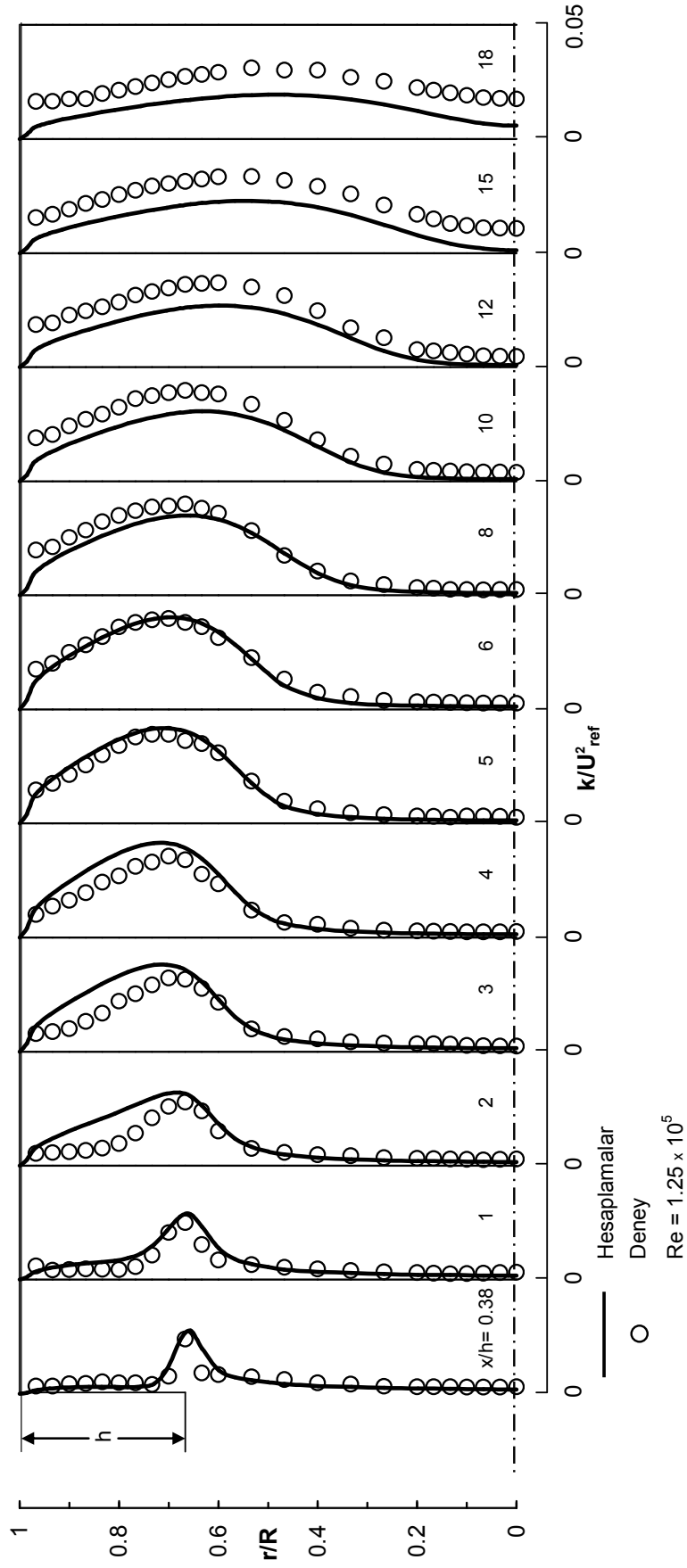
Şekil 2.4'ten görüldüğü gibi, türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri ile ölçülenler değerleri arasında elde edilen uyum da oldukça iyidir. Hesaplanan türbülans kinetik enerji değerleri girişteki referans hızın karesiyle boyutsuzlaştırılmıştır.



Şekil 2.2. Ahmed et al.'in (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



Şekil 2.3. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenal hız radyal profillerinin Ahmed et al.'in (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



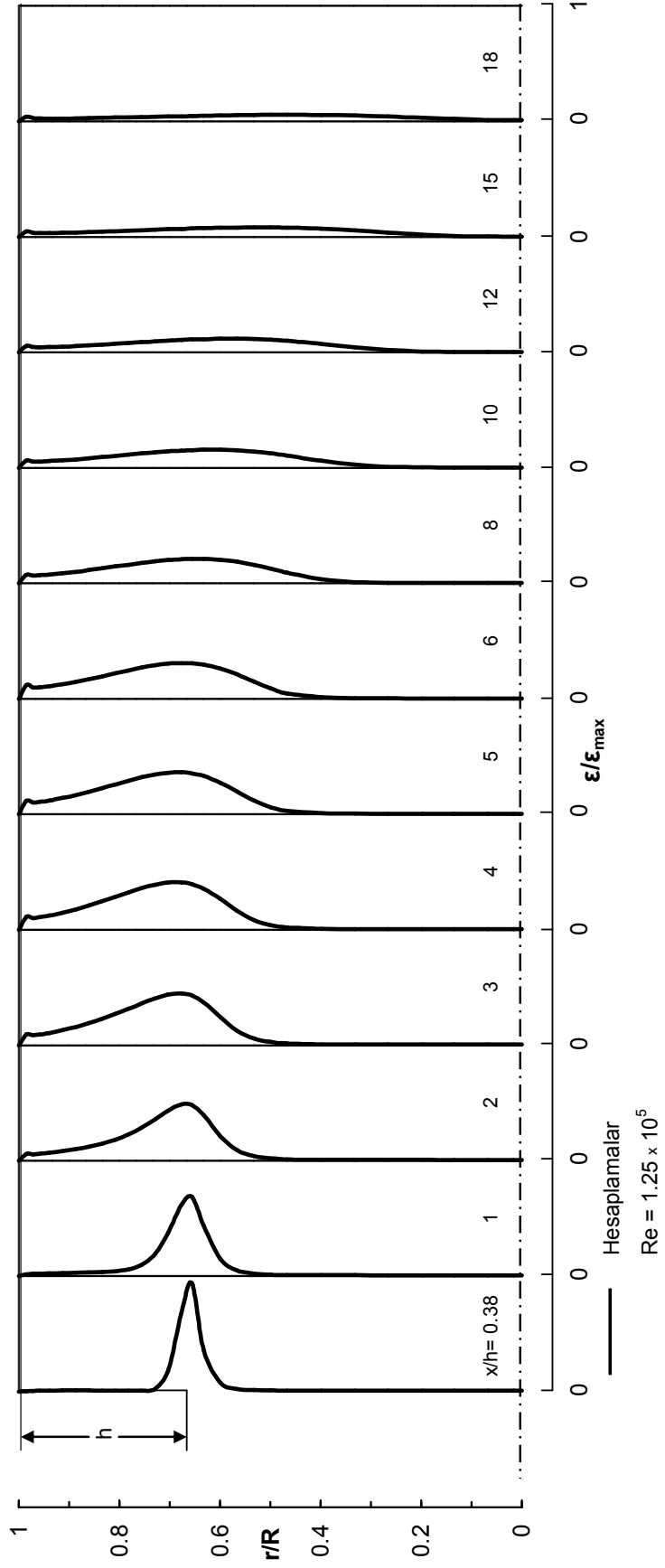
Şekil 2.4. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Ahmed et al.'in (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

Şekil 2.5 ve 2.6, sırasıyla Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini göstermektedir. Bu şekiller, anigenişlemeli boru boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleri ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksenal hız ve türbülans kinetik enerjinin Ahmed et al.'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum vardır. Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksenal hız ve türbülans kinetik enerjinin azalışı daha çabuk olmuştur.

Şekil 2.9'da Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Cidardan ölçülen dikey mesafe  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekildeki dairelerde  $u=0$  olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif hızlar, üstündeki bölgede ise pozitif hızlar bulunur. Hesaplanan akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak  $x_f=6.62h$ 'de olduğu şekilden açıkça görülmektedir.

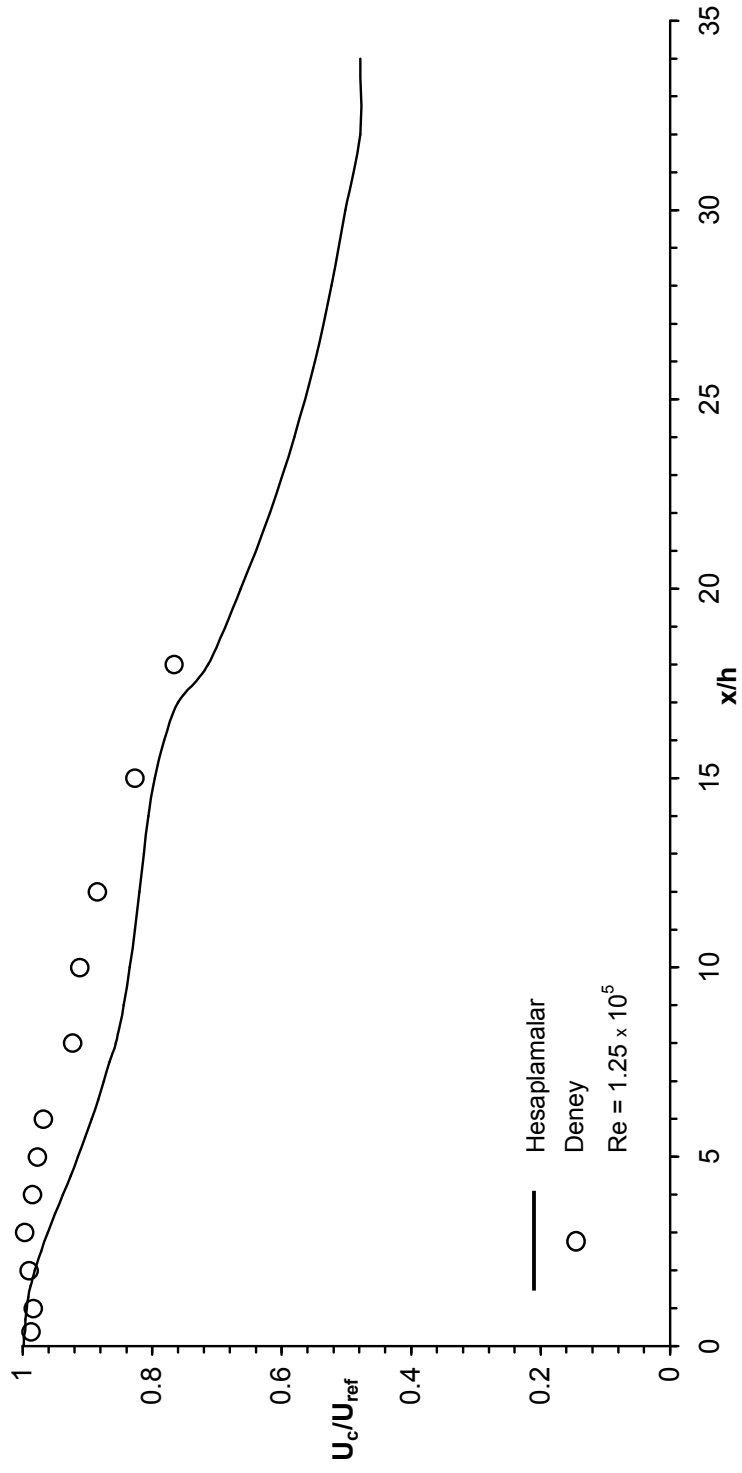
Ahmed et al.'ın (1992) aksenal simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/h=7$  kesitine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır. Bu, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan kaynaklanmaktadır. Cidar kayma gerilmesinin değerleri negatif yönde hızla artarak bir maksimum değere ulaşır ve hızla pozitif değerlere doğru yükselir. Takriben  $x/h=30$ 'da, kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır.



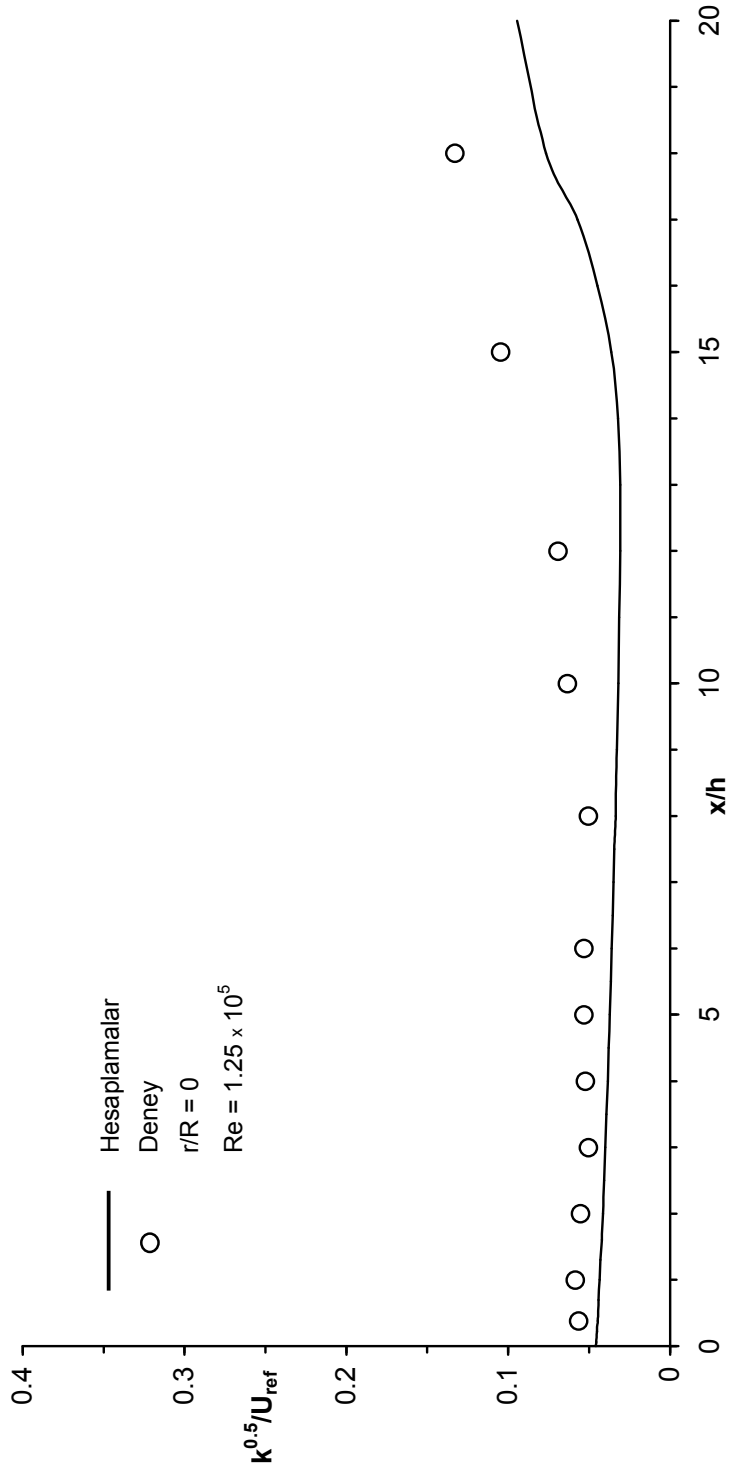
Şekil 2.5. Ahmed et al.'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



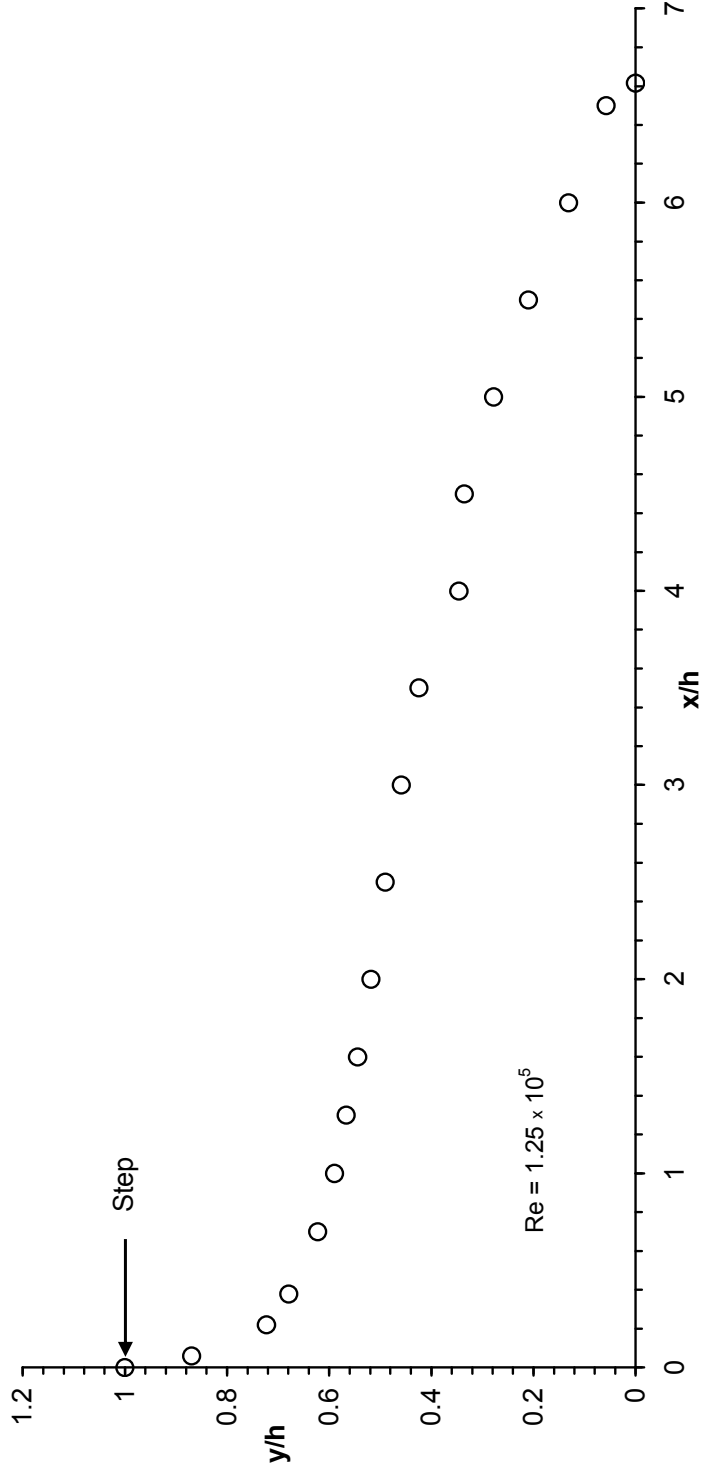




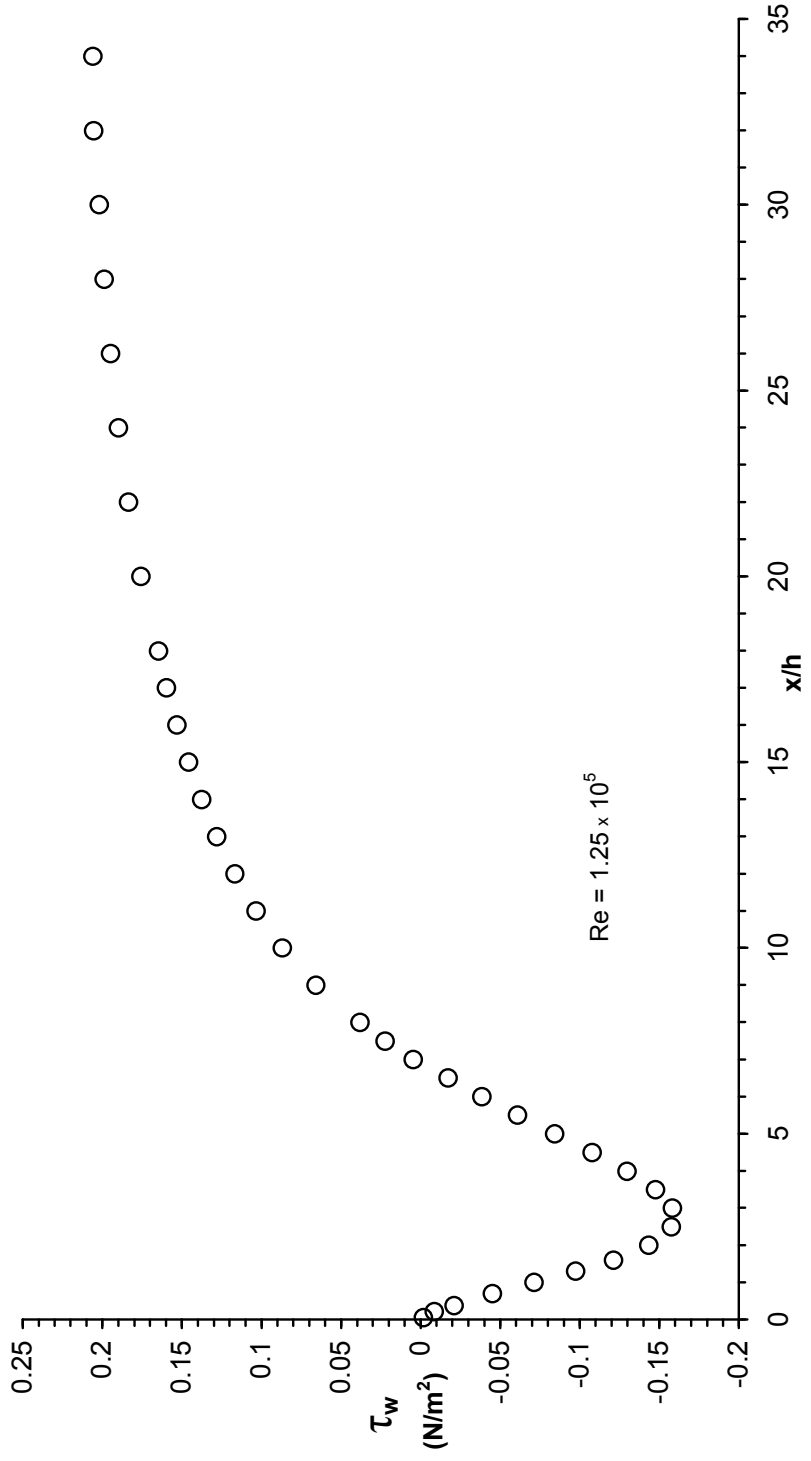
Şekil 2.7. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan eksenel hızın Ahmed et al.'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.8. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca boyunca simetri eksenine üzerinde hesaplanan türbülans kinetik enerjinin Ahmed et al.'in (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 2.9. Ahmed et al.'in (1992) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.10. Ahmed et al.'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cıdar kayma gerilmesinin değişimi.

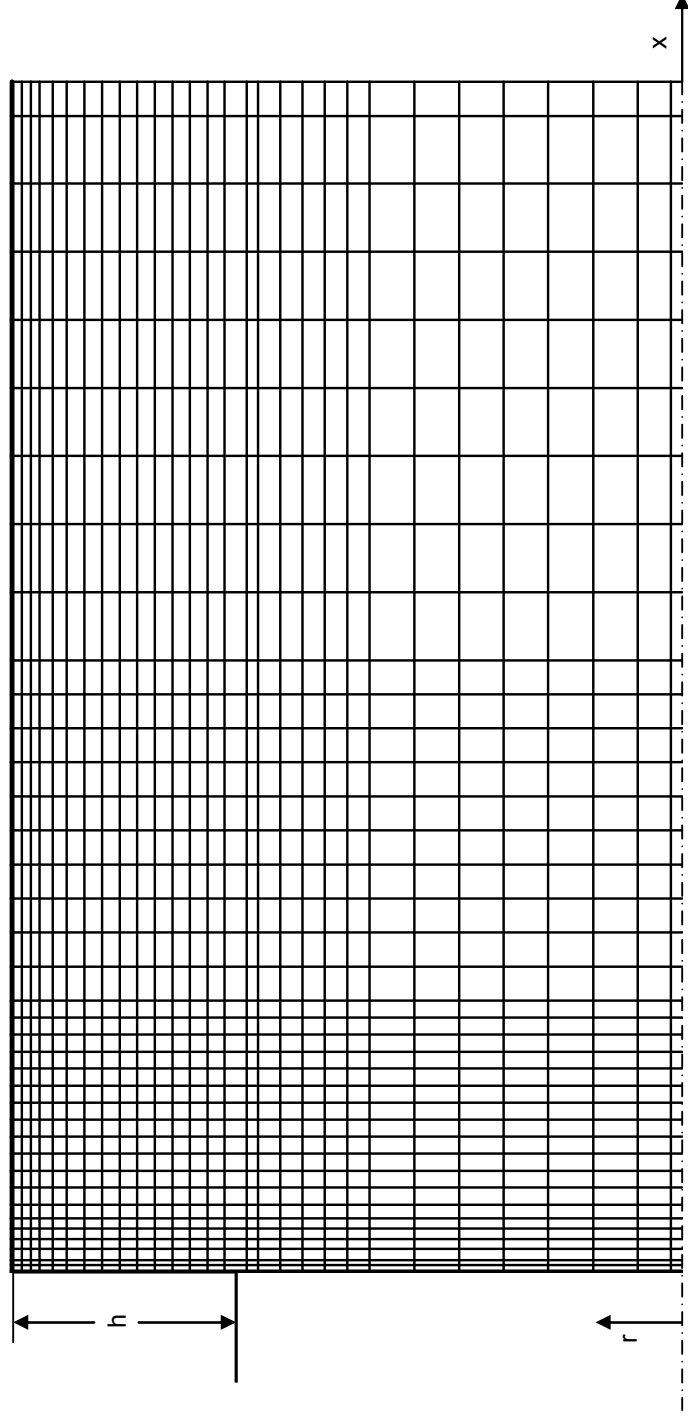
Ahmed ve Abidogun (1997) tarafından yapılan bir eksenel simetrik anigenişlemeli boru akışı deneyinin sonuçları, buradaki sayısal hesaplamalar için ikinci bir karşılaştırma verisi olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı yine  $D/d=1.5$ 'tir. Referans hız  $U_{ref}=U_c=16$  m/s olduğundan girişte akışın Reynolds sayısı yaklaşık olarak 115000 dir ( $Re=U_c d / \nu$ , burada  $U_c$  girişte simetri eksenindeki hızdır). Çalışma akışkanı yine havadır. Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda, giriş düzleminden aşağı akışta 35 basamak yüksekliğinde (h) bir eksenel mesafeye kadar genişletilmiştir. Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji değerleri  $x/h=0.38$ 'den  $x/h=18$ 'e kadar olan 12 eksenel kesitteki deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.11'de gösterilen ağ, Ahmed ve Abidogun'un (1997) akış durumu için oluşturulmuş ve x ve y yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelmiştir.

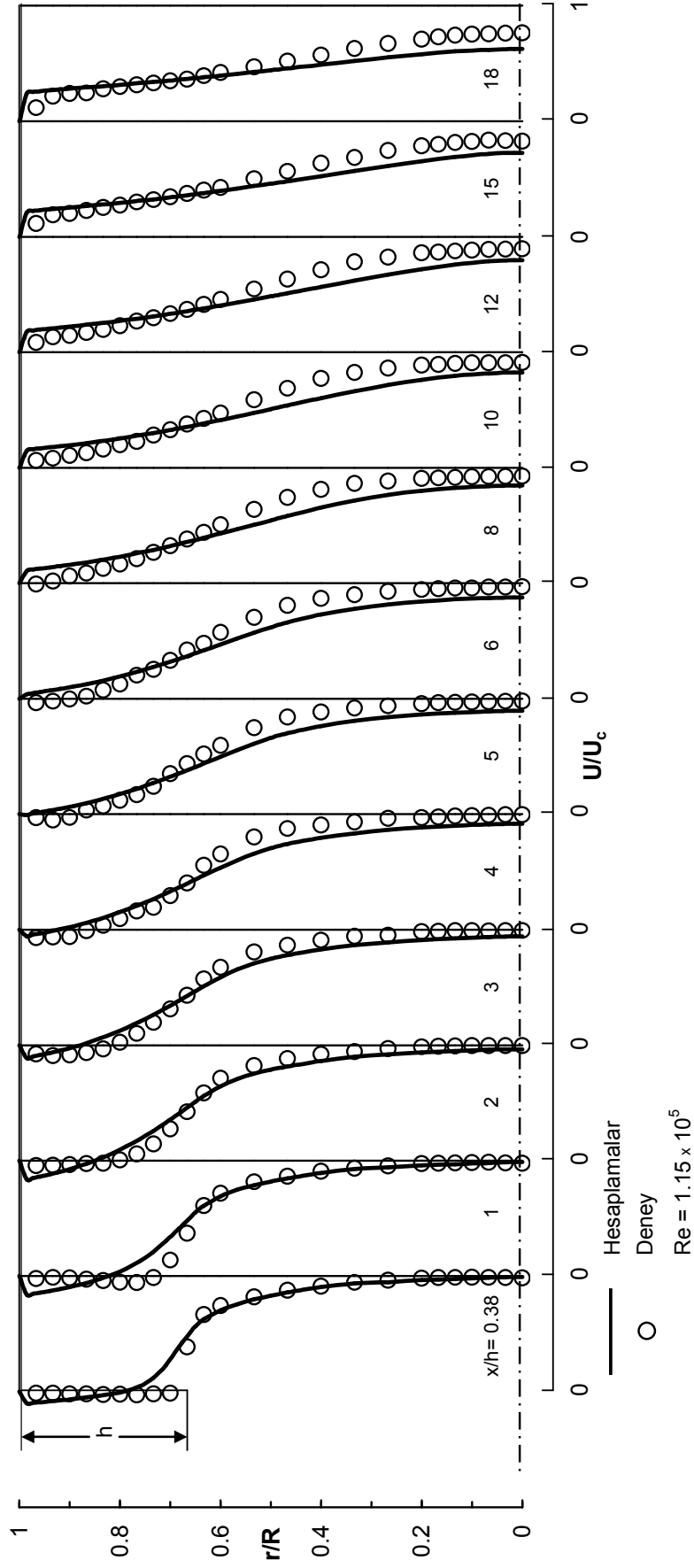
Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji değerleri sırasıyla  $U_c$  ve  $U_c^2$  ile boyutsuzlaştırılıp Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Şekil 2.12'den, hesaplanan eksenel hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasındaki uyum görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.12 dikkatlice incelendiğinde, akış tutunma uzunluğunun takriben  $x_r=5.15h$  civarında hesaplandığı görülmektedir. Buna rağmen, deneysel akış tutunma uzunluğu değeri  $x_r=8h$  olarak bildirilmiştir.

Şekil 2.13'te gösterilen hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri ile ölçülenler arasında elde edilen uyum da oldukça iyidir. Akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe türbülans kinetik enerjinin radyal dağılımı görülmektedir. Çevrintili akış bölgesinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri önce ölçülenlerin üstünde kalıyorken daha sonra  $x=6h$  mesafesinden sonra ölçülenlerin altında kalmaktadır.

Şekil 2.14 ve 2.15'ten, sırasıyla Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi görülmektedir.

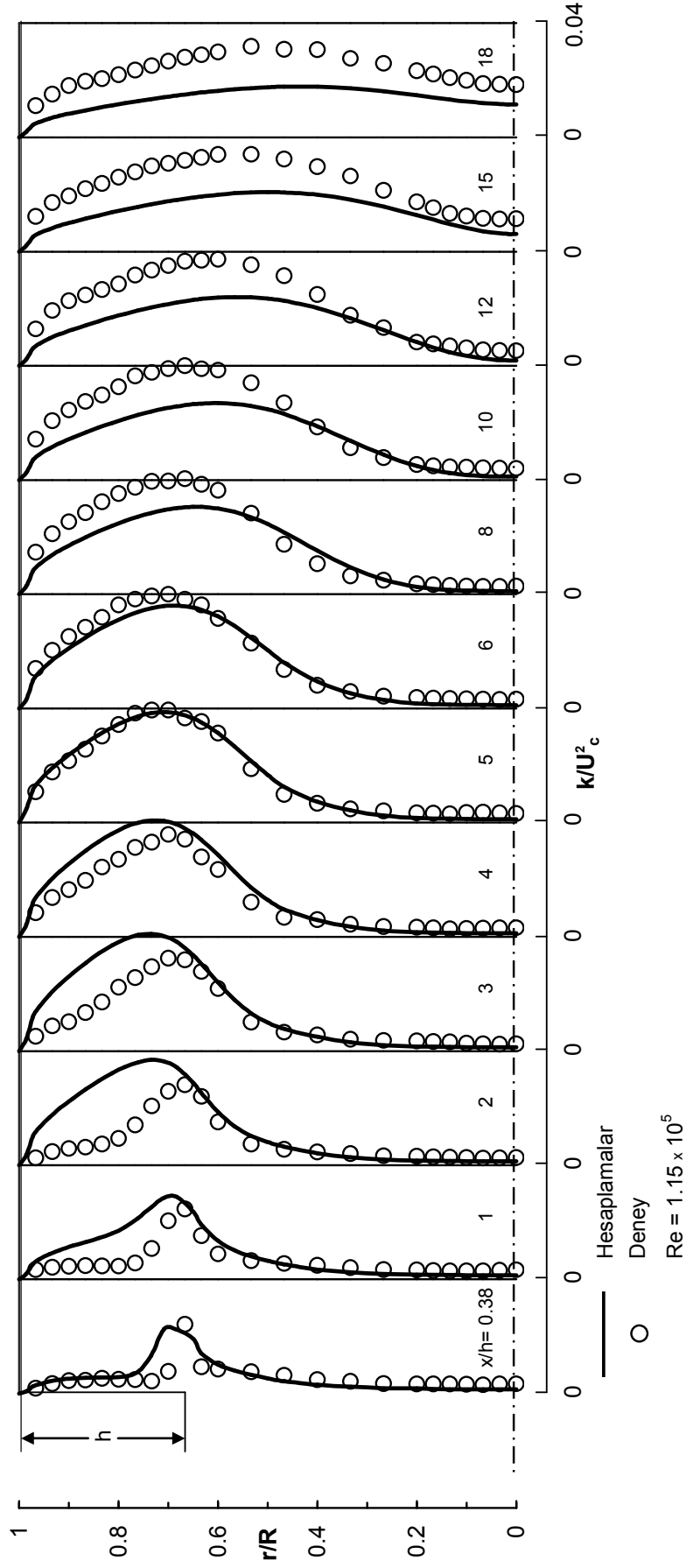


Şekil 2.11. Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

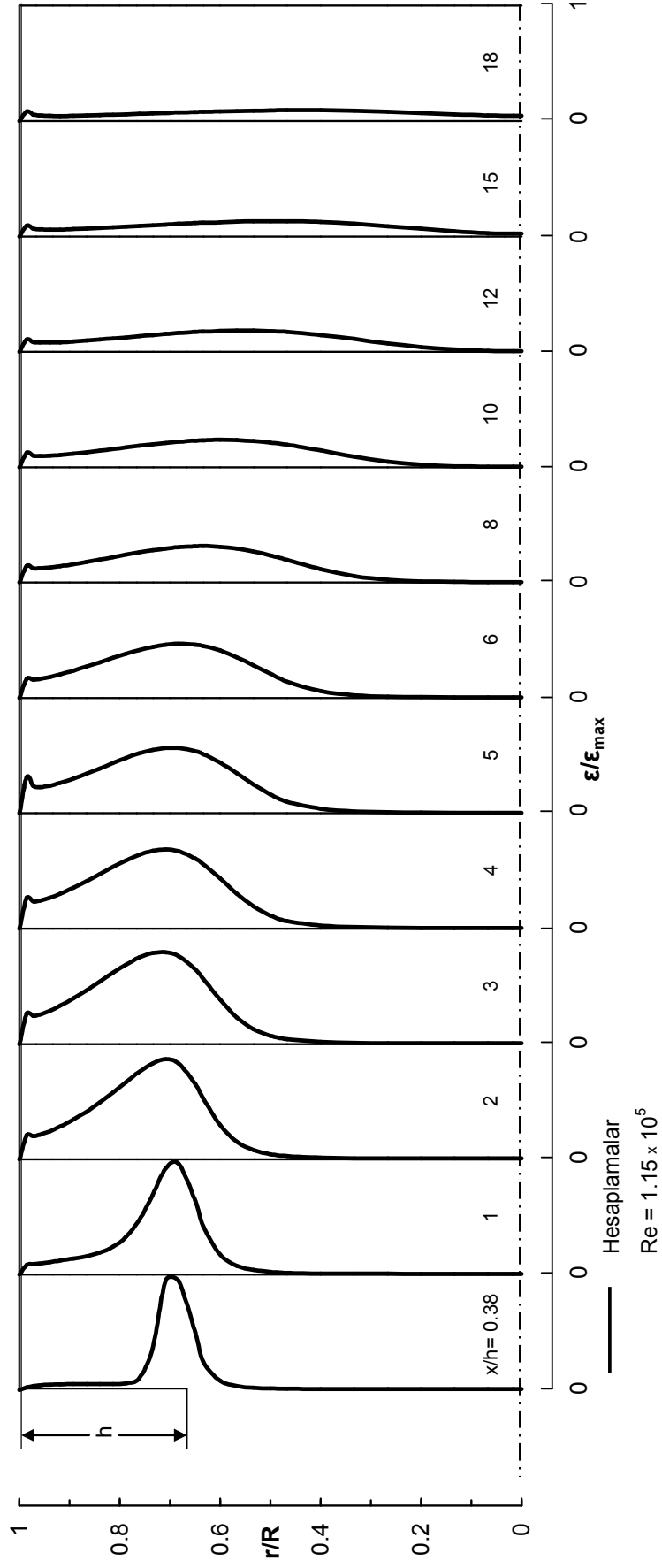


Şekil 2.12. Eksenel simetrik anisotropik akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

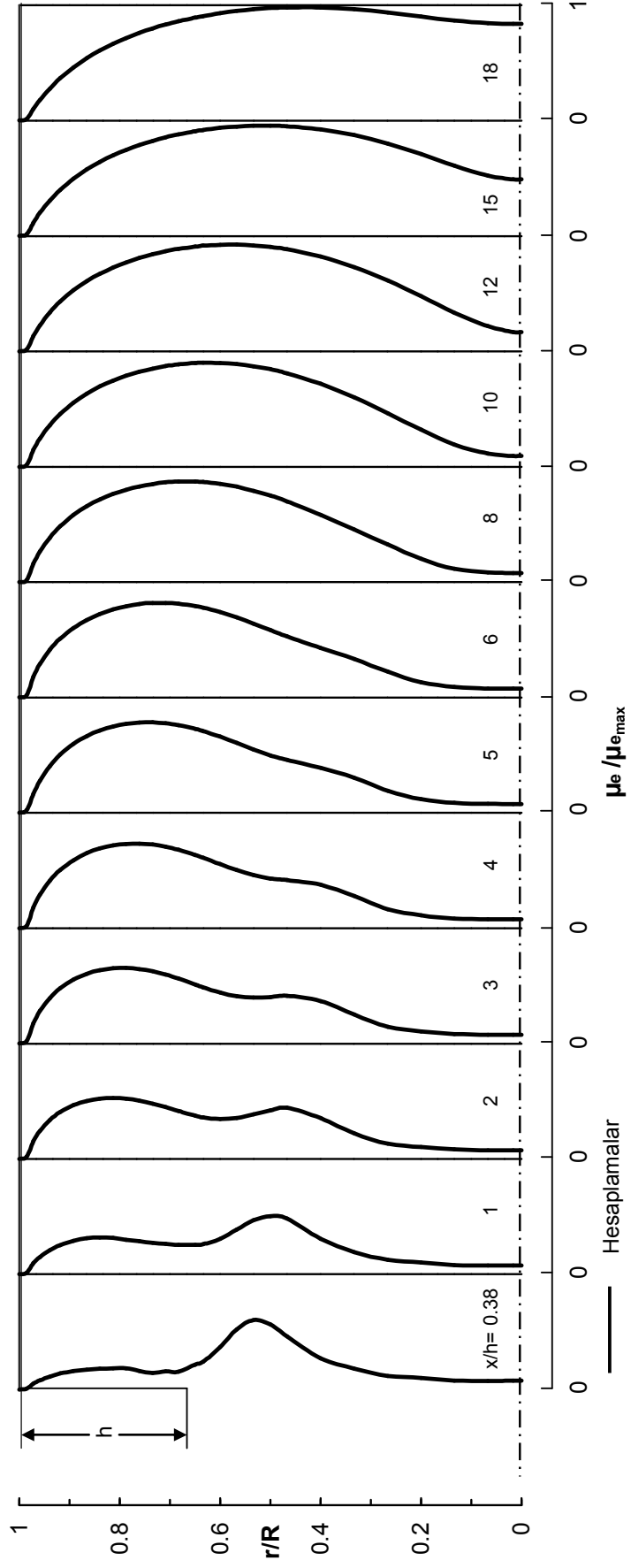




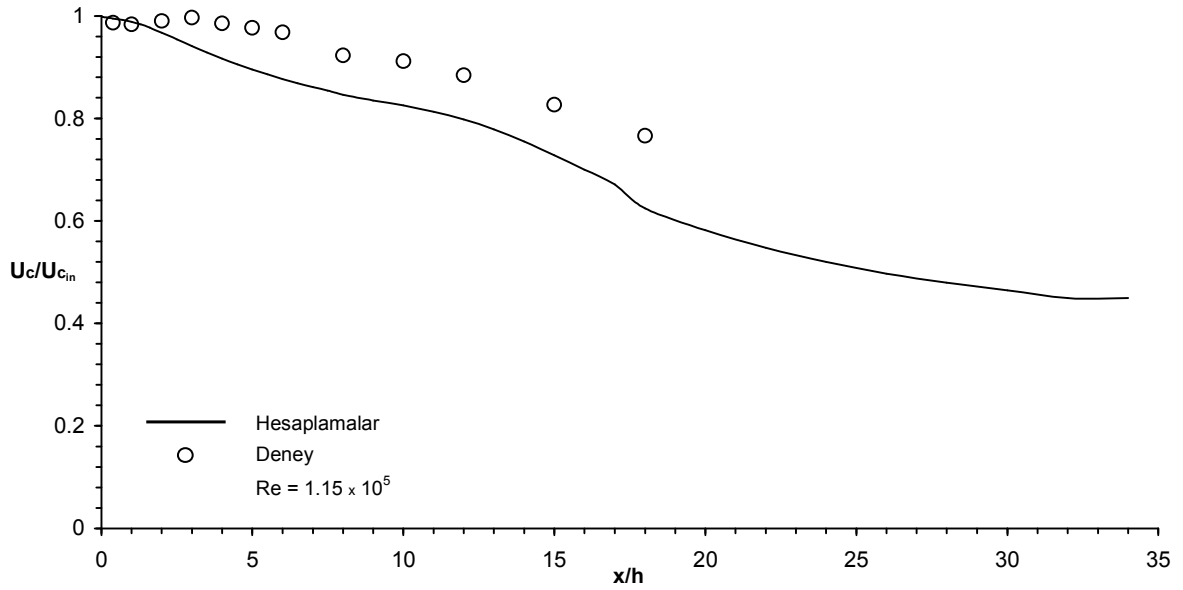
Şekil 2.13. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.14. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

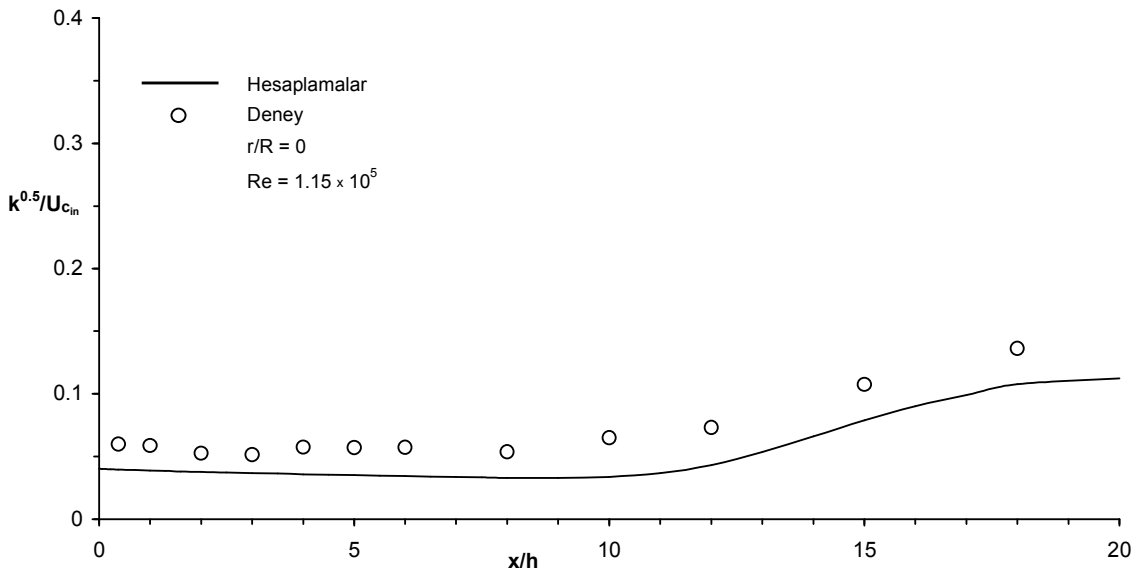


Şekil 2.15. Ahmed ve Abidogun'un (1997) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

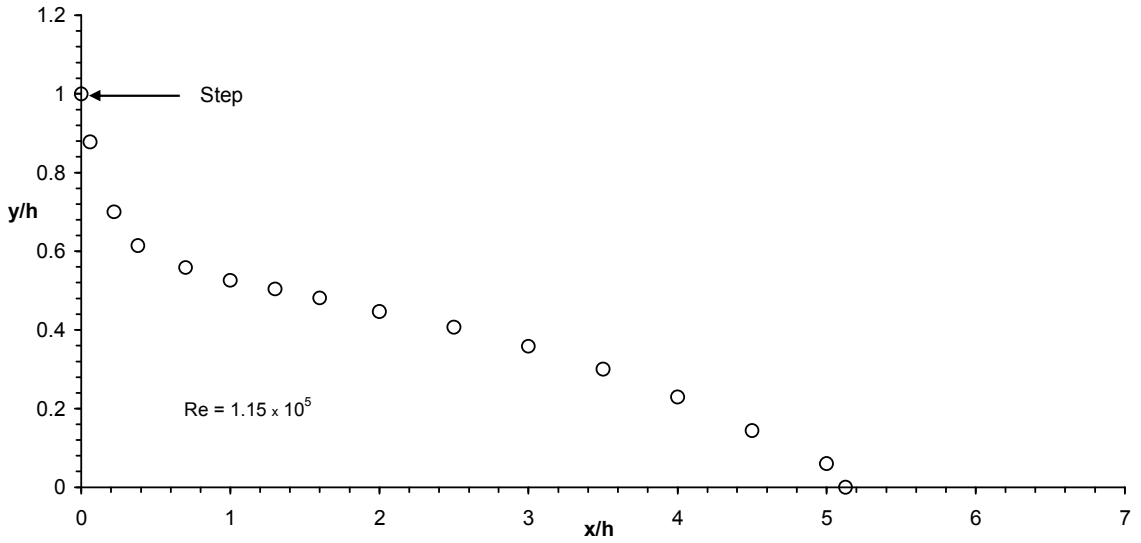


Şekil 2.16. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz aksel hızın Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

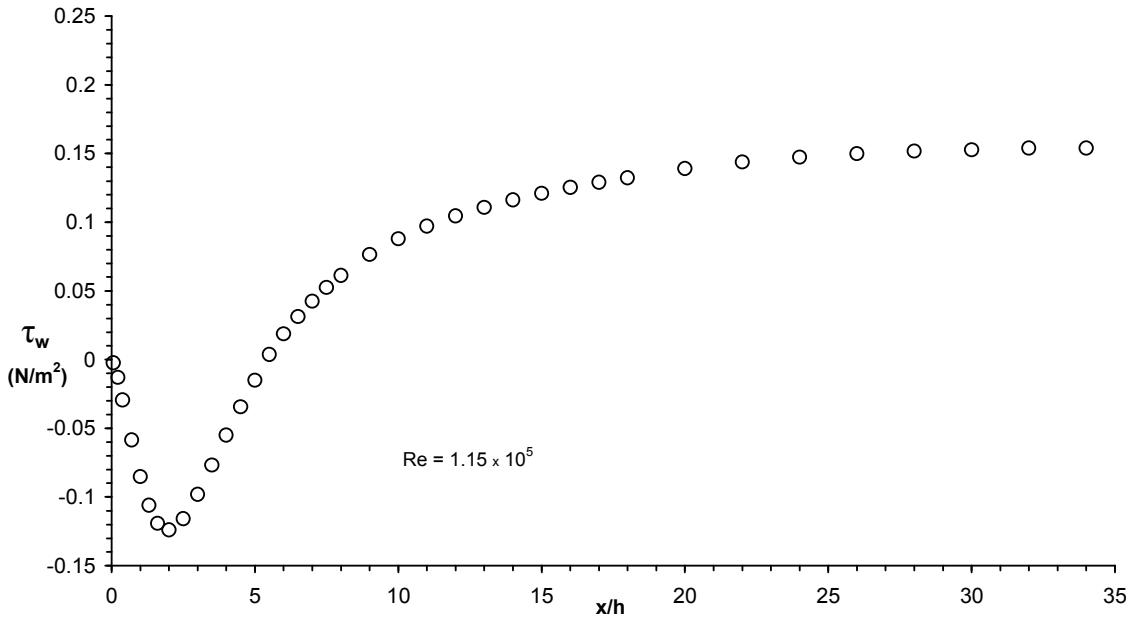
Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksel hız ve türbülans kinetik enerjinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum vardır.



Şekil 2.17. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin Ahmed ve Abidogun'un (1997) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 2.18. Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



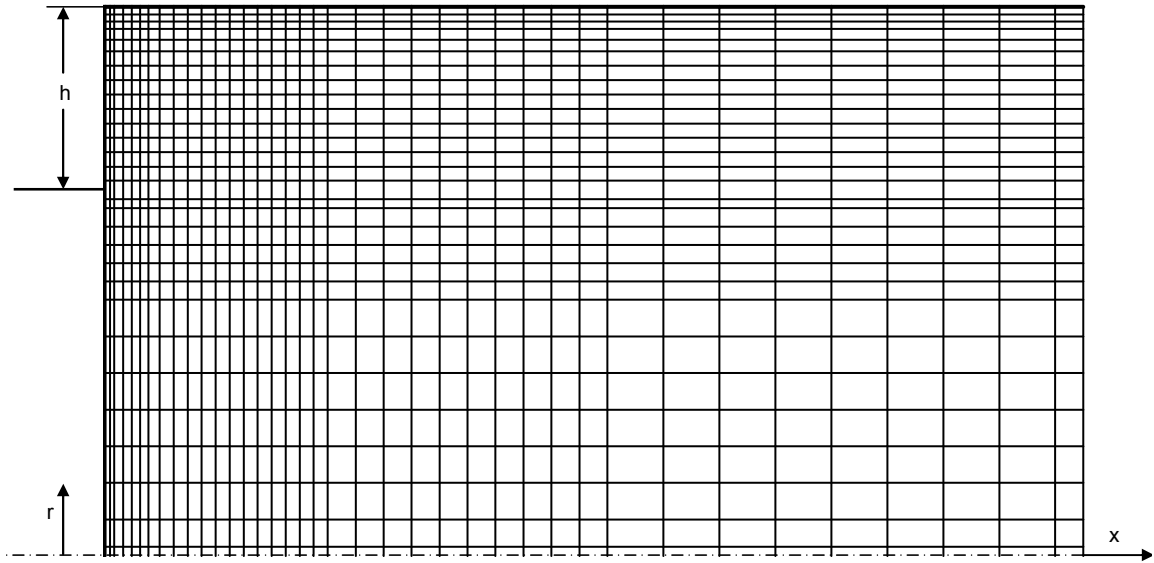
Şekil 2.19. Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

Şekil 2.18'de Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Ahmed ve Abidogun'un (1997) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 19'da verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/h=5$  mesafesine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır. Takriben  $x/h=30$ 'da, kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır.

Üçüncü sayısal analizde, Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksel simetrik anigenişlemeli boru geometrisine sahip bir yanma odasında yanmasız türbülanslı akış için yaptığı deneysel ölçümlerden yararlanılacaktır.

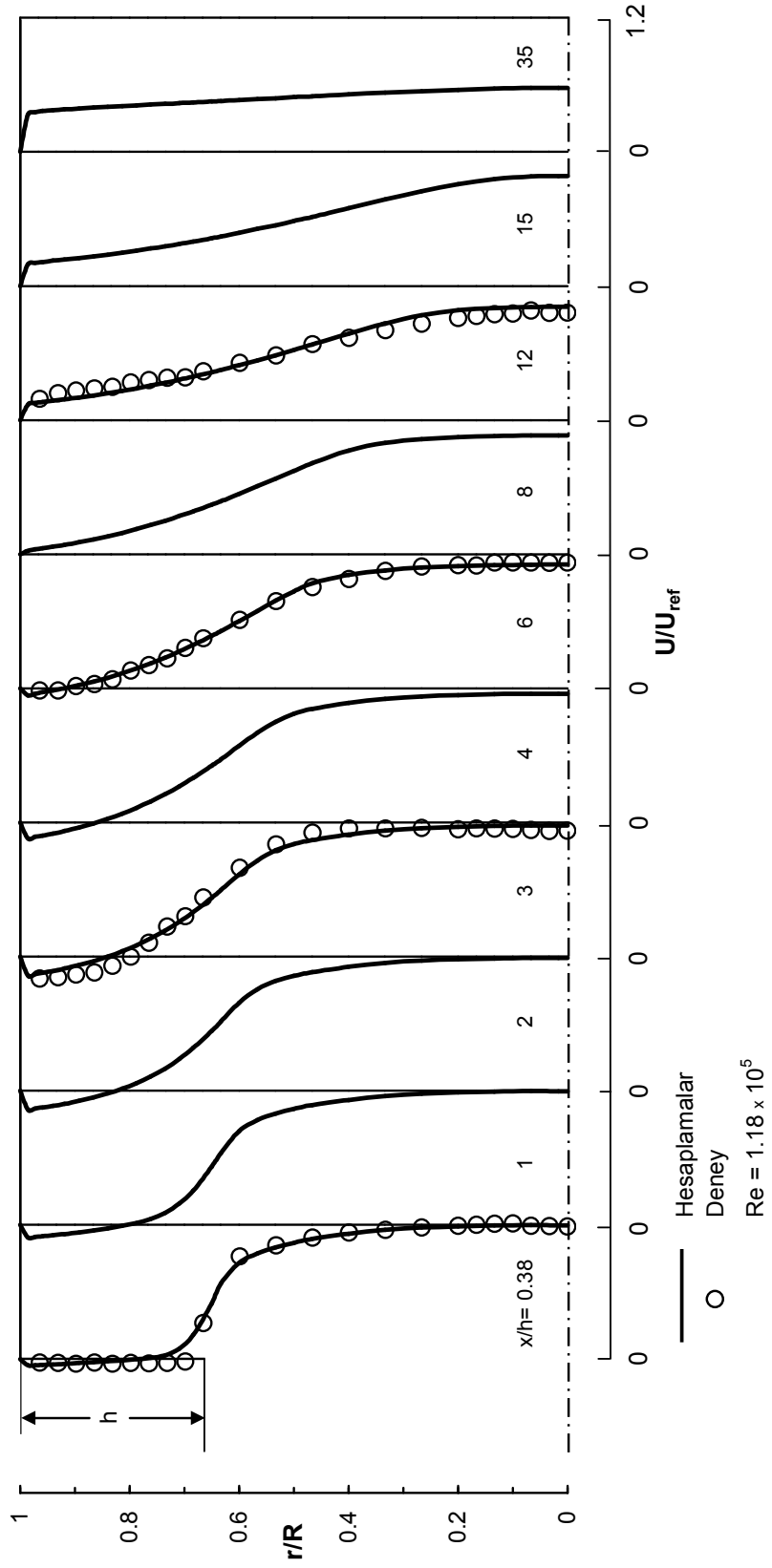
Eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d= 1.5$ 'tur. Referans hız  $U_{ref}=18.25$  m/s verildiğinden akışın Reynolds sayısı yaklaşık olarak 118000 bulunur ( $Re=U_{ref} d / \nu$ ). Çalışma akışkanı havadır. Hesaplama alanı, profillerin anigenişlemeli boru boyunca gelişimini göstermek amacıyla, giriş düzleminde aşağı akışta 35 basamak yüksekliğinde (h) bir aksel mesafeye kadar uzatılmıştır ve  $x/h=0.38$ 'den  $x/h=35$ 'e kadar olan 10 aksel kesit ele alınmıştır.

Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksel simetrik anigenişlemeli borusu için Şekil 2.20'deki 40 x 30'luk ağ oluşturulmuştur.

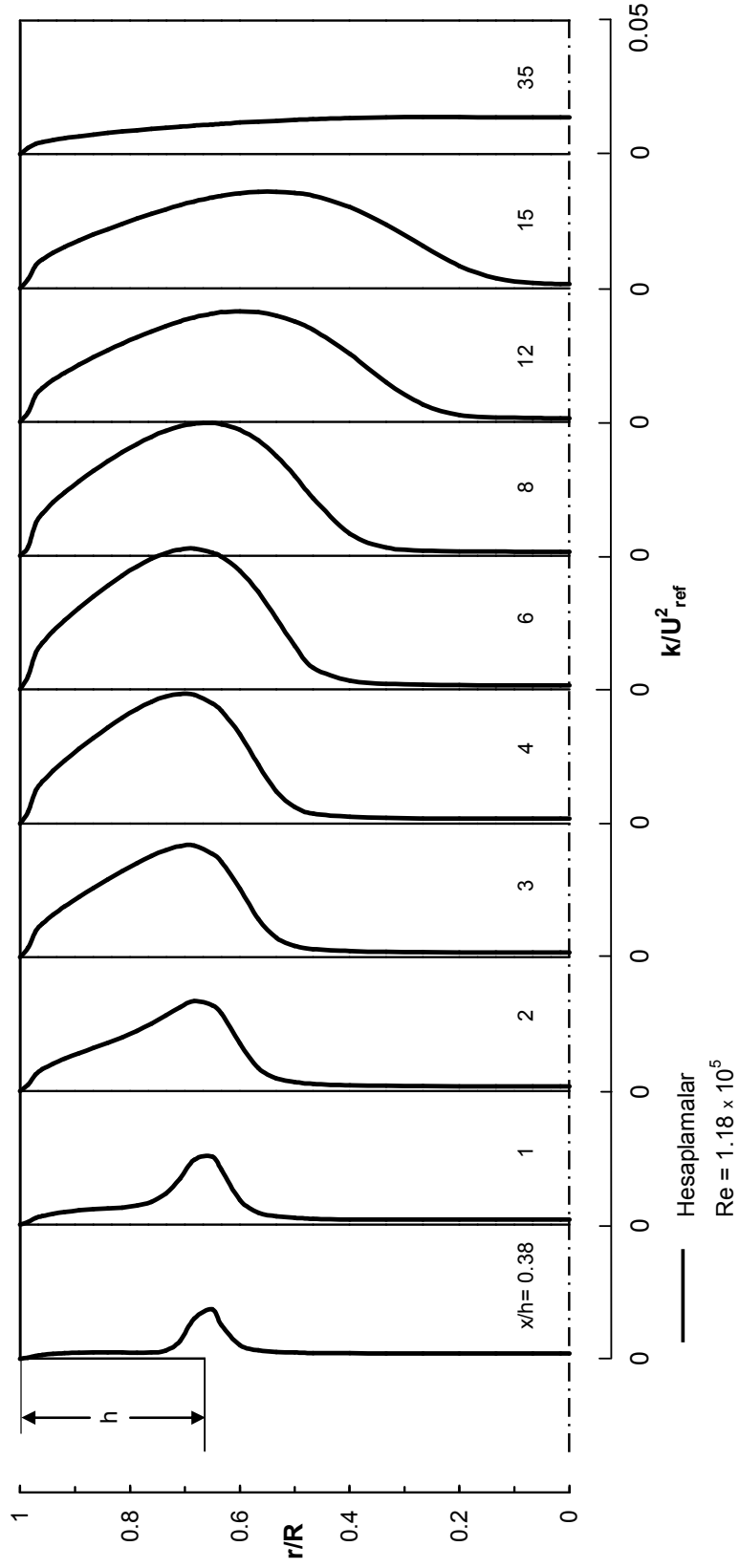


Şekil 2.20. Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Şekil 2.21'den, hesaplanan aksel hız profilleri ile karşılıkları olan deneysel değerler arasında iyi uyum olduğu görülmektedir. Akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe türbülans kinetik enerjinin nasıl geliştiği Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



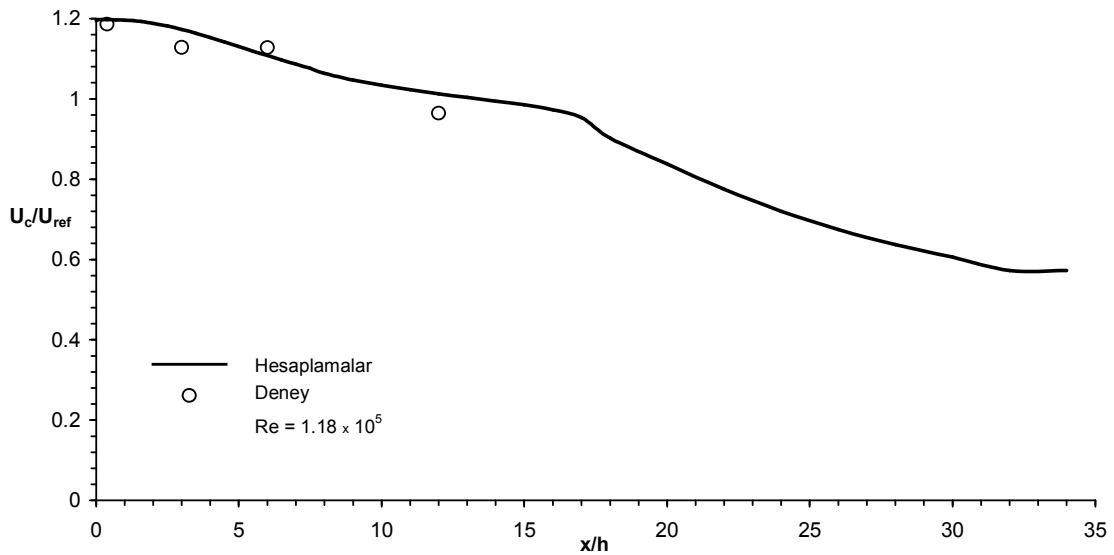
Şekil 2.21. Eksenel simetrik anisotropik akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Ahmed ve Nejad'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.22. Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksene simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



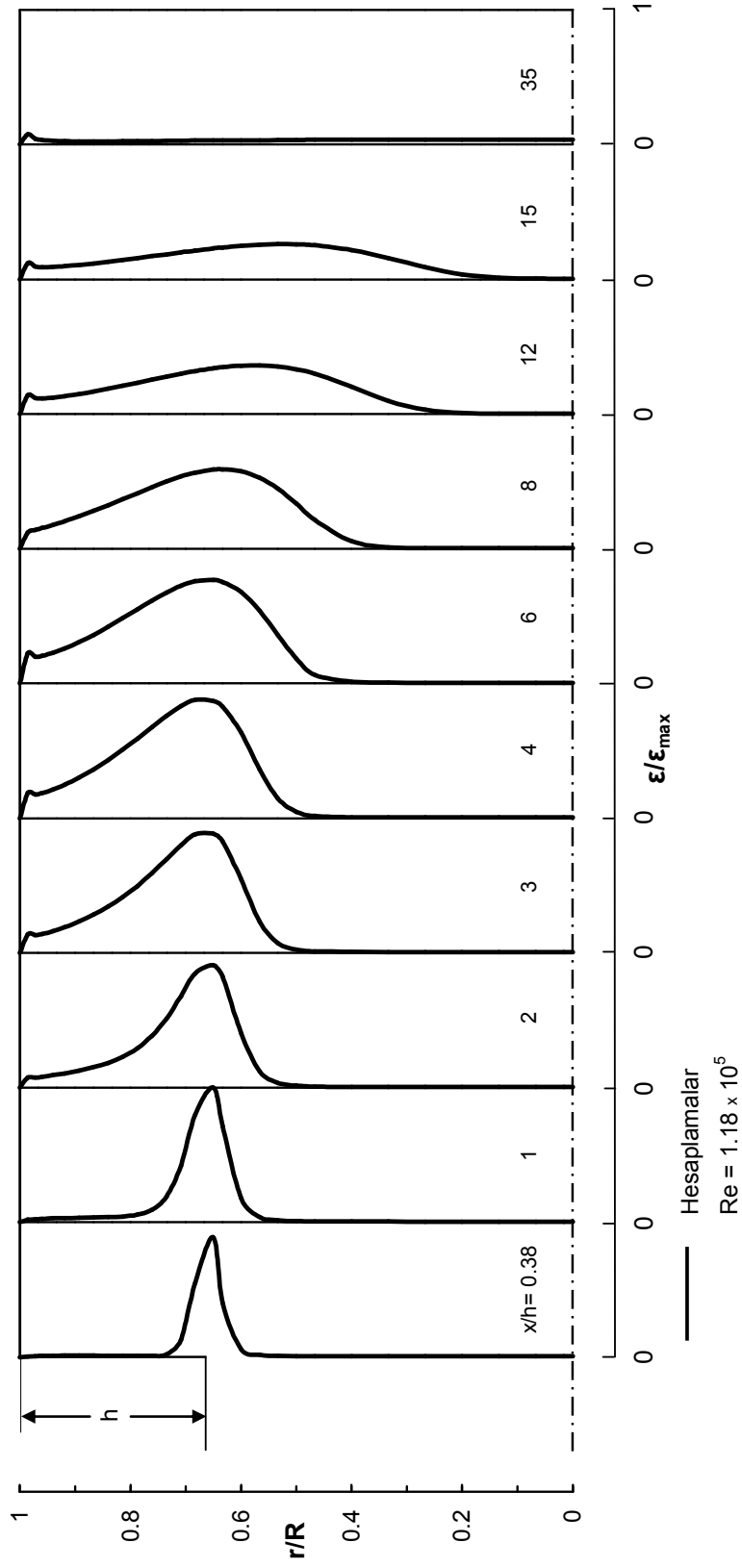
Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki eksenel hızın Ahmed ve Nejad'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız değerleri  $U_{ref}$  ile boyutsuzlaştırılmıştır. Hesaplanan değerler ile deneysel ölçümler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Hesaplanan eksenel hızın yaklaşık olarak  $x/h=32$ 'den itibaren sabit kaldığı, dolayısıyla akışın tamamıyla gelişmiş akış özelliği gösterdiğine dikkat edilmelidir.



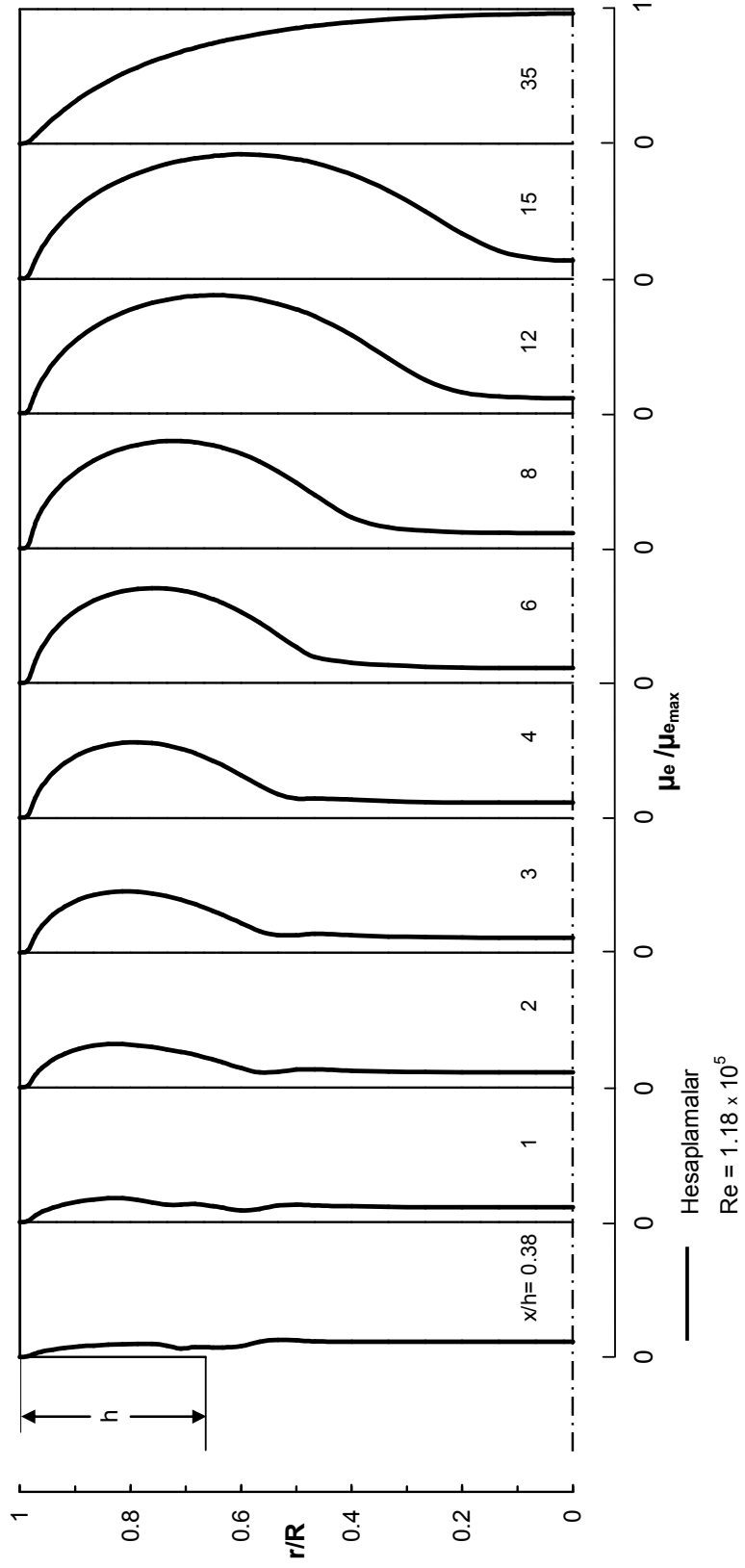
Şekil 2.23. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Ahmed ve Nejad'ın (1992) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

Şekil 2.24 ve 2.25, sırasıyla Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini göstermektedir. Bu şekillerden, anigenişlemeli boru boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimleri görülmektedir.

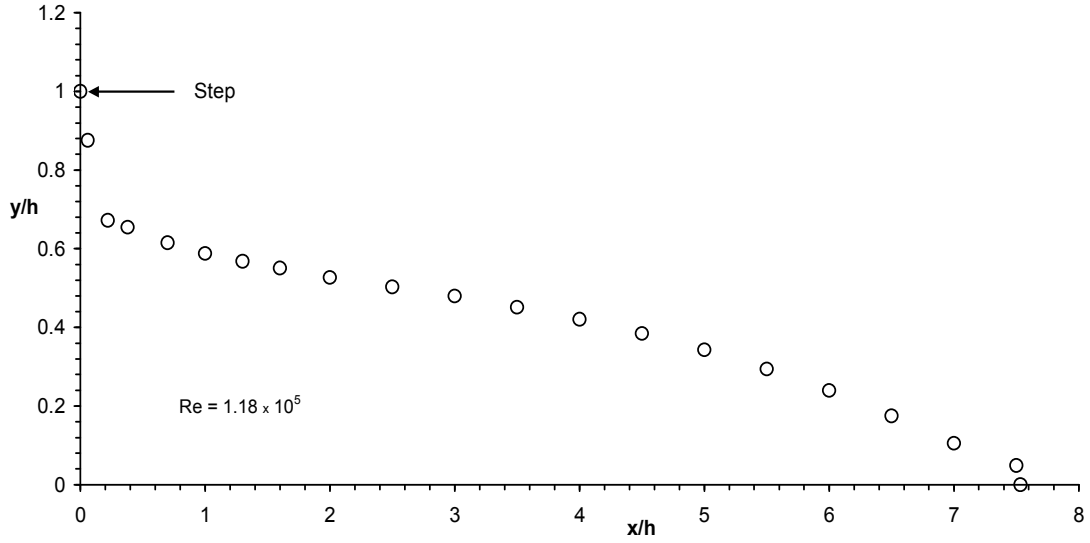
Şekil 2.26'da Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Hesaplan akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak  $x_r=7.5h$  olduğu şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 2.24. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

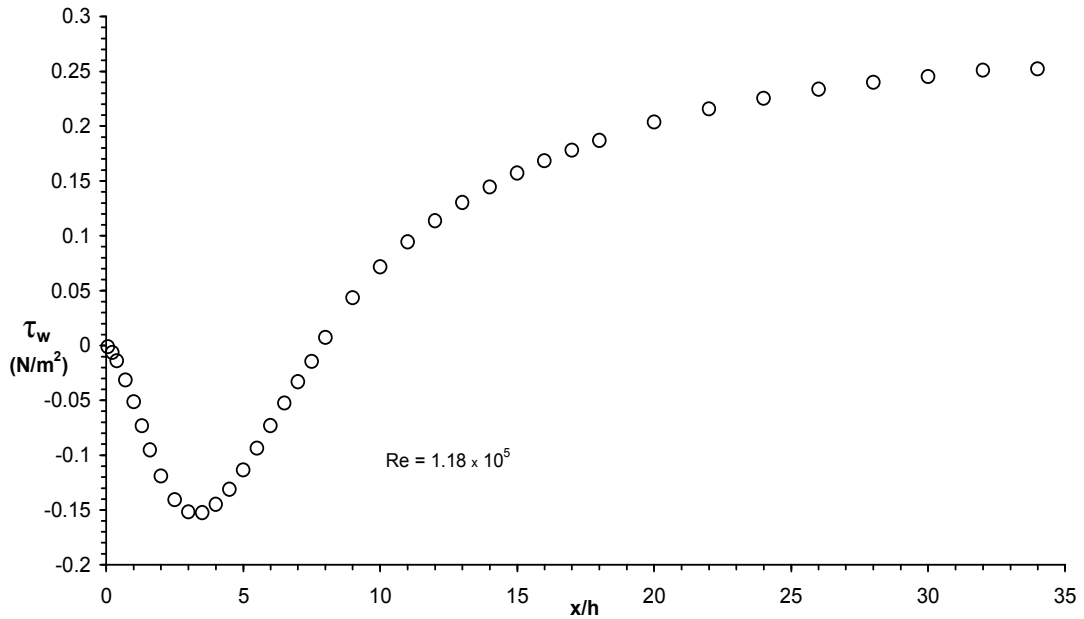


Şekil 2.25. Ahmed ve Nejad'ın (1992) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



Şekil 2.26. Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksenal simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.27'de verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/h=8$  kesitine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır. Takriben  $x/h=32$ 'de, kayma gerilmesi tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır.



Şekil 2.27. Ahmed ve Nejad'ın (1992) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

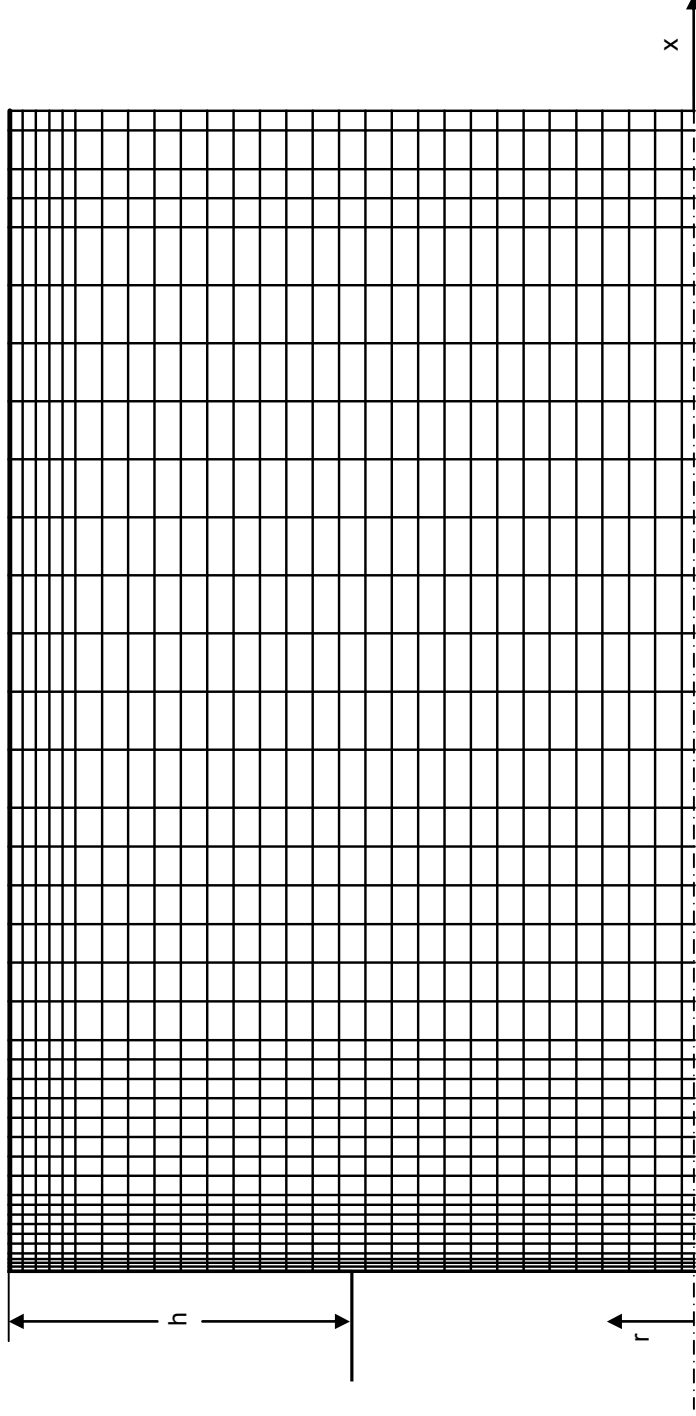
Poole ve Escudier (2003), Newtoniyen ve Newtoniyen olmayan akışkanlar için değişik Reynolds sayılarında aksenal simetrik anigenişlemeli bir borudaki türbülanslı çevrintili akışı deneysel olarak incelemiş ve aksenal hız, türbülans çalkantıları ve anigenişlemeli boru boyunca cidar statik-basınç katsayısını ölçmüşlerdir. Poole ve Escudier'in (2003) iki değişik Reynolds sayısı için yaptığı ( $Re=120000-30000$ ) Newtoniyen bir akışkan olan su ile ilgili ölçümleri buradaki analizde kullanılacaktır. Poole ve Escudier (2003), her iki Reynolds sayısındaki akış için de aynı genişleme oranına sahip anigenişlemeli boru şeklindeki test düzeneğini kullanmışlar ve düzgün aksenal hız girişini sağlamak için anigenişlemeli boru girişine yakınsak lüle koymuşlardır.

Sayısal hesaplama için ilk olarak ele alınacak akışın girişte Reynolds sayısı 120000 ve aksenal simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d=2$ 'dir. Reynolds sayısının, debiden hesaplanan ortalama hız (bulk mean velocity), basamak yüksekliği ( $h$ ) ve kinematik viskozite ( $\nu$ ) ile hesaplandığı bildirilmiştir ( $Re=U_b h / \nu$ ,  $U_b=9.27$  m/s).

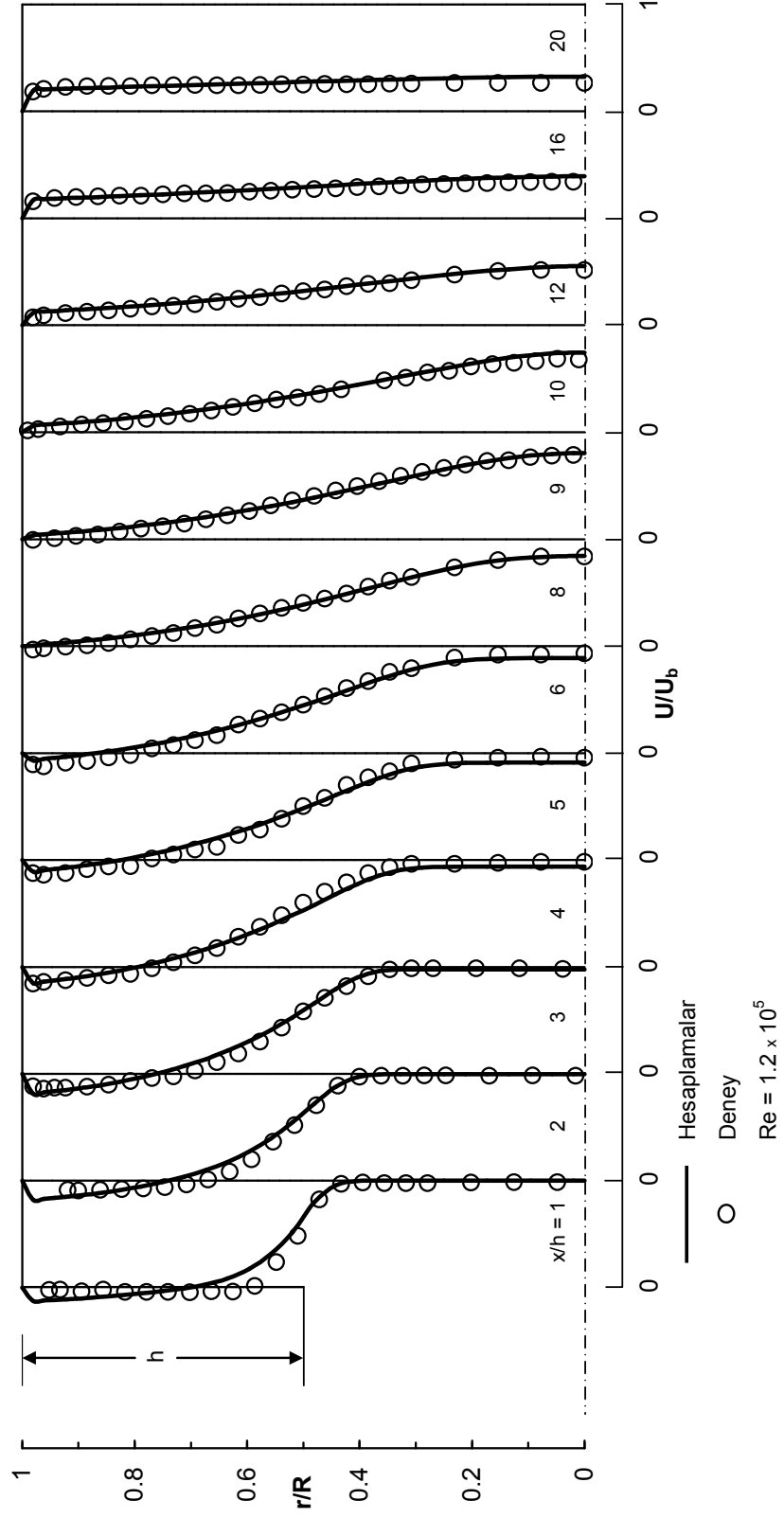
Çıkışta tamamıyla gelişmiş akış koşullarını elde edebilmek için, hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminden aşağı akışta 60 basamak yüksekliğinde ( $h$ ) bir aksenal mesafeye kadar uzatılmıştır.

Şekil 2.28'de gösterilen sayısal ağ, Poole ve Escudier'in (2003) her iki Reynolds sayısındaki akış durumu için oluşturulmuş ve  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiştir. Hesaplanan aksenal hız değerleri,  $x/h=1$ 'den  $x/h=20$ 'ye kadar olan 12 aksenal kesitteki deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Akış alanında aynı noktada ölçülmüş üç yöndeki türbülans çalkantılarından ( $u', v', w'$ ) elde edilen türbülans kinetik enerji değerleri, sayısal olarak bulunan türbülans kinetik enerji değerleri ile mukayese edilmiştir.

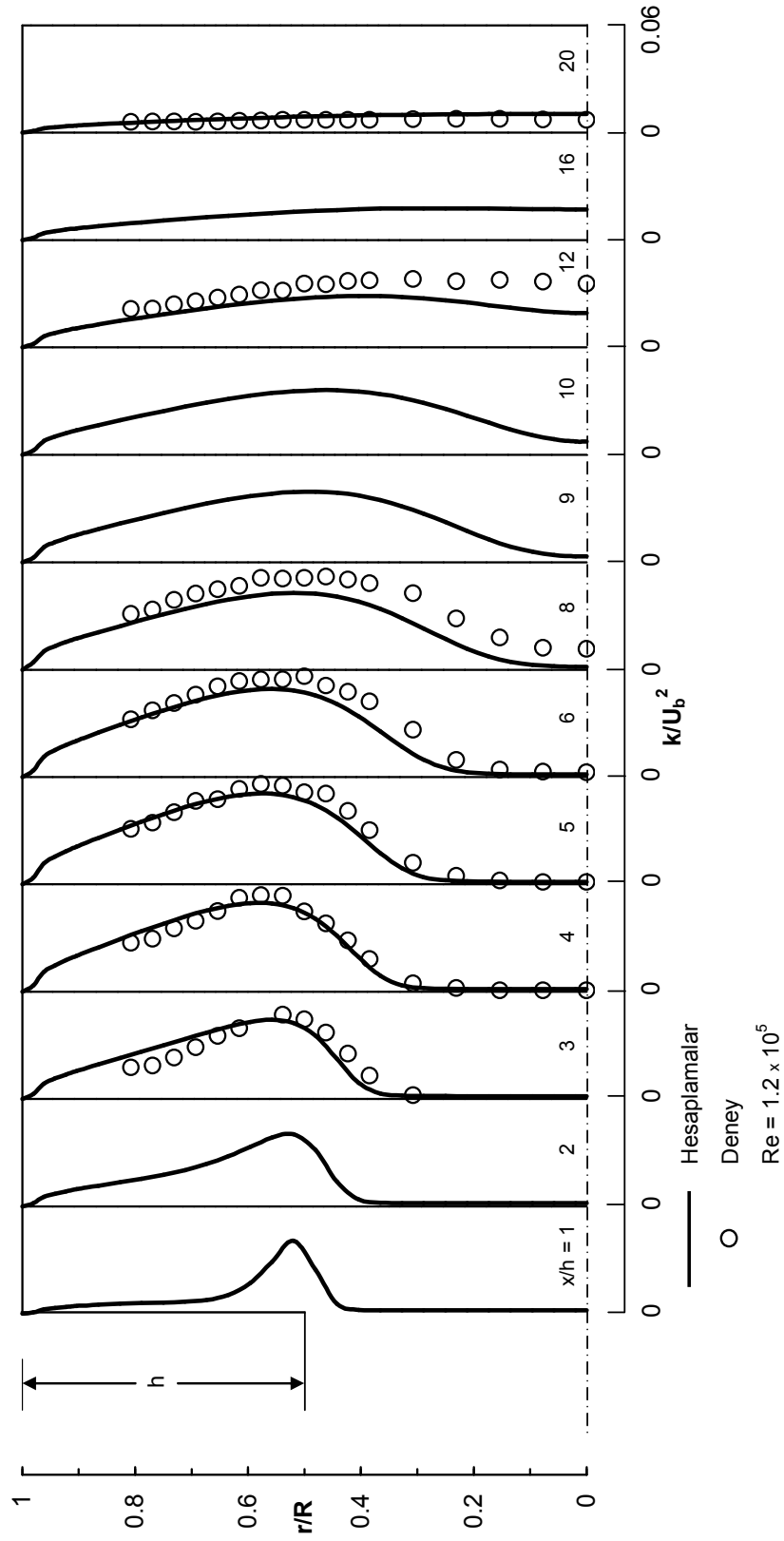
Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'dan, hesaplanan aksenal hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümler arasında oldukça iyi uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 2.28. Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

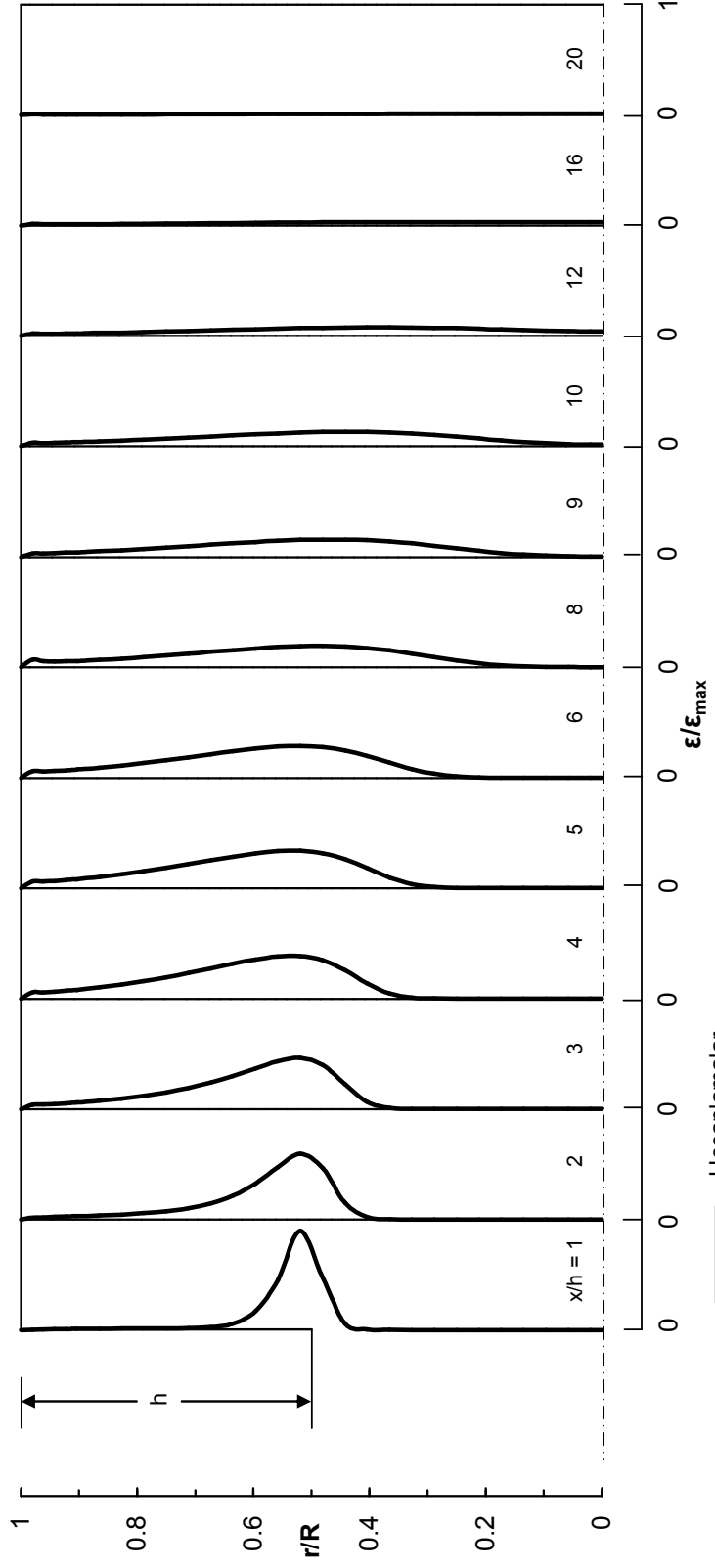


Şekil 2.29. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

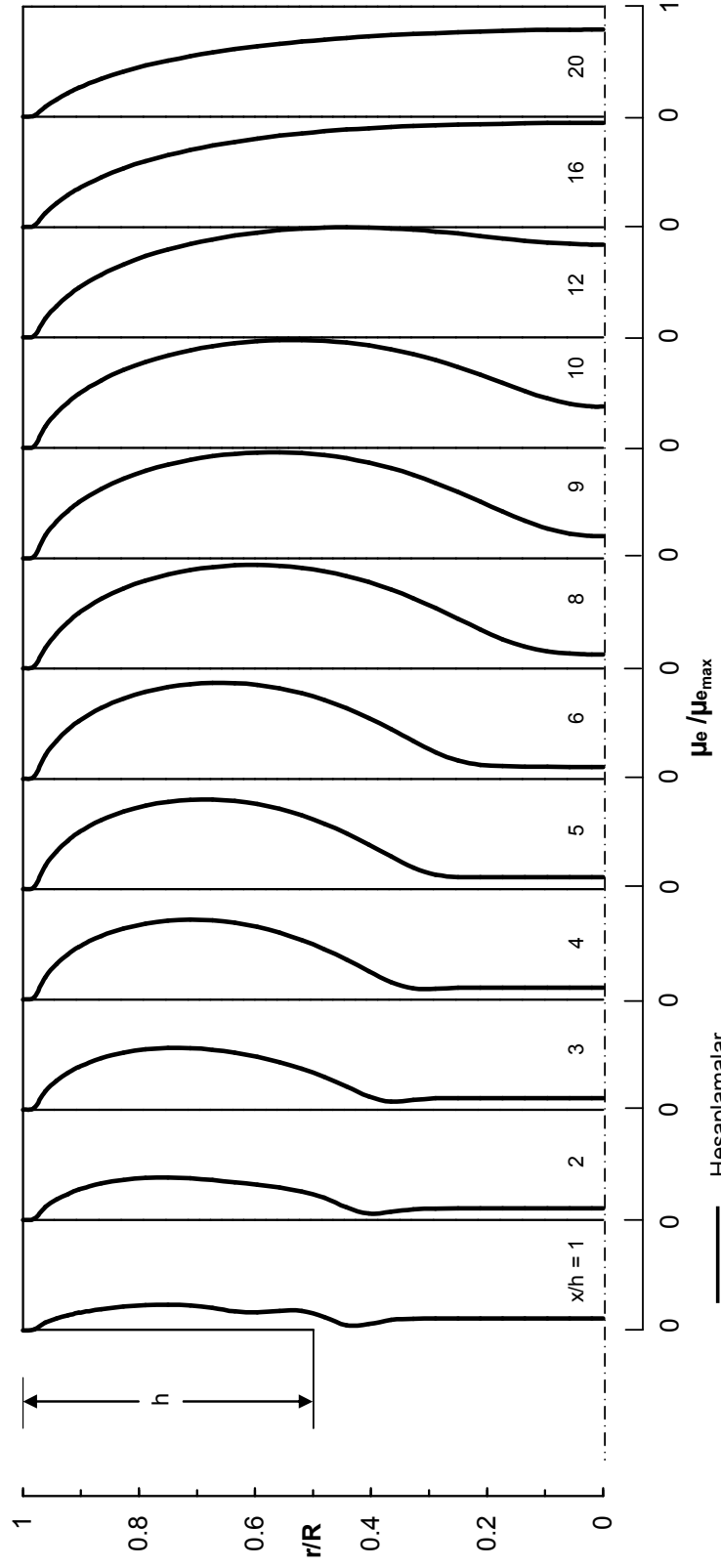


Şekil 2.30. Eksenel simetrik an genişleme li akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



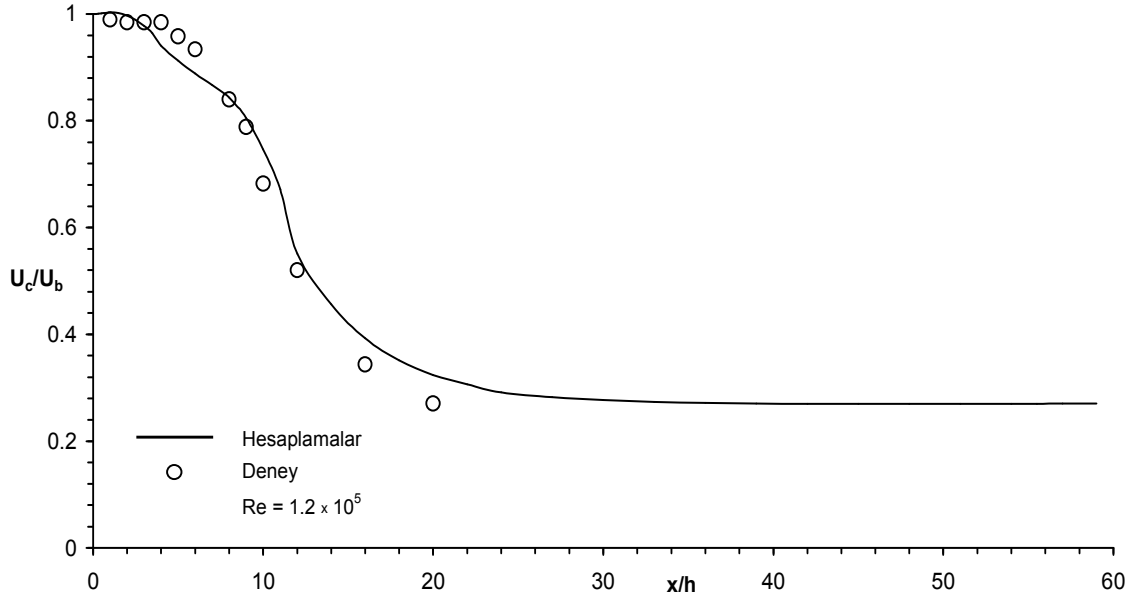


Şekil 2.31. Poole ve Escudier'in (2003) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.32. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profilleri, sırasıyla Şekil 2.31 ve Şekil 2.32'de gösterilmektedir.

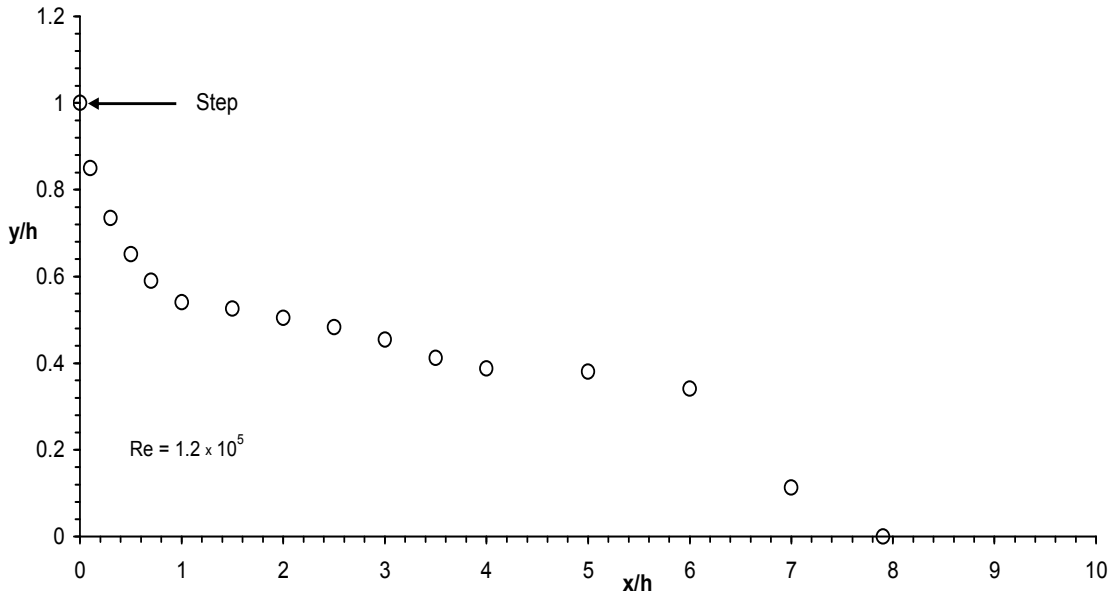


Şekil 2.33. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

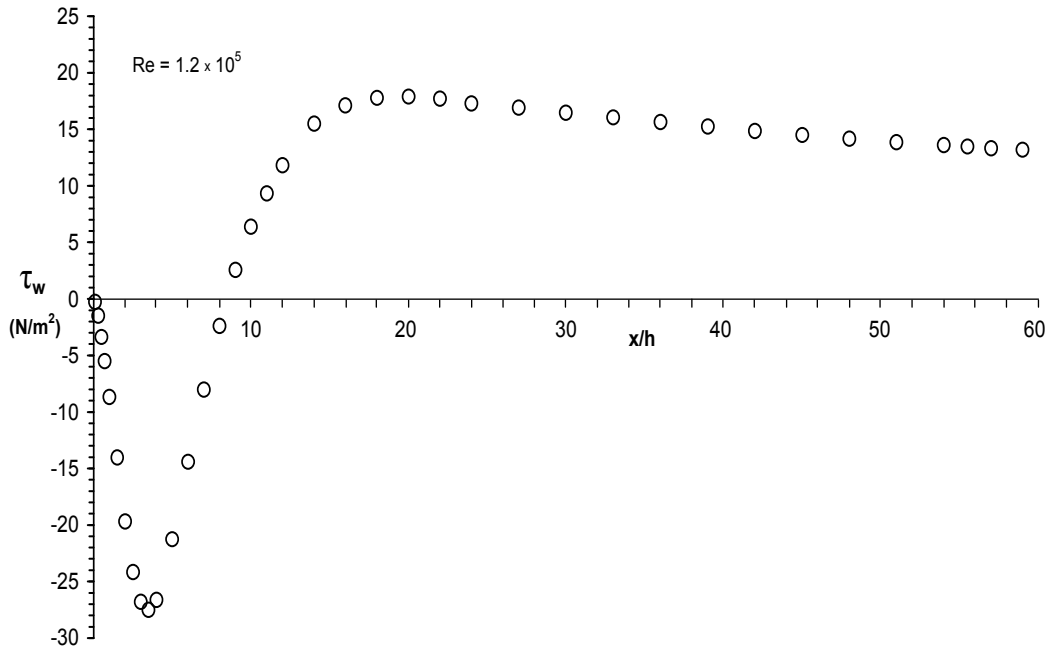
Eksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, Şekil 2.33'te gösterilmiştir. Hesaplanan aksel hız değerleri  $U_b$  (bulk velocity) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Hesaplanan aksel hız yaklaşık olarak  $x/h=32$ 'den itibaren sabit kalmaktadır.

Şekil 2.34'de Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Deneysel değeri  $x_r=9.6h$  olarak bildirilen akış tutunma uzunluğunun sayısal değeri yaklaşık olarak  $x_r=7.9h$  olarak hesaplanmıştır.

Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı, Şekil 2.35'de verilmiştir.

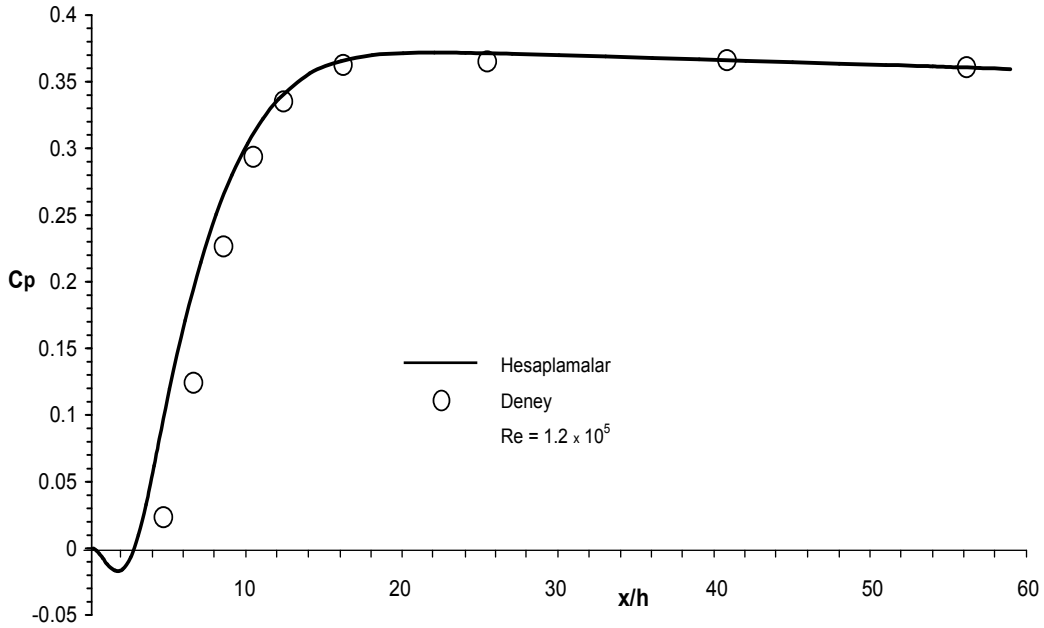


Şekil 2.34. Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



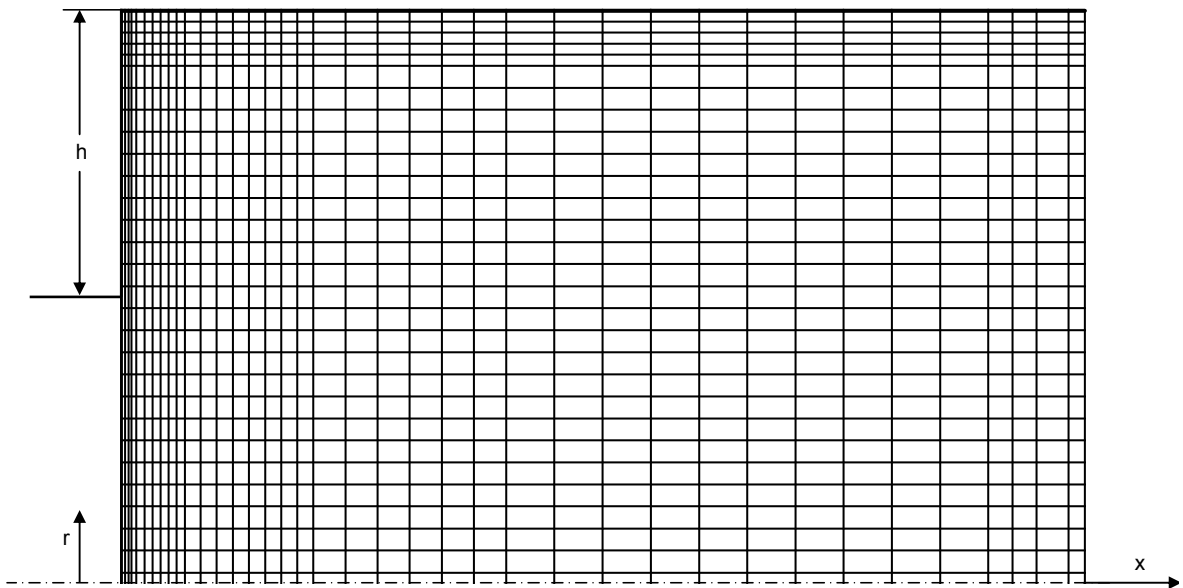
Şekil 2.35. Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Poole ve Escudier (2003), anigenişlemeli akış borusu boyunca cidar statik-basınç ölçümleri de yapmış ve boyutsuz olarak sunmuşlardır. Şekil 2.36'da aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı, Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve iyi bir uyum elde edilmiştir.

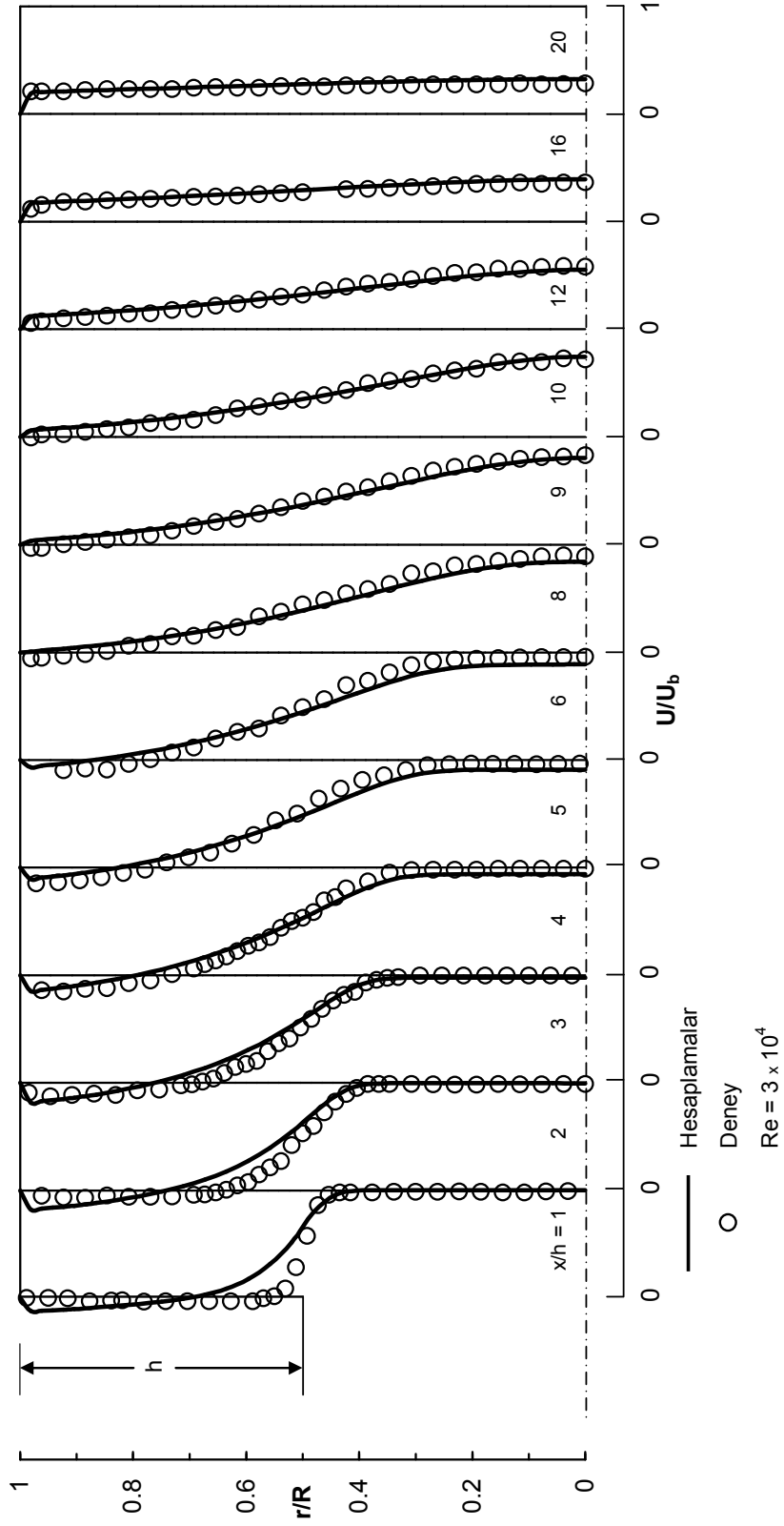


Şekil 2.36. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

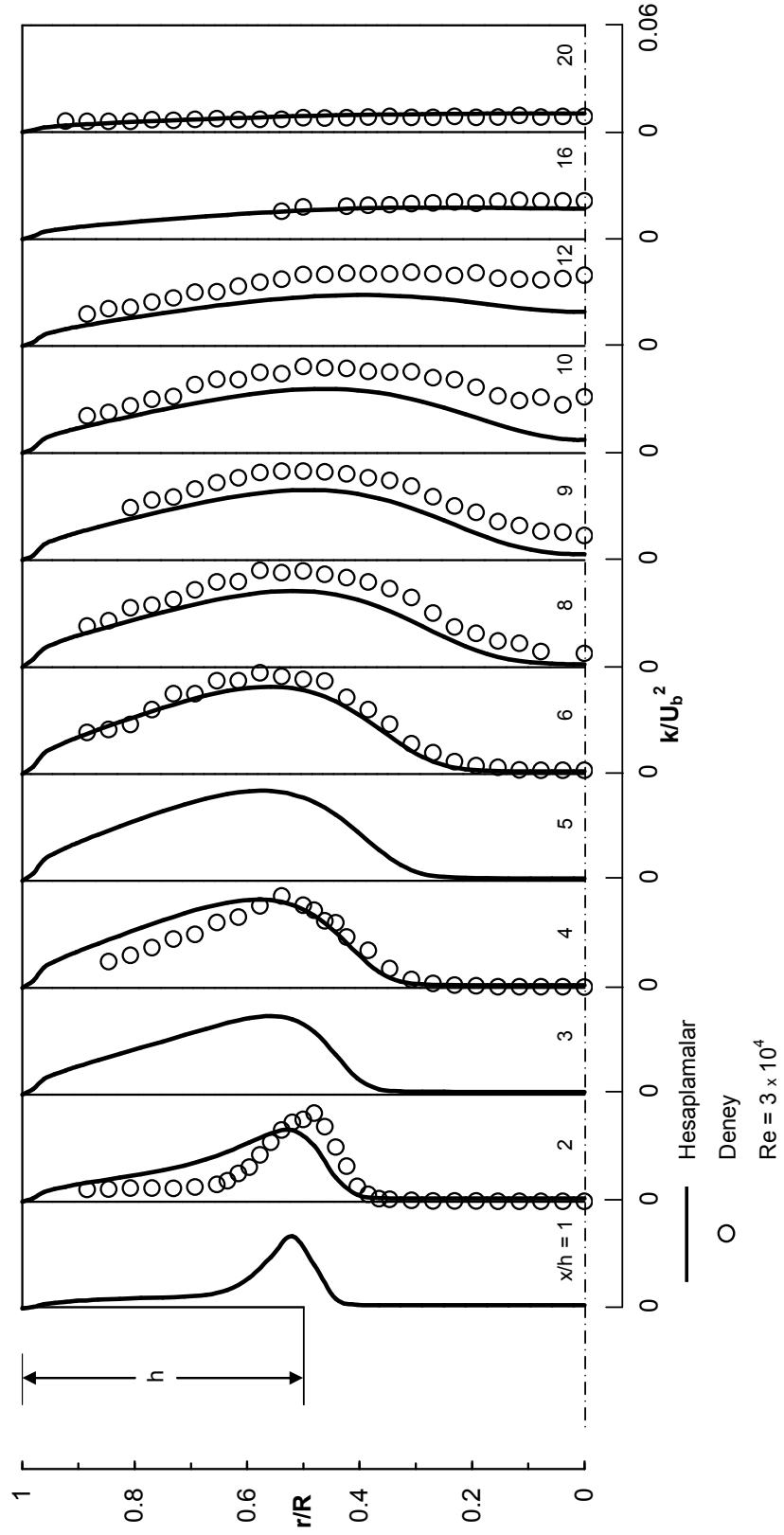
Poole ve Escudier (2003), deneylerini Reynolds sayısının 30000 olduğu akış durumu için yeniden yapmış ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Sayısal hesaplamalar da değişen giriş koşullarına göre yeniden yapılmış ve ilgili deneysel verilerle iyi uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı Şekil 2.37'de verilmiştir.



Şekil 2.37. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



Şekil 2.38. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.39. Eksenel simetrik anisotropiklemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerjinin Poole ve Escudier'in (2003) Reynolds sayısının 30000 olduğu akış için yaptığı deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.38 ve Şekil 2.39'da gösterilmiştir. Eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri sırasıyla  $U_b$  ve  $U_b^2$  ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 2.38 ve Şekil 2.39'dan görüldüğü gibi, hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerji değerleri ile deneysel ölçüm değerleri arasında genel olarak iyi uyum vardır. Bu uyum,  $Re=120000$  için olan ve Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'da görülen uyumdan biraz daha azdır. Bu durumun sebebi, standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelinin daha yüksek Reynolds sayılarındaki akışlar için daha iyi modelleme yapmasındandır.

Şekil 2.39 dikkatlice incelendiğinde çevrintili akış bölgesinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri önce ölçülenlerin üstünde kalıyorken daha sonra  $x=6h$  mesafesinden sonra ölçülenlerin altında kalmaktadır. Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılmamasıdır. Ayrıca, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu durum aynı zamanda hesaplamalar tarafından da gösterilmiştir.

Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi, sırasıyla Şekil 2.40 ve Şekil 2.41'de gösterilmiştir.

Poole ve Escudier (2003), eksenel simetrik anigenişlemeli borudaki akışta eksenel hızın simetrisini,  $x/h=3$  kesitinde boru çapı boyunca sık ölçümler yaparak göstermiştir.  $r/R=0-1$  aralığındaki ölçümlerle, hesaplanan değerler Şekil 2.42'de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi uyum güzeldir. Standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile daha büyük negatif eksenel hızlar elde edilmiş ve daha kısa çevrintili akış bölgesi oluşmuştur.



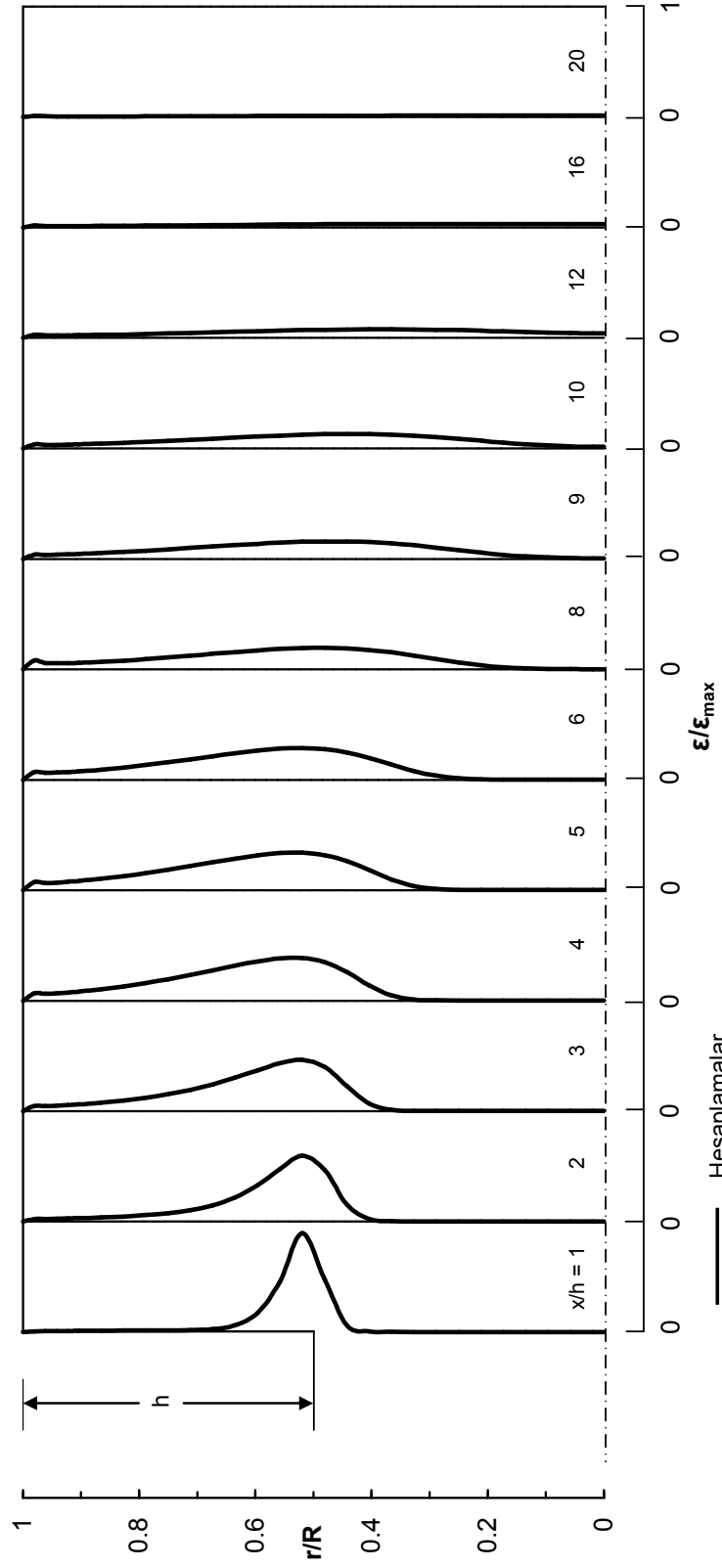
Simetri eksenini üzerindeki aksenal hız değerleri, anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanıp Poole ve Escudier'in (2003) deneysel bulgularıyla mukayese edildiğinde, Şekil 2.43'ten görüldüğü gibi benzer eğilimler elde edilir. Hesaplanan aksenal hız yaklaşık olarak  $x/h=32$  kesitinden itibaren sabit kalmaktadır.

Şekil 2.44'te Poole ve Escudier'in (2003) aksenal simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Akış tutunma uzunluğu, Reynolds sayısının 120000 olduğu akış durumu için hesaplanan değer ile yaklaşık olarak aynı bulunmuştur ( $x_r=7.9h$ ).  $Re=30000$  için bildirilen deneysel akış tutunma uzunluğu da ( $x_r=10h$ ),  $Re=120000$  için ölçülen akış tutunma uzunluğuna ( $x_r=9.6h$ ) oldukça yakındır.

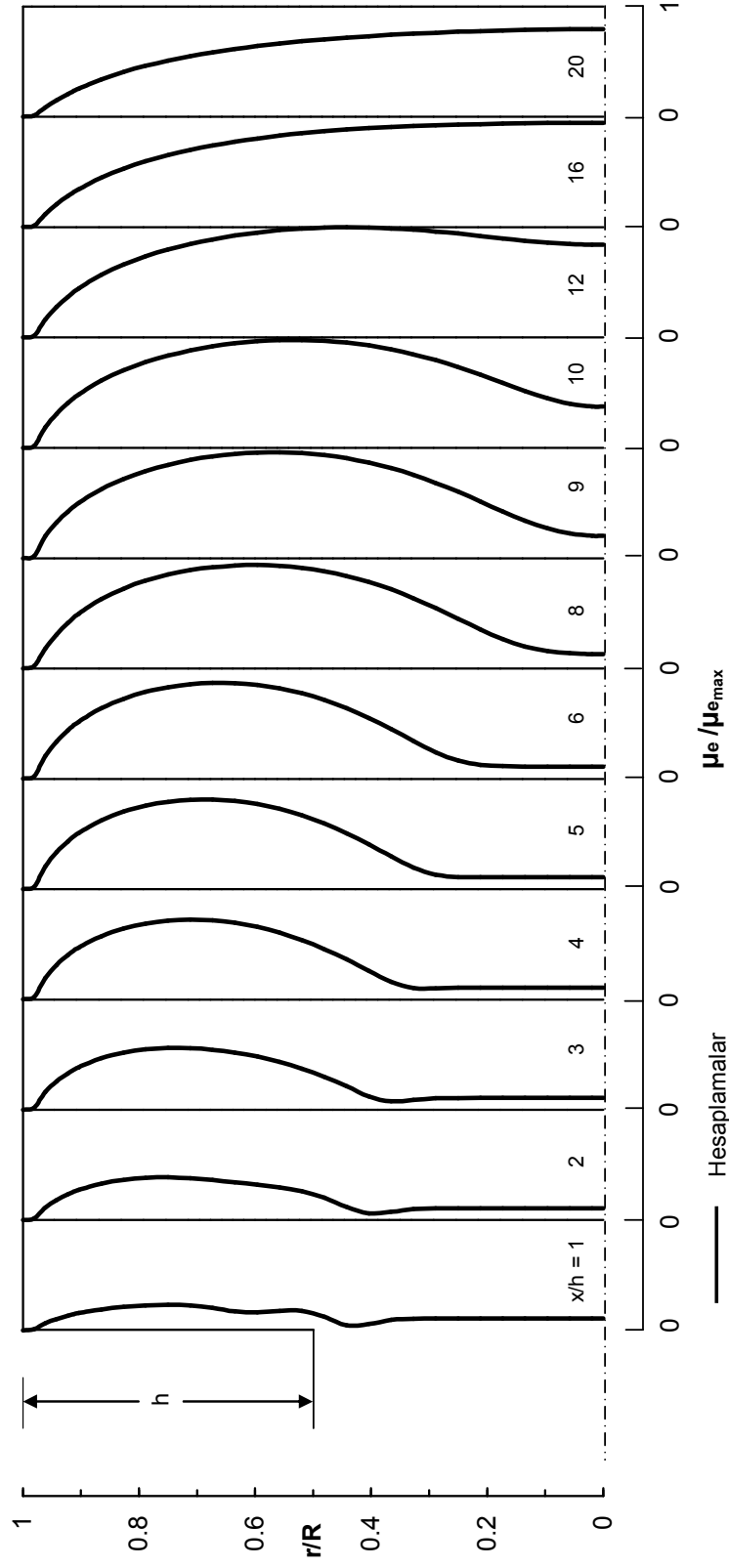
Bu sayısal çalışmadan da görüldüğü gibi, sayısal olarak hesaplanan akış tutunma uzunluğu genellikle, deneysel olarak bulunan değerden küçüktür. Bunun nedeni, deneysel olarak akış tutunma uzunluğunun belirlenmesinin zorluğunun yanı sıra, standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile çevrintili akışın daha çabuk gelişmesi ve bu yüzden daha kısa çevrintili akış bölgesi elde edilmesidir. Bir anlamda daha yüksek türbülans viskozite değerleri hesaplanmasdır. Bu sorunu aşmak için standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelinin birçok versiyonları türetilmiştir.

Şekil 2.45'te görülen anigenişleme borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesi değerleri, aynı aksenal kesitte Reynolds sayısının 120000 olduğu akış durumu için hesaplananlardan çok küçüktür.

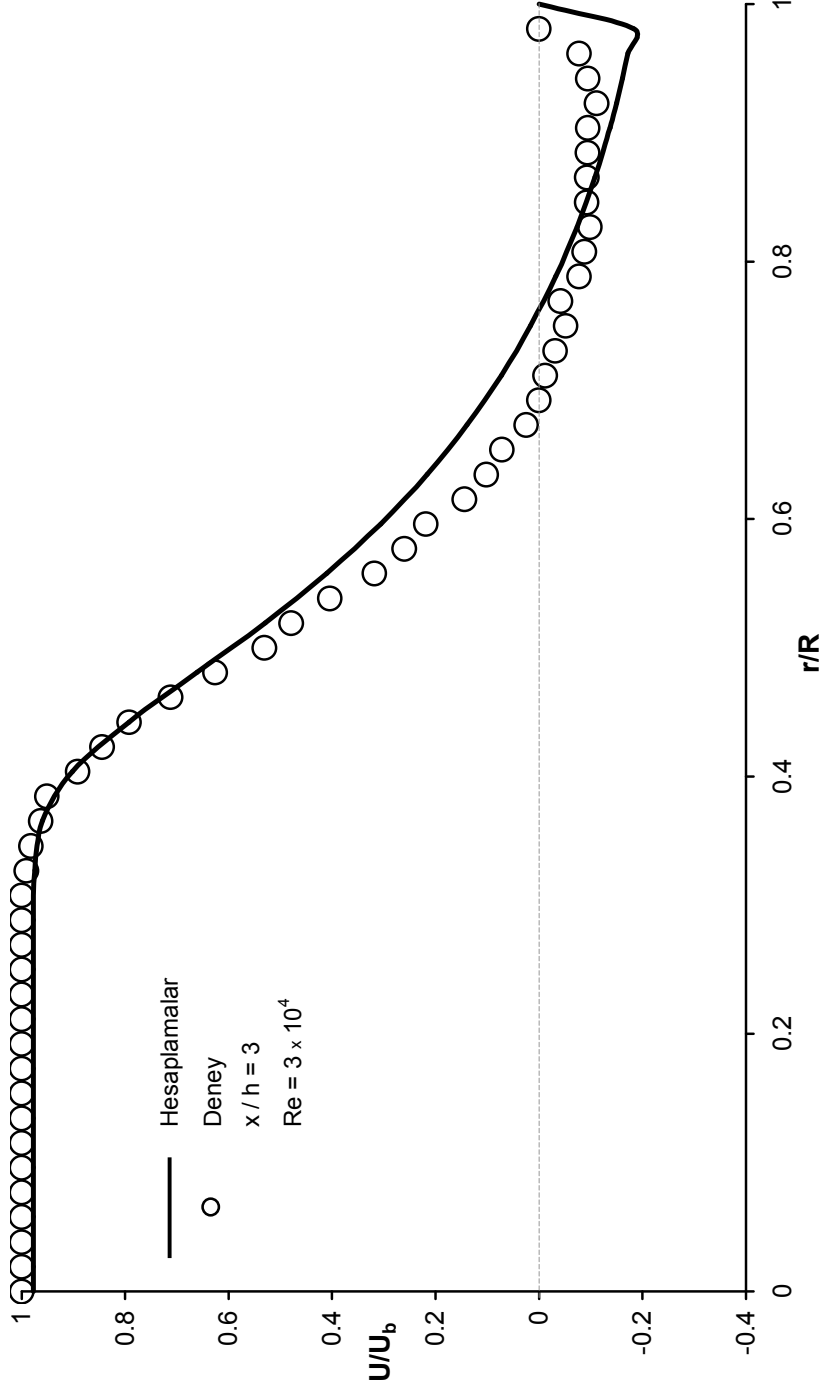
Şekil 2.46'da aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle iyi bir uyum göstermiştir. Şekilden görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, anigenişlemeli borunun girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. evrintili akıştan dolayı,  $x/h=16$  kesitine kadar ani yükseliş göstermektedir.  $x/h=16$  kesitinden sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu akış durumu için hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı değerleri,  $Re=120000$  için bulunan değerlerinden çok az farklılık göstermektedir.



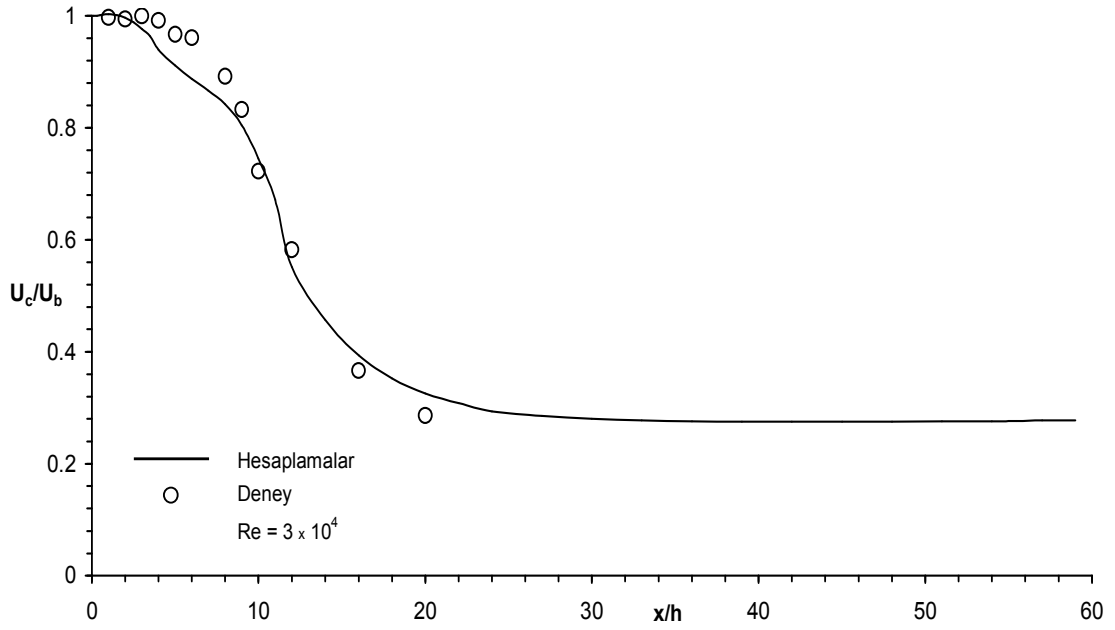
Şekil 2.40. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



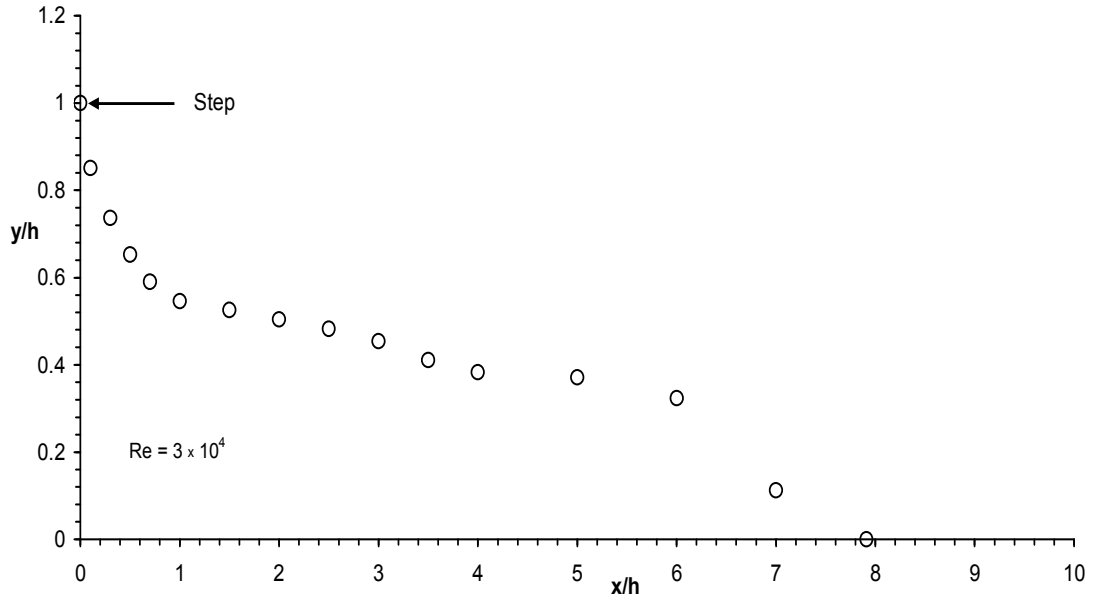
Şekil 2.41. Poole ve Escudier'in (2003) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



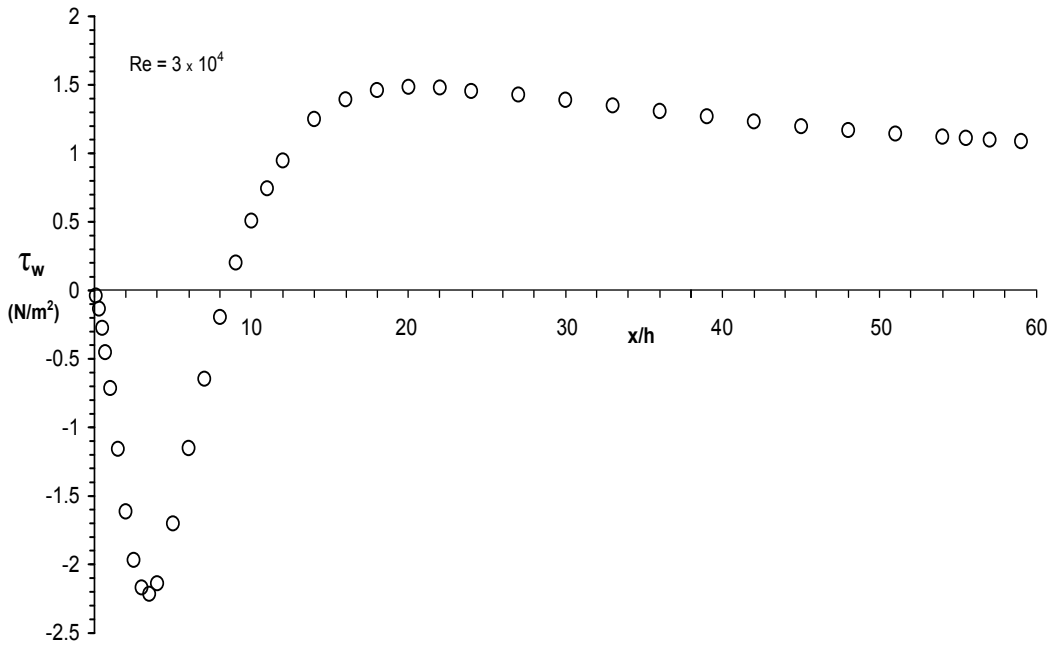
Şekil 2.42. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusunda  $x/h=3$  eksenel mesafesinde hesaplanan boyutsuz eksenel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



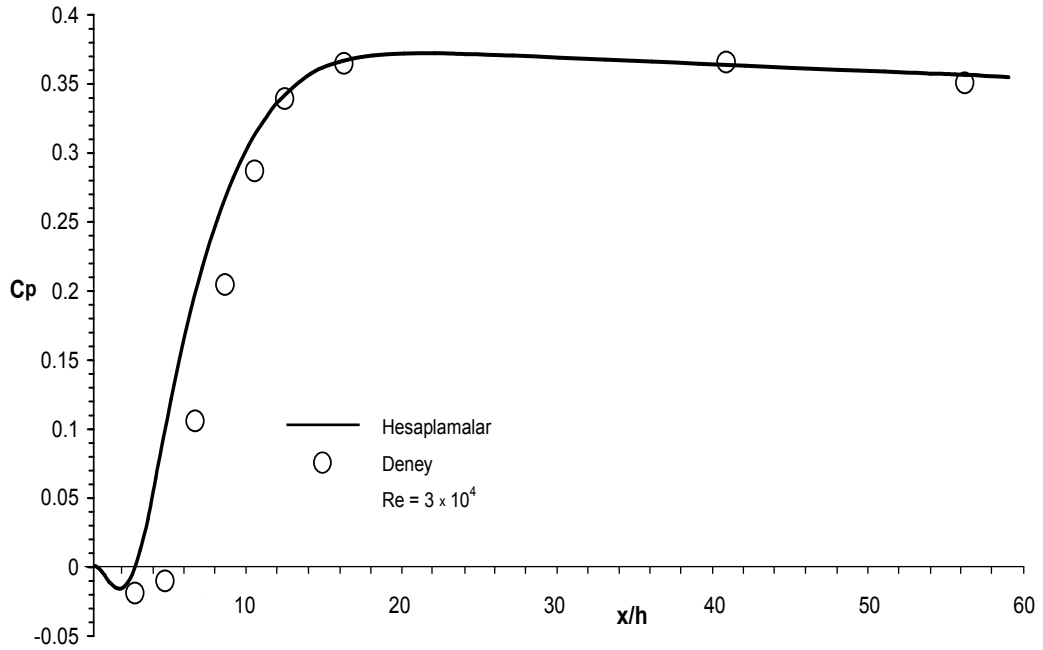
Şekil 2.43. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.44. Poole ve Escudier'in (2003) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.45. Poole ve Escudier'in (2003) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 2.46. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Poole ve Escudier'in (2003) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

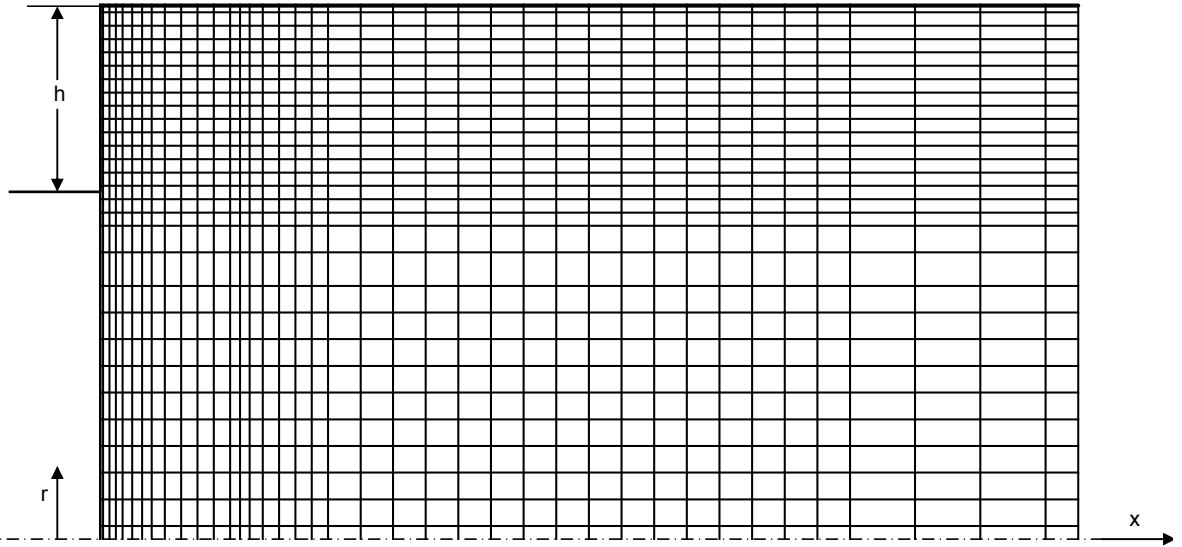
Bu sayısal hesaplamada, Escudier ve Smith'in (1999) çalışma akışkanı olarak kullandığı su ile ilgili ölçümleri kullanılmıştır.

Akışın girişte Reynolds sayısı 152000 ( $Re=U_b d / \nu$ ,  $U_b=5.2$  m/s) ve eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d=1.538$ 'dir. Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminde aşağı akışta  $x=15d$  kadar bir eksenel mesafeye uzatılmıştır.

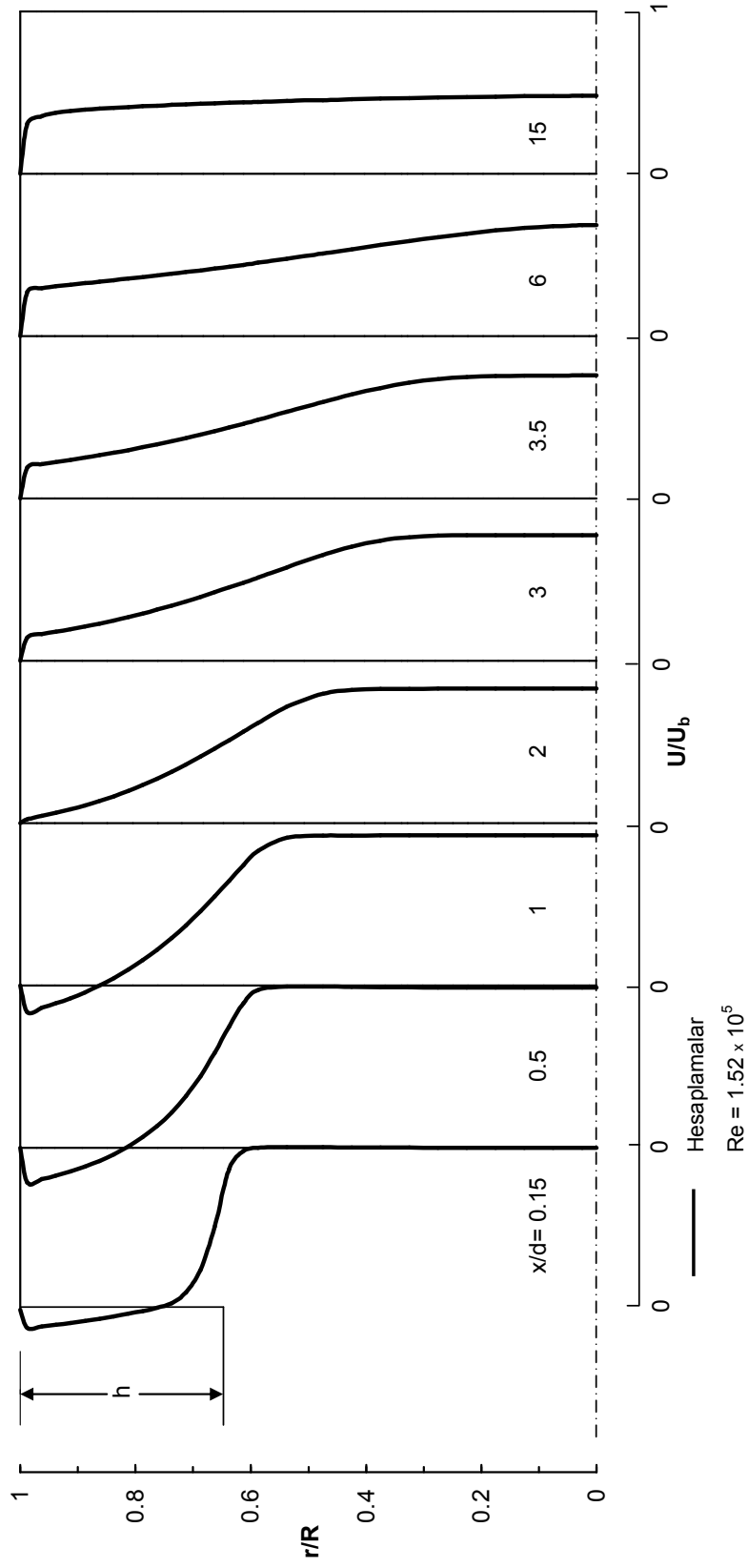
$x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelen sayısal akış ağı Şekil 2.47'de gösterilmiştir.

Hesaplanan eksenel hız değerleri,  $x/d=0.15$ 'den  $x/d=15$ 'e kadar olan 8 eksenel kesitte Şekil 2.48'de gösterilmiştir. Şekil 2.49'dan, hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümlerin karşılaştırılması görülmektedir.

Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profilleri, sırasıyla Şekil 2.50 ve Şekil 2.51'de gösterilmektedir.

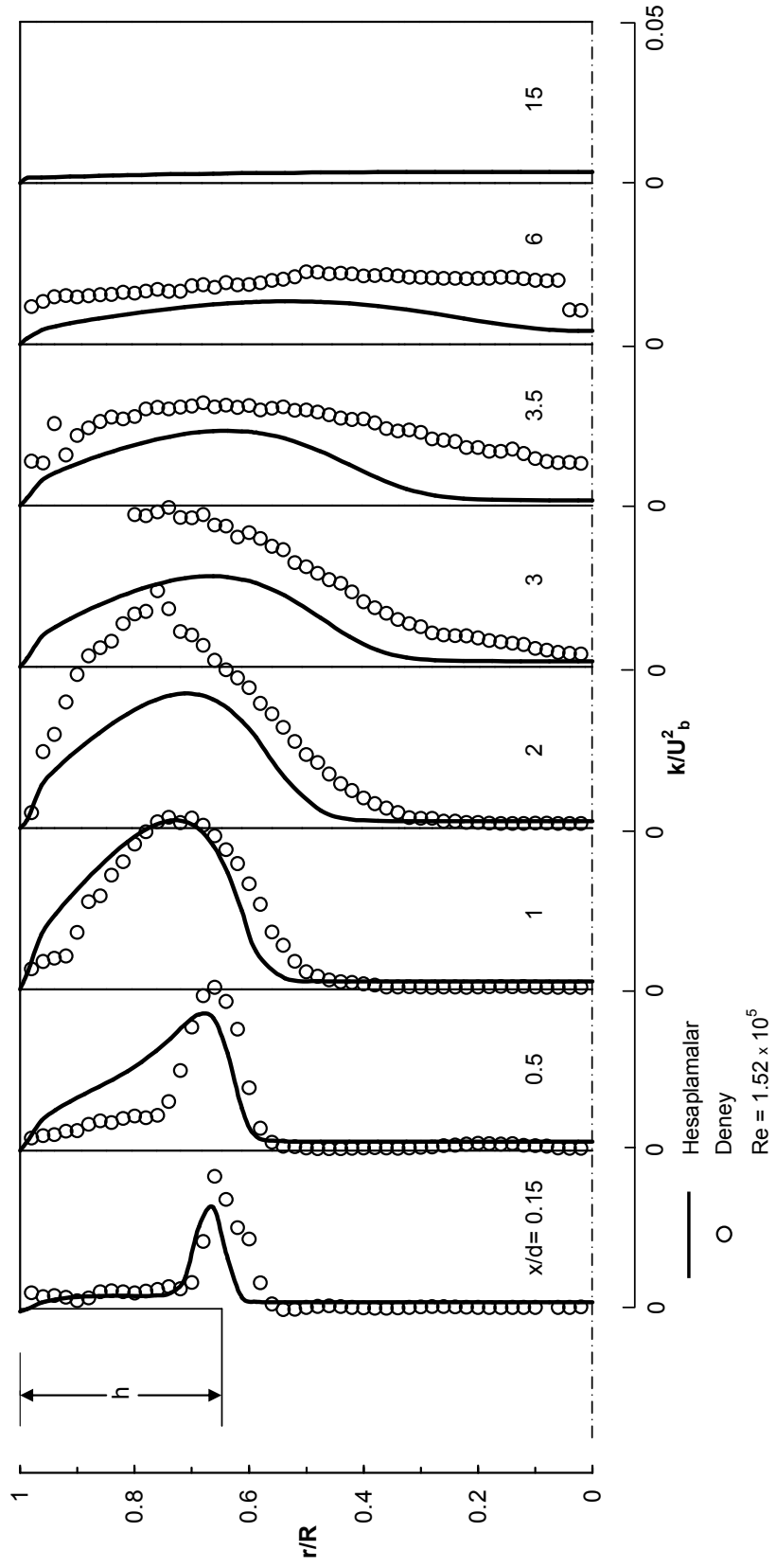


Şekil 2.47. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

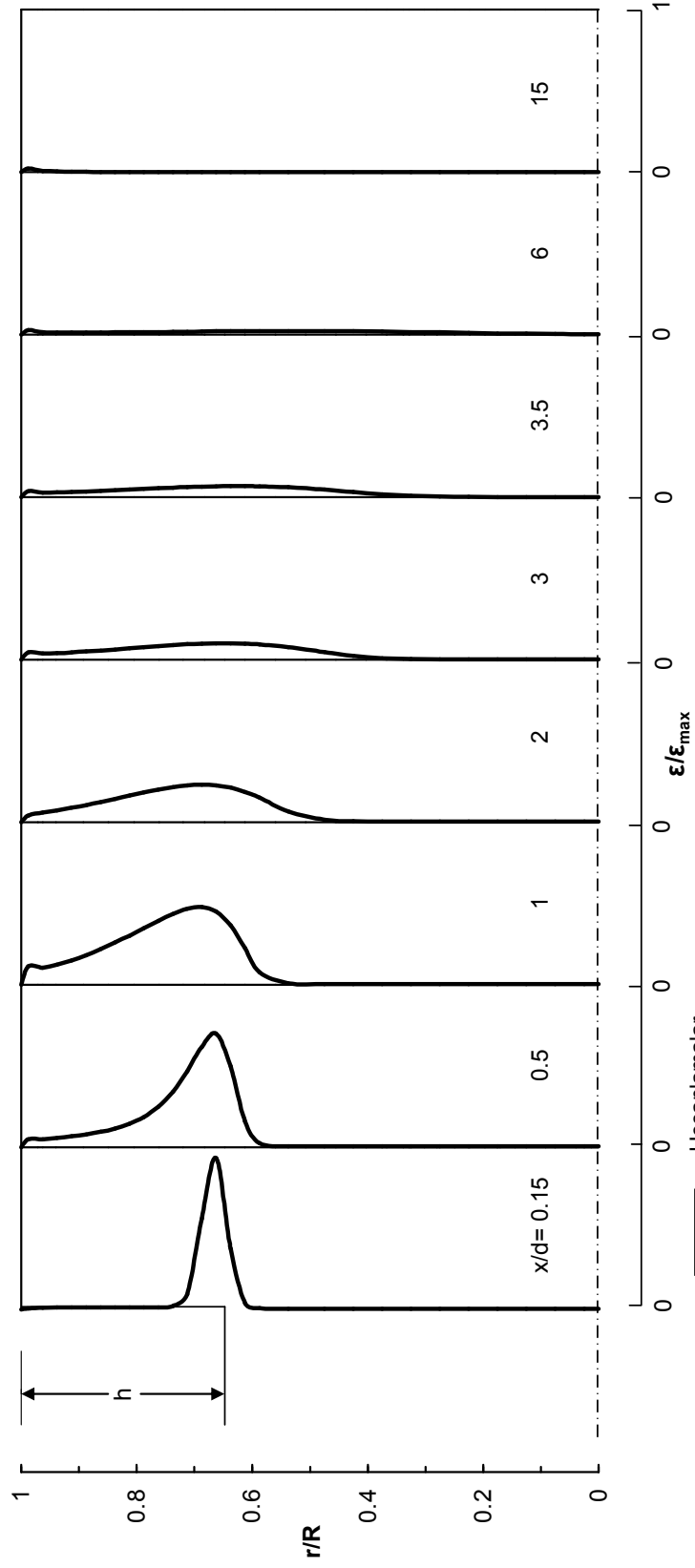


Şekil 2.48. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hız radyal profilleri.

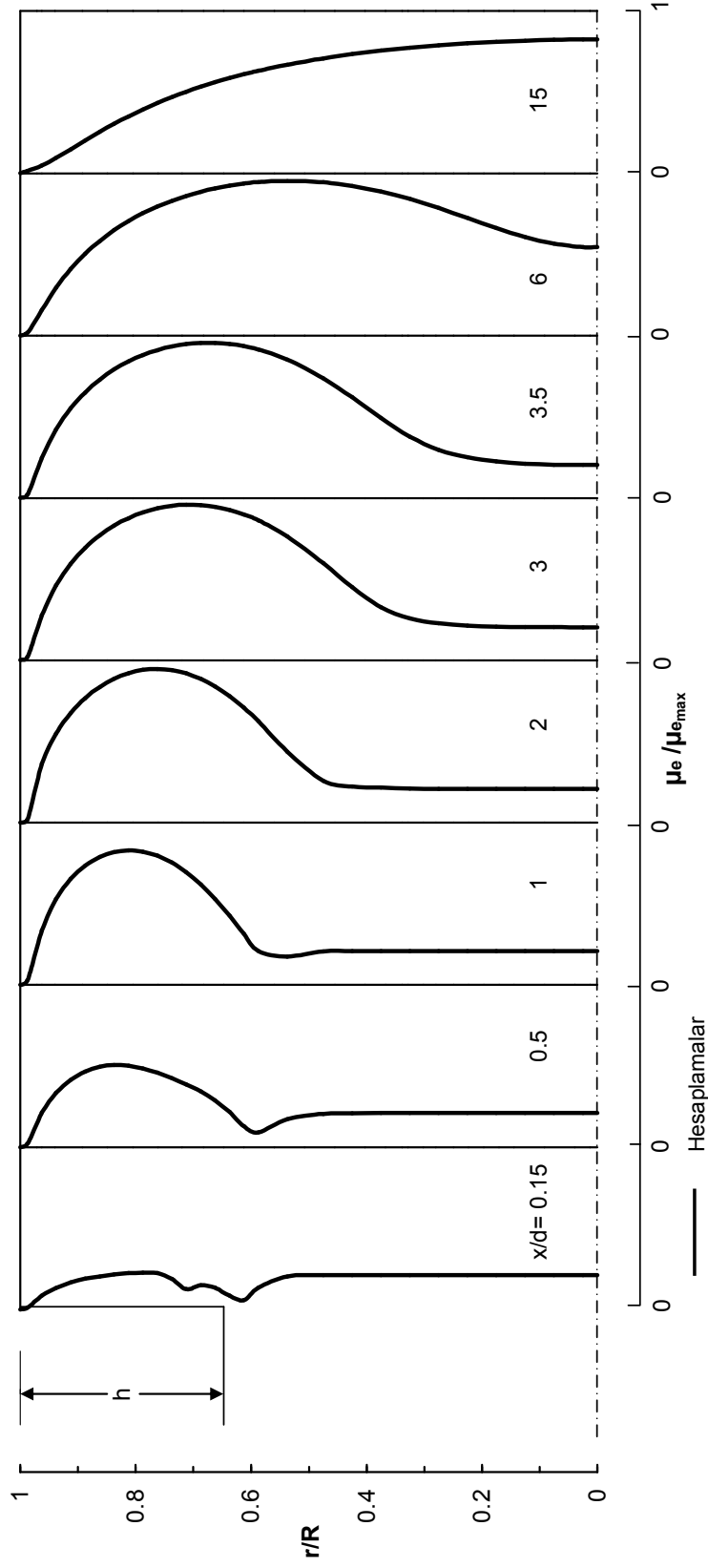




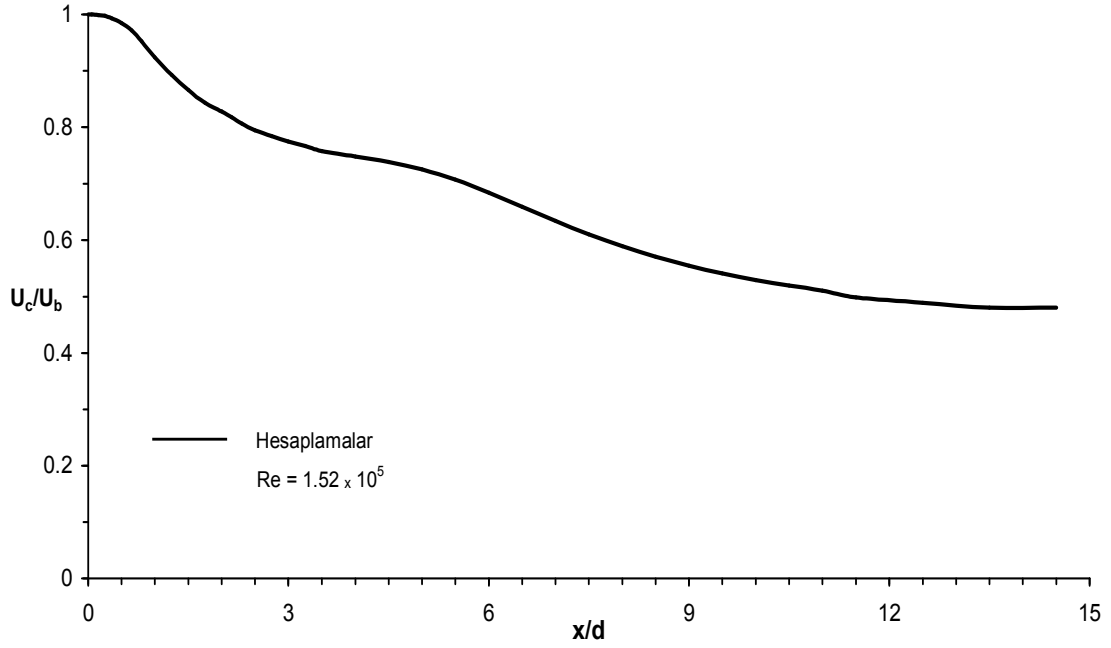
Şekil 2.49. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.50. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

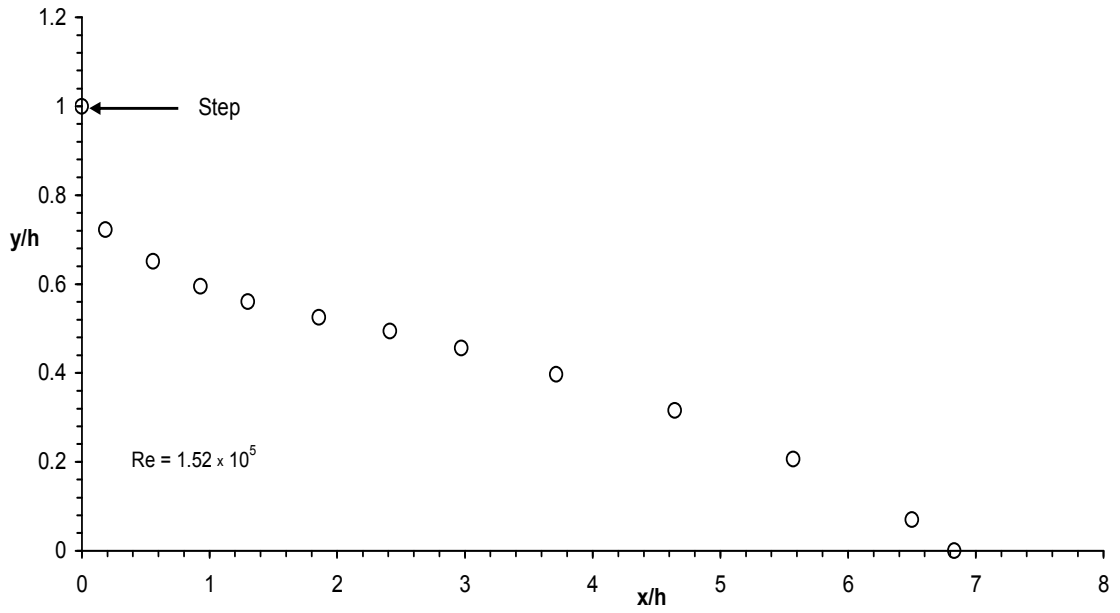


Şekil 2.51. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



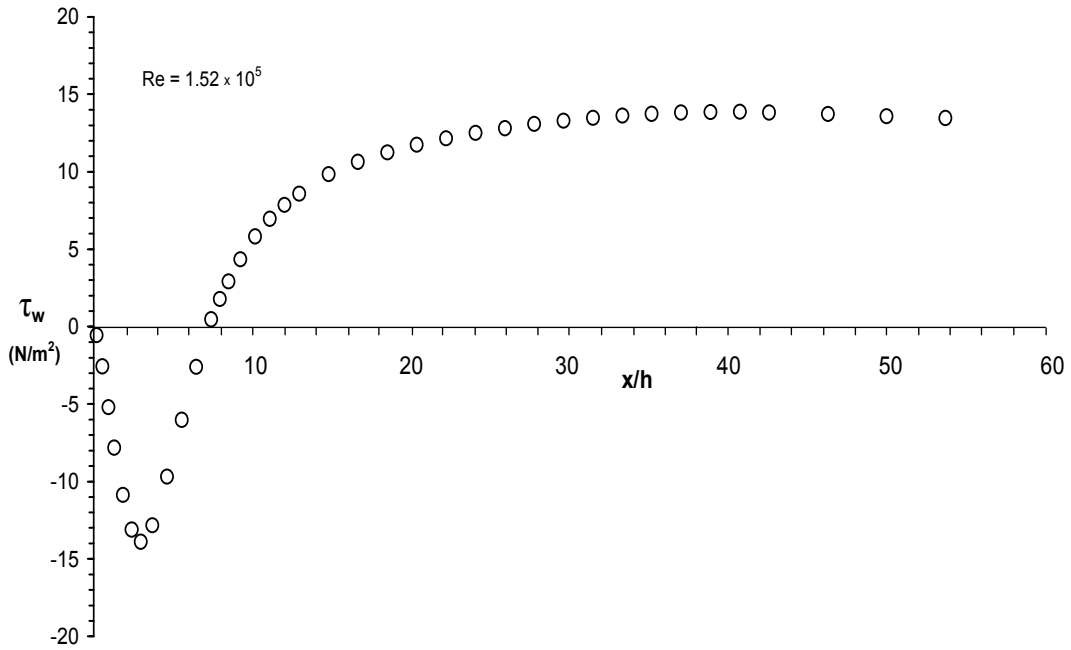
Şekil 2.52. Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişlemesi boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın değişimi.

Eksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksel hızın değişimi Şekil 2.52'de gösterilmiştir.



Şekil 2.53. Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

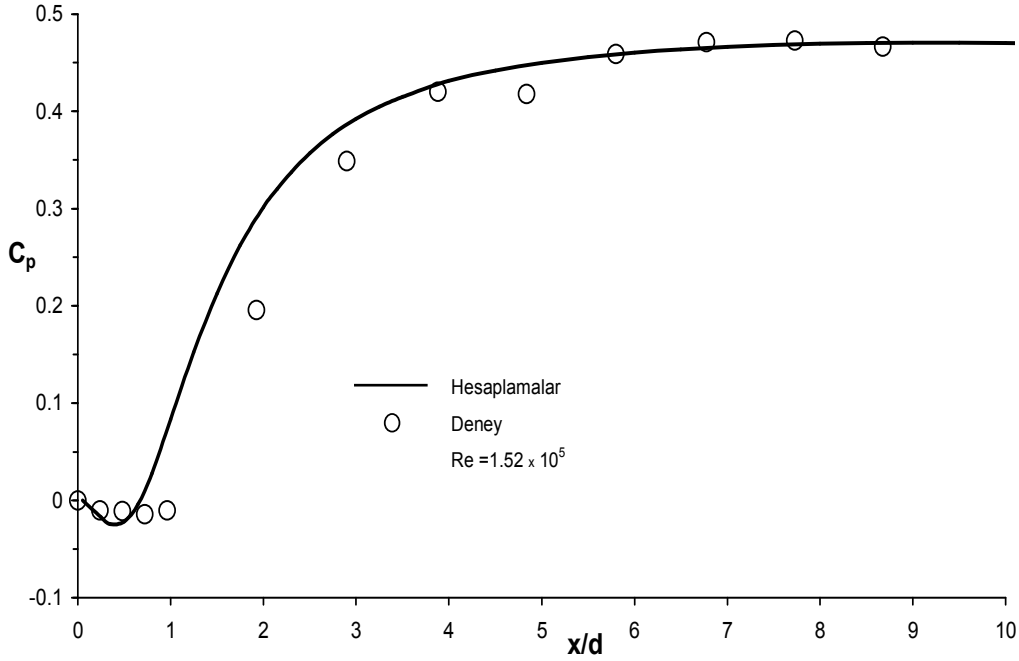
Şekil 2.53’de Escudier ve Smith’in (1999) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Cidardan ölçülen dikey mesafe  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Akış tutunma uzunluğunun deneysel değeri  $x_r=8.54h$  olmasına rağmen, sayısal değeri yaklaşık olarak  $x_r=6.8h$  hesaplanmıştır.



Şekil 2.54. Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.54'te verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/h=7$  kesitine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır.

Escudier ve Smith'in (1999), anigenişlemeli akış borusu boyunca yapmış olduğu cidar statik-basınç ölçümleri boyutsuz olarak Şekil 2.55'te verilmiştir. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı, Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve şekilden görüldüğü gibi iyi bir uyum elde edilmiştir.



Şekil 2.55. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

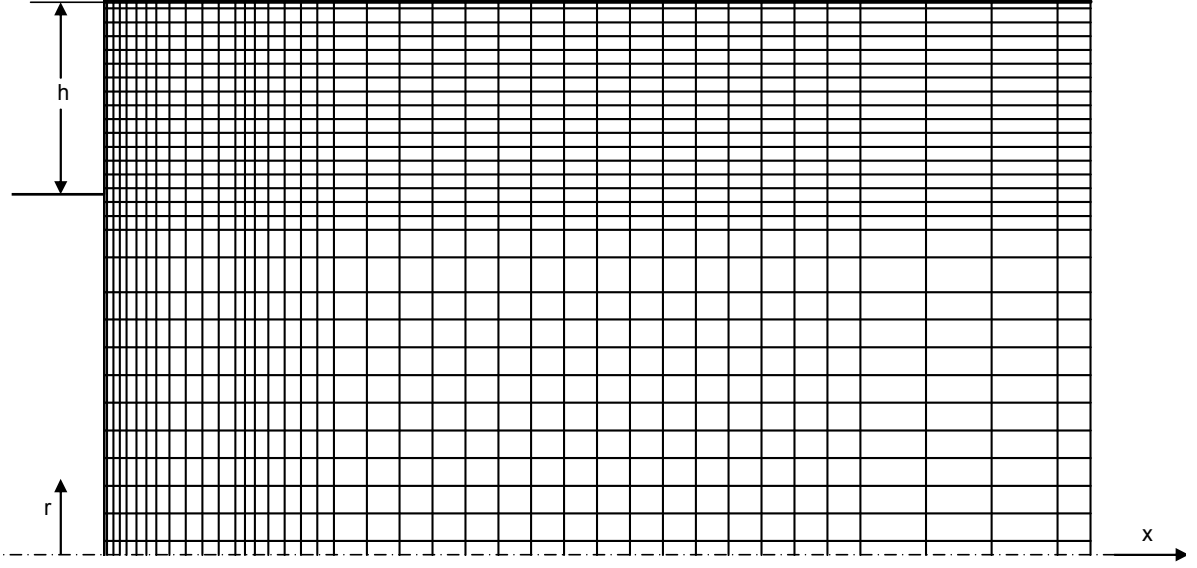
Escudier ve Smith'in (1999) Newtoniyen bir akışkan olan ve ağırlıkça %50 konsantrasyona sahip glikoz-su çözeltisini çalışma akışkanı olarak kullandığı ölçümleri aşağıdaki sayısal hesaplamalarda deney örneği olarak seçilmiştir.

Akışın girişte Reynolds sayısı 26000 ( $Re=U_b d / \nu$ ,  $U_b=7.94$  m/s) ve eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d=1.538$ 'dir.

Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminden aşağı akışta  $x=15d$  kadar bir eksenel mesafeye uzatılmıştır.

Şekil 2.56'daki sayısal akış ağı, x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelmiştir.

Sayısal iraksamaya neden olmamak için anigenişlemeli boru girişinde ve cidarda ağ sıklığı artırılmıştır.



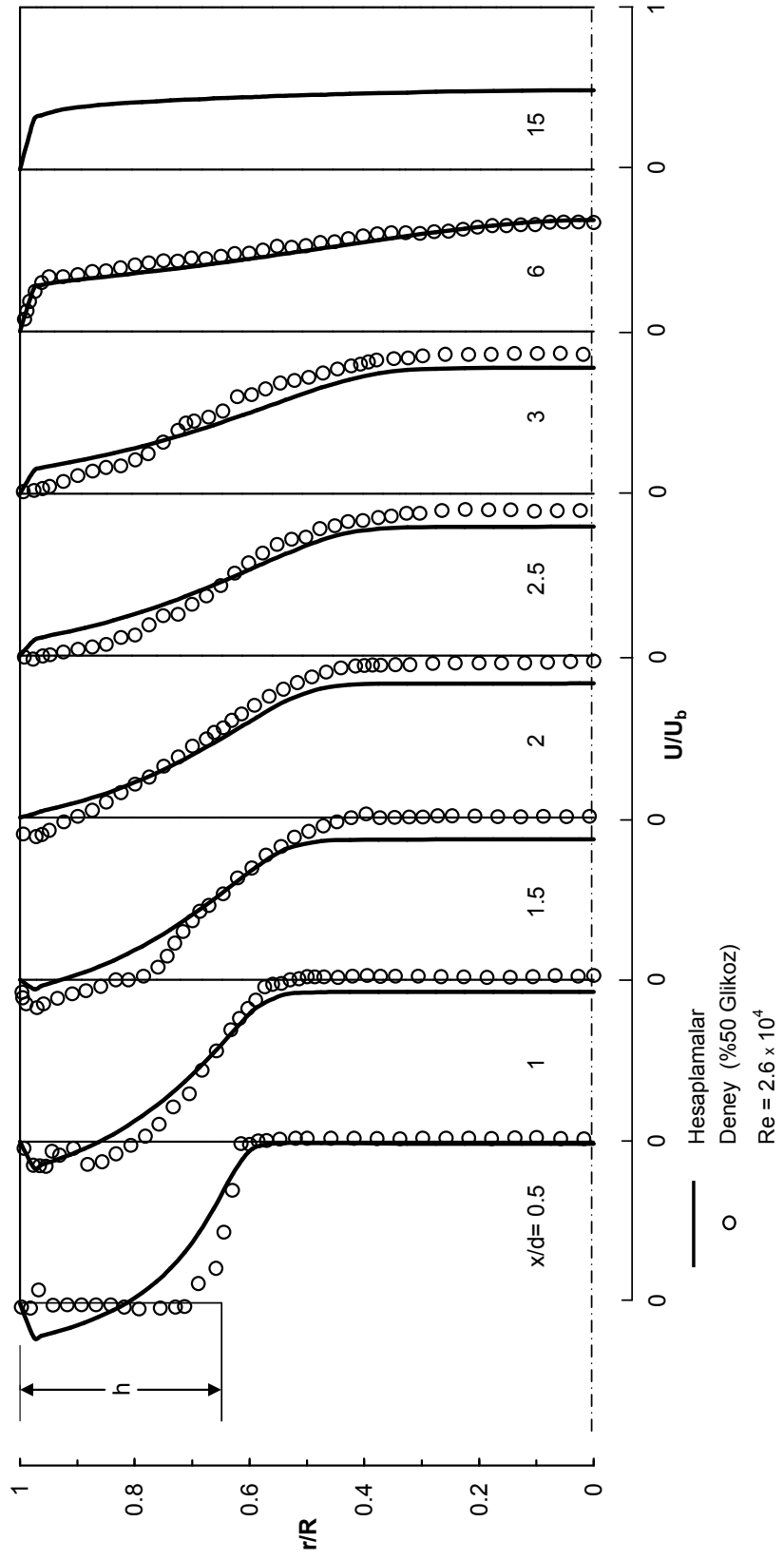
Şekil 2.56. Escudier ve Smith (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri  $x/d=0.5$ 'den  $x/d=15$ 'e kadar olan 8 eksenel kesitte, sırasıyla Şekil 2.57 ve Şekil 2.58'de gösterilmiştir. Şekil 2.57'den görüldüğü üzere, hesaplanan eksenel hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında oldukça iyi bir uyum vardır.

Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profilleri, sırasıyla Şekil 2.59 ve Şekil 2.60'ta gösterilmektedir.

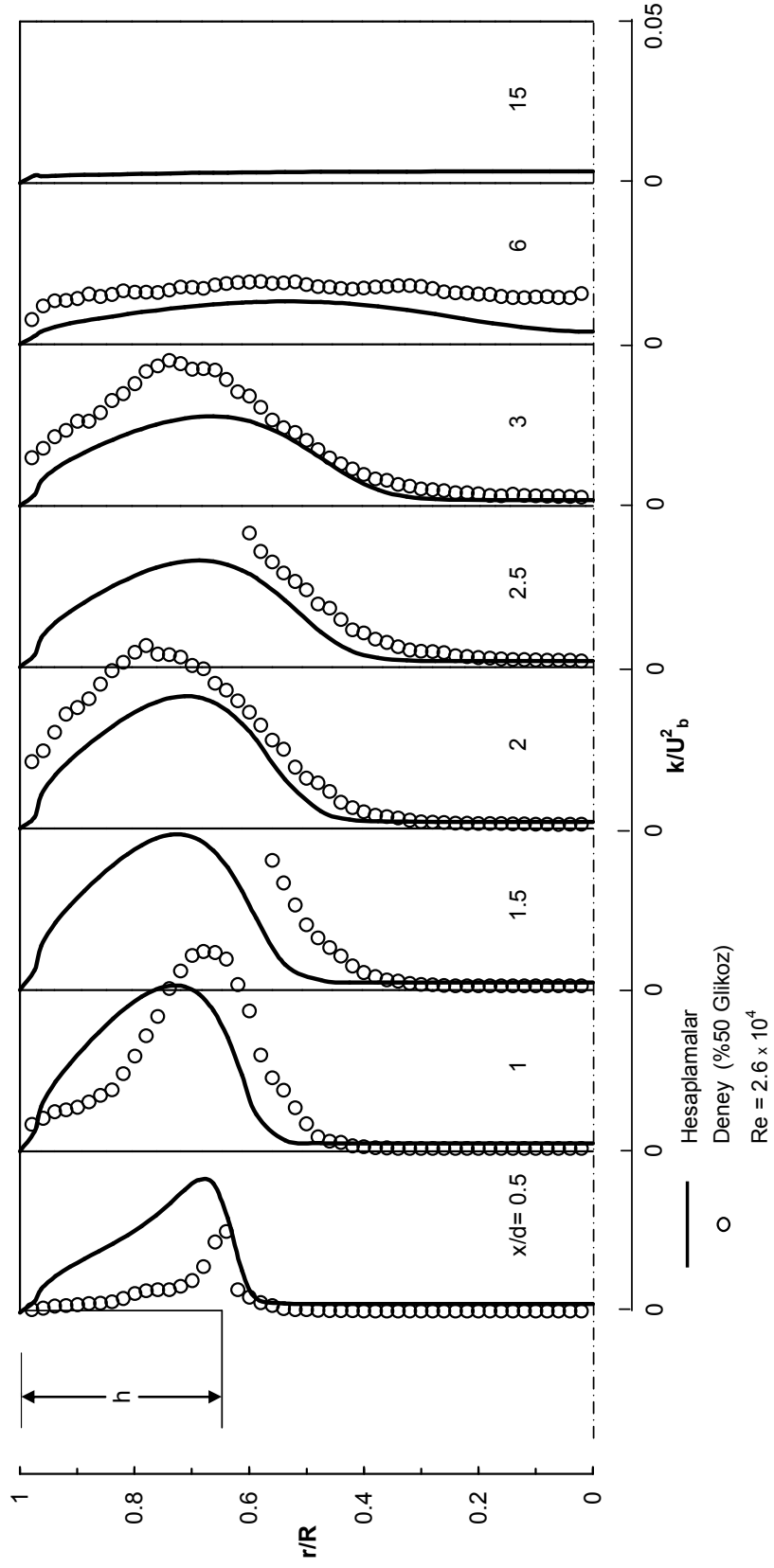
Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki eksenel hızın Escudier ve Smith'in (1999) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması Şekil 2.61'de gösterilmiştir. Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki eksenel hızın azalışı biraz daha çabuk olmuştur.

Şekil 2.62'de Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Deneysel olarak  $x_r=9.7h$  mesafesinde ölçülmüş olan akış tutunma uzunluğu yaklaşık olarak  $x_r=6.8h$  olarak hesaplanmıştır.

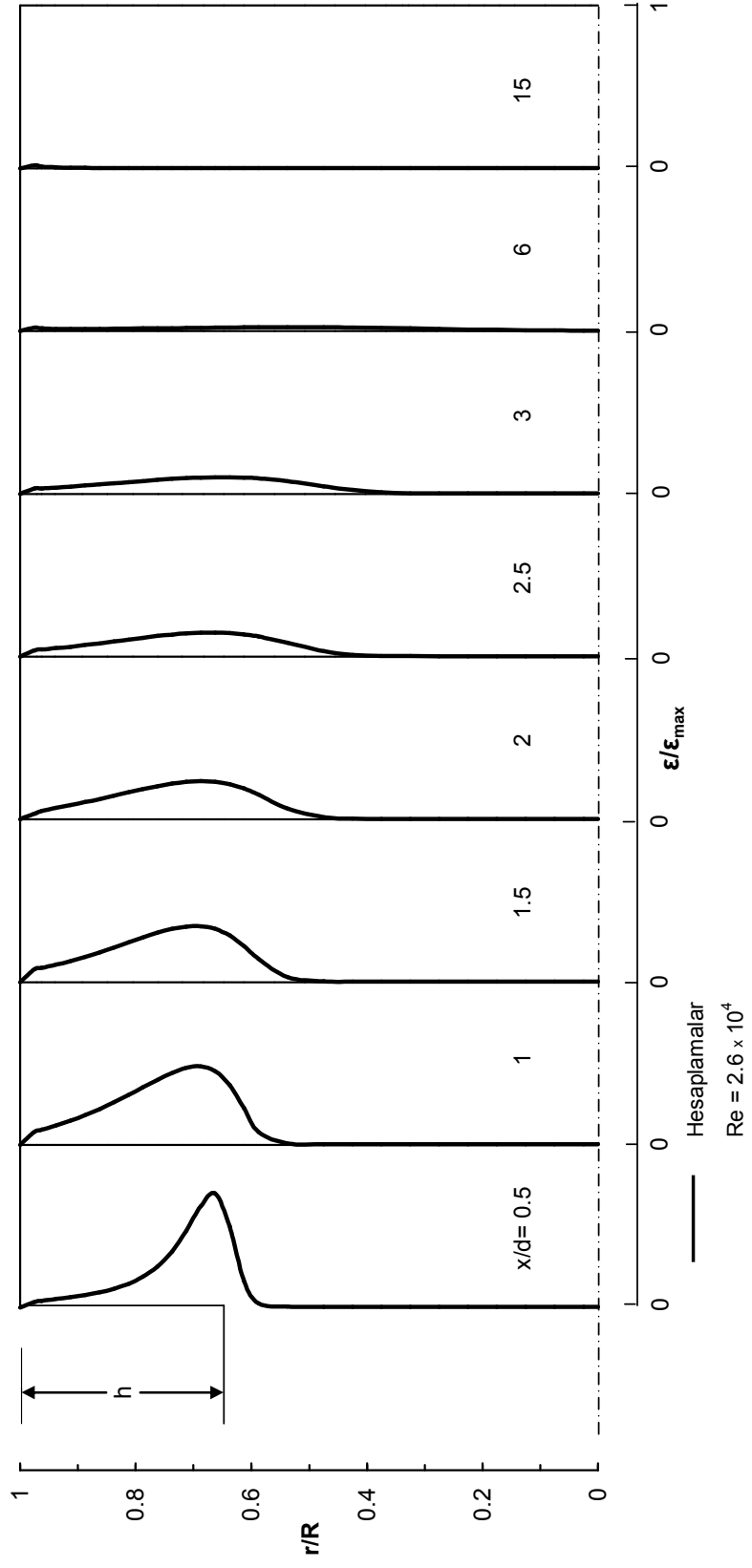


Şekil 2.57. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenal hız radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

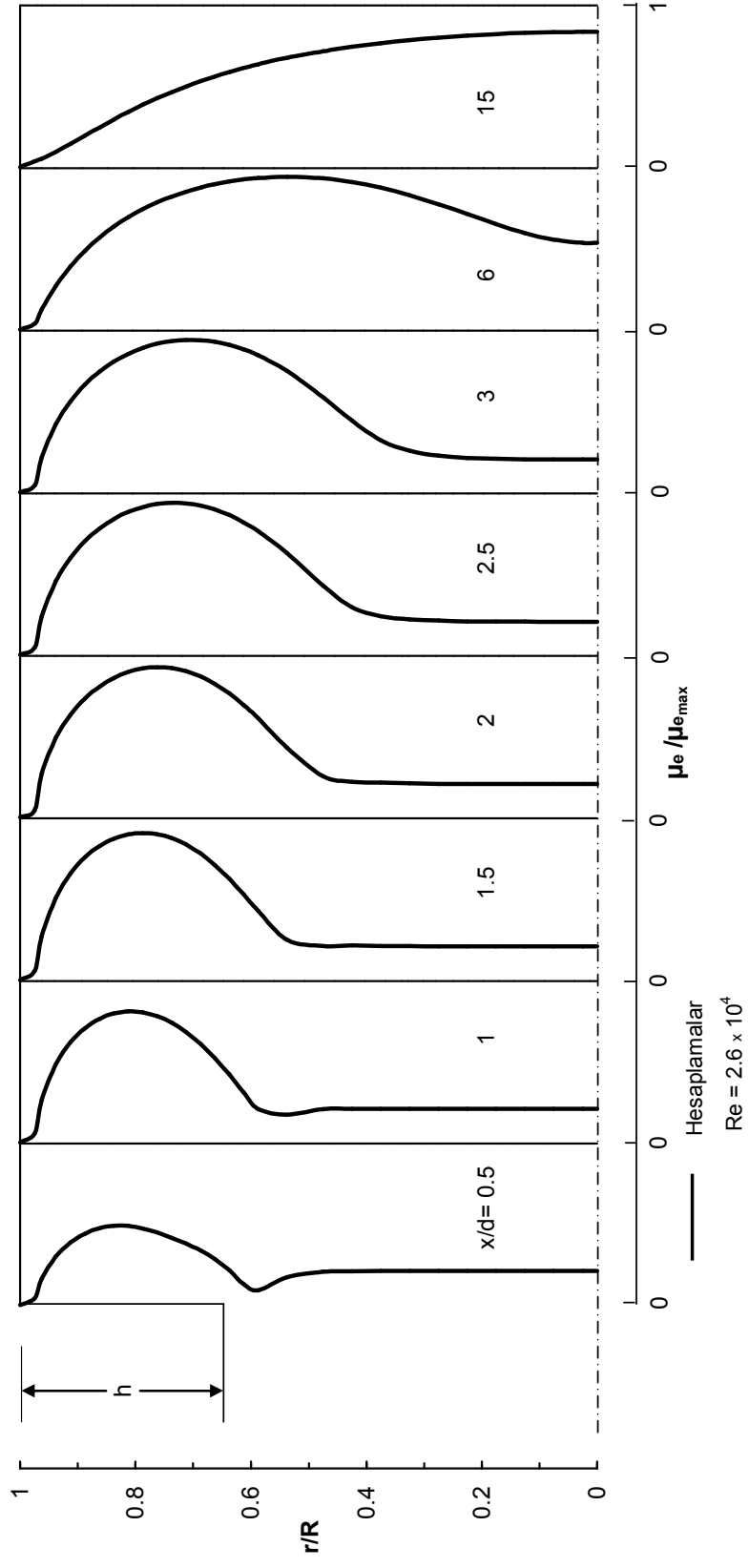




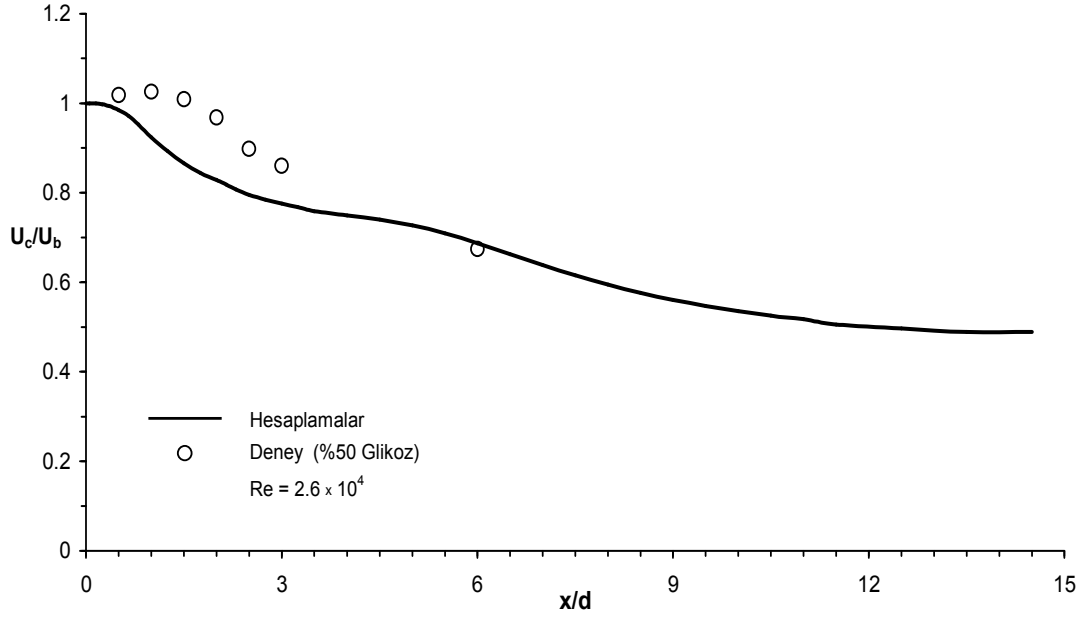
Şekil 2.58. Eksenal simetrik anıgenişleme li akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



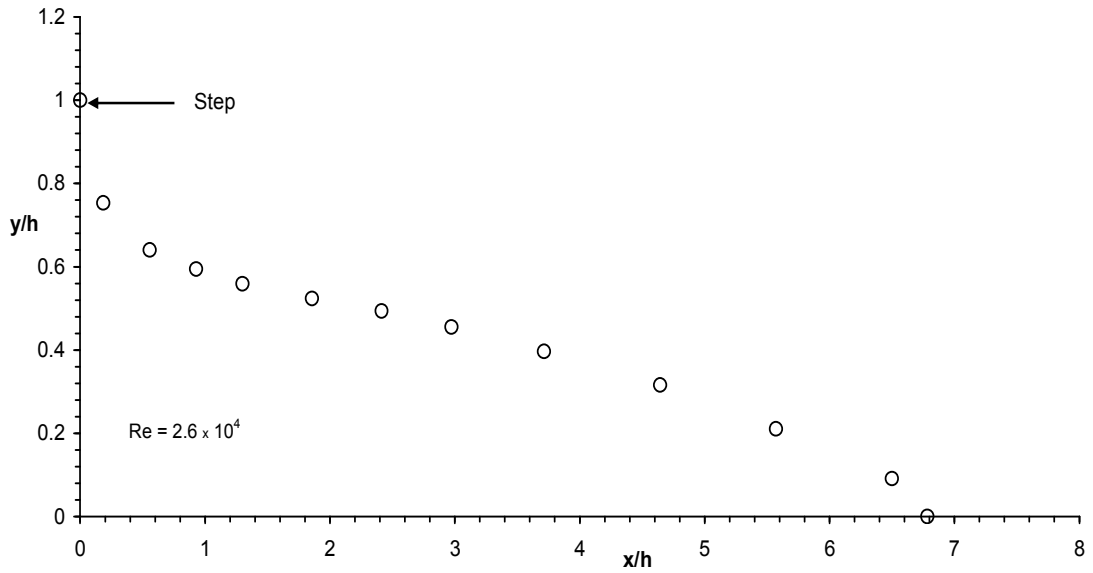
Şekil 2.59. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.60. Escudier ve Smith'in (1999) eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

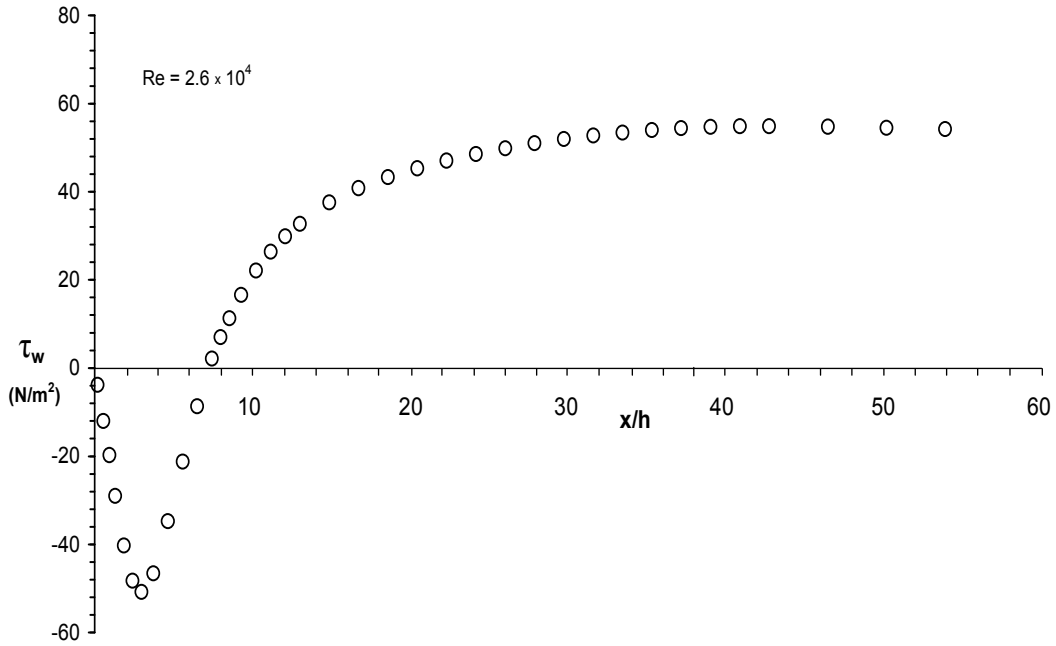


Şekil 2.61. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Escudier ve Smith'in (1999) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

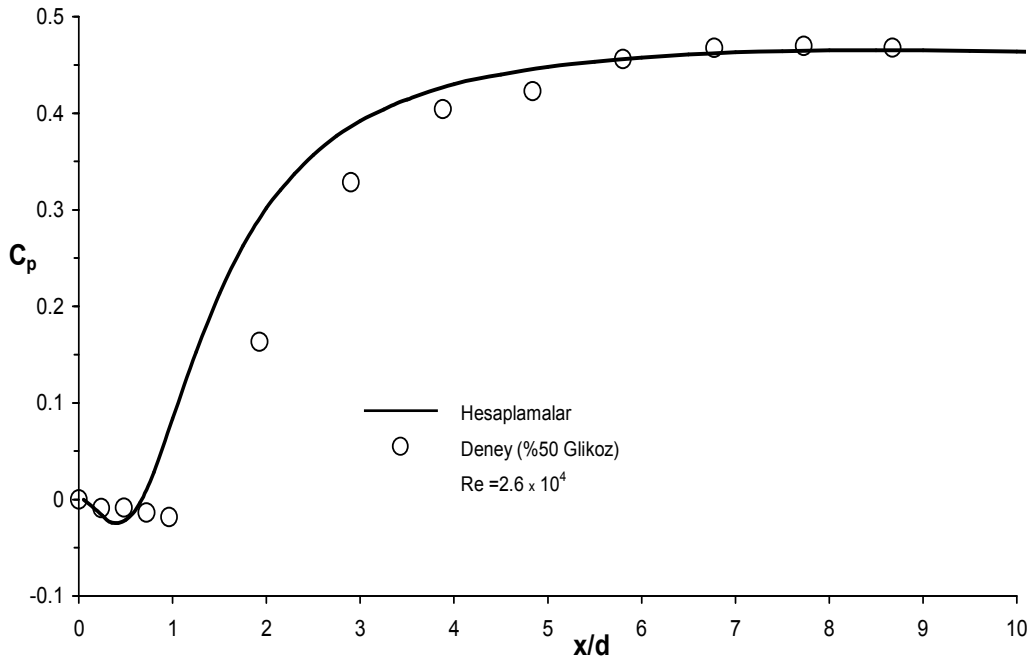


Şekil 2.62. Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

Escudier ve Smith'in (1999) akış durumu için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.63'te verilmiştir. Anigenişlemeli akış borusu boyunca cidar statik-basınç katsayısı ölçümlerinin sayısal hesaplamalarla olan uyumu Şekil 2.64'ten görülmektedir.



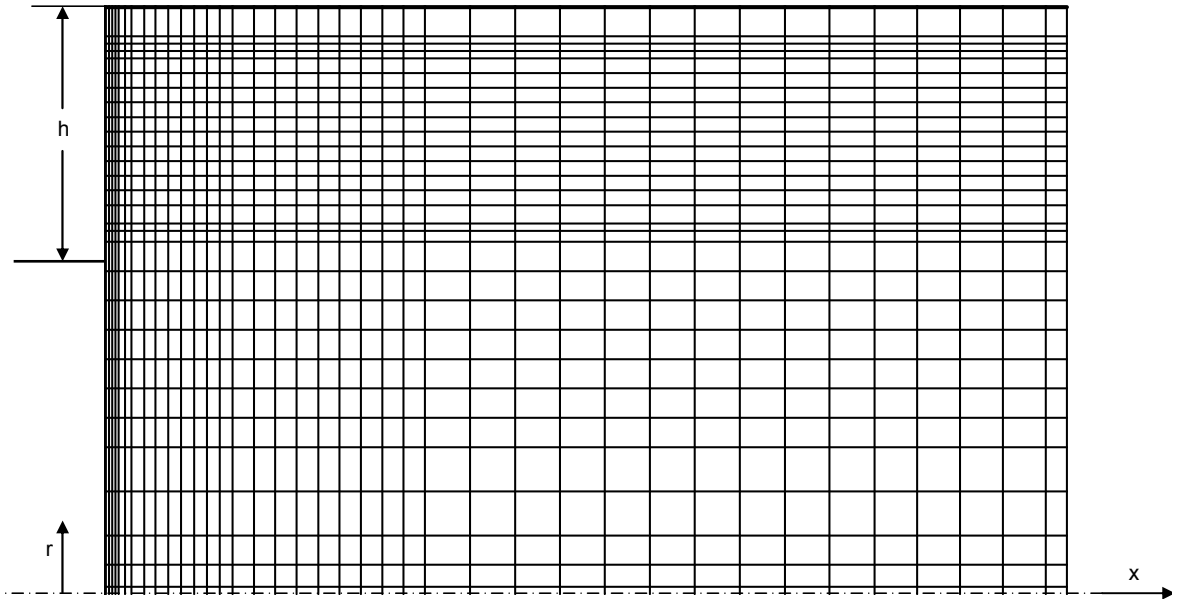
Şekil 2.63. Escudier ve Smith'in (1999) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 2.64. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Escudier ve Smith'in (1999) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

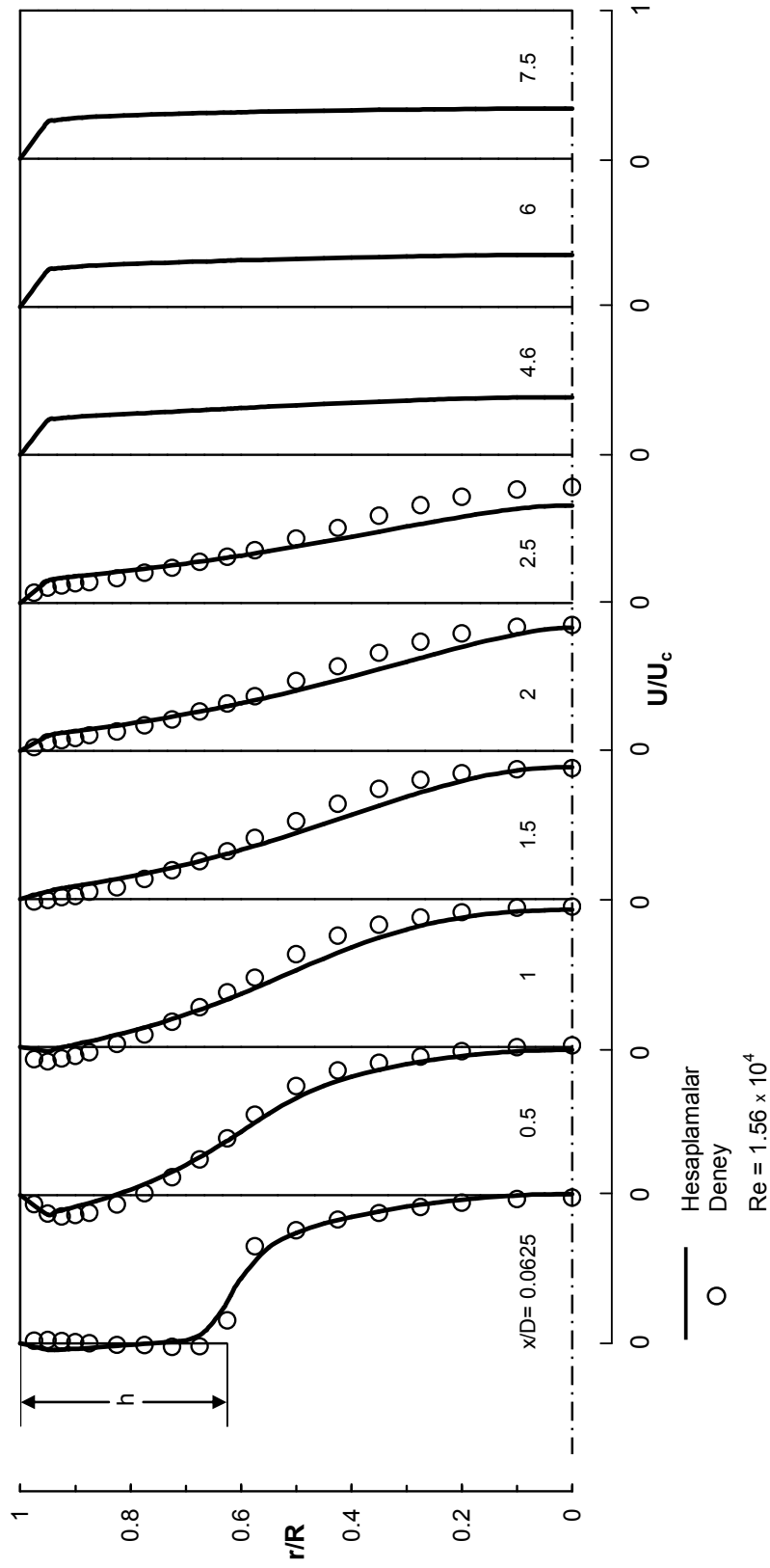
Stieglmeier et al. (1989), değişik genişleme açıları için büyük çaplı borudaki türbülanslı akışı incelemiştir. Stieglmeier et al.'ın (1989), doksan derecelik genişleme açısı için yaptığı ölçümler anigenişlemeli bir boru akışını ifade ettiğinden dolayı, bu ölçümler sayısal hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

Bu akış durumunda girişte Reynolds sayısı 15600 dür ( $Re=U_b D_h / \nu$ , burada  $D_h$  difüzörün hidrolik çapıdır,  $D_h=(d+D)/2=65\text{mm}$  ve  $U_b=1.92\text{ m/s}$ ). Eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d=1.6$  dır. Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminde aşağı akışta  $x=7.5D$  kadar bir eksenel mesafeye genişletilmiştir. Şekil 2.65'teki ağ, Stieglmeier et al.'ın (1989) akış durumu için oluşturulmuş ve  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiştir.

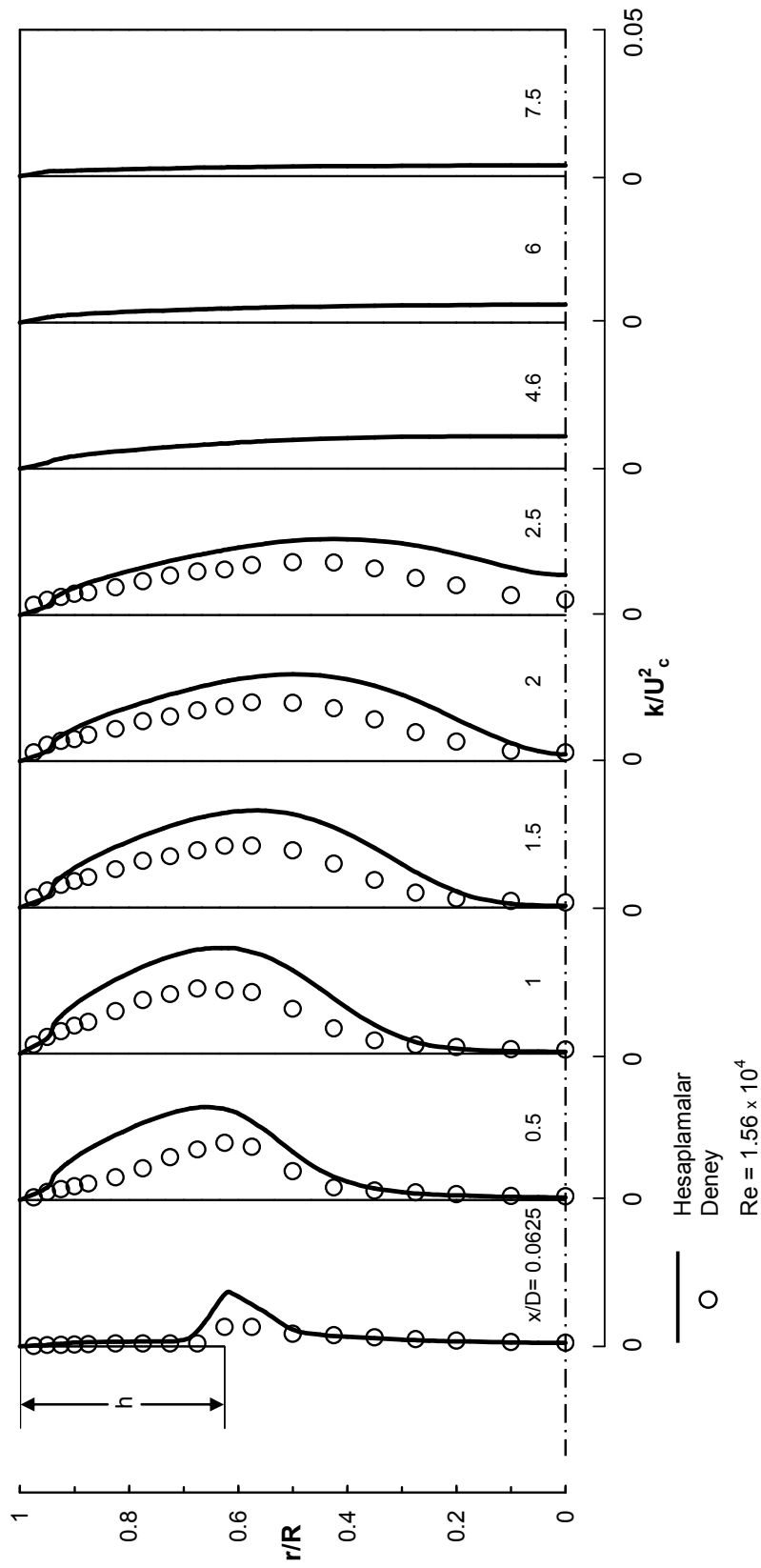


Şekil 2.65. Stieglmeier et al.'ın (1989) akış durumu için sayısal ağ dağılımı.

$x/D=0.0625$ 'den  $x/D=7.5$ 'e kadar olan 9 eksenel kesitte, hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümlerin karşılaştırılması sırasıyla, Şekil 2.66 ve Şekil 2.67'de gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji değerleri sırasıyla  $U_c$  ve  $U_c^2$  ile boyutsuzlaştırılmıştır ( $U_c=2.51\text{ m/s}$ ). Şekil 2.66'daki uyum oldukça iyidir. Şekil 2.67'den görüldüğü gibi, türbülans kinetik enerji değerleri deneysel ölçümlerin biraz üzerinde hesaplanmıştır.

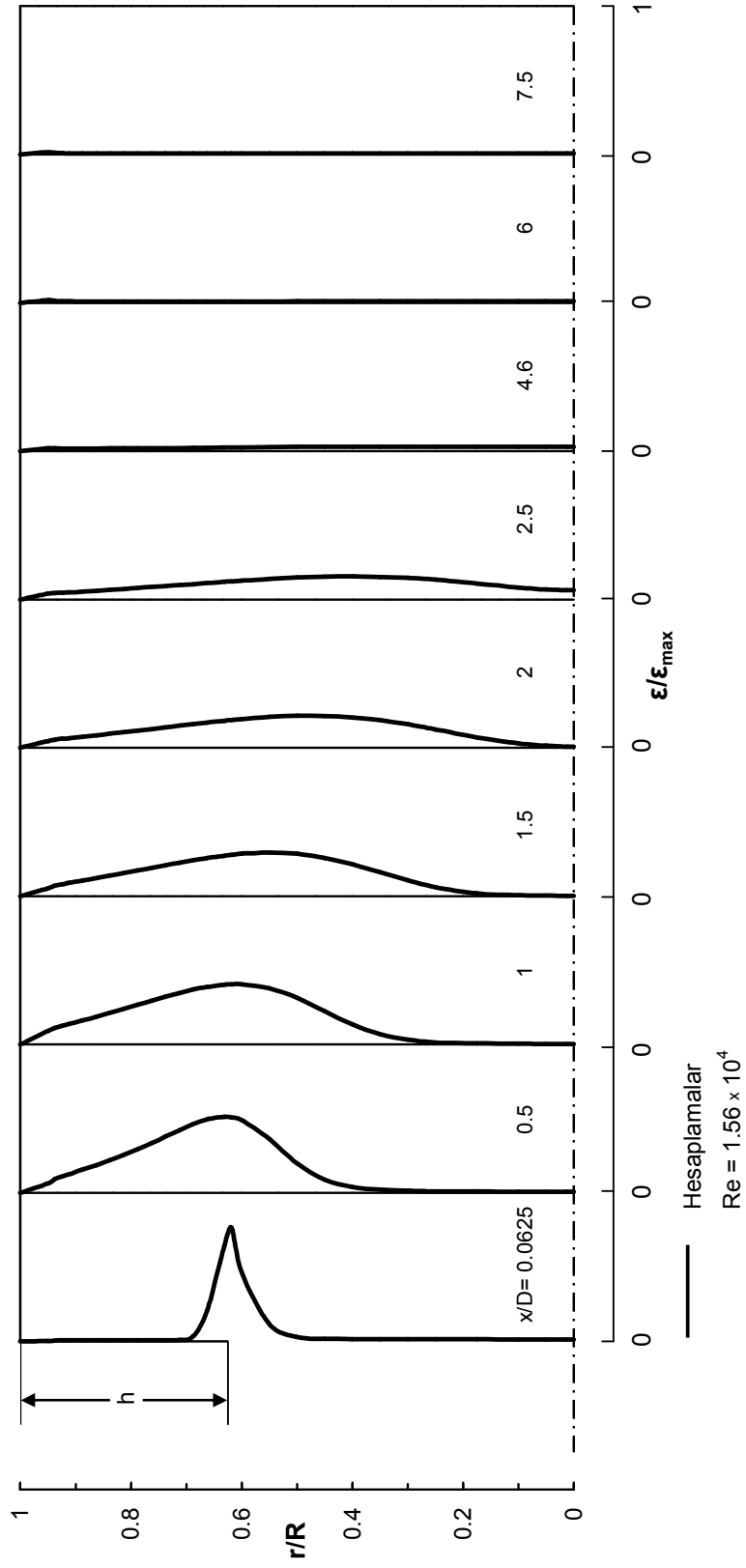


Şekil 2.66. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Stieglmeier et al.'ın (1989) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

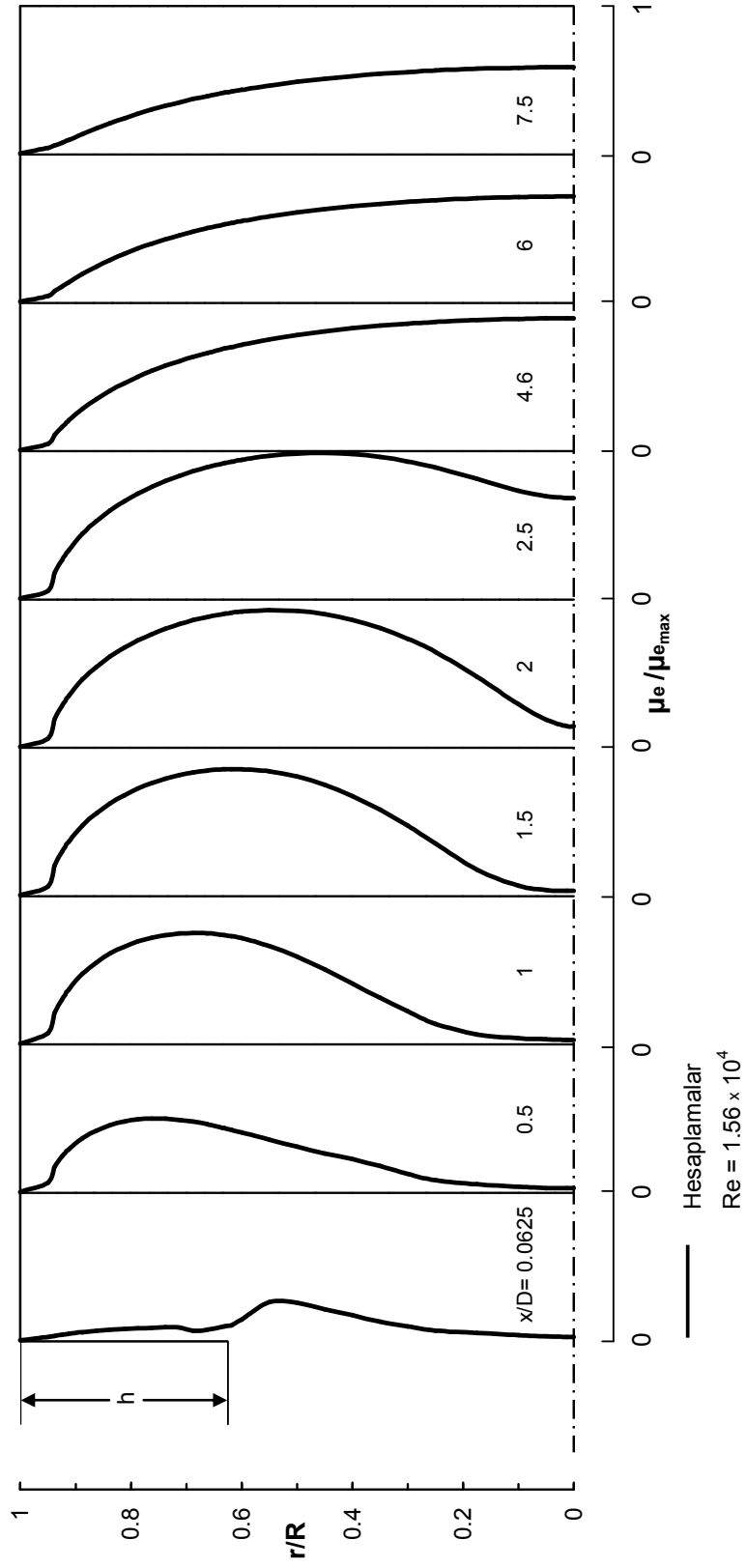


Şekil 2.67. Eksenel simetrik anijenleşmeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Stieglmeier et al.'ın (1989) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

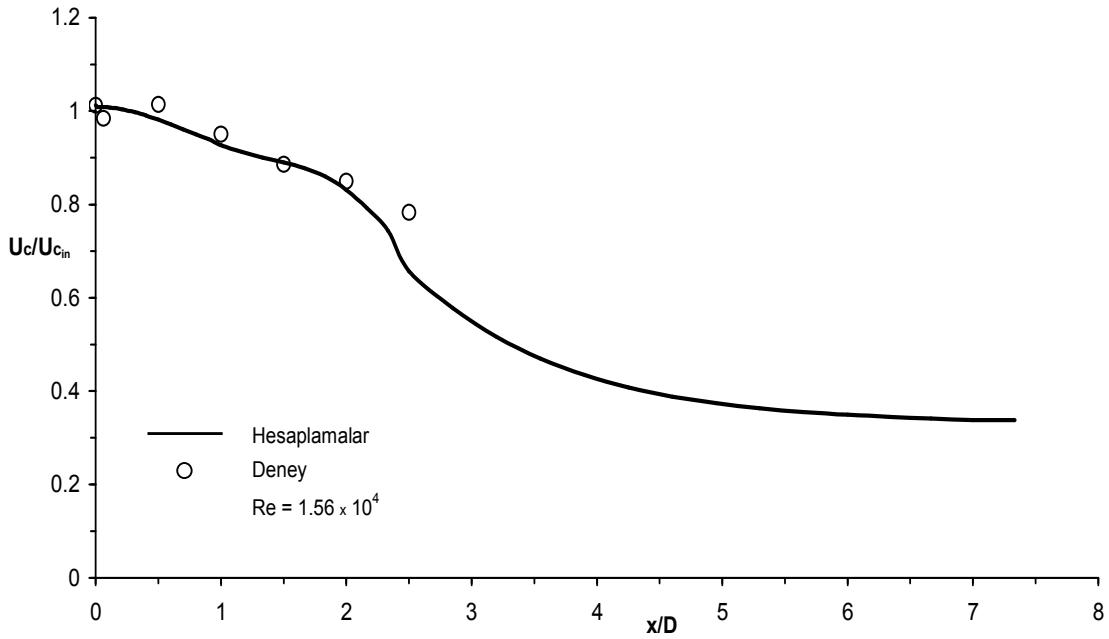




Şekil 2.68. Stieglmeier et al.'in (1989) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.69. Stieglmeier et al.'ın (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

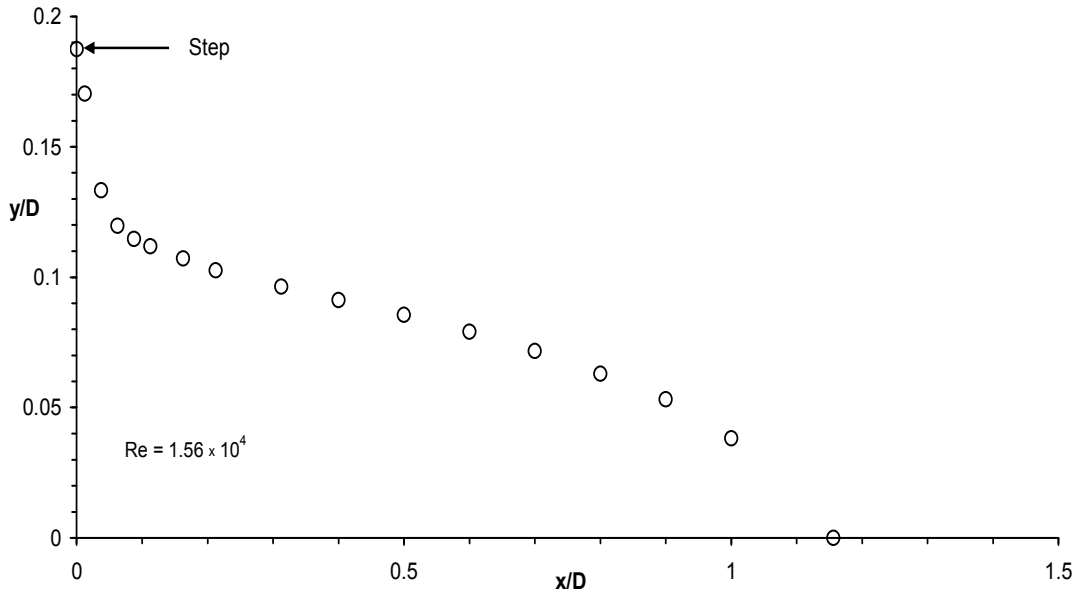


Şekil 2.70. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Stieglmeier et al.'in (1989) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

Stieglmeier et al.'in (1989) eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profilleri, sırasıyla Şekil 2.68 ve Şekil 2.69'da gösterilmektedir

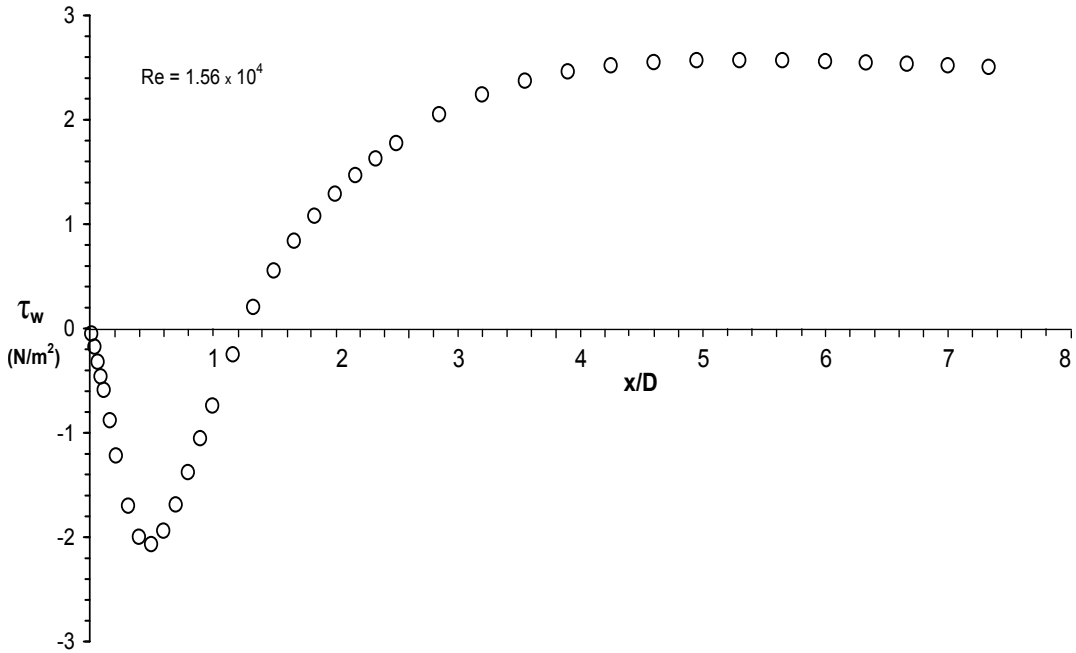
Simetri eksenindeki aksel hız değerleri, anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanıp Stieglmeier et al.'in (1989) deneysel bulgularıyla kıyaslandığında Şekil 2.70'teki gibi benzer eğilimler görülür. Hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Hesaplanan aksel hız yaklaşık olarak  $x/D=6.5$ 'ten itibaren sabit kalmaktadır.

Şekil 2.71'de Stieglmeier et al.'in (1989) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri gösterilmektedir. Akış tutunma uzunluğu değerinin yaklaşık olarak  $x_r=1.156D$  olarak hesaplandığı görülmektedir. Akış tutunma uzunluğunun deneysel değeri  $x_r=1.87D$  olarak verilmiştir.



Şekil 2.71. Stieglmeier et al.'ın (1989) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

Stieglmeier et al.'ın (1989) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.72'de verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından takriben  $x/D=1.2$  mesafesine kadar  $\tau_w$  negatiftir.



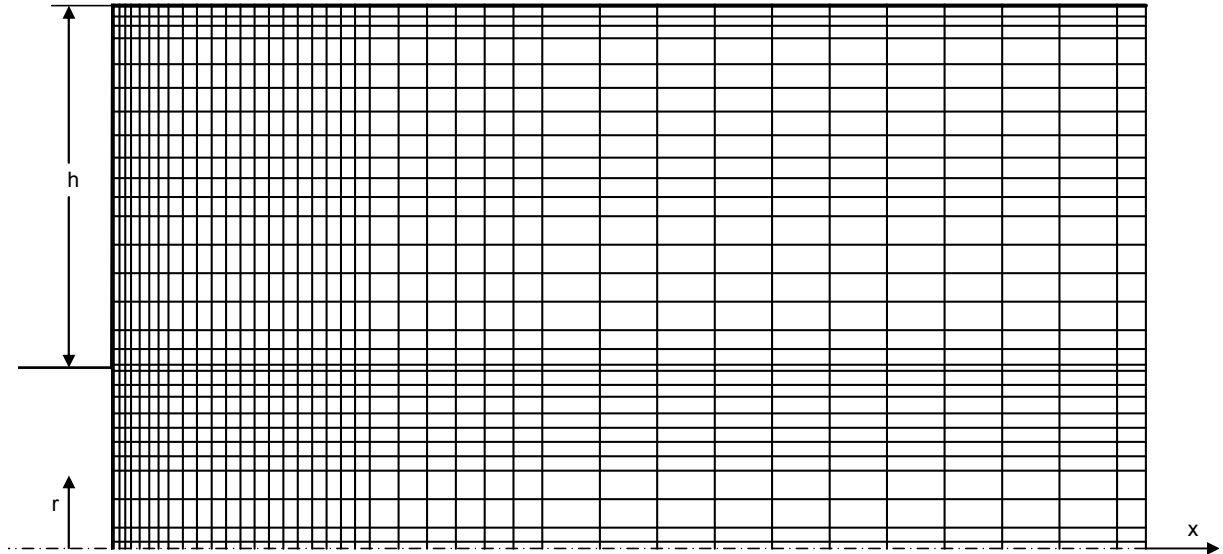
Şekil 2.72. Stieglmeier et al.'ın (1989) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Bir diğ er sayısal hesaplamanın sonuçları, Tinney et al.'ın (2006) anıgenişlemeli borusu boyunca sabit radyal mesafelerde yaptığı eksenel hız ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

Eksenel simetrik anıgenişlemeli boru  $D/d=3$  genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı 54000 olarak bildirilmiştir ( $Re=U_c d / \nu$ , burada  $U_c$  girişte simetri eksenindeki hızdır ve değeri 10.35 m/s dir). Çalışma akışkanı havadır.

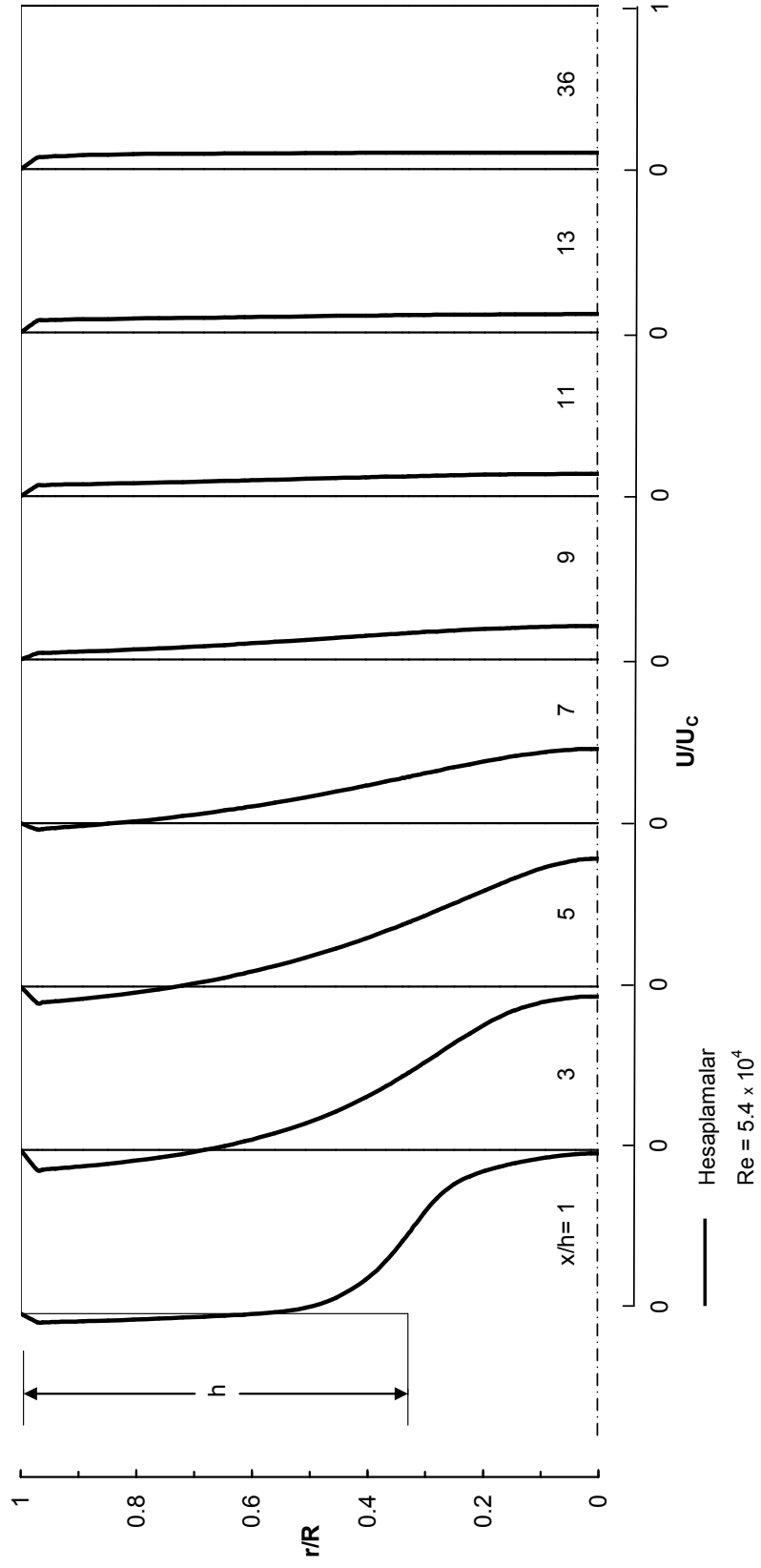
Hesaplama alanı, anıgenişlemeli boruda giriş düzleminde aşağı akışta  $x=36h$  kadar bir eksenel mesafeye uzatılmış ve çıkışta tam gelişmiş akış koşulları sağlanmıştır.

Tinney et al.'ın (2006) anıgenişlemeli borusu için  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelen sayısal akış ağı Şekil 2.73'te gösterilmiştir.



Şekil 2.73. Tinney et al. (2006) eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Hesaplanan eksenel hız değerleri,  $U_c$  ile boyutsuzlaştırılıp,  $x/h=1$ 'den  $x/h=36$ 'ya kadar olan 8 eksenel kesitte Şekil 2.74'te sunulmuştur.



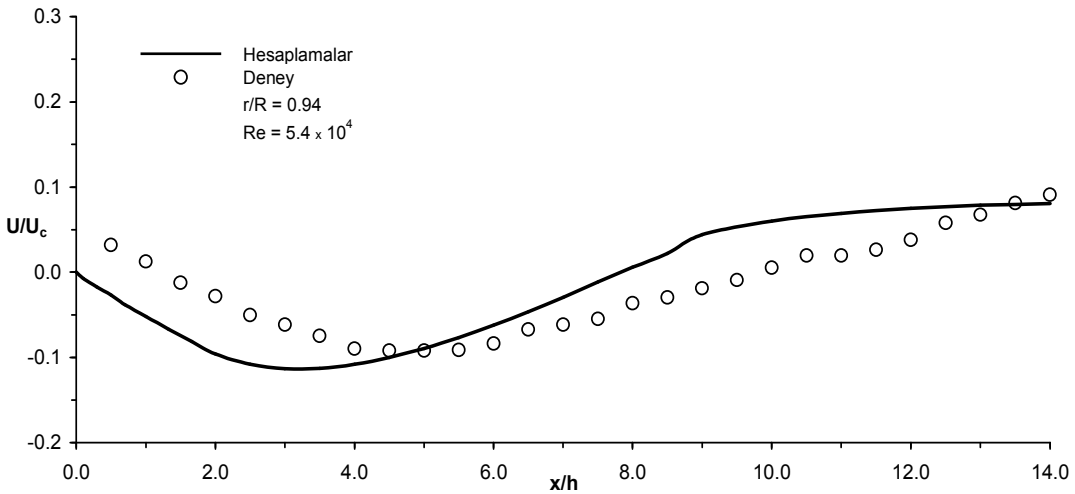
Şekil 2.74. Tinney et al.'in (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hız radyal profilleri

Tinney et al. (2006), 5 değişik sabit radyal mesafe için eksenel hız değerlerinin değişimlerini incelemiş ve bulgularını grafikler halinde sunmuştur.

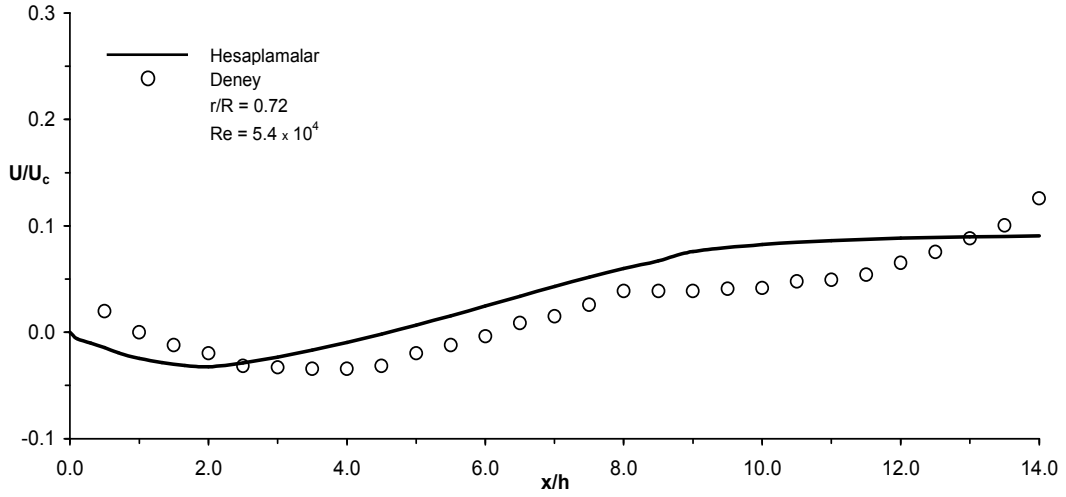
Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hızların sabit radyal mesafelerdeki ( $r/R=0.94$ ,  $r/R=0.72$ ,  $r/R=0.56$ ,  $r/R=0.28$ ,  $r/R=0.0$ ) değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.75, Şekil 2.76, Şekil 2.77, Şekil 2.78 ve Şekil 2.79'da verilmiştir.

Şekiller incelendiğinde genel olarak, hesaplanan ve ölçülen değerler arasında benzer eğilimlerin olduğu ancak giriş kesitlerine yakın olan ve anigenişlemenin olduğu  $r/R=0.33$  radyal mesafesi civarındaki bölgede daha büyük farklılıklar olduğu görülür.

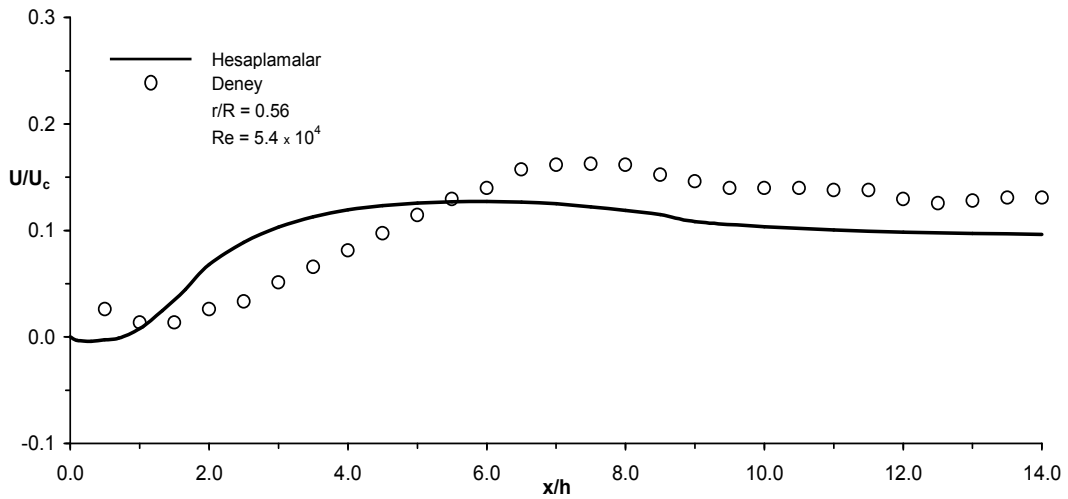
Bu durumun sebebi, anigenişleme oranının büyük olmasının yanı sıra bu bölgenin, hız gradyanlarının büyük olduğu türbülanslı çevrintili akış bölgesi olmasındandır.



Şekil 2.75. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.94$ ) hesaplanan eksenel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

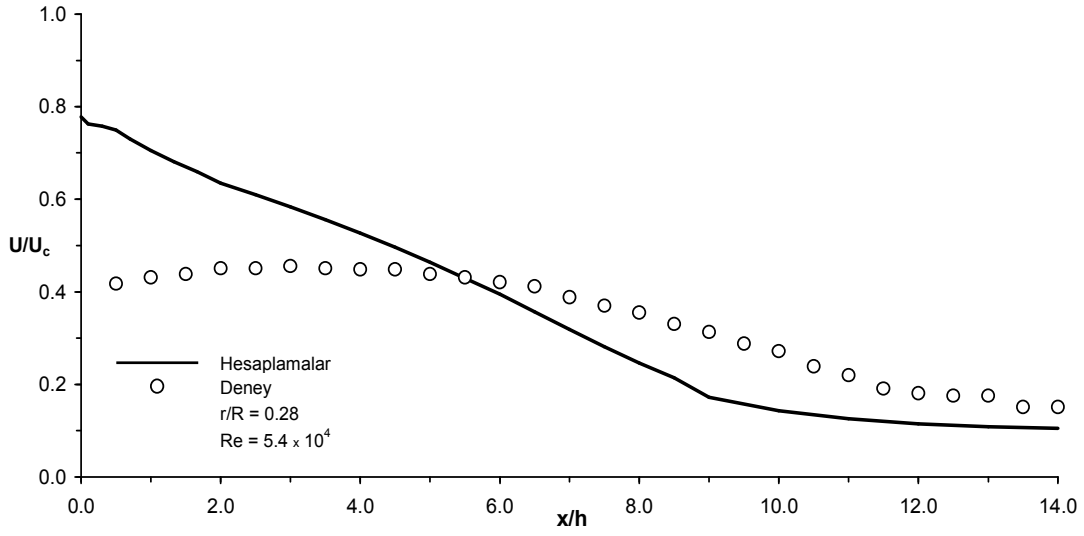


Şekil 2.76. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.72$ ) hesaplanan aksel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

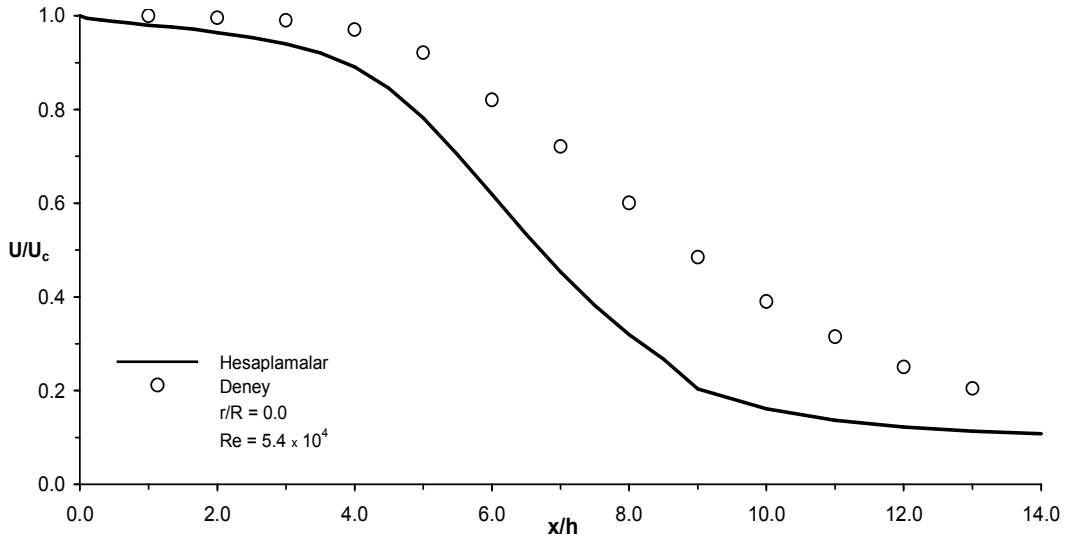


Şekil 2.77. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.56$ ) hesaplanan aksel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.





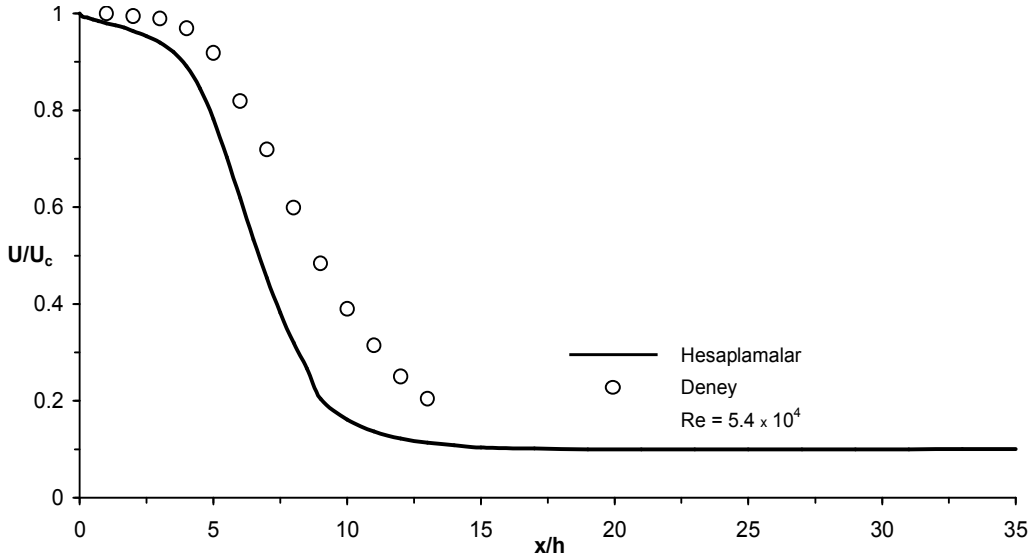
Şekil 2.78. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.28$ ) hesaplanan aksenal hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.79. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.0$ ) hesaplanan aksenal hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksenal hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması Şekil 2.80'de gösterilmiştir.

Ani genişlemeli akış borusu boyunca, hesaplanan simetri eksenini üzerindeki aksel hız deneysel ölçümlerden daha hızlı düşme göstermiştir. Simetri eksenini üzerindeki aksel hız yaklaşık olarak  $x/h=15$  mesafesinde sabit değerler almaktadır.

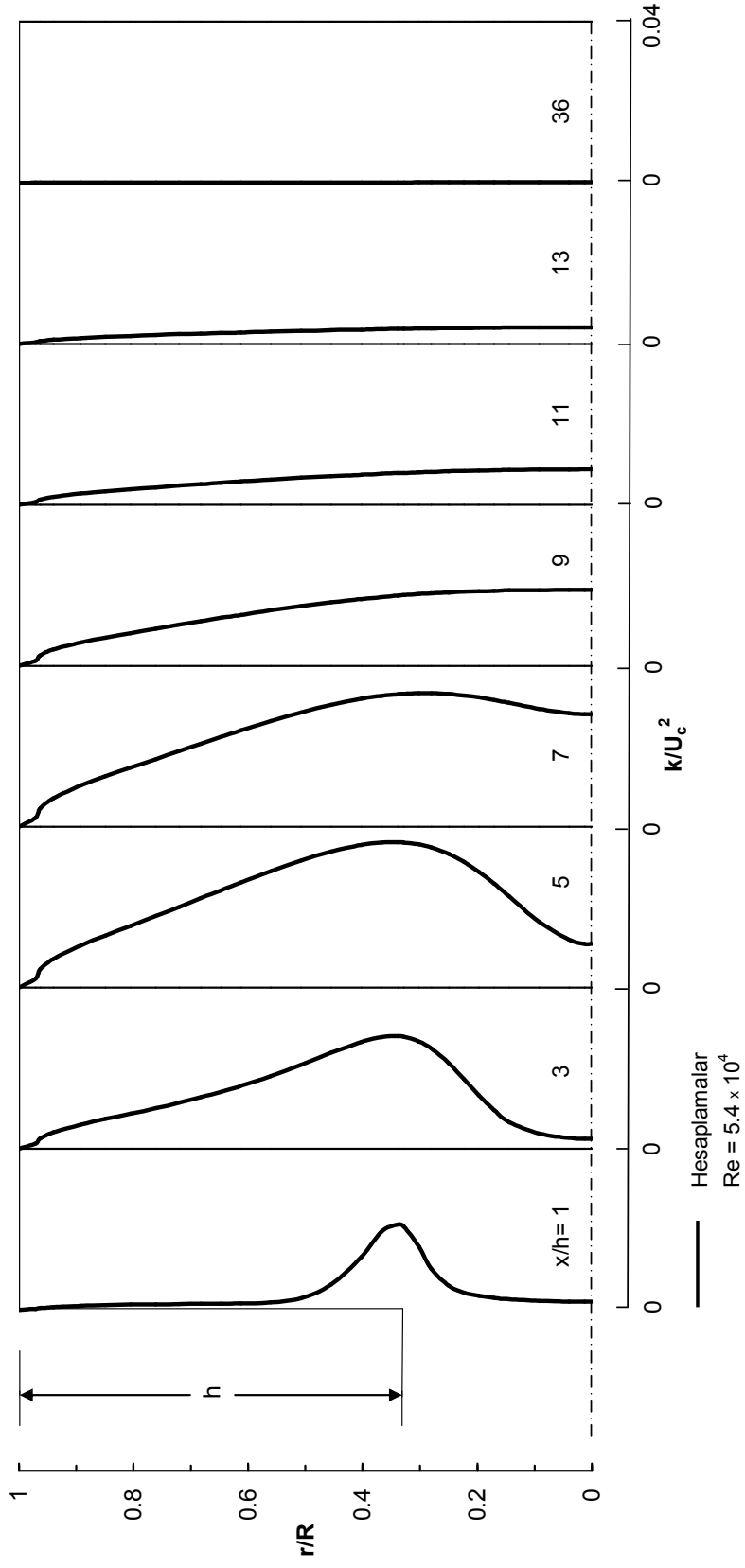


Şekil 2.80. Aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan aksel hızın Tinney et al.'ın (2006) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

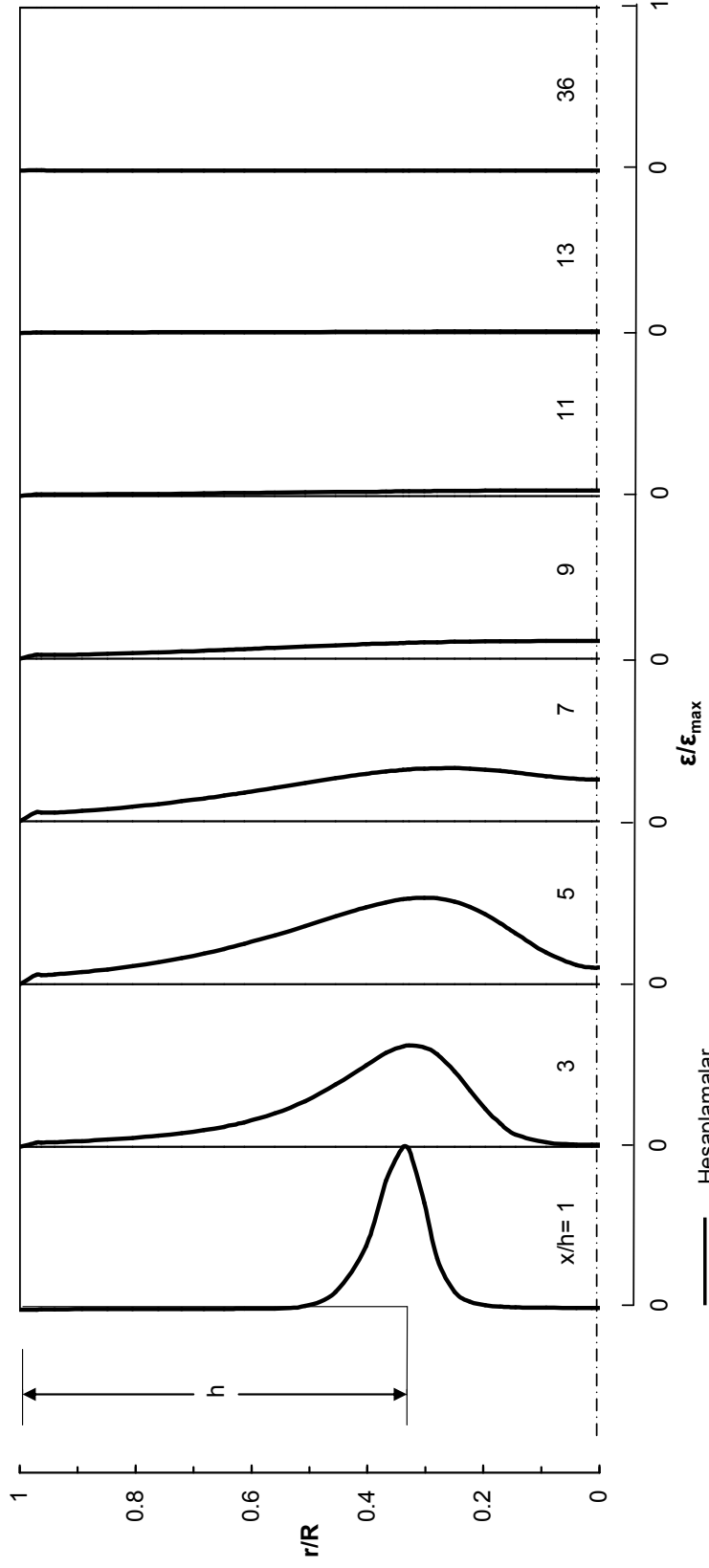
Tinney et al.'ın (2006) aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri sırasıyla Şekil 81 ve Şekil 82'de görülmektedir. Bu şekillerden türbülans kinetik enerjinin ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarının maksimum değerlerinin yaklaşık olarak, ani genişlemenin olduğu  $r/R=0.33$  sabit radyal mesafesi boyunca hesaplandığı görülmektedir.

Tinney et al.'ın (2006) akış durumu için hesaplanan efektif viskozite radyal profilleri ve geri akışın geometrik yeri Şekil 2.83 ve Şekil 2.84'te gösterilmektedir. Deneysel olarak  $x_r=9h$  olarak ölçüldüğü bildirilen akış tutunma uzunluğu değeri yaklaşık olarak  $x_r=8.1h$  olarak hesaplanmıştır.

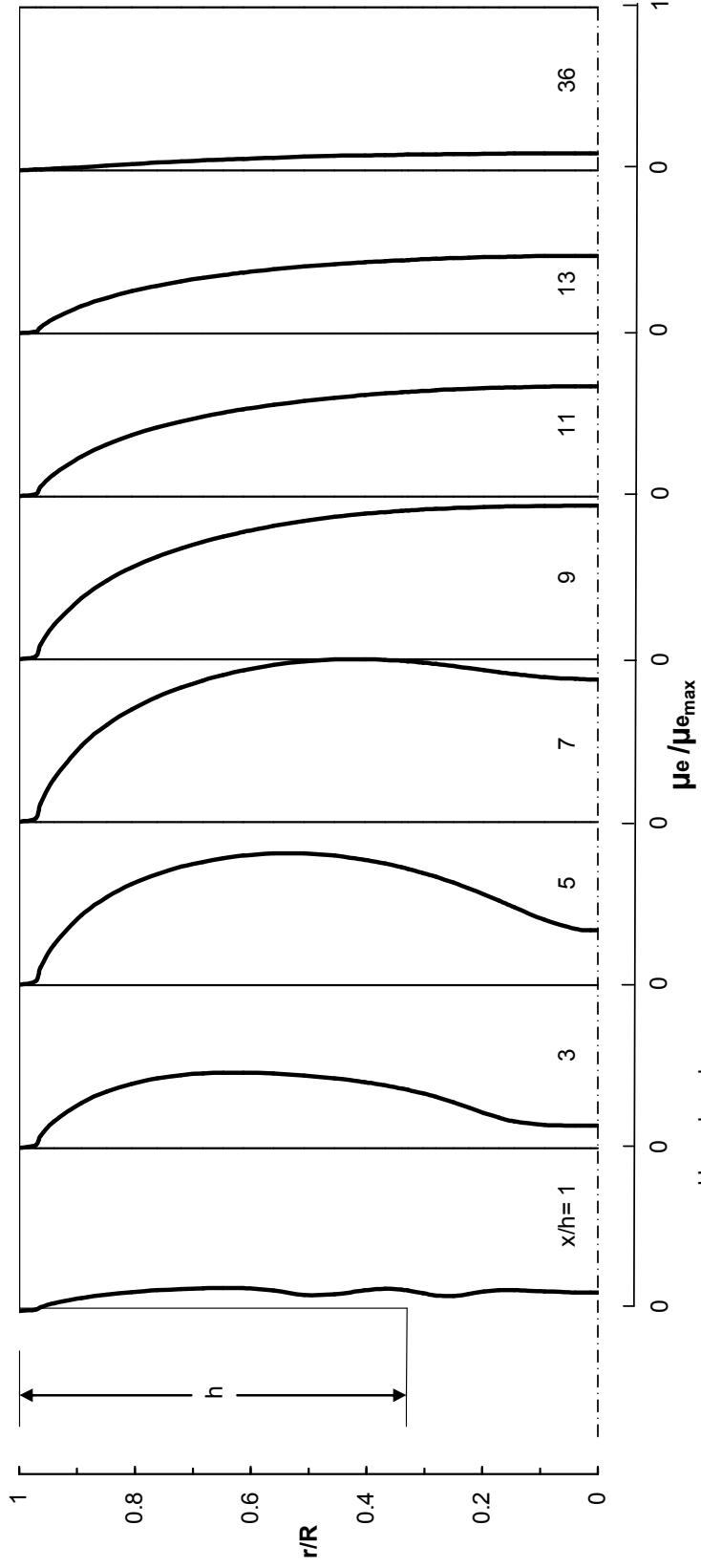
Şekil 2.85'te Tinney et al.'ın (2006) aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi görülmektedir.  $\tau_w$  yaklaşık olarak  $x/h=8$  kesitine kadar negatif değerler almaktadır.



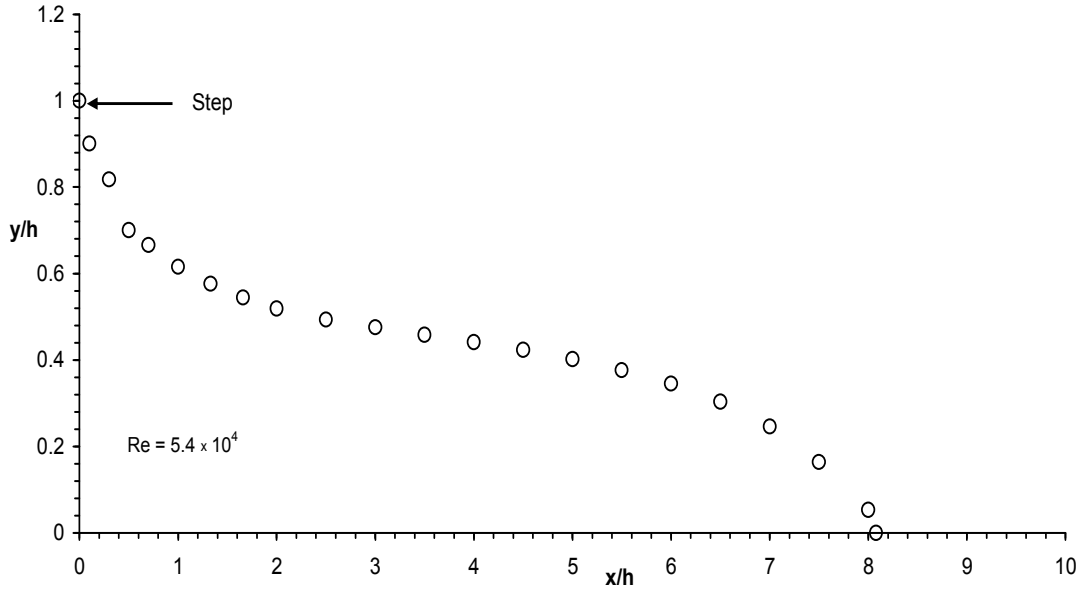
Şekil 2.81. Tinney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişleme li akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



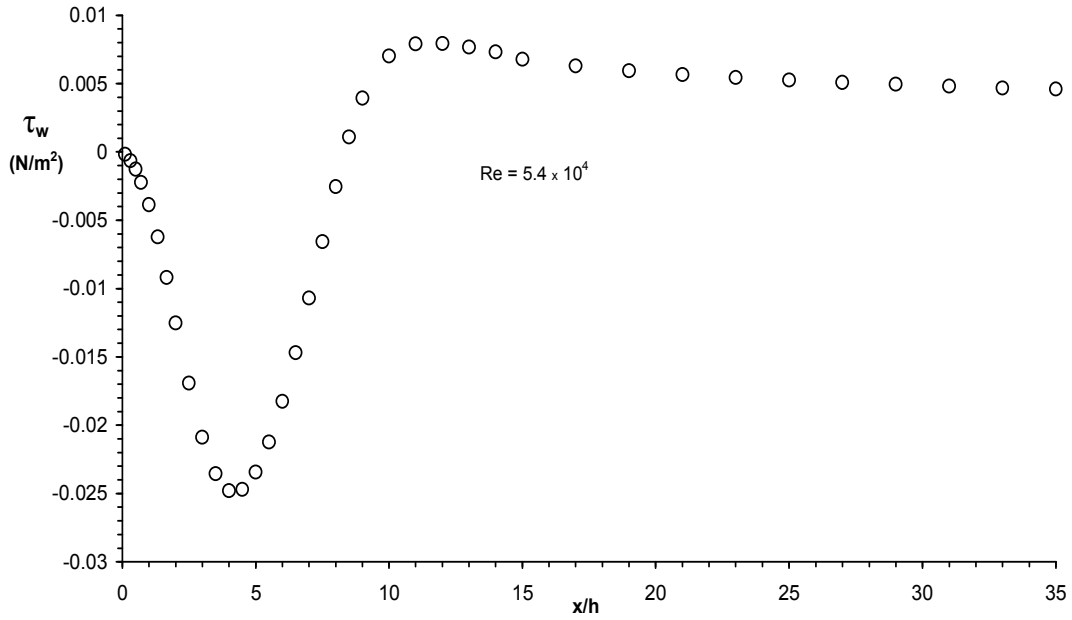
Şekil 2.82. Timney et al.'in (2006) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.83. Timney et al.'ın (2006) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



Şekil 2.84. Tinney et al.'ın (2006) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



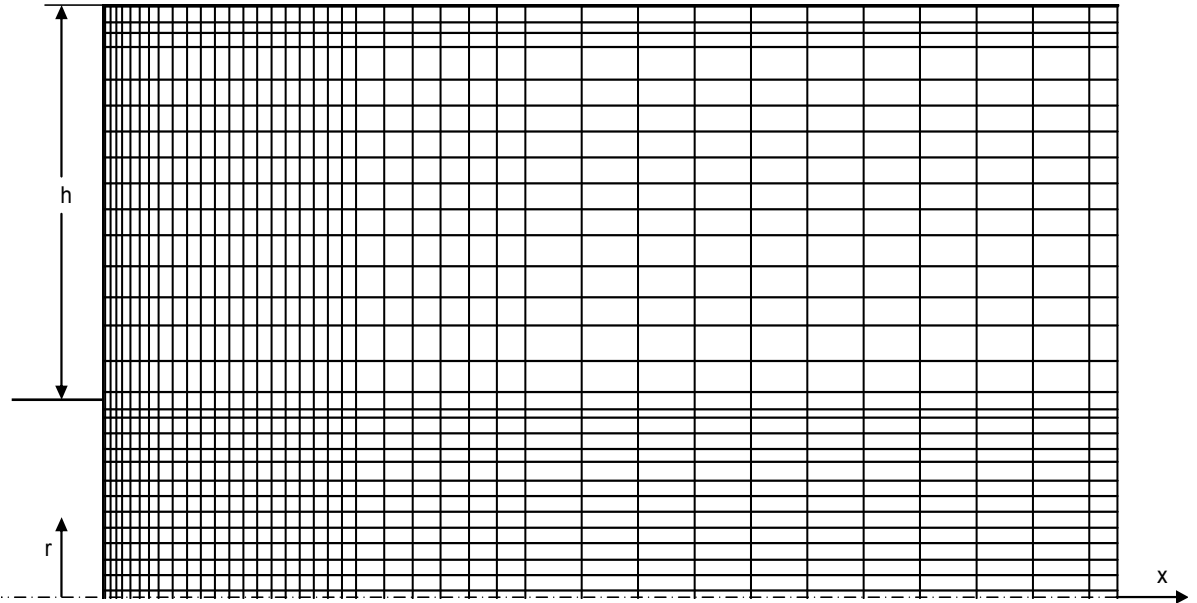
Şekil 2.85. Tinney et al.'ın (2006) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

Bu sayısal hesaplamada, Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleri ile karşılaştırma yapılmıştır.

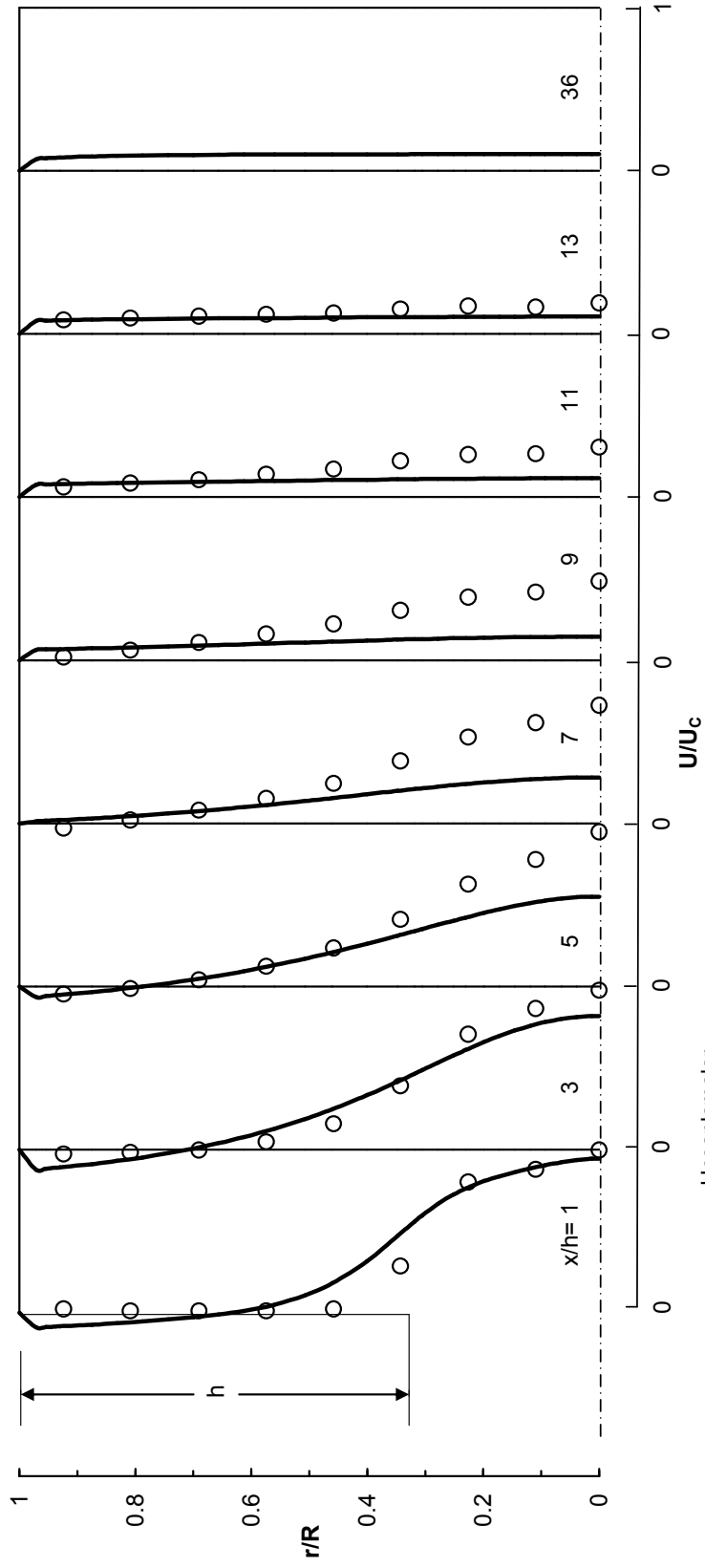
Eksenel simetrik anigenişlemeli boru  $D/d=3$  genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı 41000 olarak bildirilmiştir ( $Re=U_b d / \nu$ , burada  $U_b$  debiden hesaplanan ortalama hızdır). Çalışma akışkanı havadır. Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminde aşağı akışta  $x=36h$  kadar bir eksenel mesafeye uzatılmıştır.

Cole ve Glauser'ın (1998a) akış durumu için oluşturulmuş sayısal ağ dağılımı, Şekil 2.86'da gösterilmiştir. Sayısal ağ  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelmiştir.

Hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümlerin  $x/h=1$ 'den  $x/h=36$ 'ya kadar olan 8 eksenel kesitte karşılaştırılması sırasıyla, Şekil 2.87 ve Şekil 2.88'de gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız değerleri anigenişlemeli akış borusu girişindeki simetri eksenini üzerindeki eksenel hız ( $U_c=10.25$  m/s) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Genişleme oranı büyük olduğundan dolayı, bu sayısal hesaplamaların deneysel verilerden daha fazla sapması da normal karşılanmalıdır.

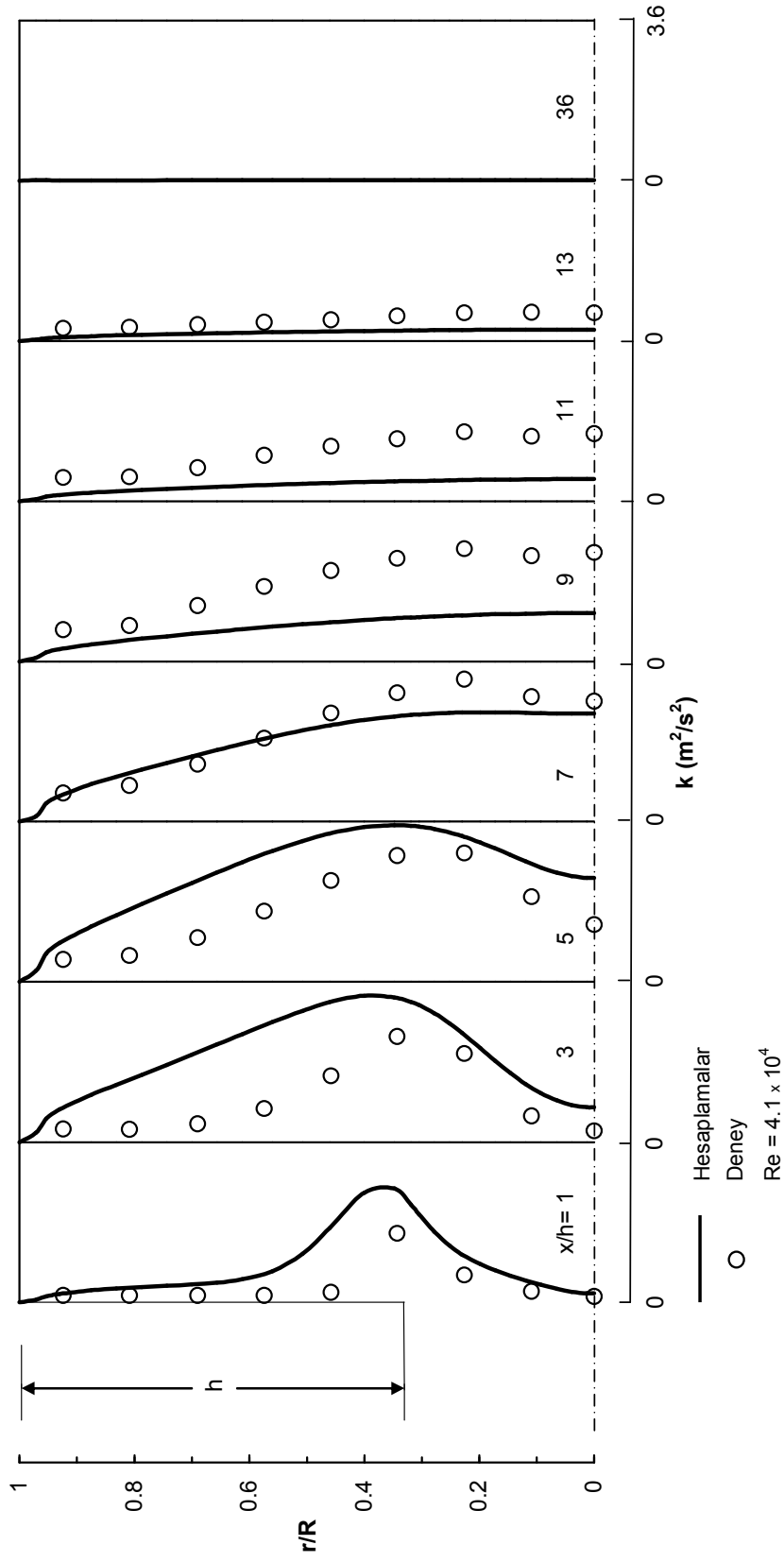


Şekil 2.86. Cole ve Glauser'ın (1998a) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



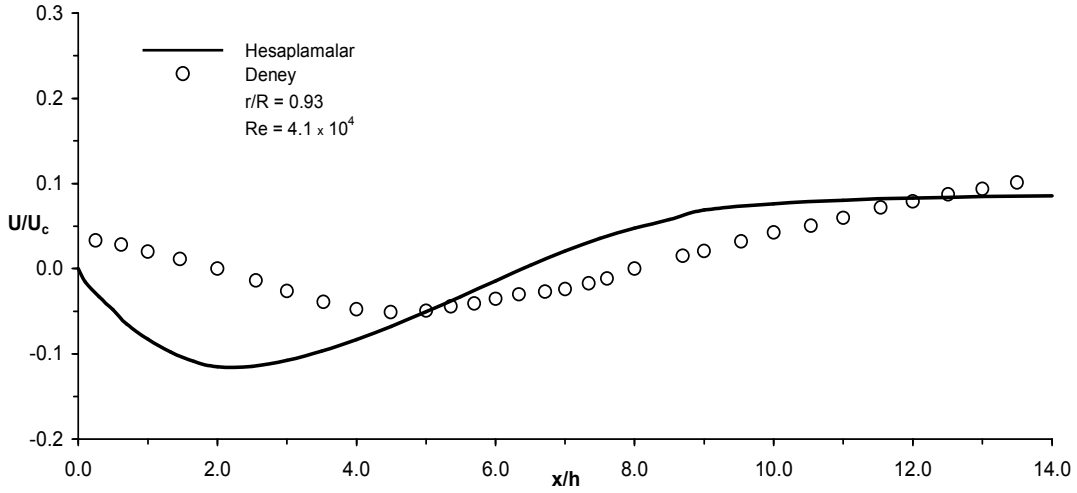
Şekil 2.87. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.





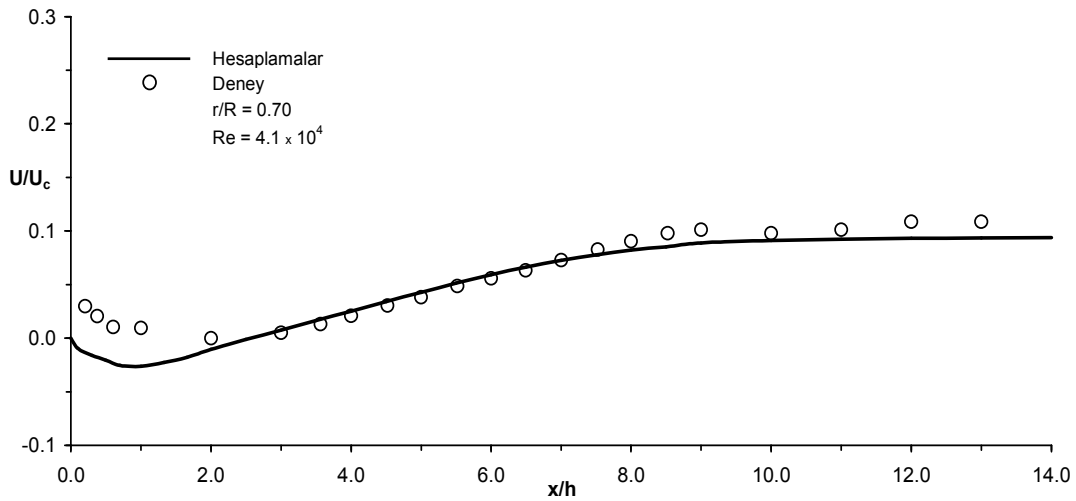
Şekil 2.88. Eksenel simetrik anisotropik akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Cole ve Glauser<sup>3</sup> in (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Cole ve Glauser (1998a) da değişik sabit radyal mesafeler için eksenel hız değerlerini ölçmüştür. Cole ve Glauser'ın (1998a) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hızların sabit radyal mesafelerdeki ( $r/R=0.93$ ,  $r/R=0.70$ ,  $r/R=0.46$ ,  $r/R=0.23$ ,  $r/R=0.0$ ) değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.89, Şekil 2.90, Şekil 2.91, Şekil 2.92 ve Şekil 2.93'te gösterilmiştir.

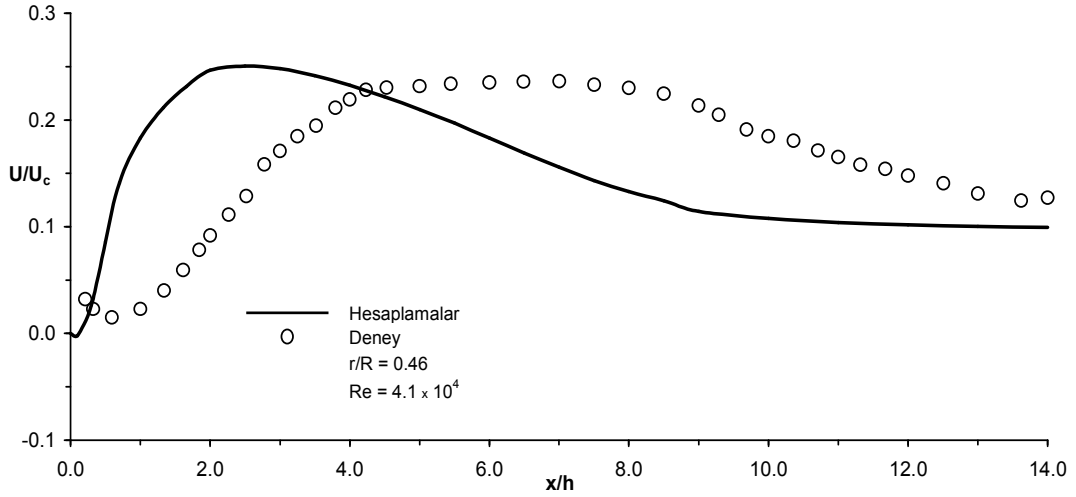


Şekil 2.89. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.93$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

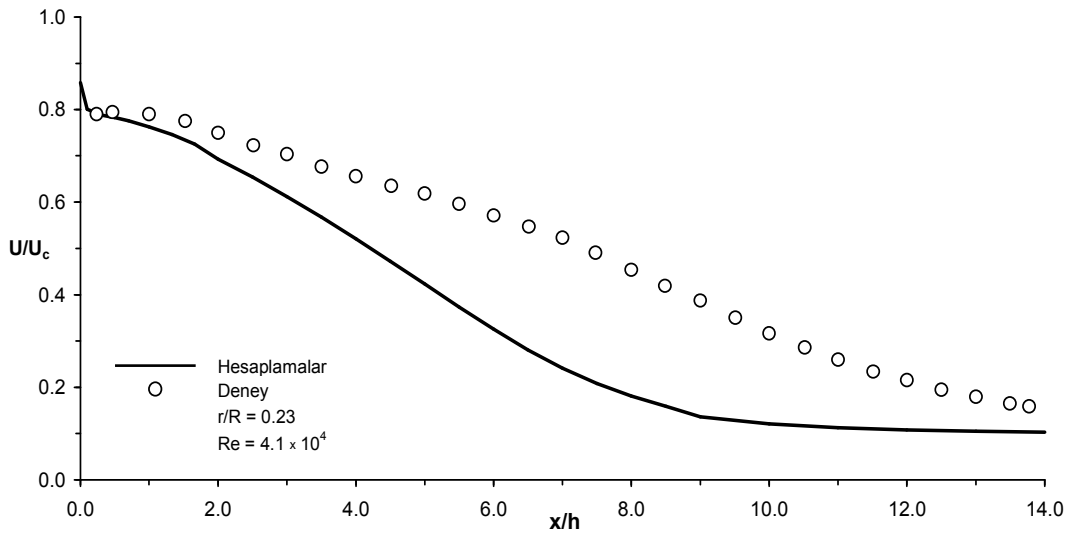
Şekiller incelendiğinde genel olarak, standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelinin akışı daha çabuk geliştirdiği ve çevrıntili akış bölgesinin girişe yakın olan kısımlarında uyumun daha az olduğu söylenebilir.



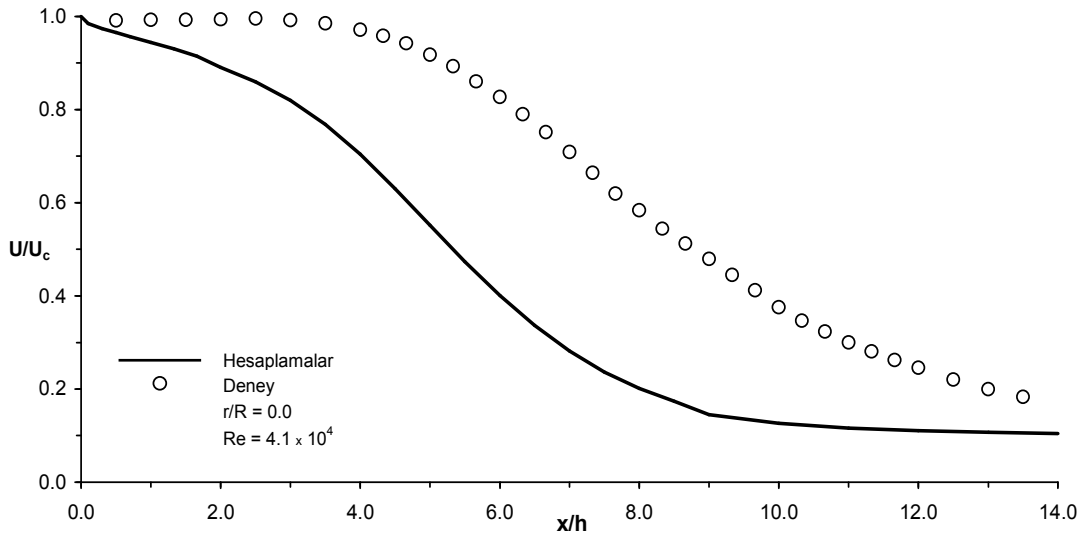
Şekil 2.90. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.70$ ) hesaplanan eksenel hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.91. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.46$ ) hesaplanan aksenal hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

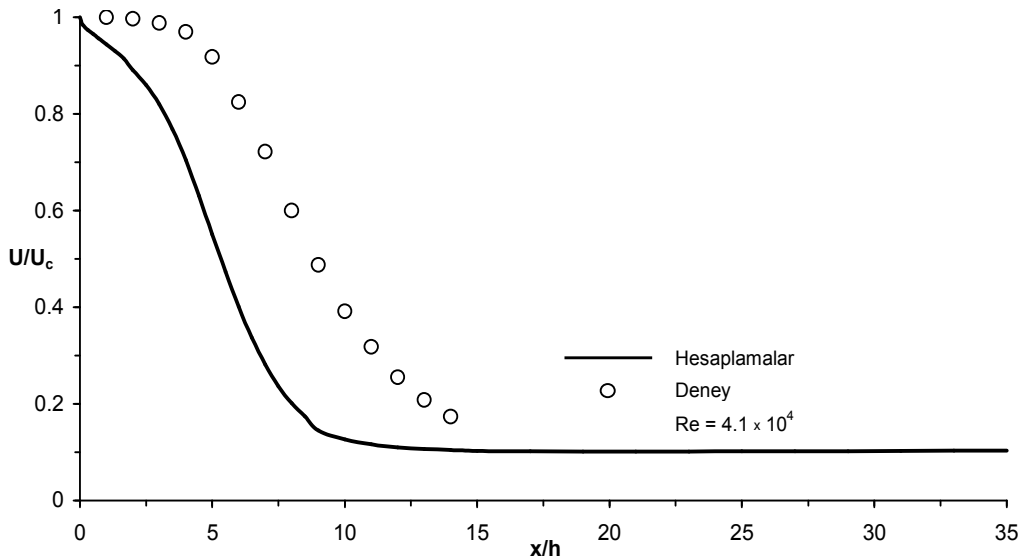


Şekil 2.92. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.23$ ) hesaplanan aksenal hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



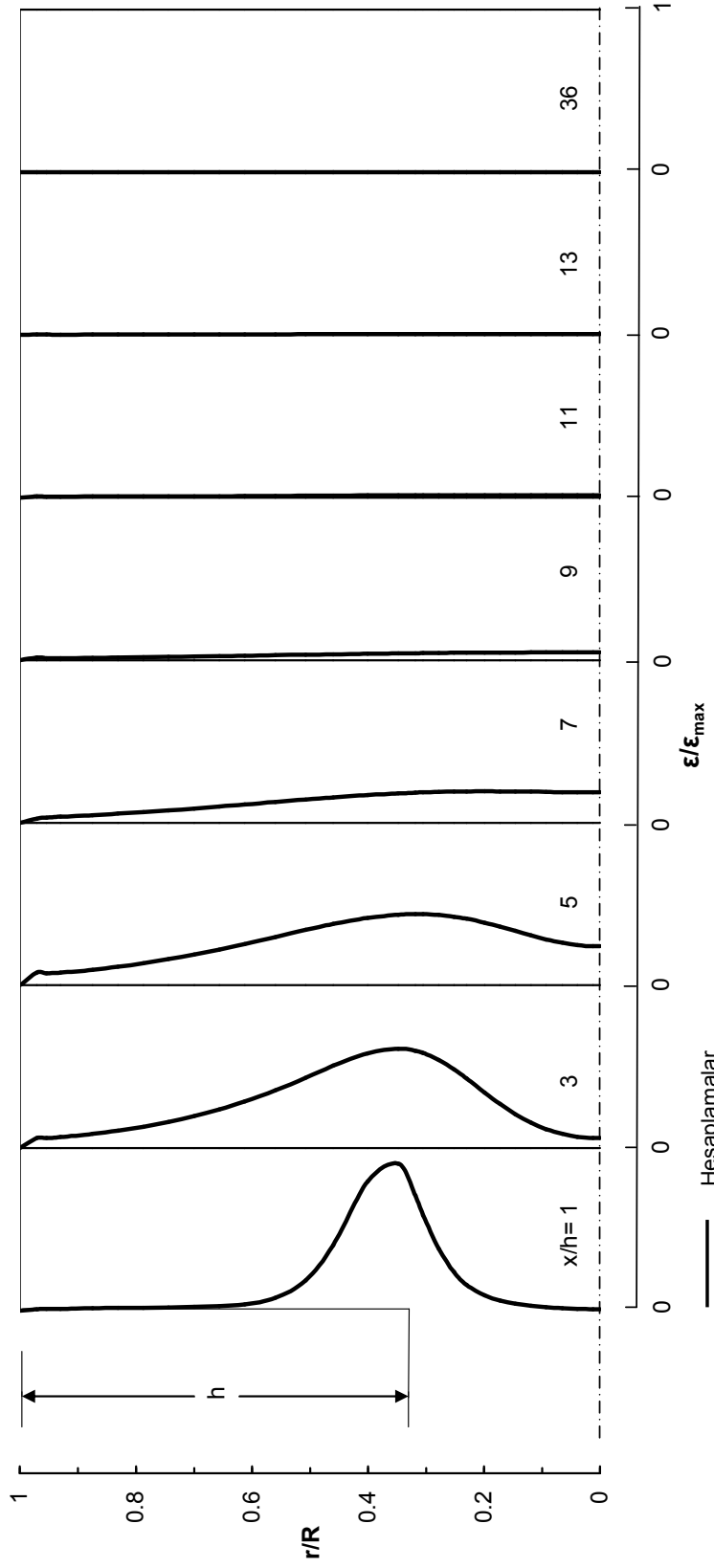
Şekil 2.93. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca sabit radyal mesafede ( $r/R=0.0$ ) hesaplanan aksenal hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, Şekil 2.94'te verilmiştir. Akış tutunma uzunluğu ( $x_r=9h$ ) yakınlarında hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasındaki fark artmaktadır.

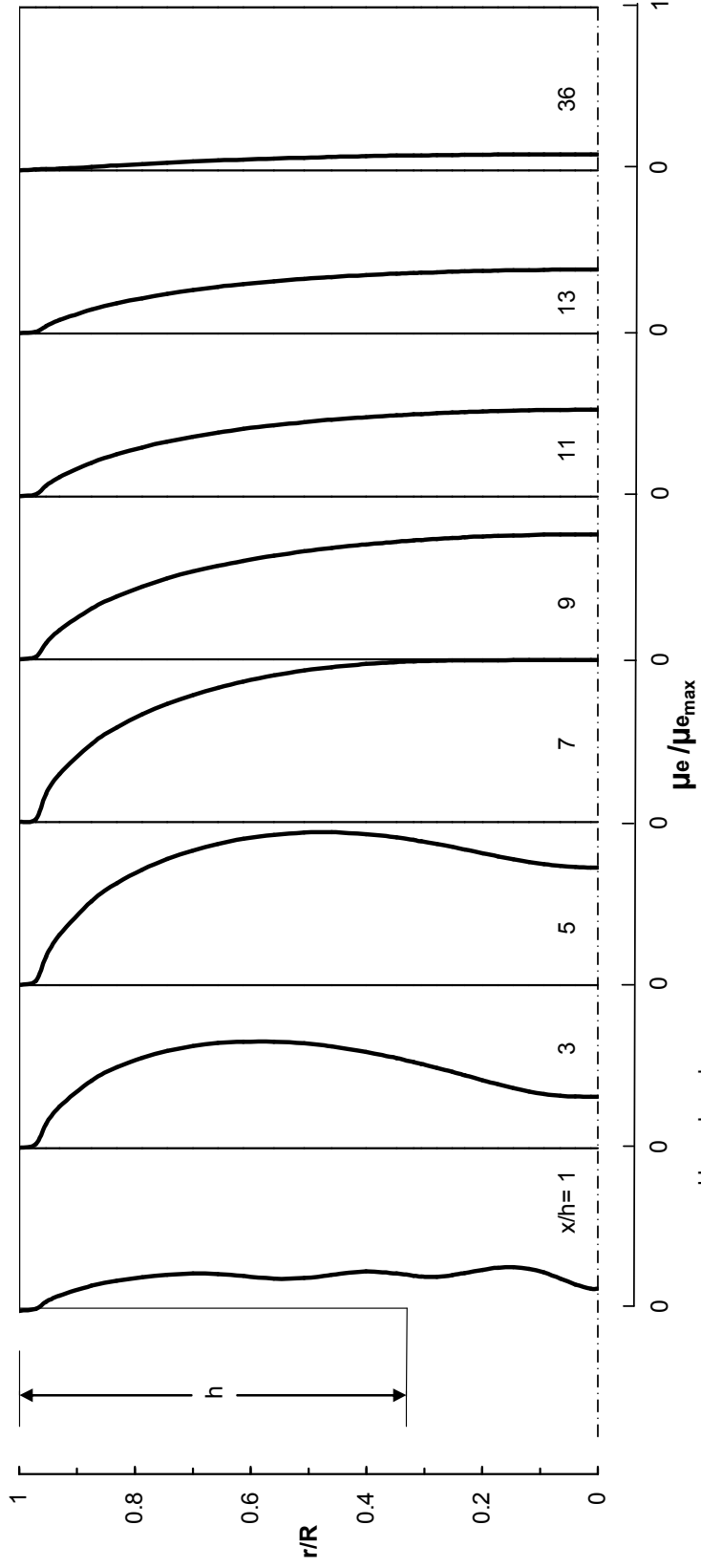


Şekil 2.94. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Cole ve Glauser'ın (1998a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

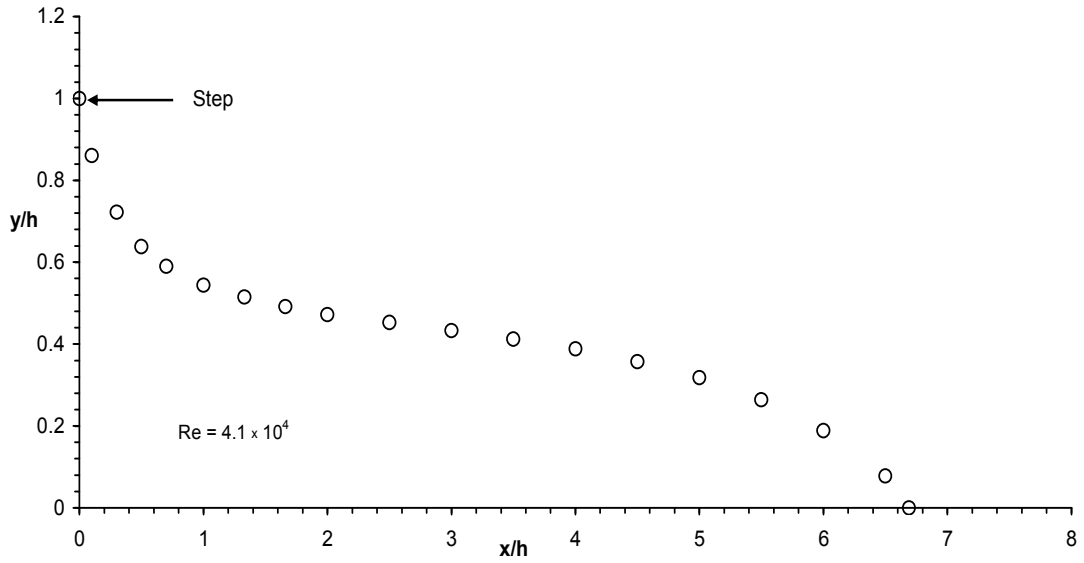
Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenal simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profilleri, sırasıyla Şekil 2.95 ve Şekil 2.96'da gösterilmektedir.



Şekil 2.95. Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

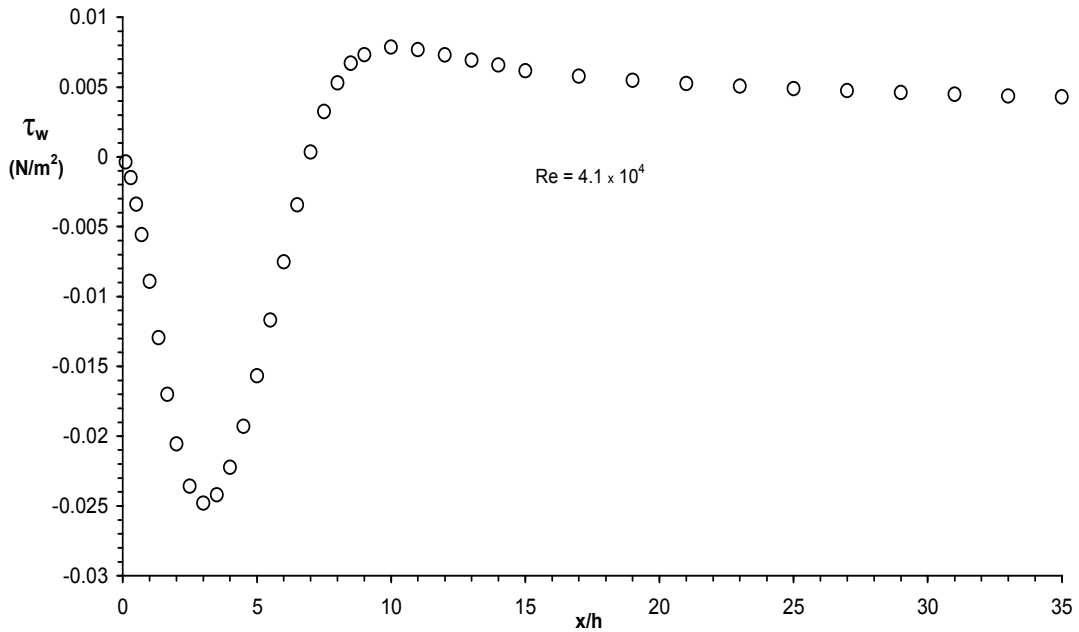


Şekil 2.96. Cole ve Glauser'ın (1998a) aksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



Şekil 2.97. Cole ve Glauser'ın (1998a) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

Cole ve Glauser'ın (1998a) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ve cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.97 ve Şekil 2.98'de verilmiştir. Akış tutunma uzunluğu takriben  $x_r=6.7h$  hesaplanmıştır. Deneysel akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak  $x_r=9h$  değerinde olduğu bildirilmiştir.



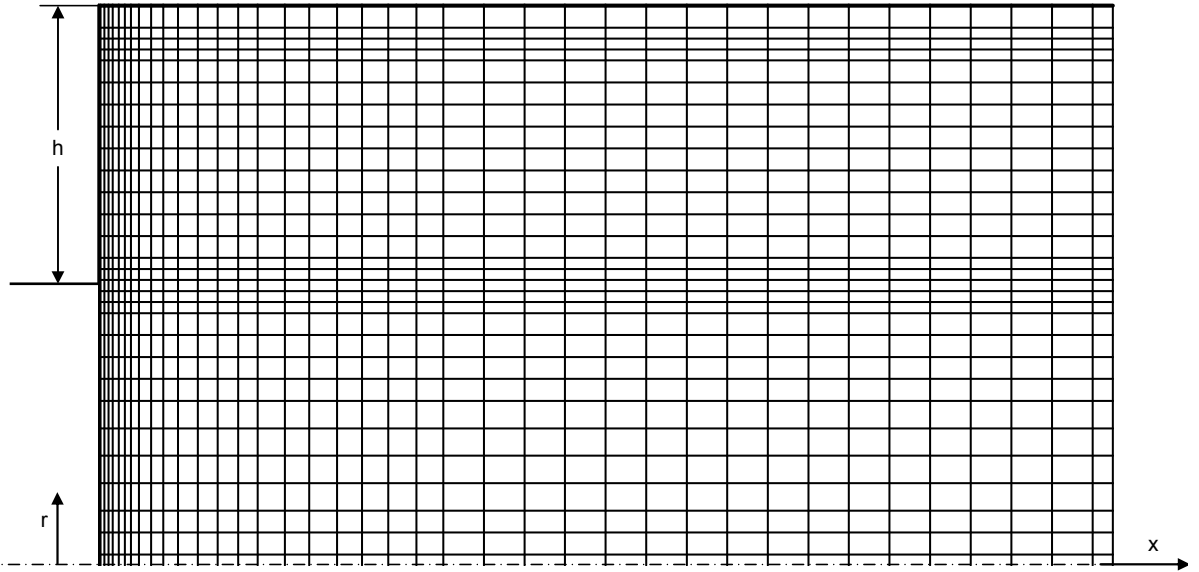
Şekil 2.98. Cole ve Glauser'ın (1998a) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

Founti ve Klipfel (1998), aksel simetrik anigenişlemeli bir borudaki akış içine katı parçacık salınımının etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Aşağıdaki sayısal çalışmanın sonuçları, Founti ve Klipfel'in (1998) parçacık salınmamış (single phase) akış durumunda yaptıkları deney bulguları ile mukayese edilmiştir.

Eksenel simetrik anigenişlemeli boru  $D/d=2$  genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı 56000 olarak bildirilmiştir ( $Re=U_c D / \nu$ , burada  $U_c$  girişte simetri eksenindeki hızdır ve değeri 5.694 m/s dir).

Hesaplama alanı, anigenişlemeli boruda giriş düzleminde aşağı akışta  $x=50h$  kadar bir aksel mesafeye uzatılmıştır.

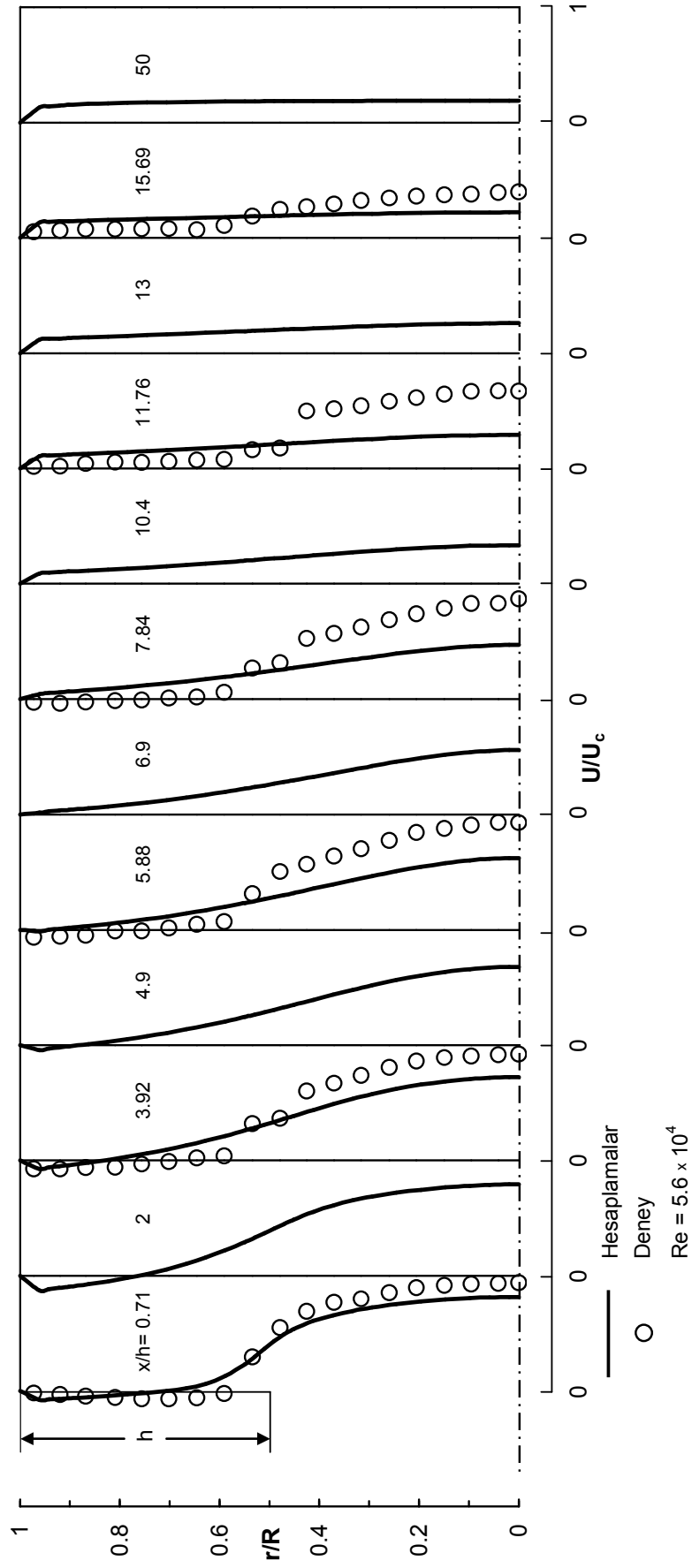
Şekil 2.99'da gösterilen ağ, Founti ve Klipfel'in (1998) akış durumu için oluşturulmuş ve  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiştir.



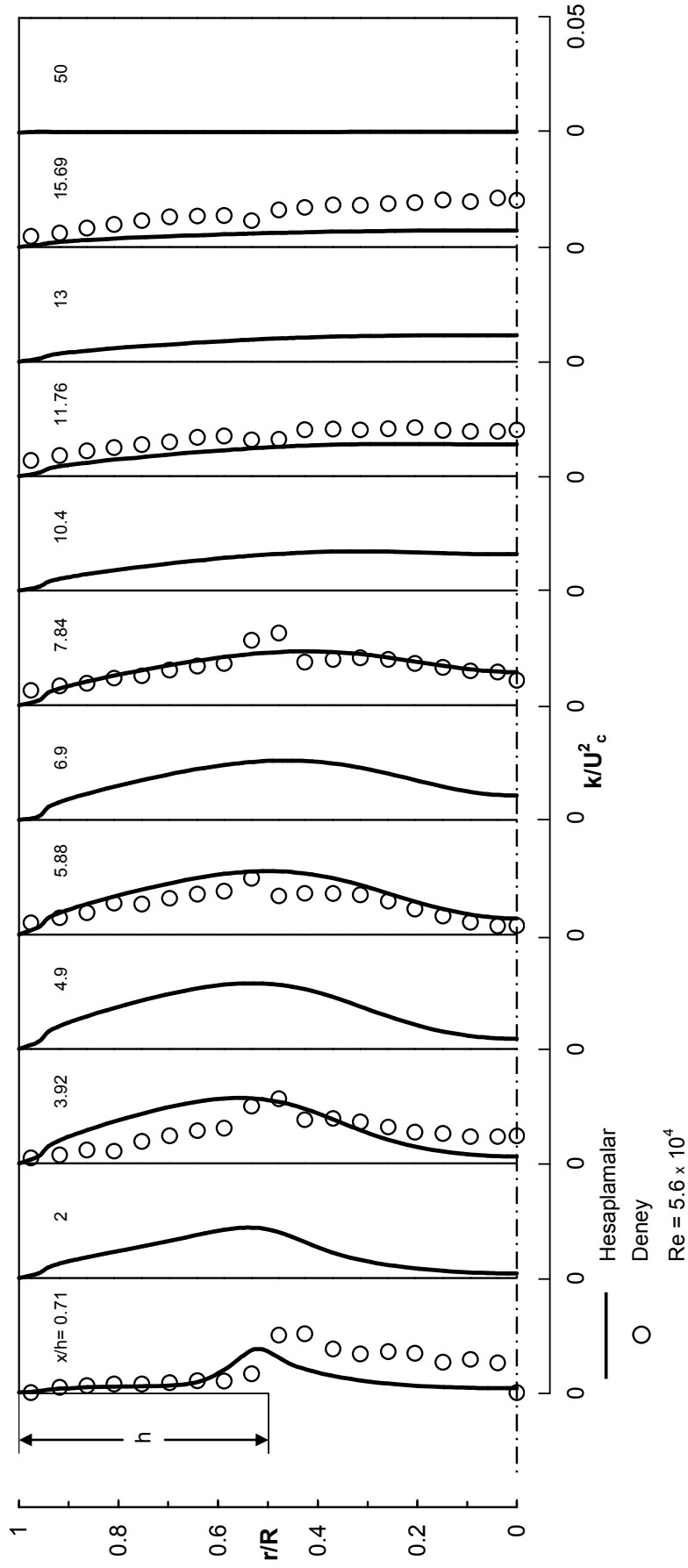
Şekil 2.99. Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Hesaplanan aksel hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümler  $x/h=0.71$ 'den  $x/h=50$ 'ye kadar olan 12 aksel kesitte karşılaştırıldığında sırasıyla, Şekil 2.100 ve Şekil 2.101'de gösterilen uyum elde edilmiştir.

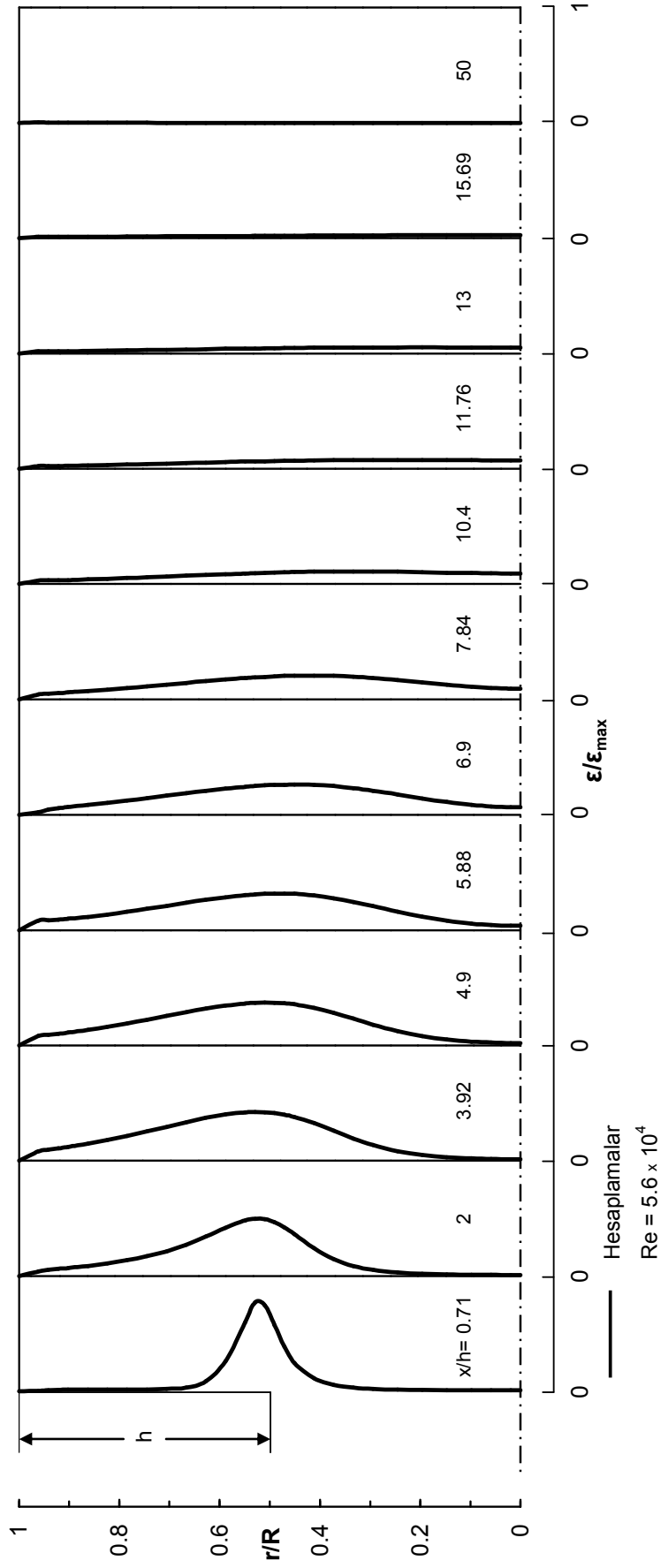




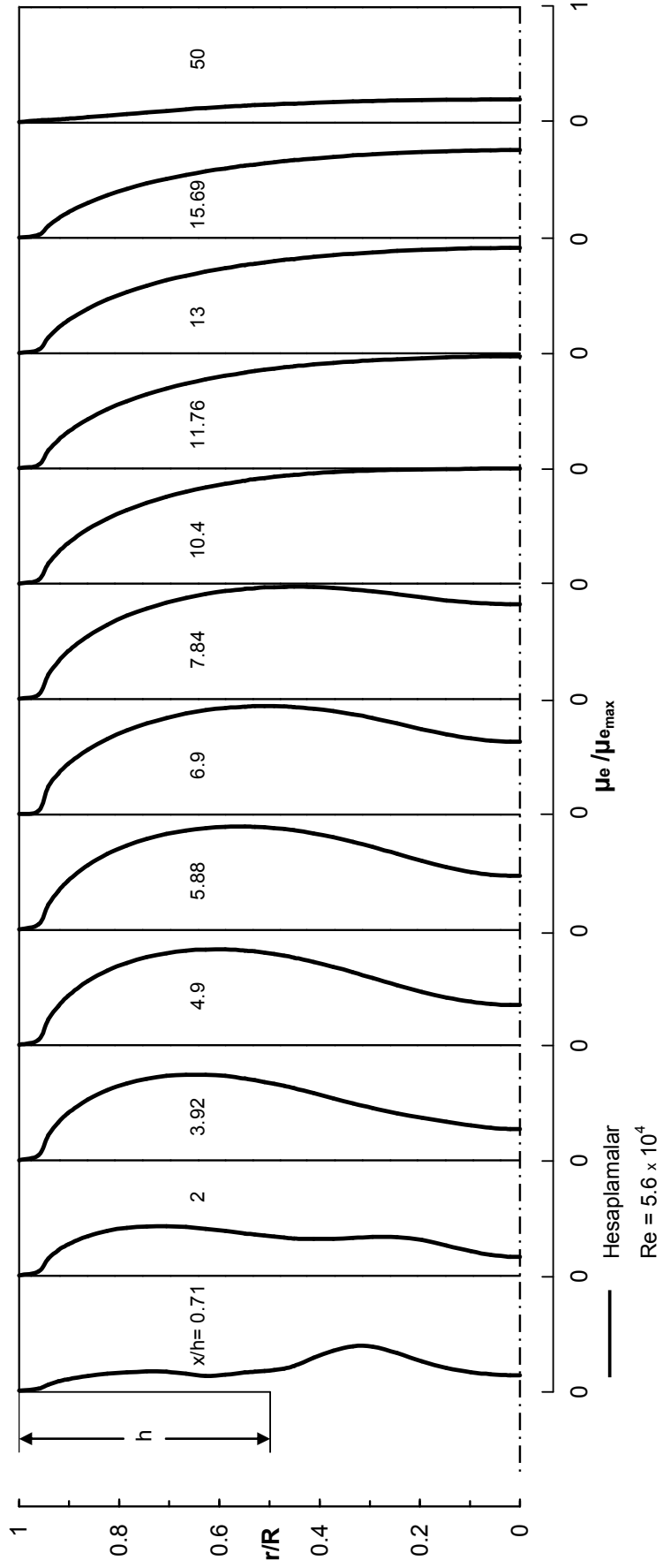
Şekil 2.100. Eksenel simetrik anisotropik akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.101. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

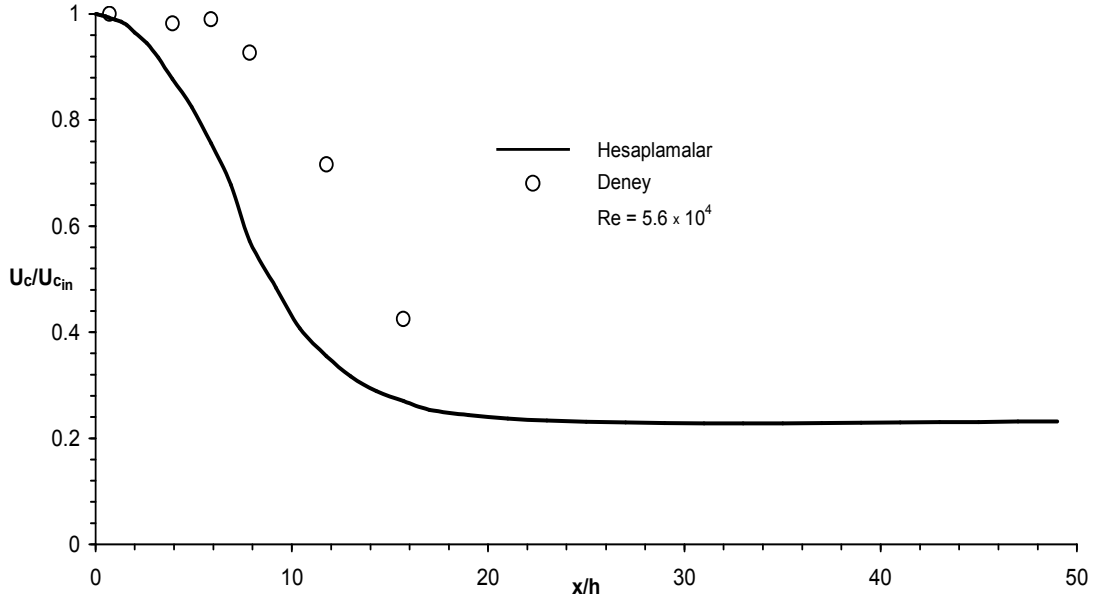


Şekil 2.102. Founti ve Klipfel'in (1998) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.103. Founti ve Klipfel'in (1998) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

Şekil 2.102 ve 2.103'ten, Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi görülmektedir.

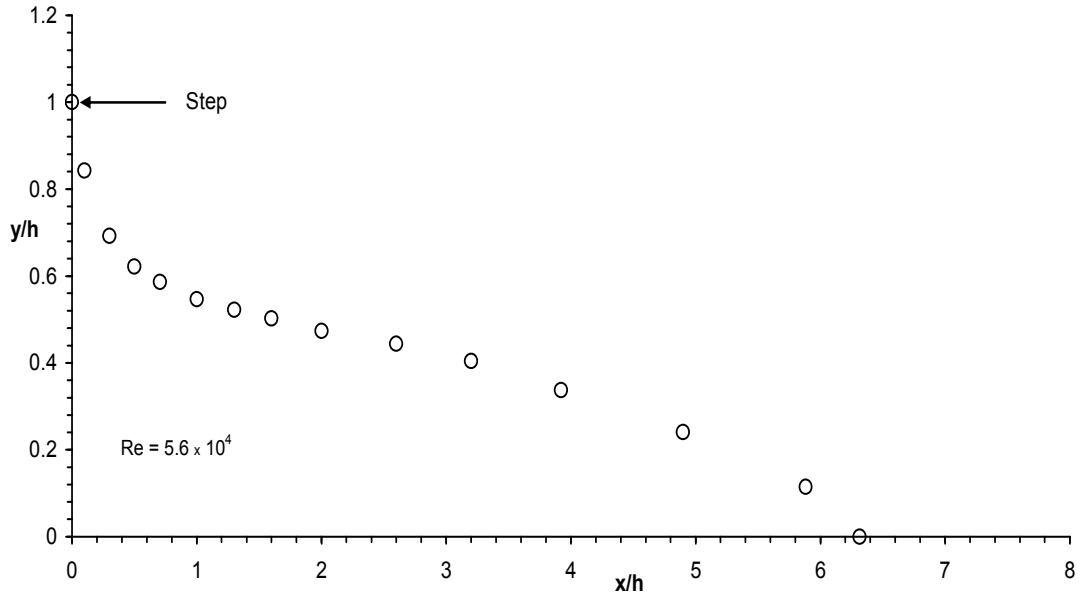


Şekil 2.104. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

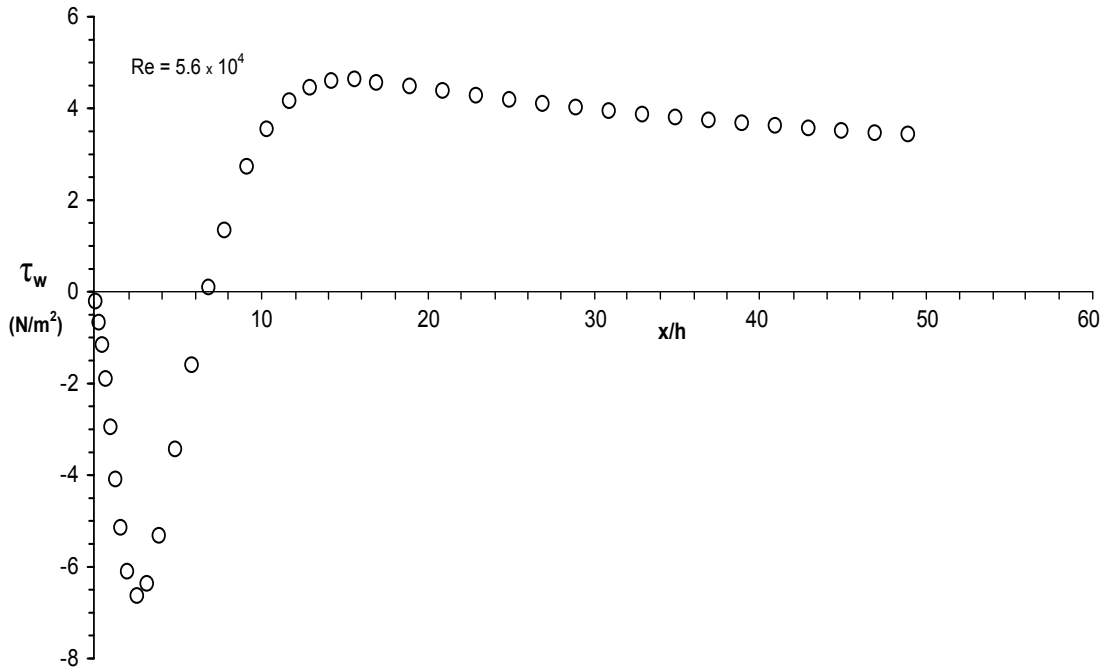
Simetri eksenindeki aksel hız değerleri, anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanıp Founti ve Klipfel'in (1998) deneysel bulgularıyla karşılaştırıldığında Şekil 2.104'teki gibi benzer eğilimlerin olduğu görülür. Hesaplanan aksel hız değerleri anigenişlemeli akış borusu girişindeki simetri eksenindeki aksel hız ( $U_{c_{in}}$ ) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Hesaplanan aksel hız değerleri yaklaşık olarak  $x/h=26$  kesitinden sonra sabit kalmaktadır.

Şekil 2.105'de Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri gösterilmektedir. Akış tutunma uzunluğu değerinin yaklaşık olarak  $x_r=6.3h$  olarak hesaplandığı görülmektedir. Akış tutunma uzunluğunun deneysel değeri ise  $x_r=11.37h$  olarak bildirilmiştir.

Şekil 2.106'da Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi görülmektedir.



Şekil 2.105. Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.106. Founti ve Klipfel'in (1998) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

Pereira ve Pinho (2000) da Poole ve Escudier (2003) gibi, Newtoniyen ve Newtoniyen olmayan akışkanlar için değişik Reynolds sayılarında aksel simetrik anijenleşmeli borulardaki türbülanslı çevrintili akışları deneysel olarak incelemiştir. Burada Pereira ve Pinho'nun (2000) iki değişik Reynolds sayısında ( $Re=135000-50300$ ) Newtoniyen bir akışkan olan su ile ilgili ölçümleri kullanılacaktır.

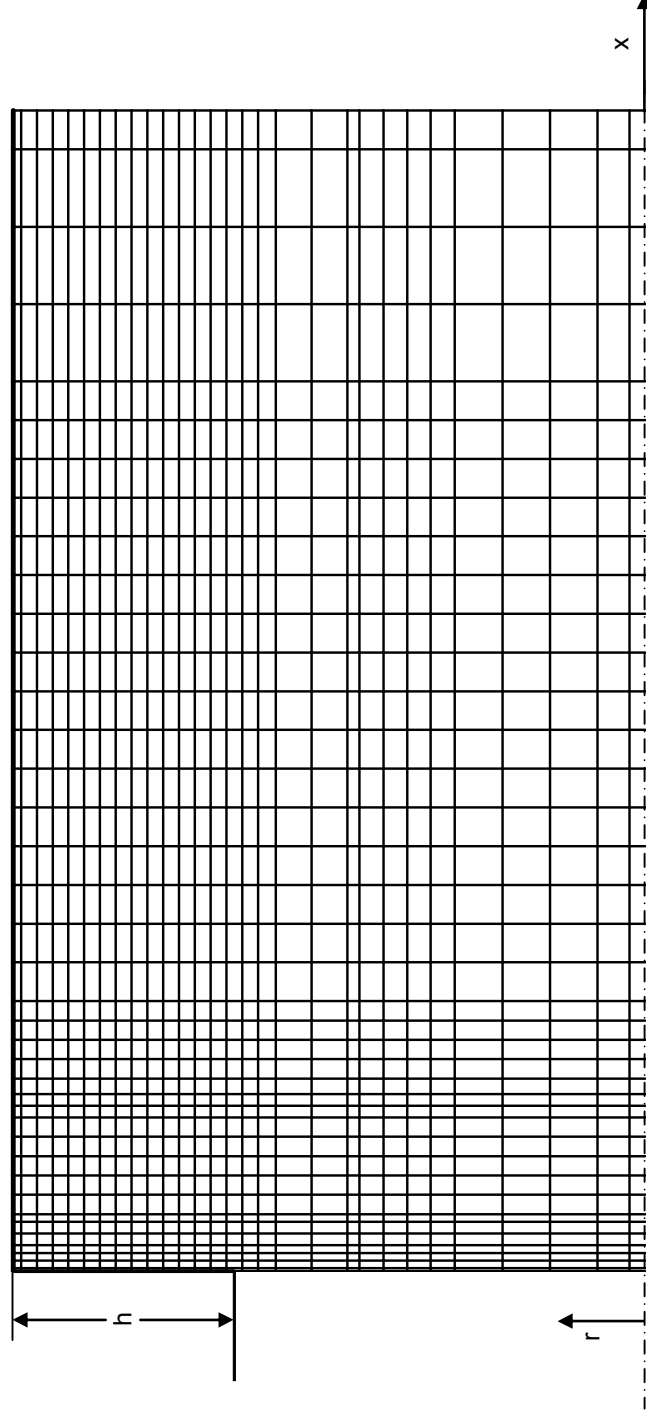
İlk olarak ele alınan akışın girişte Reynolds sayısı 135000 ve aksel simetrik anijenleşmeli boru genişleme oranı  $D/d= 1.538$ 'dir. Reynolds sayısının, debiden hesaplanan ortalama hız (bulk mean velocity), giriş borusu çapı ( $d$ ) ve kinematik viskozite ( $\nu$ ) ile hesaplandığı bildirilmiştir ( $Re = U_b d / \nu$  ;  $U_b = U_{in} = 4.61$  m/s ).

Şekil 2.107'de gösterilen sayısal ağ, Pereira ve Pinho'nun (2000) bu akış durumu için oluşturulmuş ve  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiştir.

Hesaplanan aksel hızın deneysel karşılıkları ile  $x/d=0.25$ 'den  $x/d=15$ 'e kadar olan 10 aksel kesitteki karşılaştırılması Şekil 2.108'de verilmiştir. Akış alanında aynı noktada ölçülmüş üç yöndeki türbülans çalkantılarından ( $u',v',w'$ ) elde edilen türbülans kinetik enerji değerleri, sayısal olarak bulunan türbülans kinetik enerji değerleri ile Şekil 2.109'da karşılaştırılmıştır.

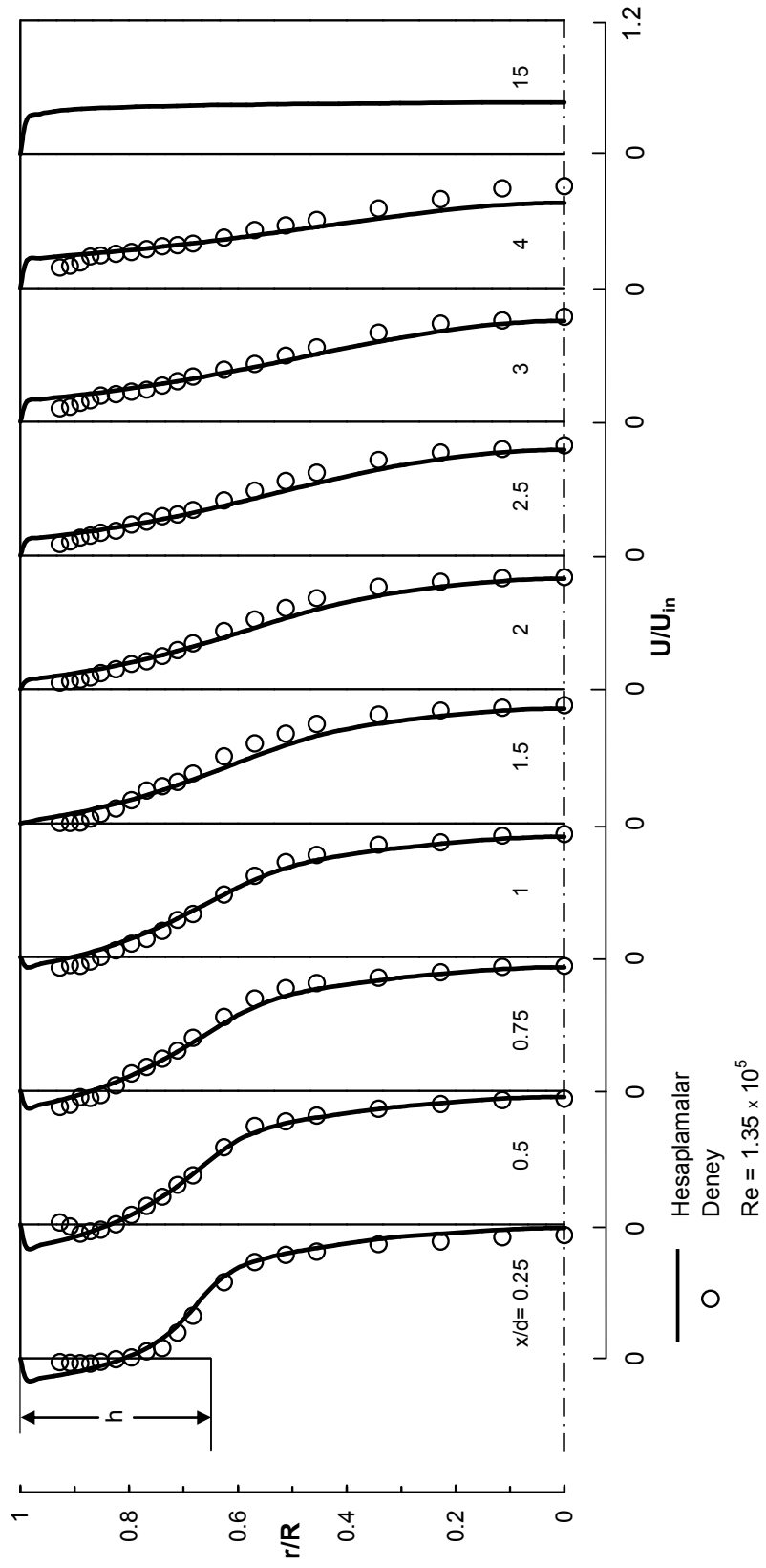
Şekil 2.108 ve Şekil 2.109'dan, hesaplanan aksel hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümler arasında oldukça iyi uyum olduğu görülmektedir.

Pereira ve Pinho'nun (2000) aksel simetrik anijenleşmeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi, sırasıyla Şekil 2.110 ve 2.111'den görülmektedir.

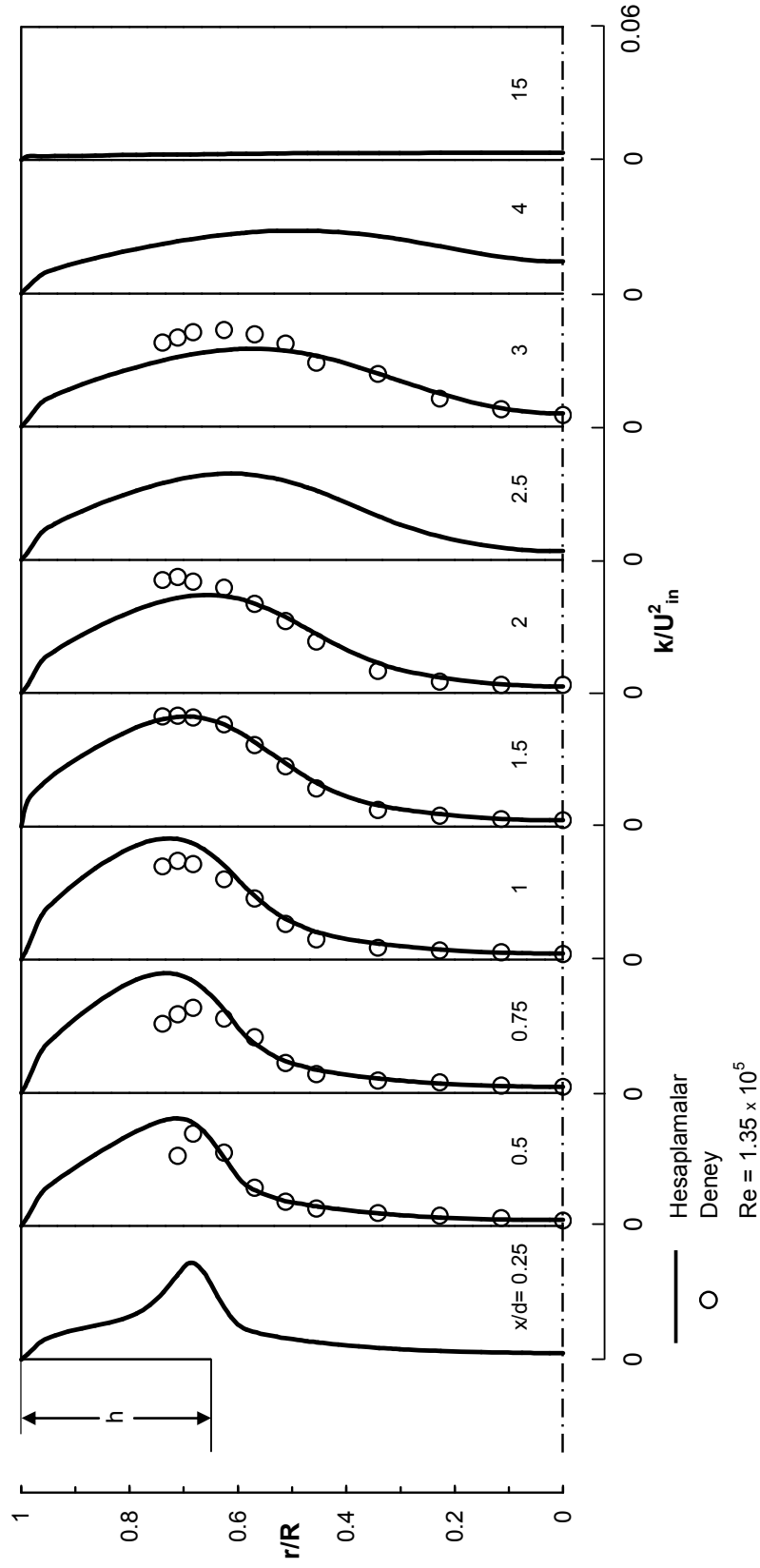


Şekil 2.107. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anijenleşmeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

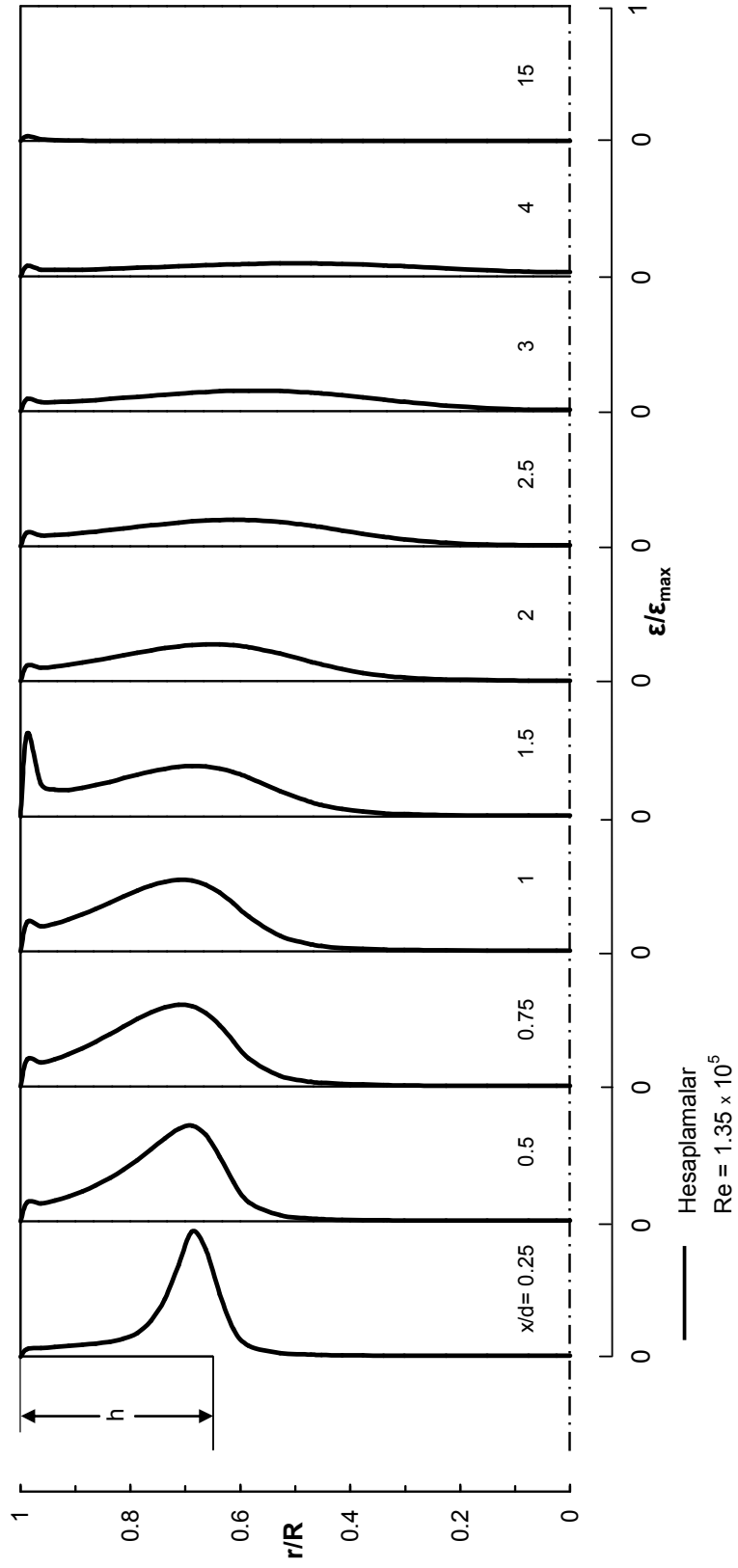




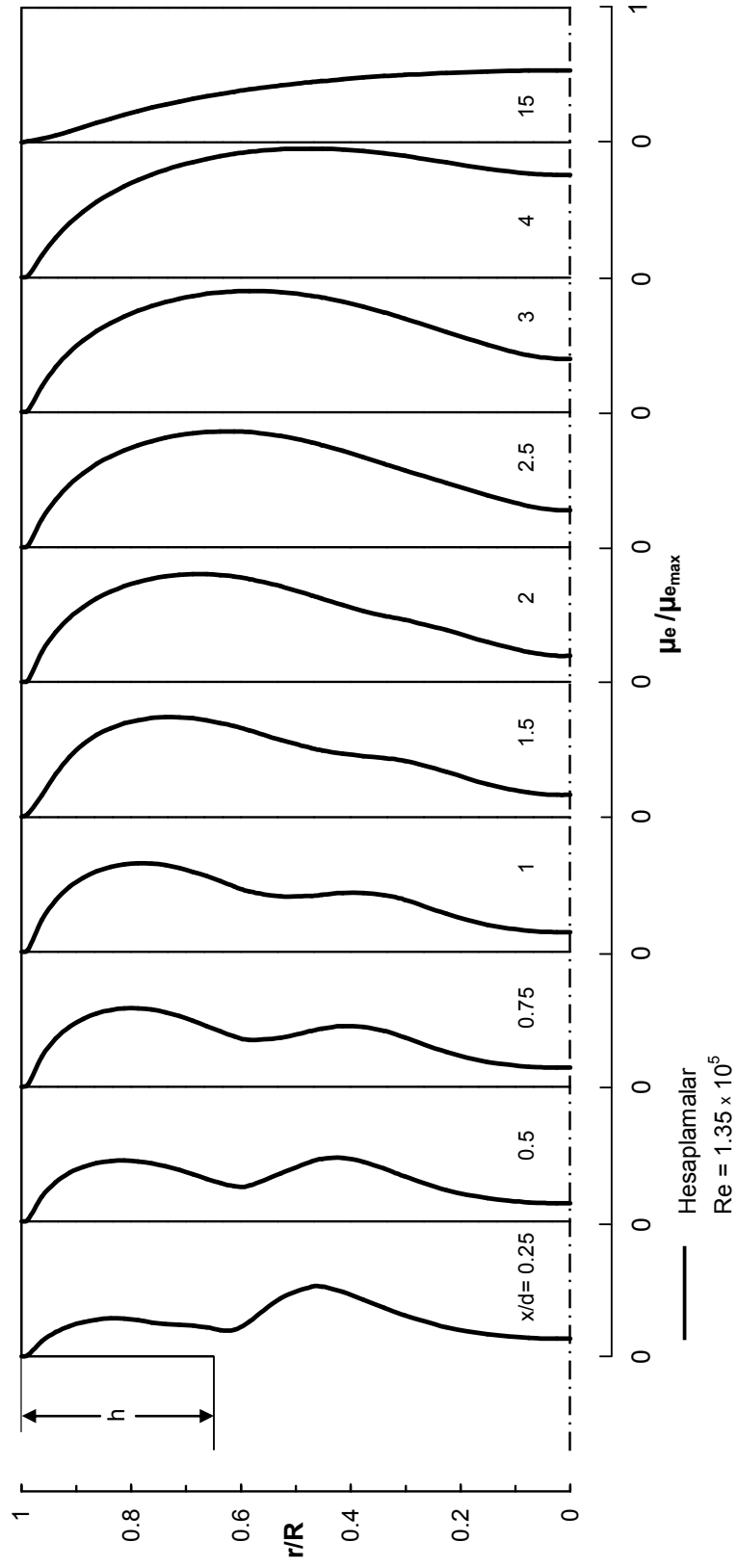
Şekil 2.108. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



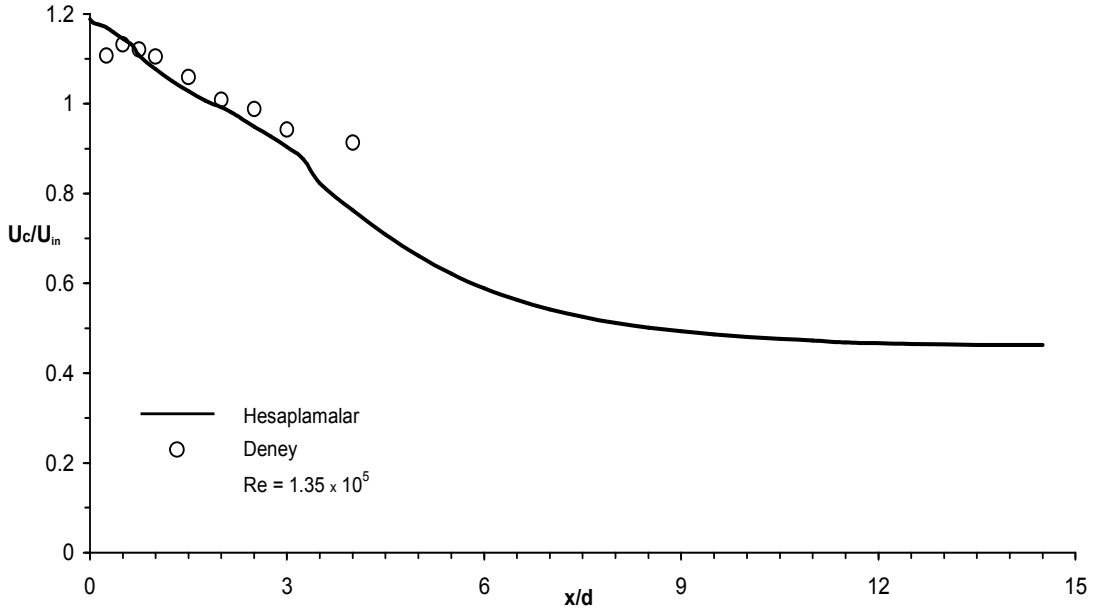
Şekil 2.109. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.110. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.111. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



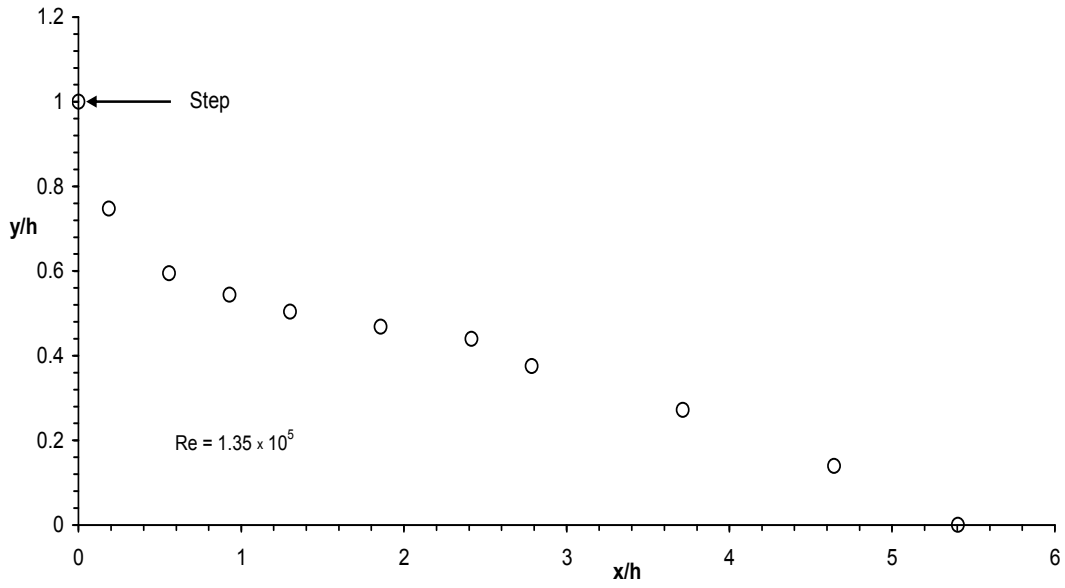
Şekil 2.112. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Pereira ve Pinho'nun (2000) akış durumu için hesaplanan simetri eksenindeki aksenal hızın deneysel bulgularla karşılaştırılması, Şekil 2.112'de gösterilmiştir. Simetri eksenindeki aksenal hız, yaklaşık olarak  $x/d=12$  kesitinde sabit değerler almaktadır.

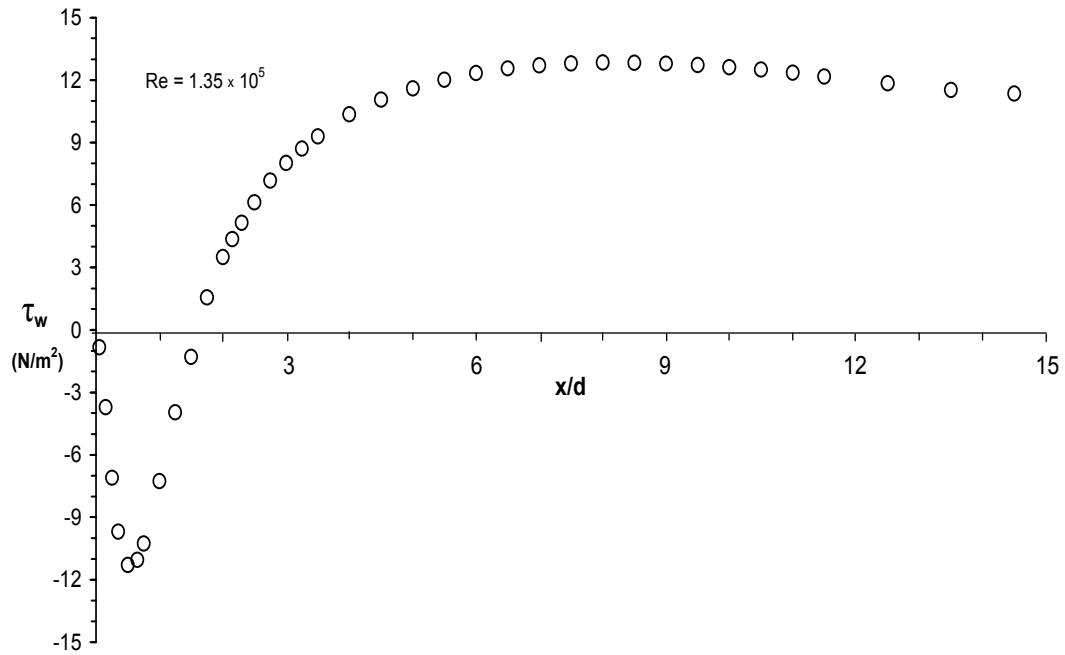
Şekil 2.113'te Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu değerinin yaklaşık olarak  $x_r=5.4h$  olduğu şekilden açıkça görülmektedir. Deneysel akış tutunma uzunluğu ise  $x_r=8.43h$  olarak bildirilmiştir.

Pereira ve Pinho'nun (2000) aksenel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.114'te verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/d=1.5$  kesitine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır.

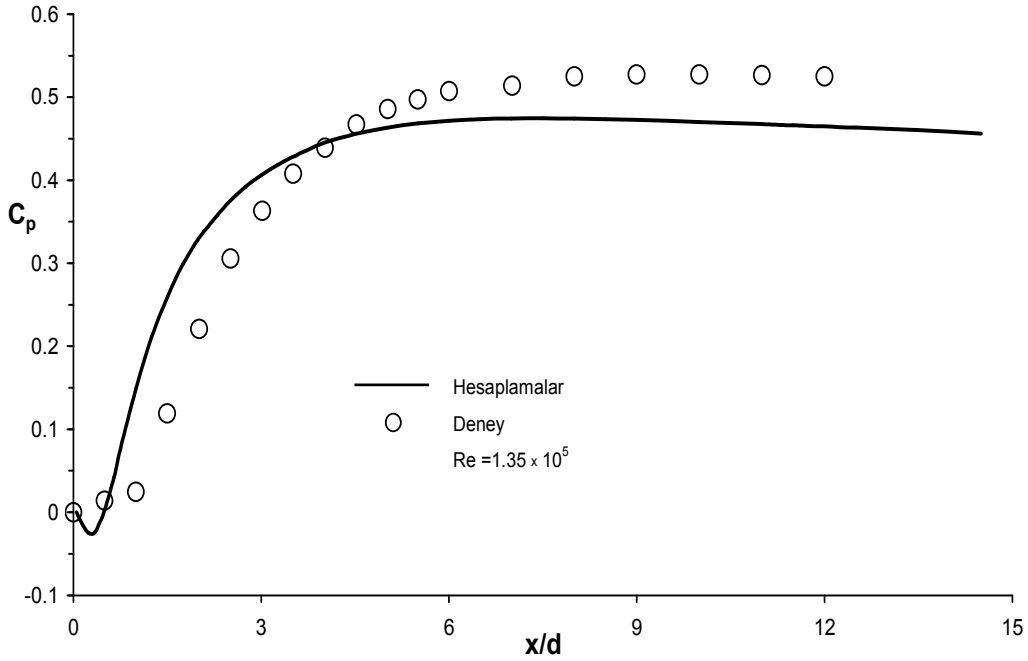
Anigenişlemeli akış borusu boyunca cidar statik-basınç katsayısı ölçümlerinin sayısal hesaplamalarla olan uyumu Şekil 2.115'ten görülmektedir.



Şekil 2.113. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

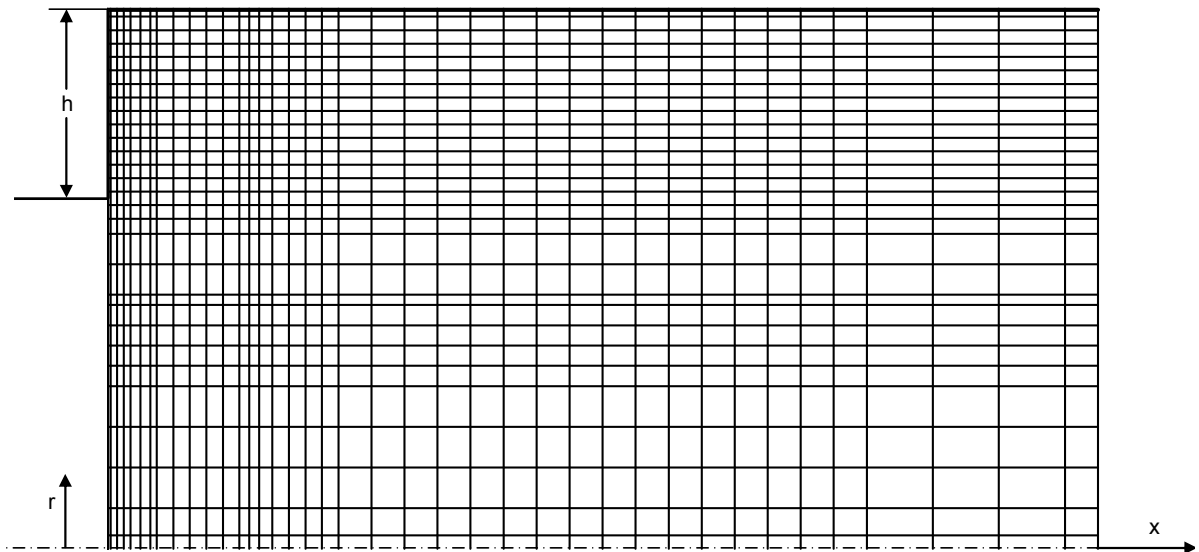


Şekil 2.114. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.



Şekil 2.115. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

Pereira ve Pinho (2000), Reynolds sayısının 50300 olduğu diğer akış durumu için yaptıkları ölçümlerin sonuçlarını da sunmuşlardır. Bu deneylerinde de genişleme oranı 1.538'dir. Çalışma akışkanı olarak kullandıkları su ile ilgili ölçümler buradaki sayısal hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için oluşturulan sayısal ağ dağılımı Şekil 2.116'daki gibidir.



Şekil 2.116. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerjinin, Pereira ve Pinho'nun (2000) Reynolds sayısının 50300 olduğu akış durumu için yaptığı deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması sırasıyla, Şekil 2.117 ve Şekil 2.118'de gösterilmiştir. Eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri sırasıyla  $U_{in}$  ve  $U_{in}^2$  ile boyutsuzlaştırılmıştır ( $U_{in} = U_b = 1.73$  m/s).

Şekil 2.117 ve Şekil 2.118'den görüldüğü gibi, hesaplanan eksenel hız ve türbülans kinetik enerji değerleri ile deneysel ölçüm değerleri arasında genel olarak iyi uyum vardır.

Pereira ve Pinho'nun (2000) akış durumu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi, sırasıyla Şekil 2.119 ve Şekil 2.120'den görülmektedir.

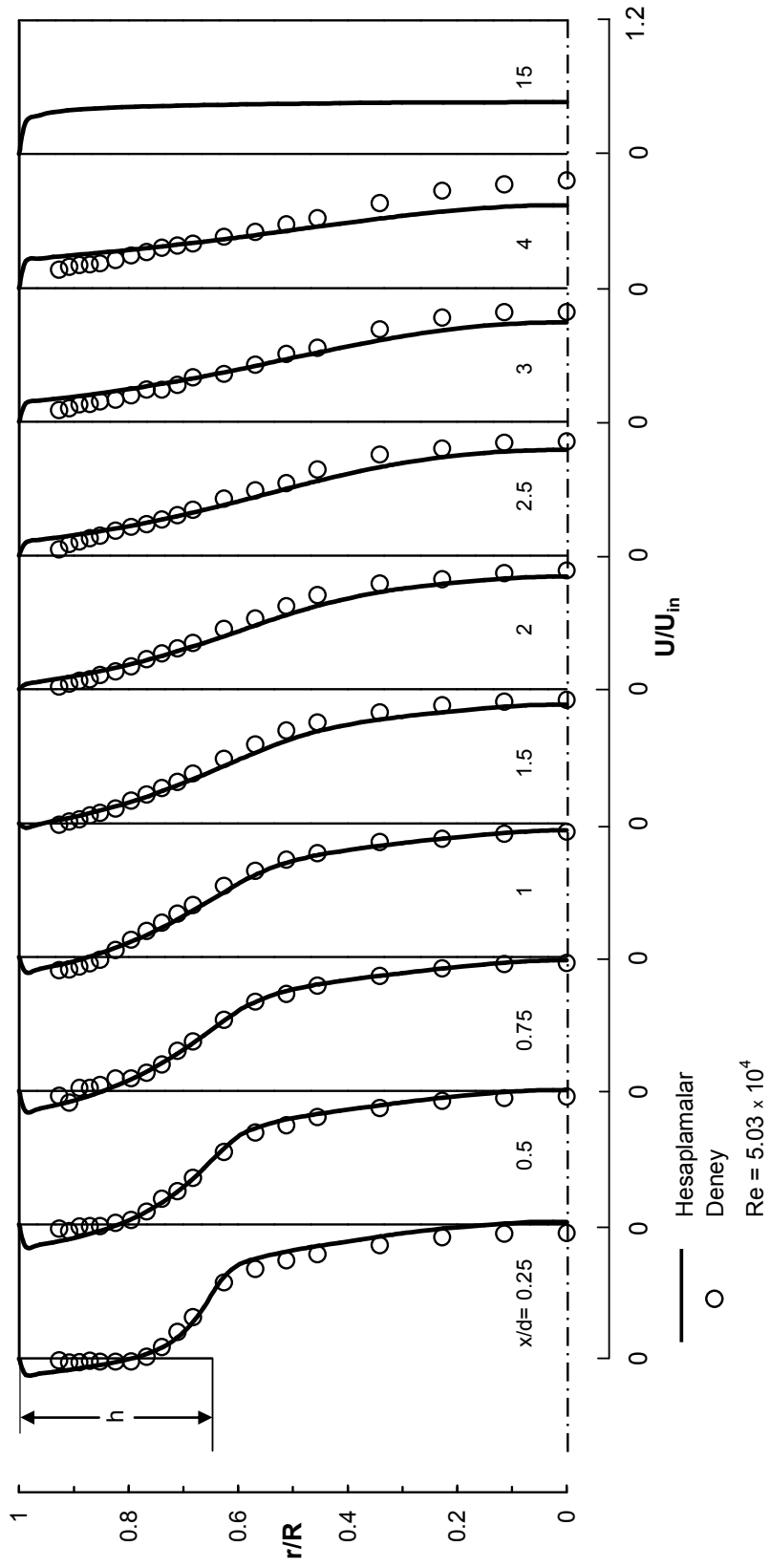
Pereira ve Pinho'nun (2000) akış durumu için hesaplanan simetri eksenini üzerindeki eksenel hızın deneysel bulgularla karşılaştırılması Şekil 2.121'de gösterilmiştir. Simetri eksenini üzerindeki eksenel hız yaklaşık olarak  $x=11d$  mesafesinde sabit değerler almaktadır.

Şekil 2.122'de Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Akış tutunma uzunluğu yaklaşık olarak  $x_t=6.4h$  hesaplanmıştır. Deneysel akış tutunma uzunluğu ise  $x_t=8.71h$  olarak bildirilmiştir.

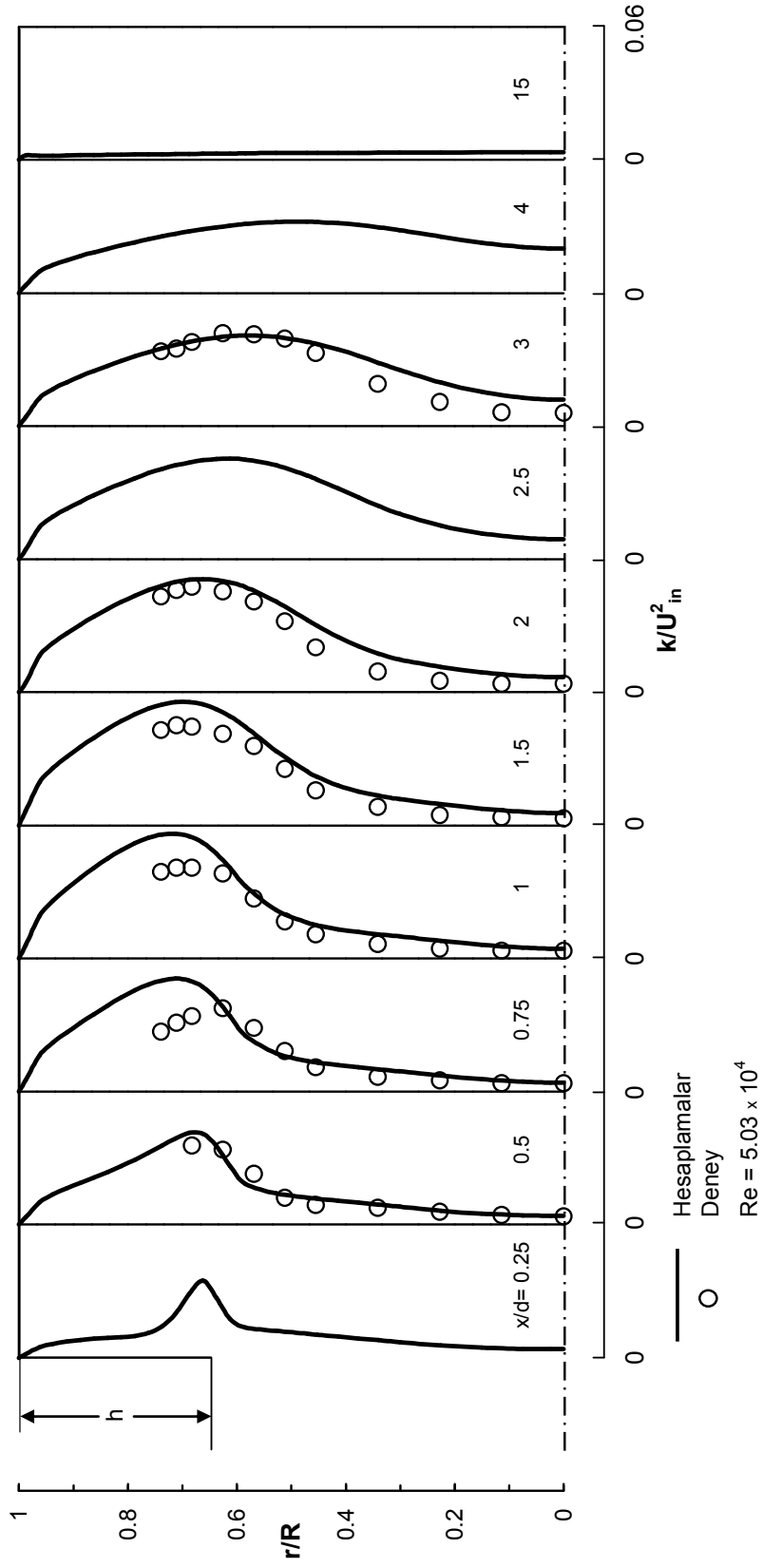
Şekil 2.123'te verilen cidar kayma gerilmesi değerleri mutlak değer olarak  $Re=135000$  için hesaplanan değerlerden oldukça küçüktür. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x=2d$  mesafesine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı, Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve Şekil 2.124'ten görüldüğü gibi iyi bir uyum elde edilmiştir.

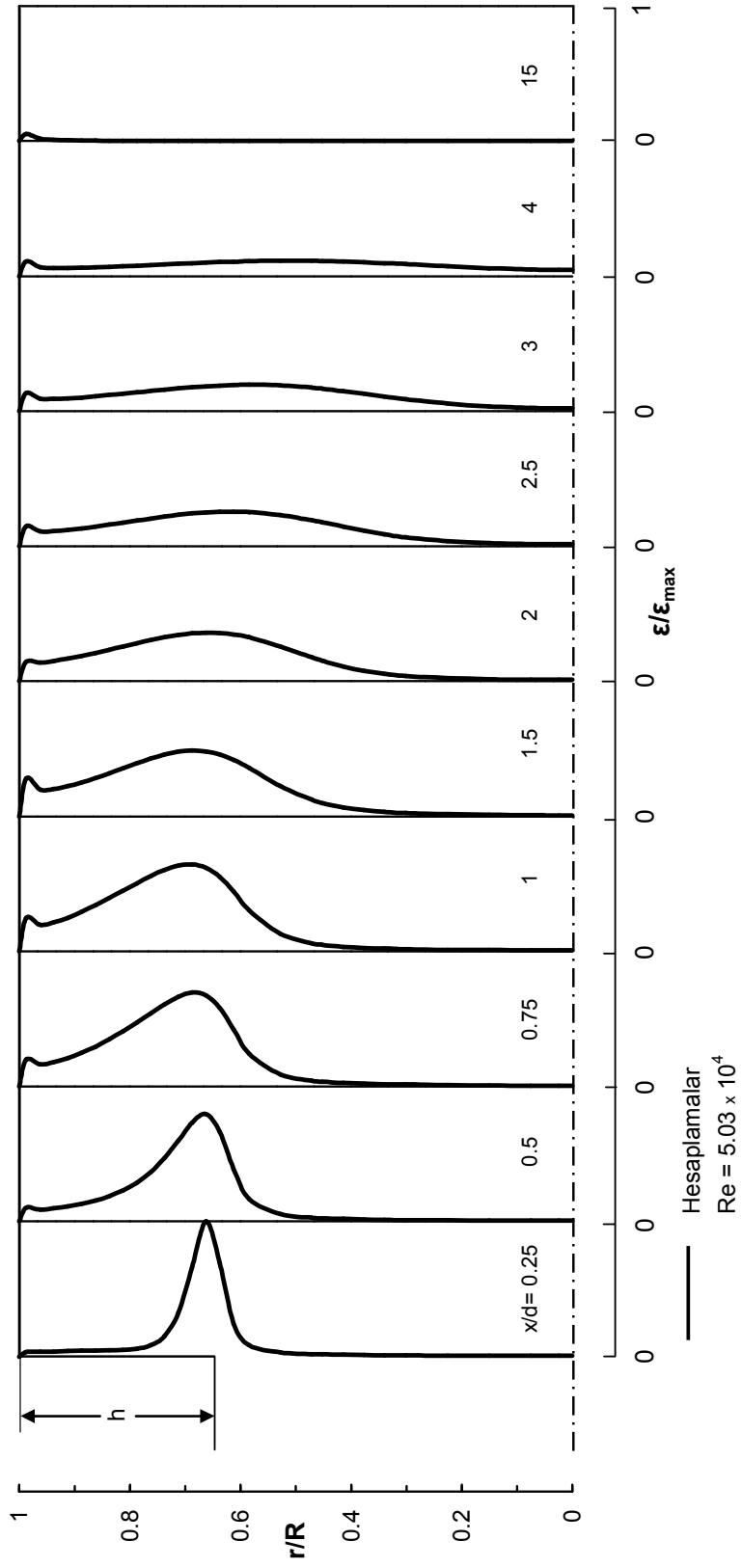




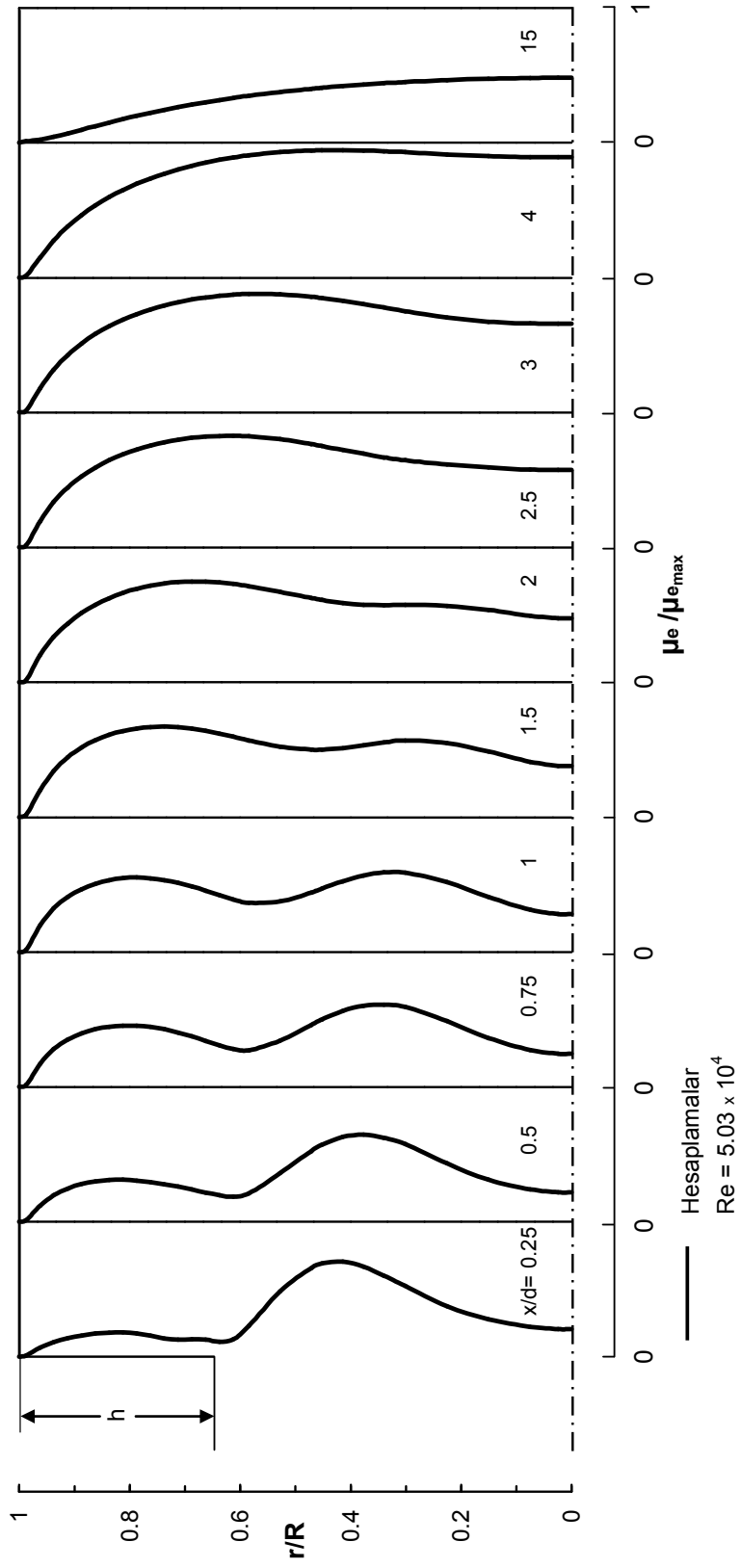
Şekil 2.117. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



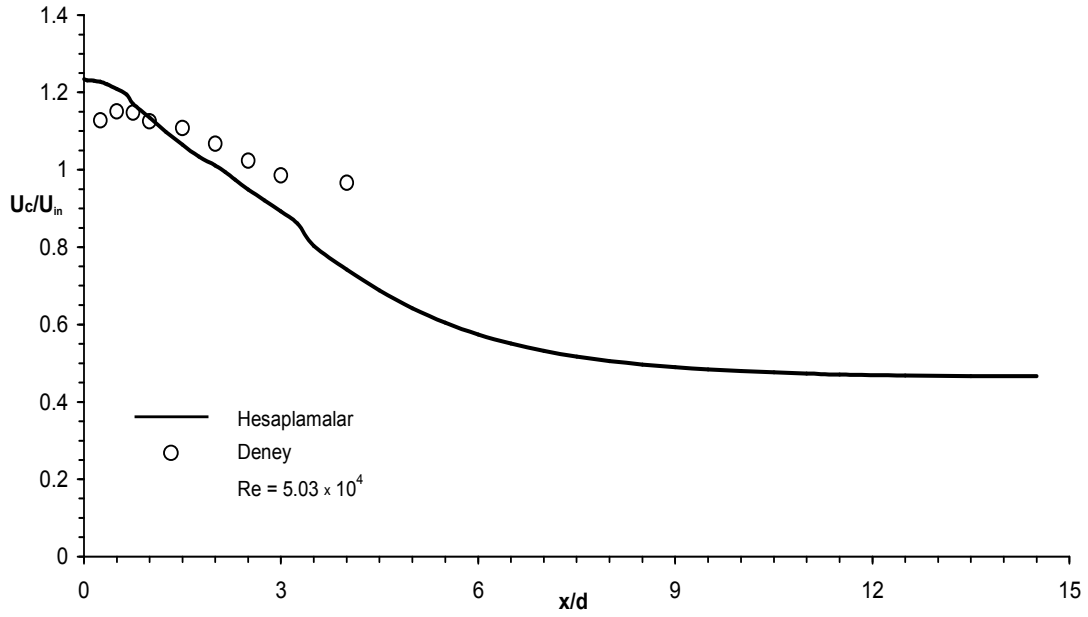
Şekil 2.118. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



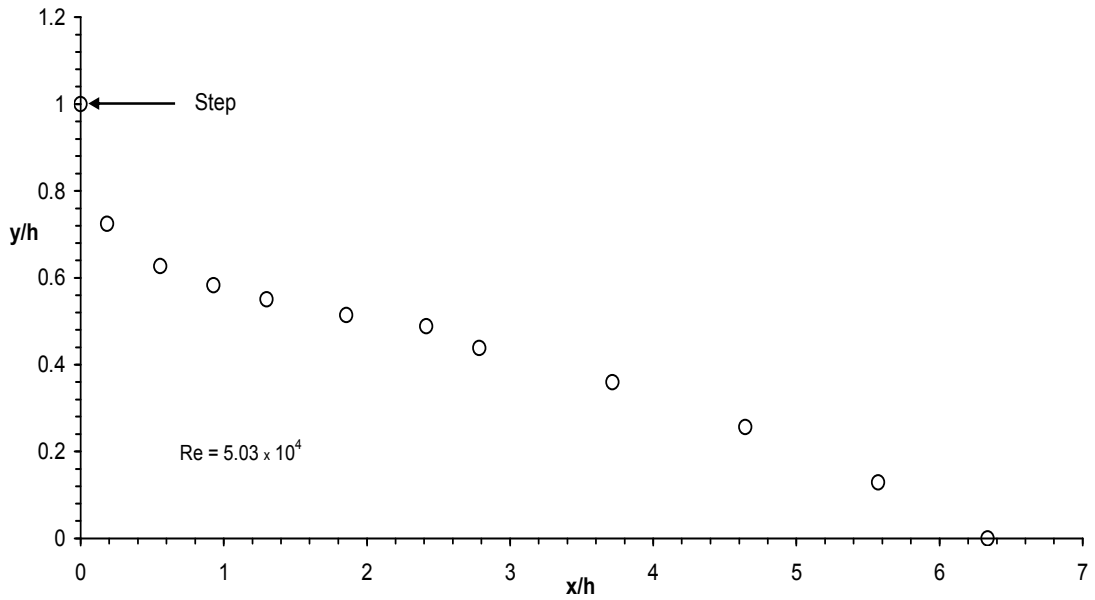
Şekil 2.119. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



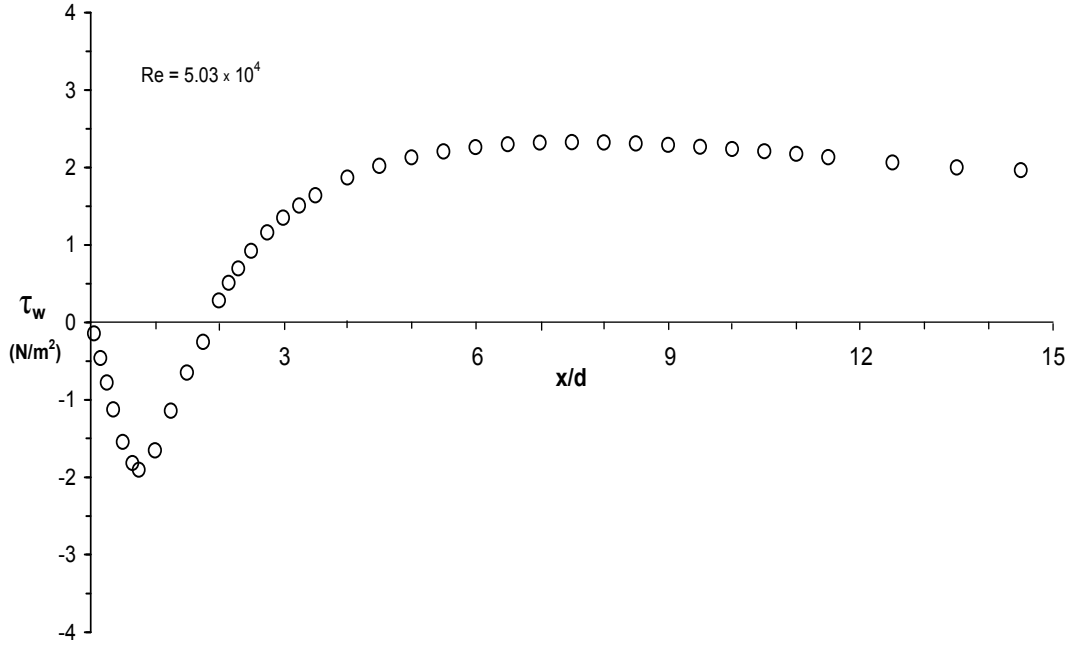
Şekil 2.120. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



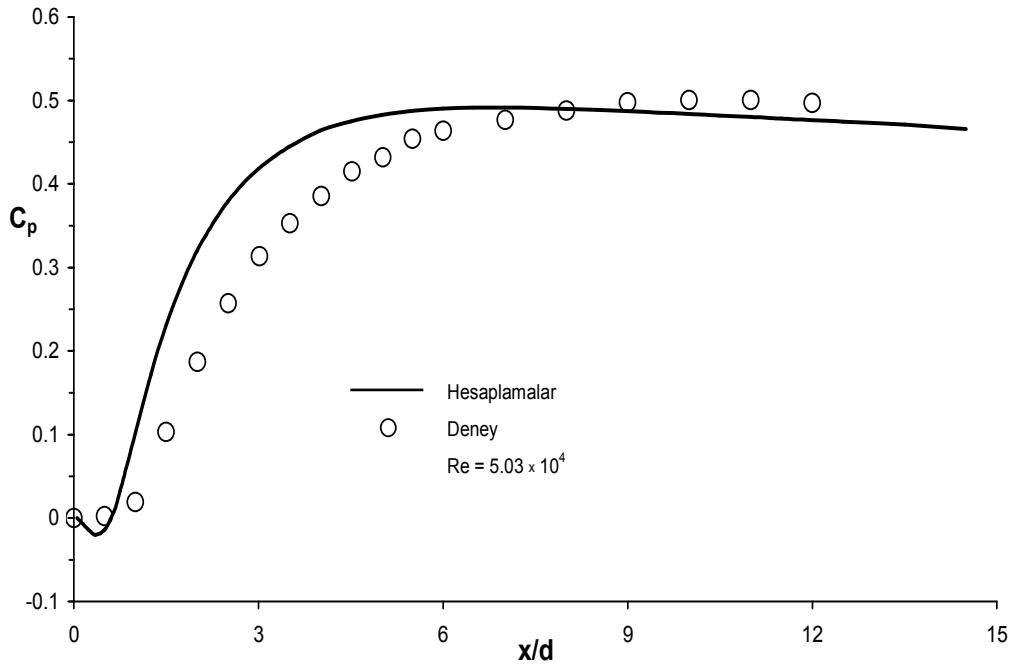
Şekil 2.121. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 2.122. Pereira ve Pinho'nun (2000) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.123. Pereira ve Pinho'nun (2000) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

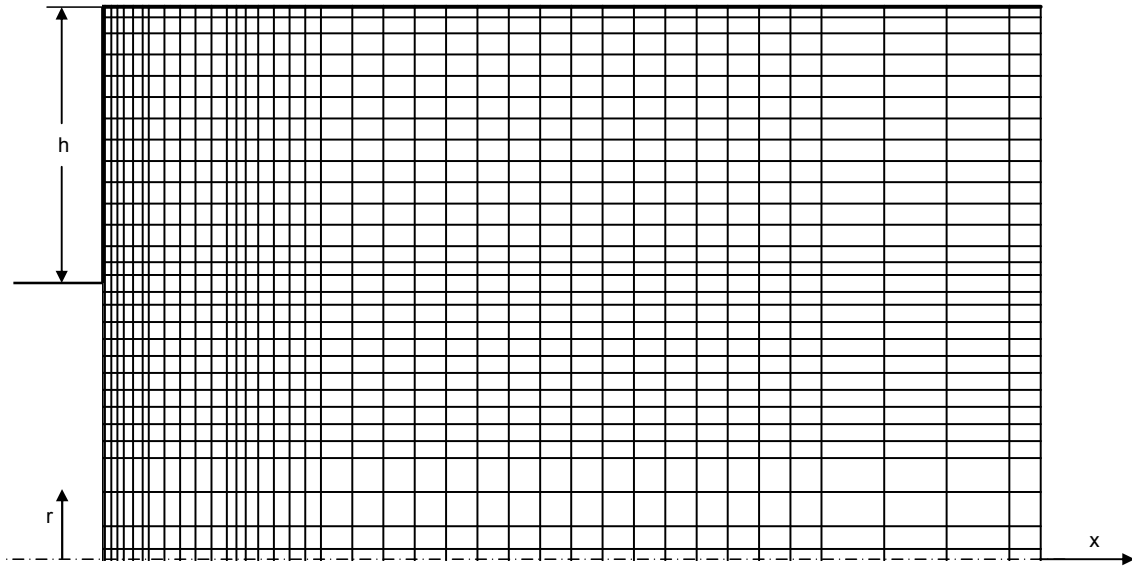


Şekil 2.124. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2000) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Pereira ve Pinho (2002), anigenişleme borusundaki türbülanslı çevrintili akış üzerinde genişleme oranının etkisini incelemek için, yukarıda sayısal analizi yapılan akış durumu (Pereira ve Pinho (2000)) ile yaklaşık olarak aynı Reynolds sayılarında olan ancak genişleme oranının 2 olduğu akış koşullarında yeni deneyler yapmışlardır. Burada yine su ile ilgili ölçümler kullanılmıştır.

Akışın girişte Reynolds sayısı 134000'dir ( $Re=U_b h / \nu$  ;  $U_b=U_{in}=4.62$  m/s ). Eksenel simetrik anigenişlemeli boru genişleme oranı  $D/d= 2$ 'dir.

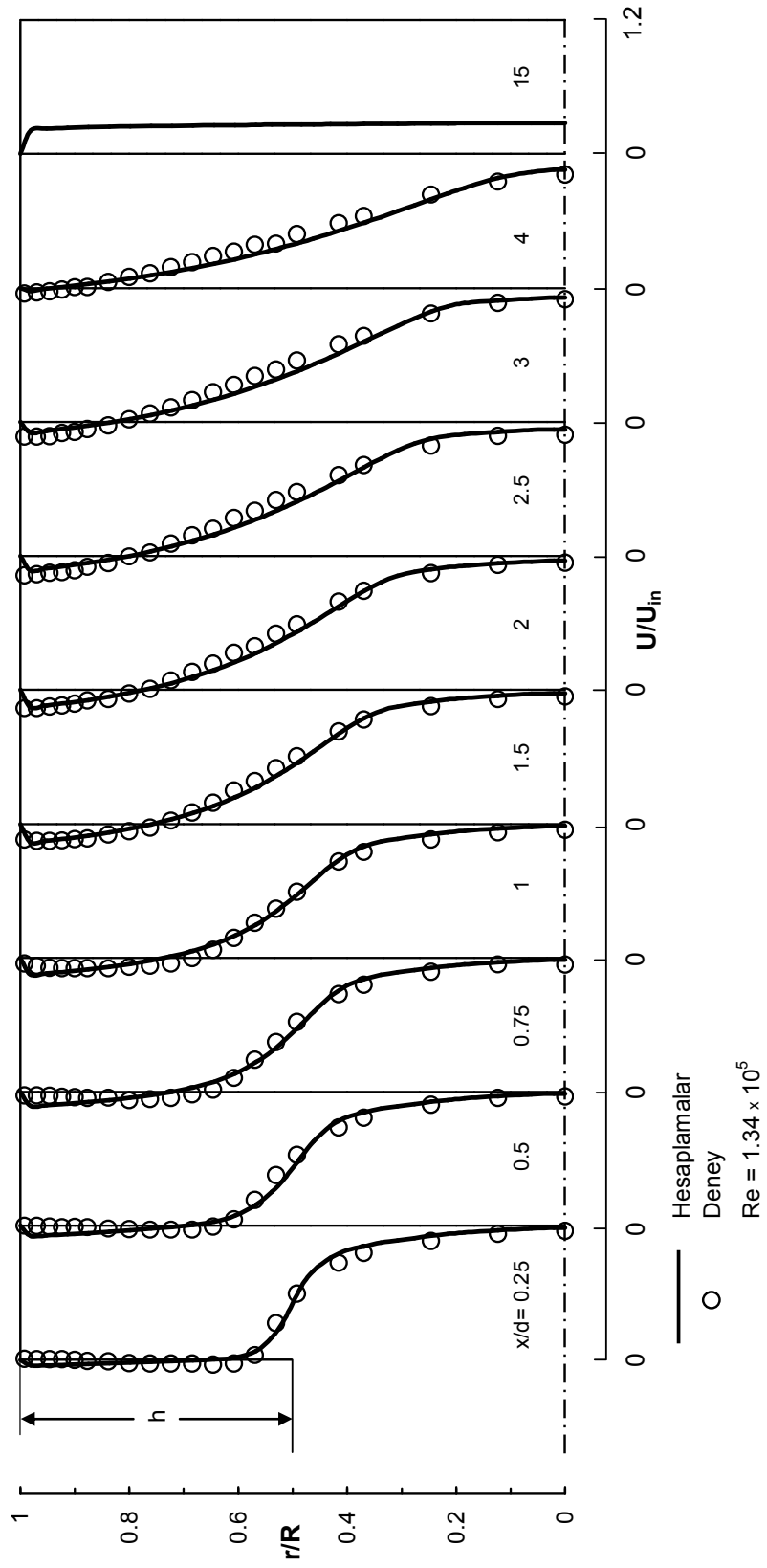
Şekil 2.125'te gösterilen sayısal ağ, Pereira ve Pinho'nun (2002) bu akış durumu için oluşturulmuş ve x ve r yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelmiştir.



Şekil 2.125. Pereira ve Pinho'nun (2002) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

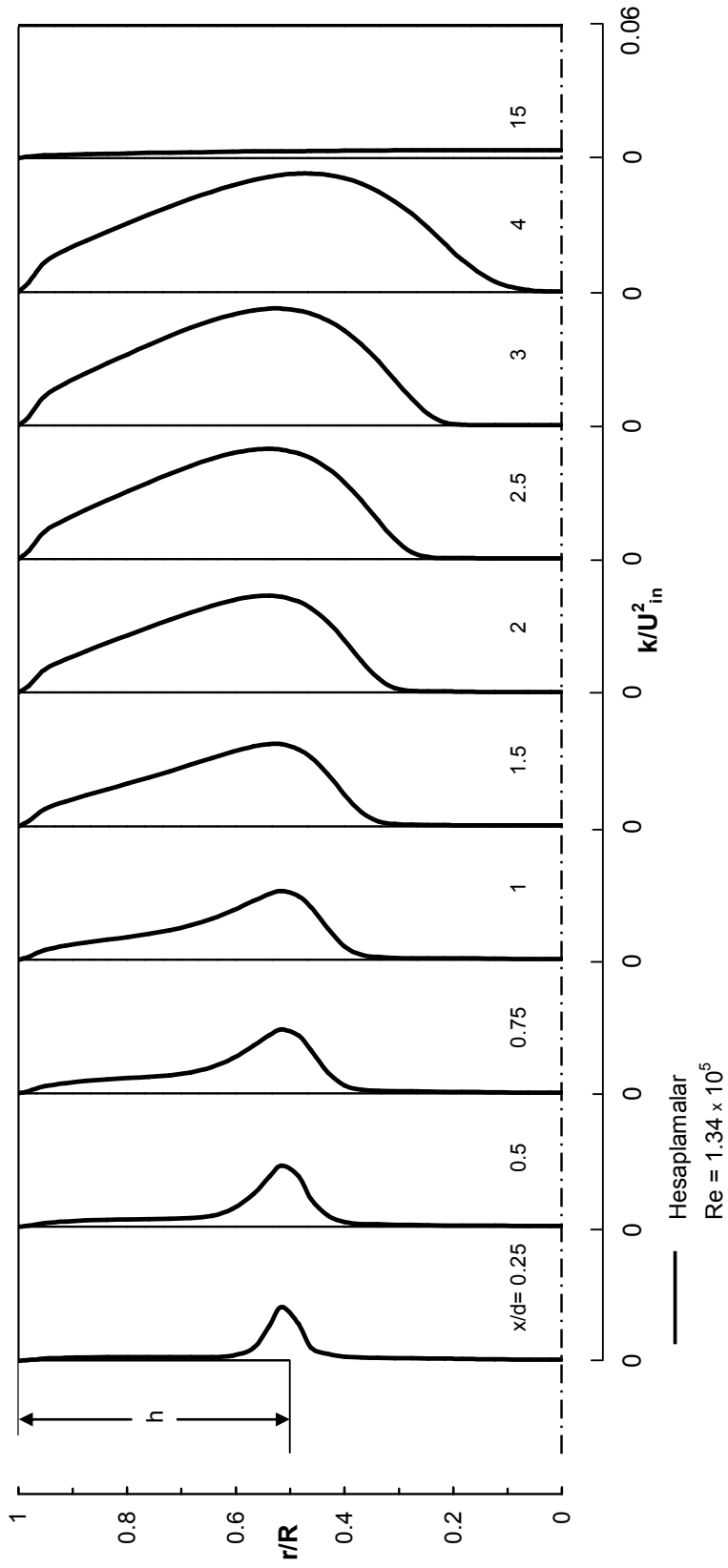
$x/d=0.25$ 'den  $x/d=15$ 'e kadar olan 10 eksenel kesitte, hesaplanan eksenel hız profilleri ile karşılıkları olan deneysel ölçümlerin karşılaştırılması Şekil 2.126'da gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi çok iyi uyum elde edilmiştir.

Pereira ve Pinho'nun (2002) akış durumu için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite radyal profilleri sırasıyla, Şekil 127, Şekil 128, Şekil 129'dan görülmektedir.

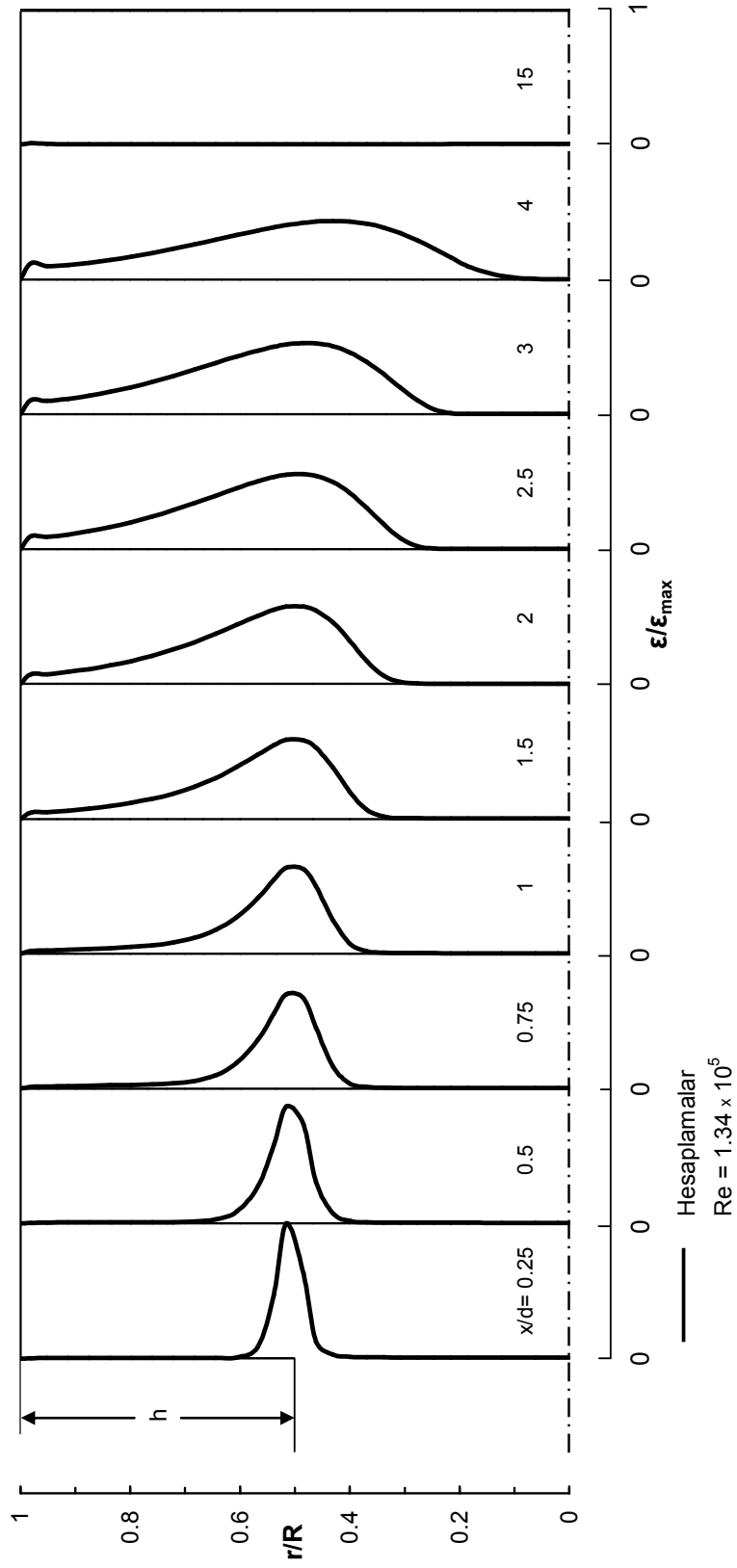


Şekil 2.126. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

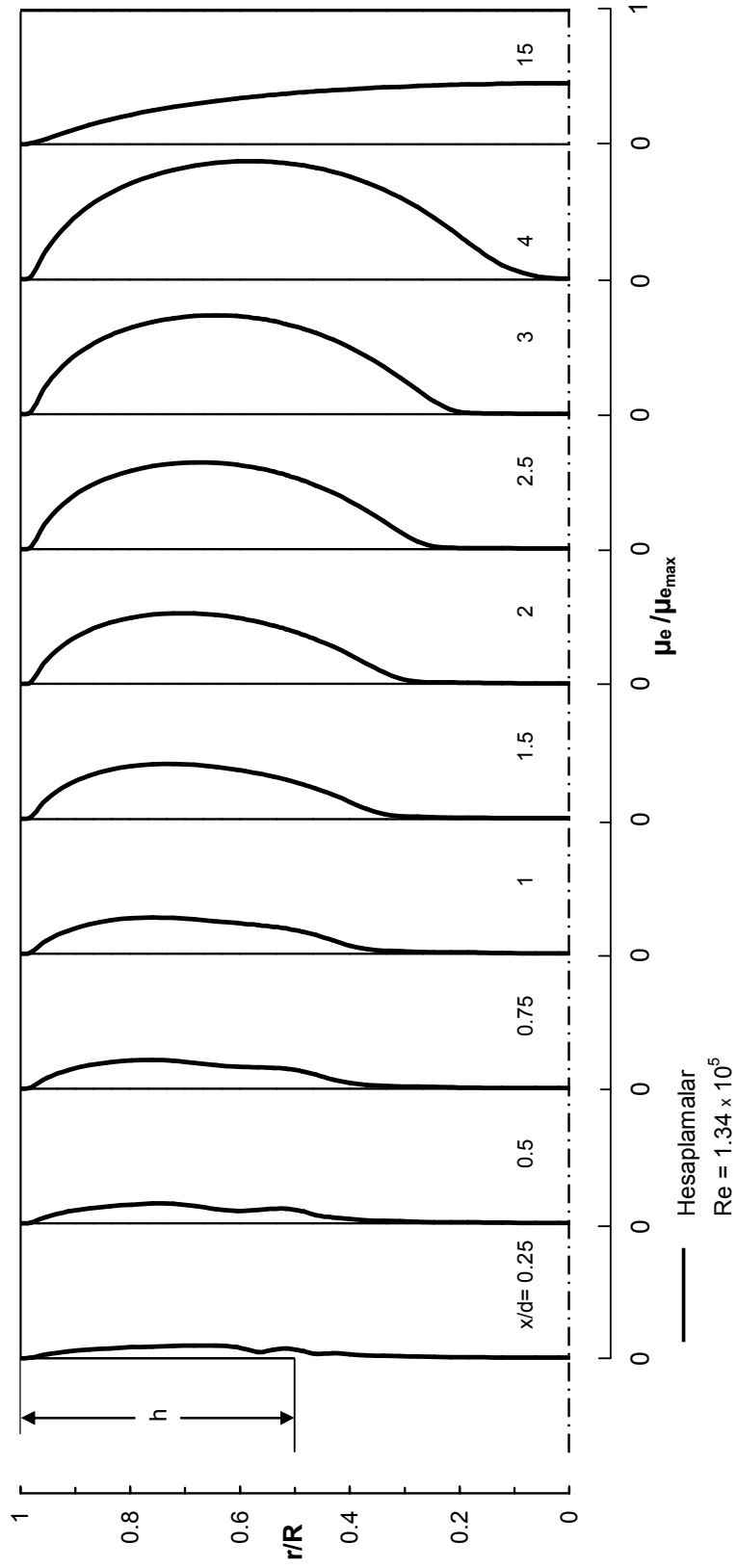




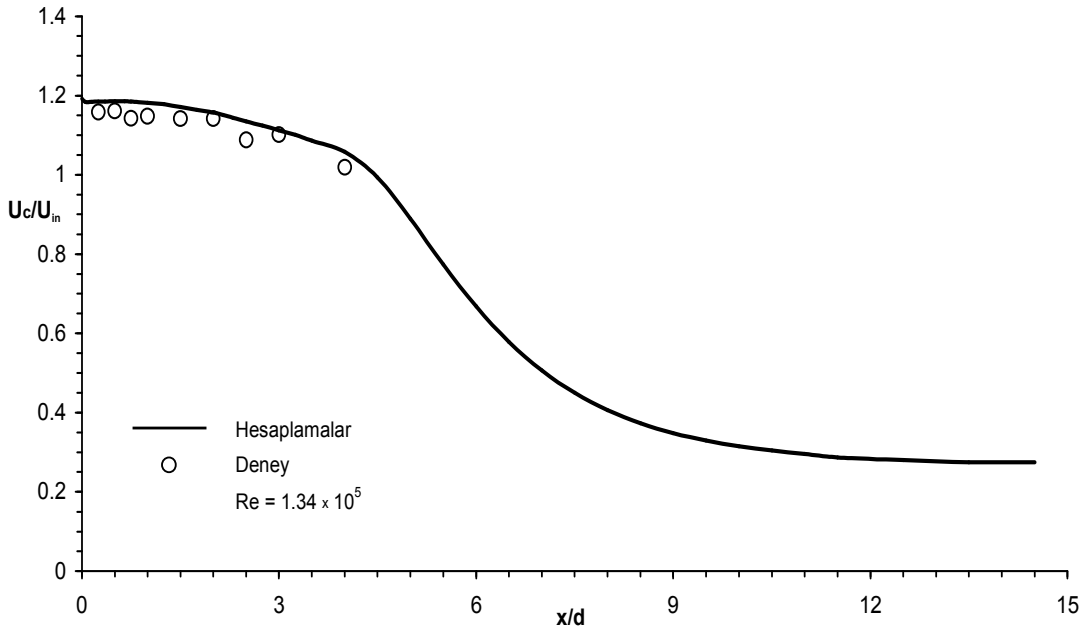
Şekil 2.127. Pereira ve Pinho'nun (2002) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



Şekil 2.128. Pereira ve Pinho'nun (2002) eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

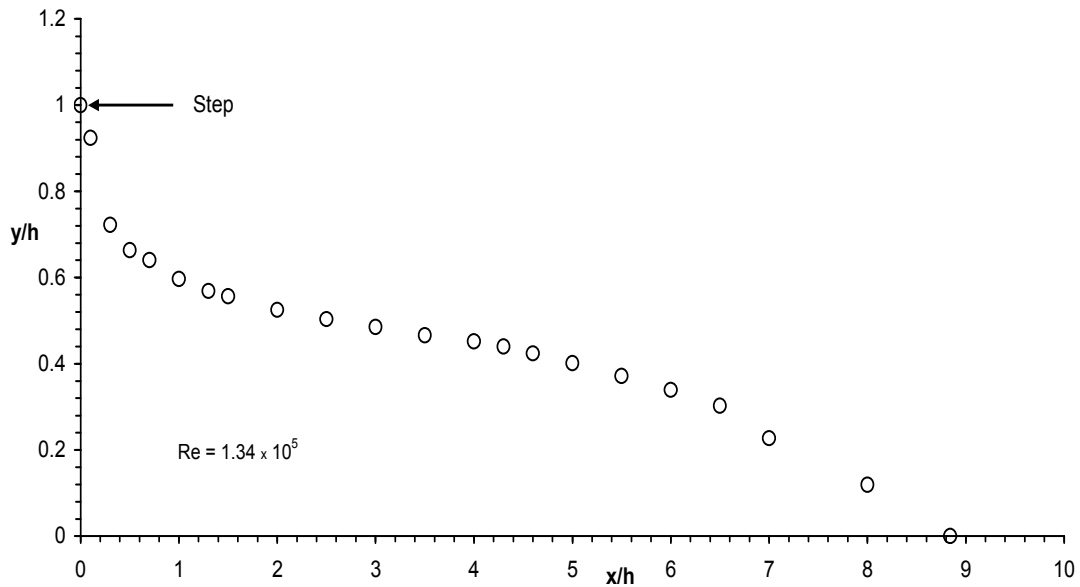


Şekil 2.129. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



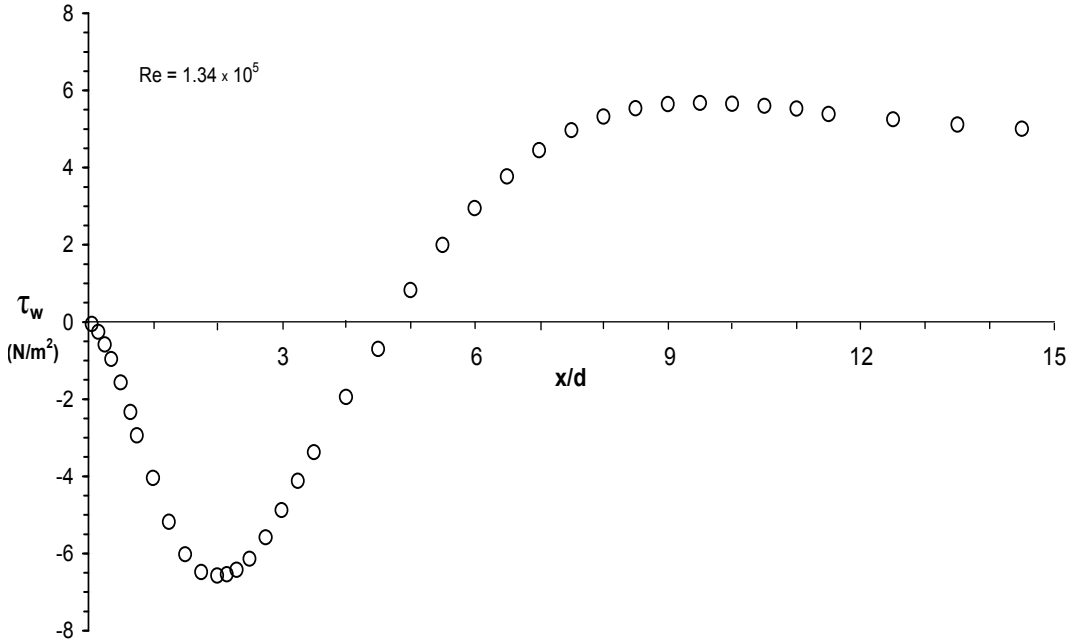
Şekil 2.130. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan aksel hızın Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Hesaplanan ve deneysel değerleri karşılaştırılan simetri eksenindeki aksel hızın, yaklaşık olarak  $x/d=12$  mesafesinden sonra sabit kaldığı Şekil 2.130'dan görülebilir. Akış tutunma uzunluğunun deneysel değeri  $x_r=9.30h$  olarak bildirilmesine rağmen, Şekil 2.131'den görüldüğü gibi takriben  $x_r=8.9h$  büyüklüğünde hesaplanmıştır. (Re=135000 ve D/d=1.538 olan akış durumunda bu uzunluğun deneysel değeri  $x_r=8.43h$  olarak verilmişti.)

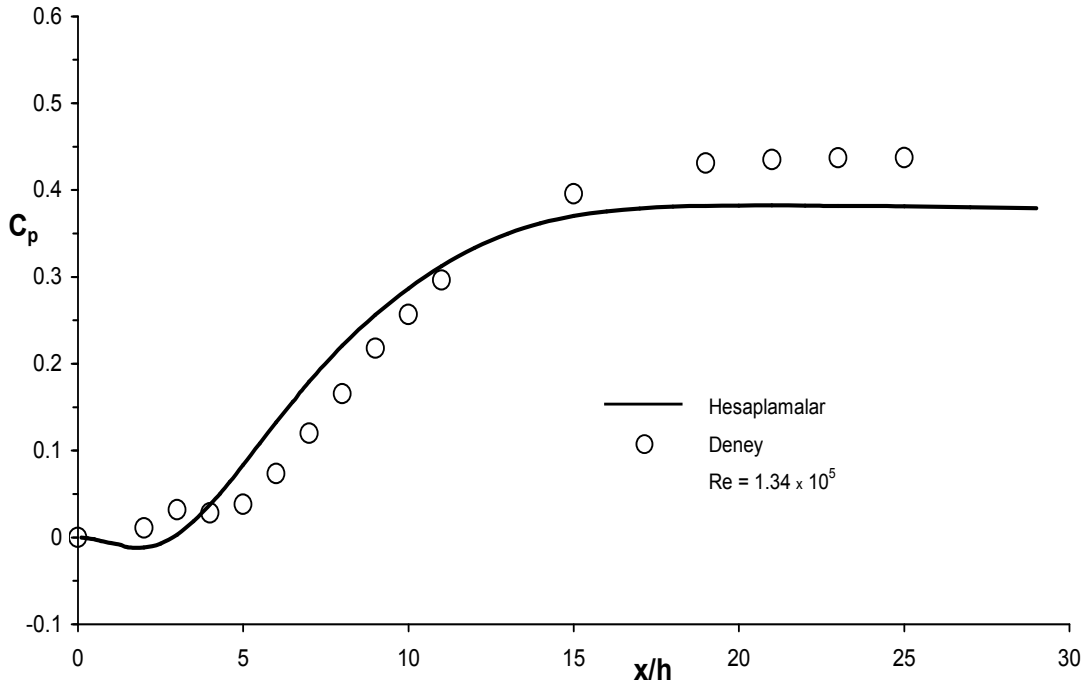


Şekil 2.131. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).

Pereira ve Pinho'nun (2002) akış durumu için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.132'de verilmiştir. Anigenişlemeli akış borusu boyunca cidar statik-basınç katsayısı ölçümlerinin sayısal hesaplamalarla olan uyumu Şekil 2.133'ten görülmektedir.



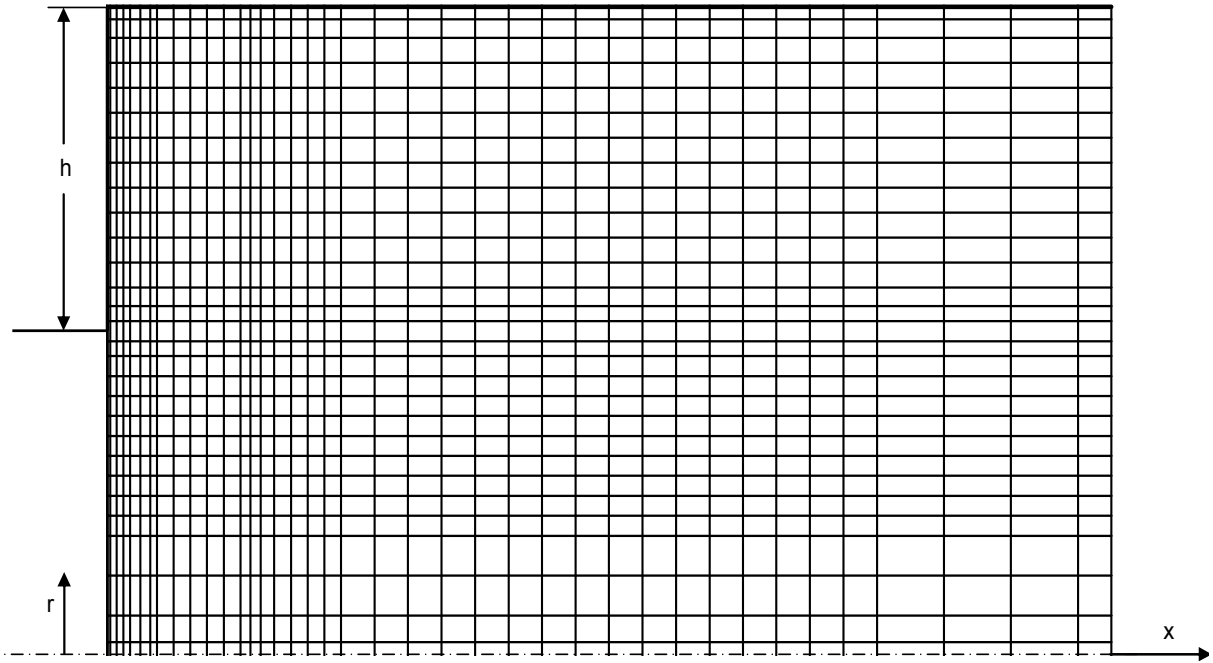
Şekil 2.132. Pereira ve Pinho'nun (2002) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 2.133. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Pereira ve Pinho'nun (2002), Reynolds sayısının 50400 ( $Re=U_b h / \nu$ ;  $U_b=U_{in}=1.74$  m/s) ve genişleme oranının 2 olduğu deneylerinin su ile ilgili ölçümleri buradaki sayısal hesaplamaların geçerliliğini kanıtlamak için kullanılmıştır.

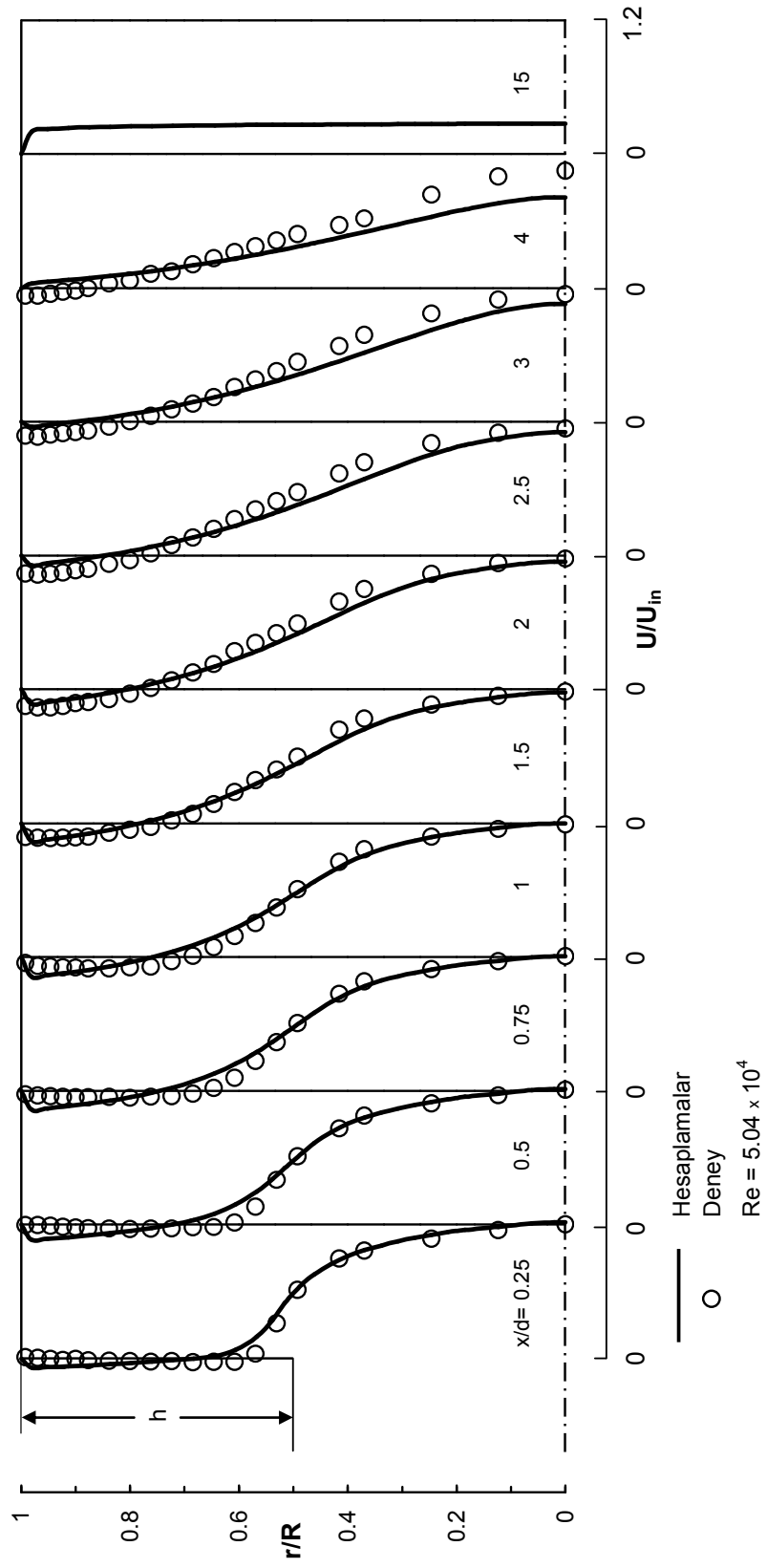
Pereira ve Pinho'nun (2002) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu için oluşturulan sayısal ağ dağılımı Şekil 2.134'deki gibidir.



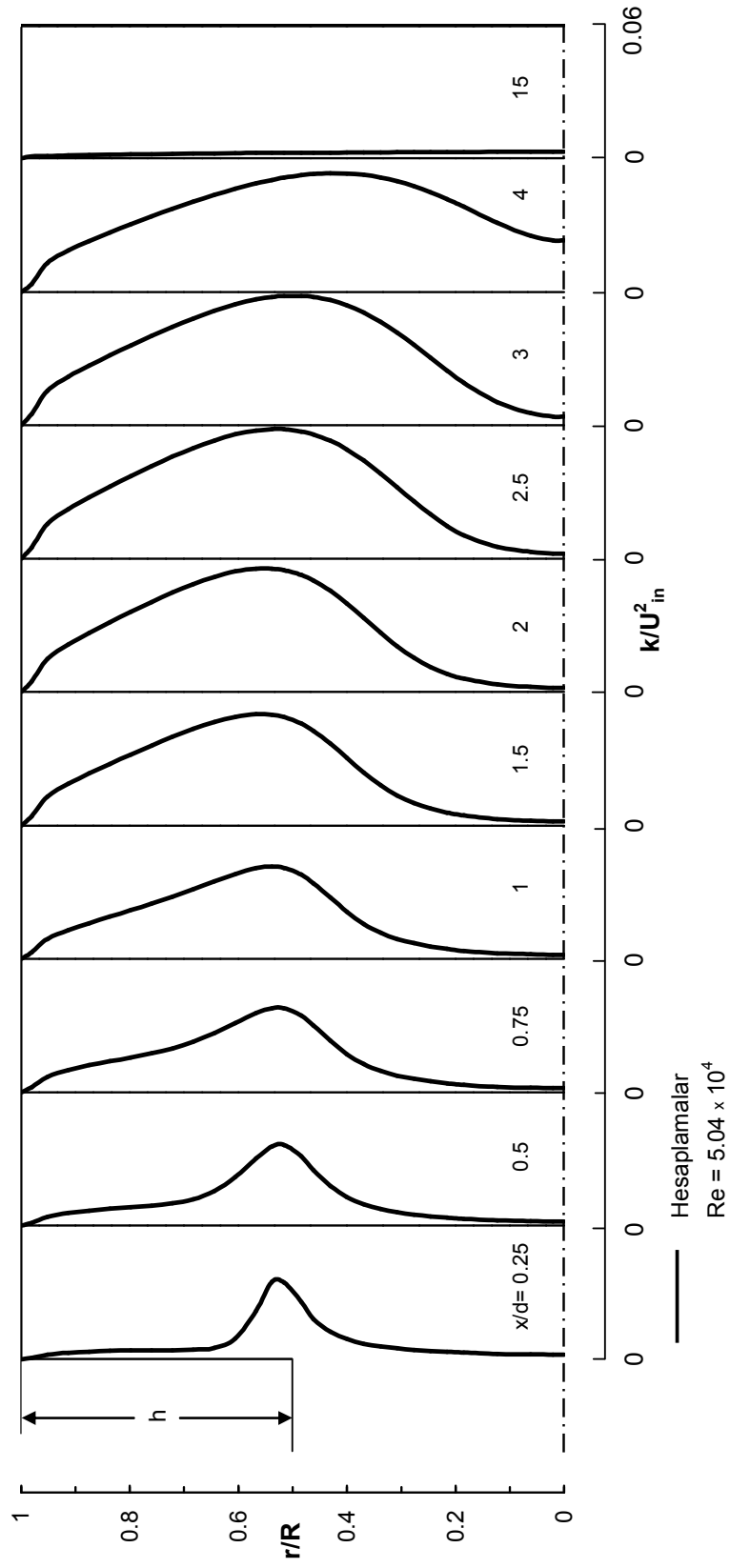
Şekil 2.134. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

Hesaplanan aksel hızın deneysel karşılıkları ile  $x/d=0.25$ 'den  $x/d=15$ 'e kadar olan 10 aksel kesitteki karşılaştırılması Şekil 2.135'te verilmiştir. Genel olarak oldukça iyi uyum vardır.

Pereira ve Pinho'nun (2002) akış durumu için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri ve efektif viskozite radyal profilleri sırasıyla, Şekil 2.136, Şekil 2.137 ve Şekil 2.138'de görülmektedir.

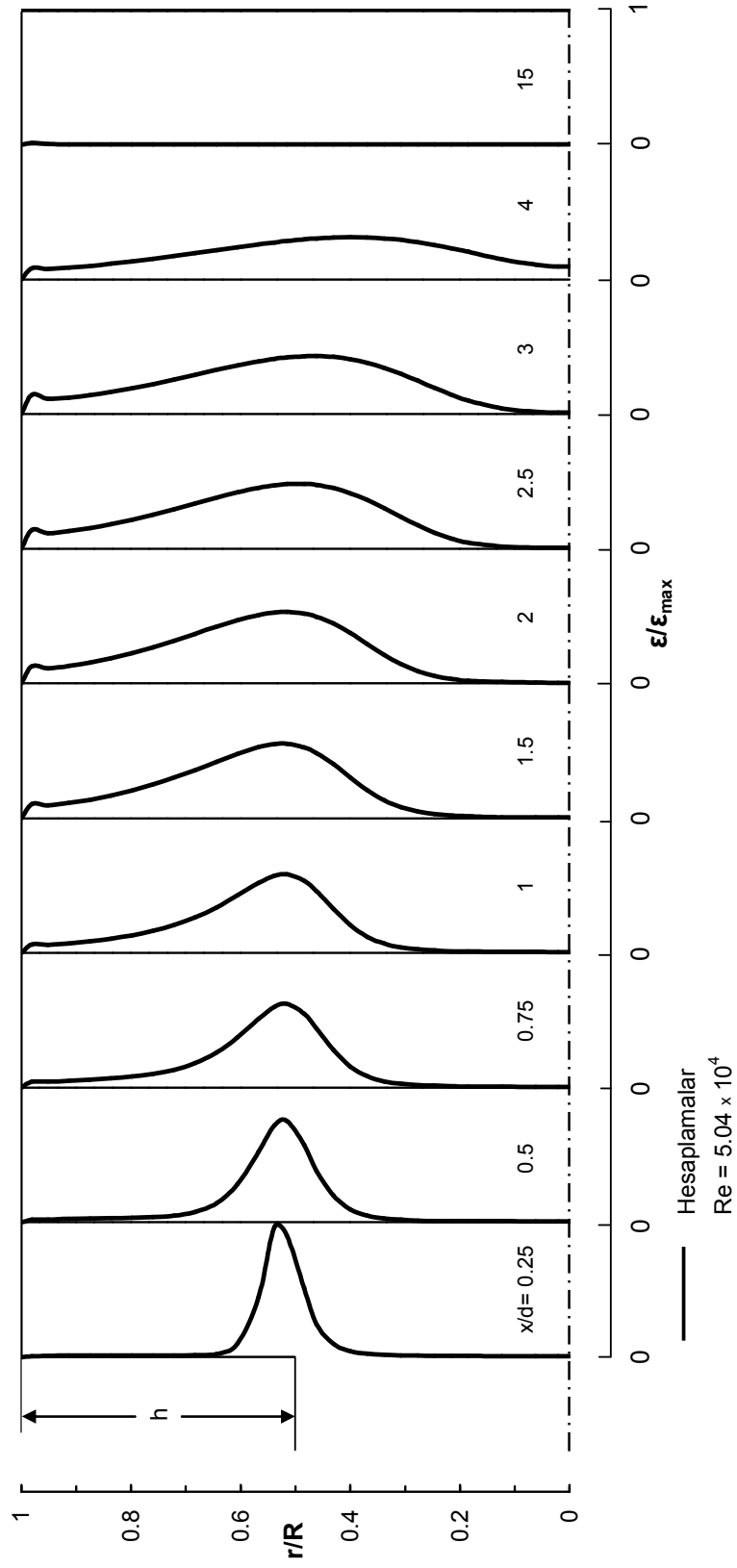


Şekil 2.135. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

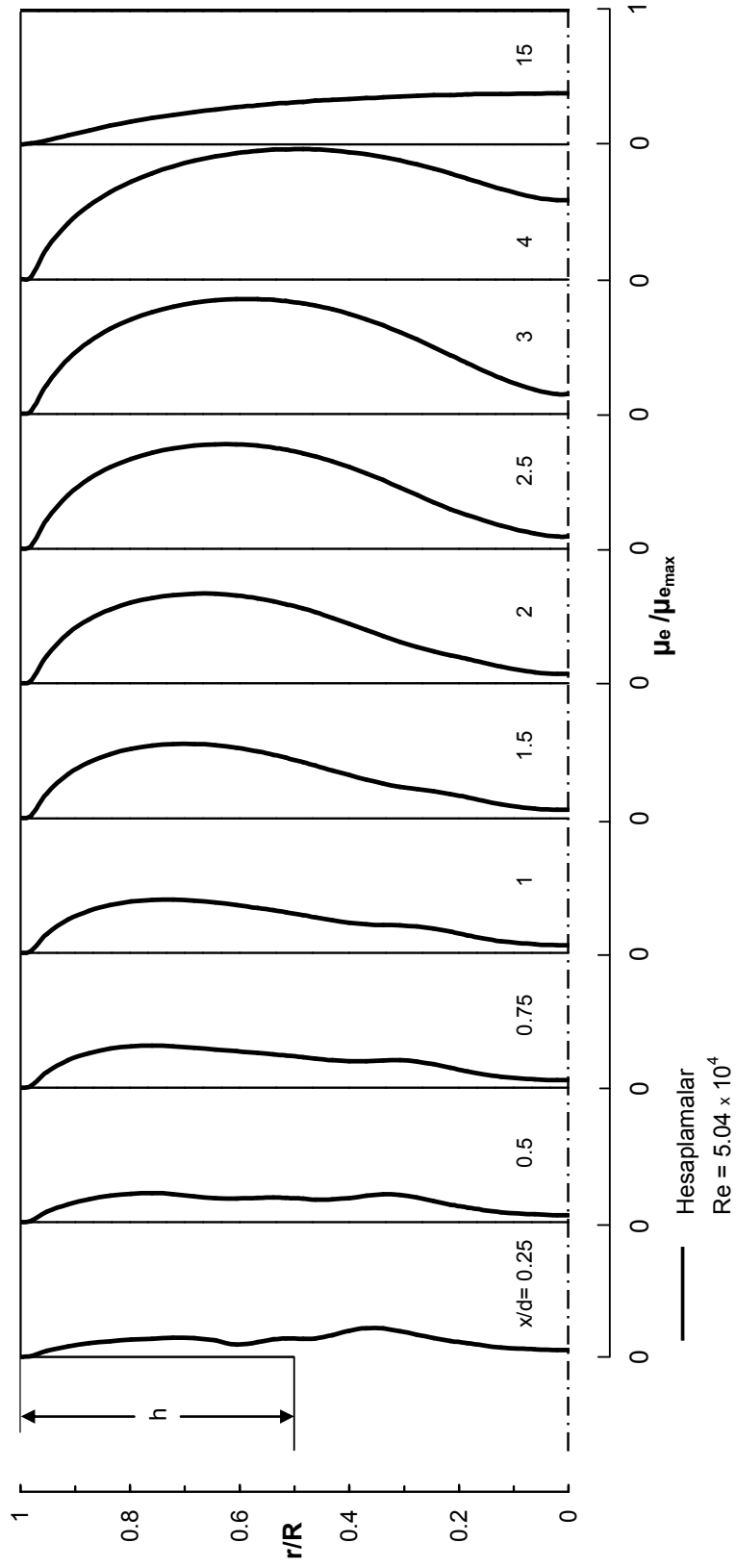


Şekil 2.136. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.

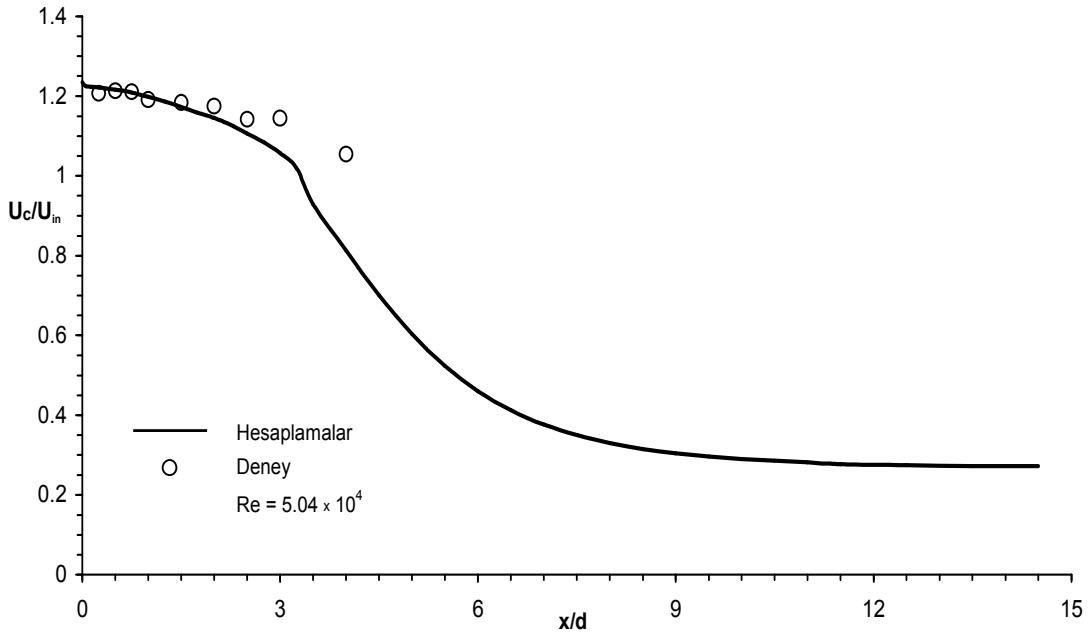




Şekil 2.137. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

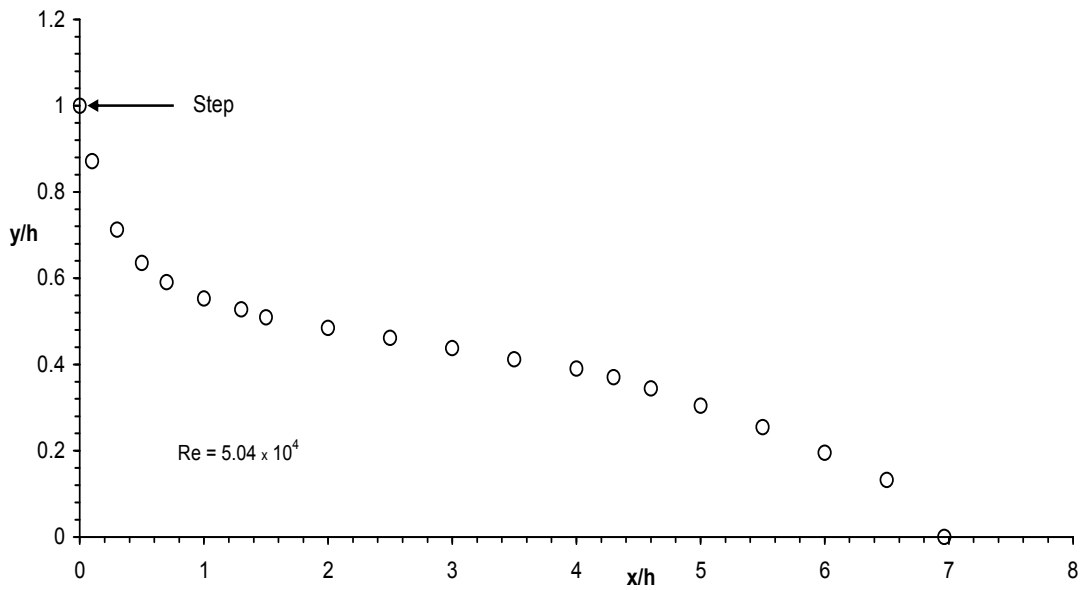


Şekil 2.138. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

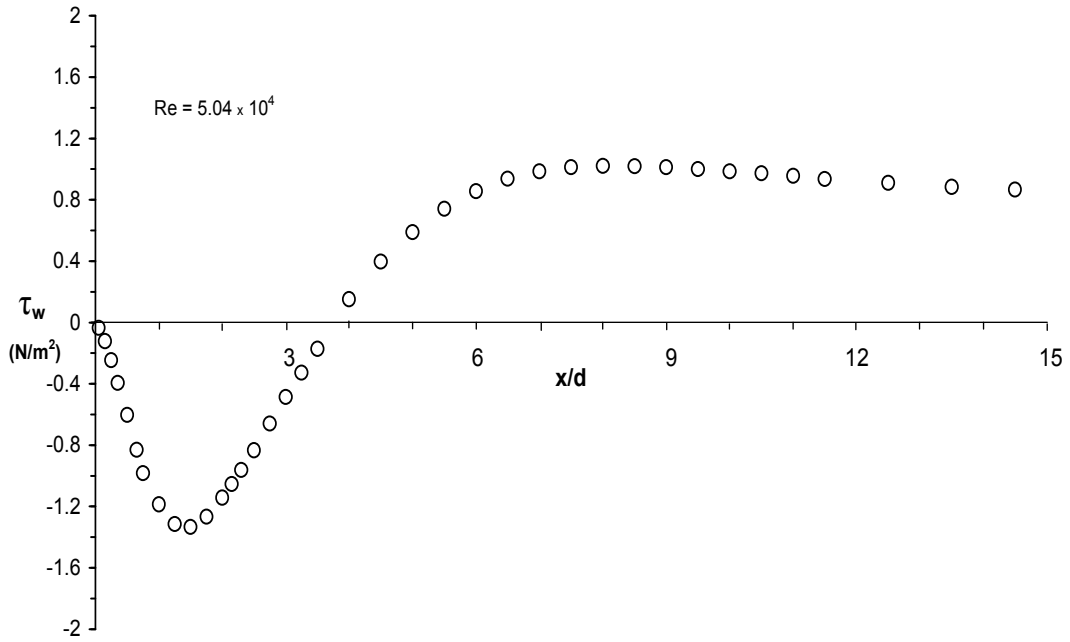


Şekil 2.139. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın, deneysel değerleri ile karşılaştırılması Şekil 2.139'da verilmiştir. Şekil 2.140'ta Pereira ve Pinho'nun (2002) akış durumu için geri akışın geometrik yeri gösterilmiştir. Deneysel değeri  $x_r=10h$  olarak bildirilen akış tutunma uzunluğu takriben  $x_r=7h$  değerinde hesaplanmıştır ( $Re=50300$  ve  $D/d=1.538$  olan akış için bu uzunluğun deneysel değeri  $x_r=8.71h$  olarak bildirilmiştir).

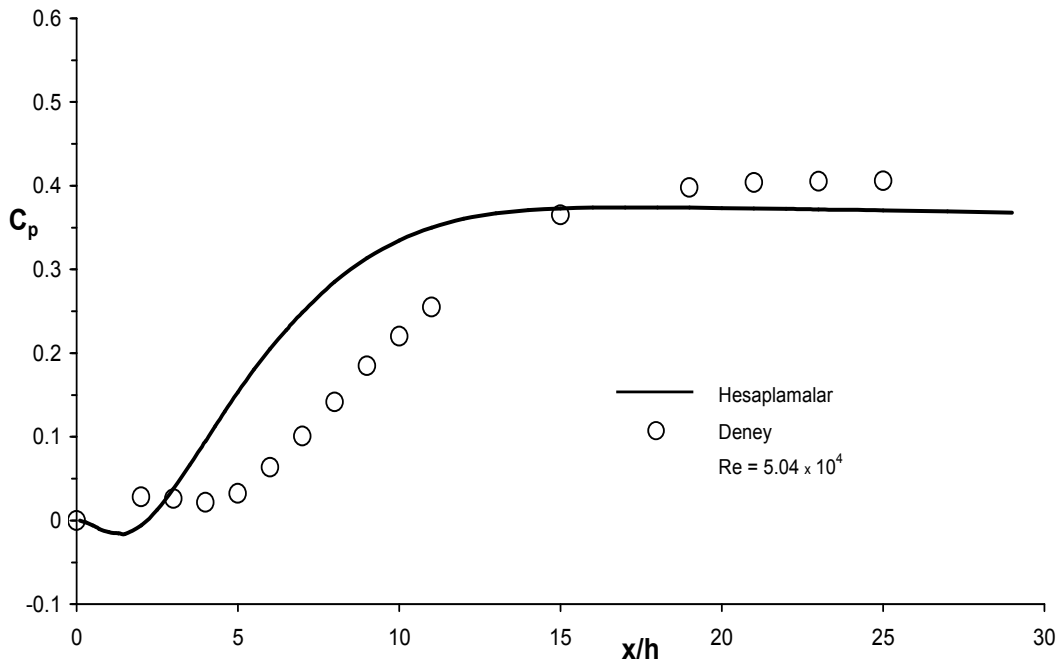


Şekil 2.140. Pereira ve Pinho'nun (2002) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.141. Pereira ve Pinho'nun (2002) aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Pereira ve Pinho'nun (2000) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.141'de verilmiştir. Şekil 2.142'den anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısı değerlerinin, ölçülen değerlerle mukayesesi görülmektedir.



Şekil 2.142. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının Pereira ve Pinho'nun (2002) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

Bu tezdeki son sayısal çalışmanın sonuçları, aksenal simetrik anigenişlemeli borulardaki türbülanslı çevrintili akışları incelemek için Castro ve Pinho'nun (1995) yaptığı deneyin ölçümleriyle kıyaslanacaktır. Çalışma akışkanı olarak kullanılan su ile ilgili bulgular kullanılacaktır.

Akışın Reynolds sayısı 178000 ve aksenal simetrik anigenişlemeli borunun genişleme oranı  $D/d=1.538$ 'dir. Girişte Reynolds sayısının, debiden hesaplanan ortalama hız (bulk mean velocity), giriş borusu çapı ( $d$ ) ve kinematik viskozite ( $\nu$ ) ile hesaplandığı bildirilmiştir ( $Re= U_{in} d / \nu$  ;  $U_{in}=U_b=6.09$  m/s ).

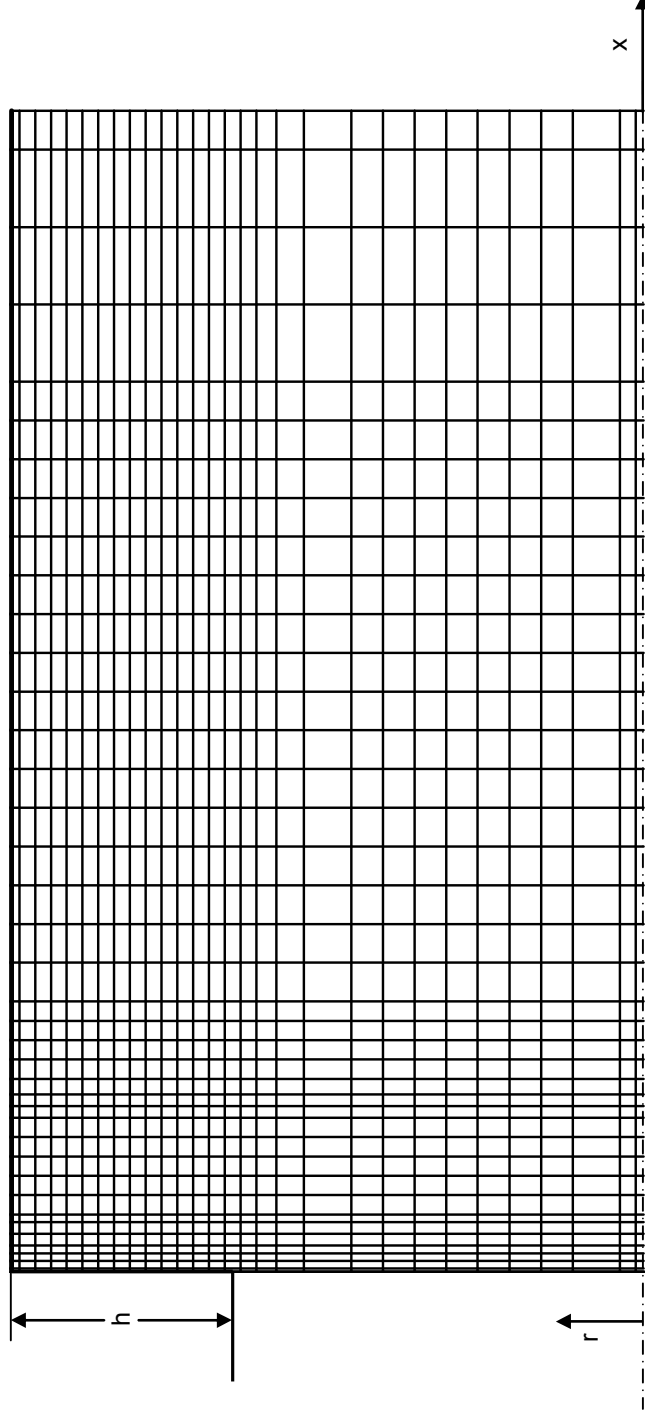
Şekil 2.143'te gösterilen sayısal ağ, Castro ve Pinho'nun (1995) akış durumu için oluşturulmuş ve  $x$  ve  $r$  yönlerinde sırasıyla  $40 \times 30$  ağ noktasından meydana gelmiştir.

Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan aksenal hız ve türbülans kinetik enerjinin Castro ve Pinho'nun (1995) bu akış durumu için yaptığı deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 2.144 ve Şekil 2.145'te gösterilmiştir.

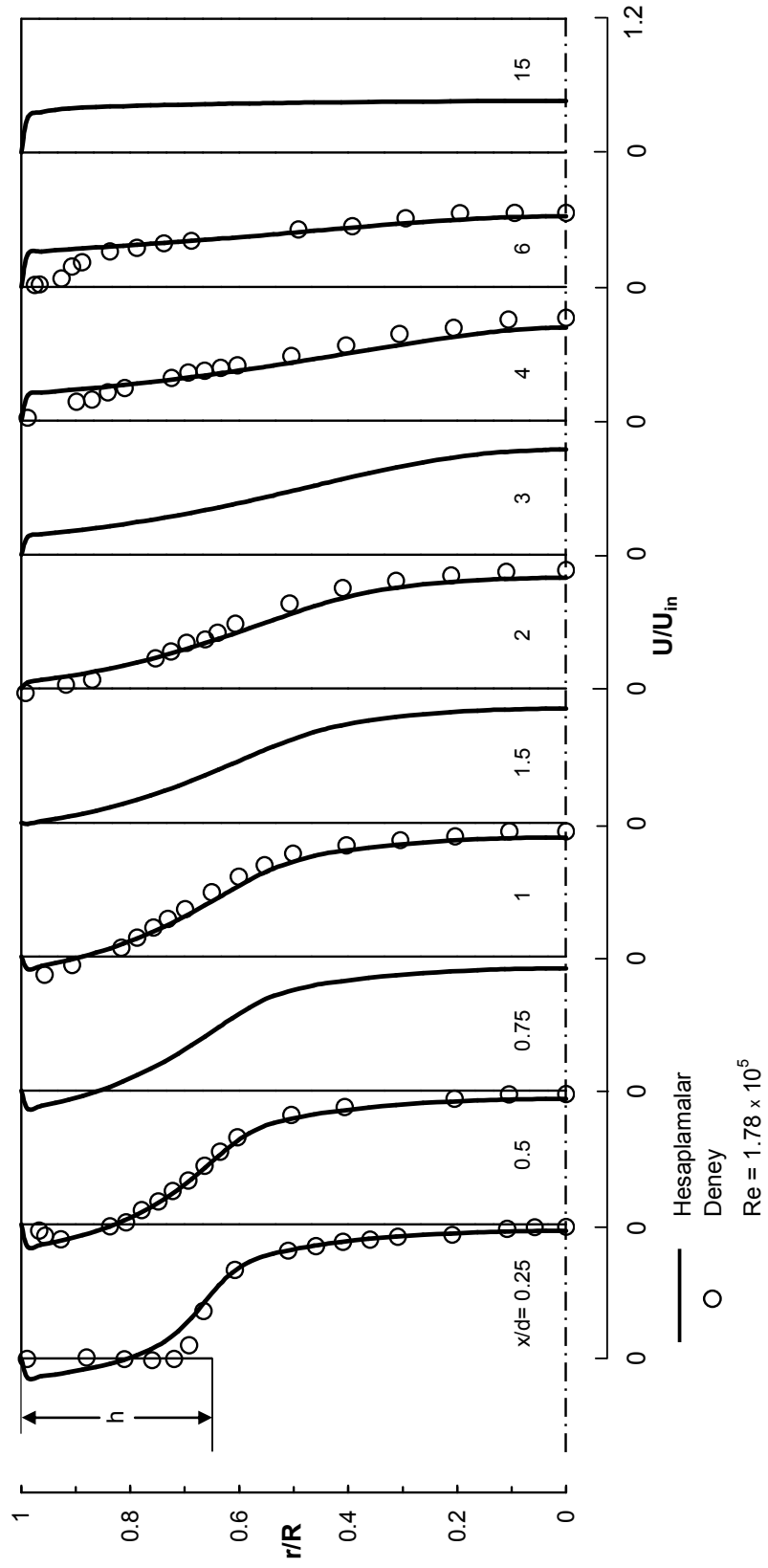
Eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri sırasıyla  $U_{in}$  ve  $U_{in}^2$  ile boyutsuzlaştırılmış ve  $x/d=0.25$ 'ten  $x/d=15$ 'e kadar olan 10 aksenal kesitte gösterilmiştir. ( $U_{in}=U_b$ ).

Şekil 2.144 ve Şekil 2.145'ten görüldüğü gibi, hesaplanan aksenal hız ve türbülans kinetik enerji değerleri ile deneysel ölçüm değerleri arasında genel olarak iyi uyum vardır.

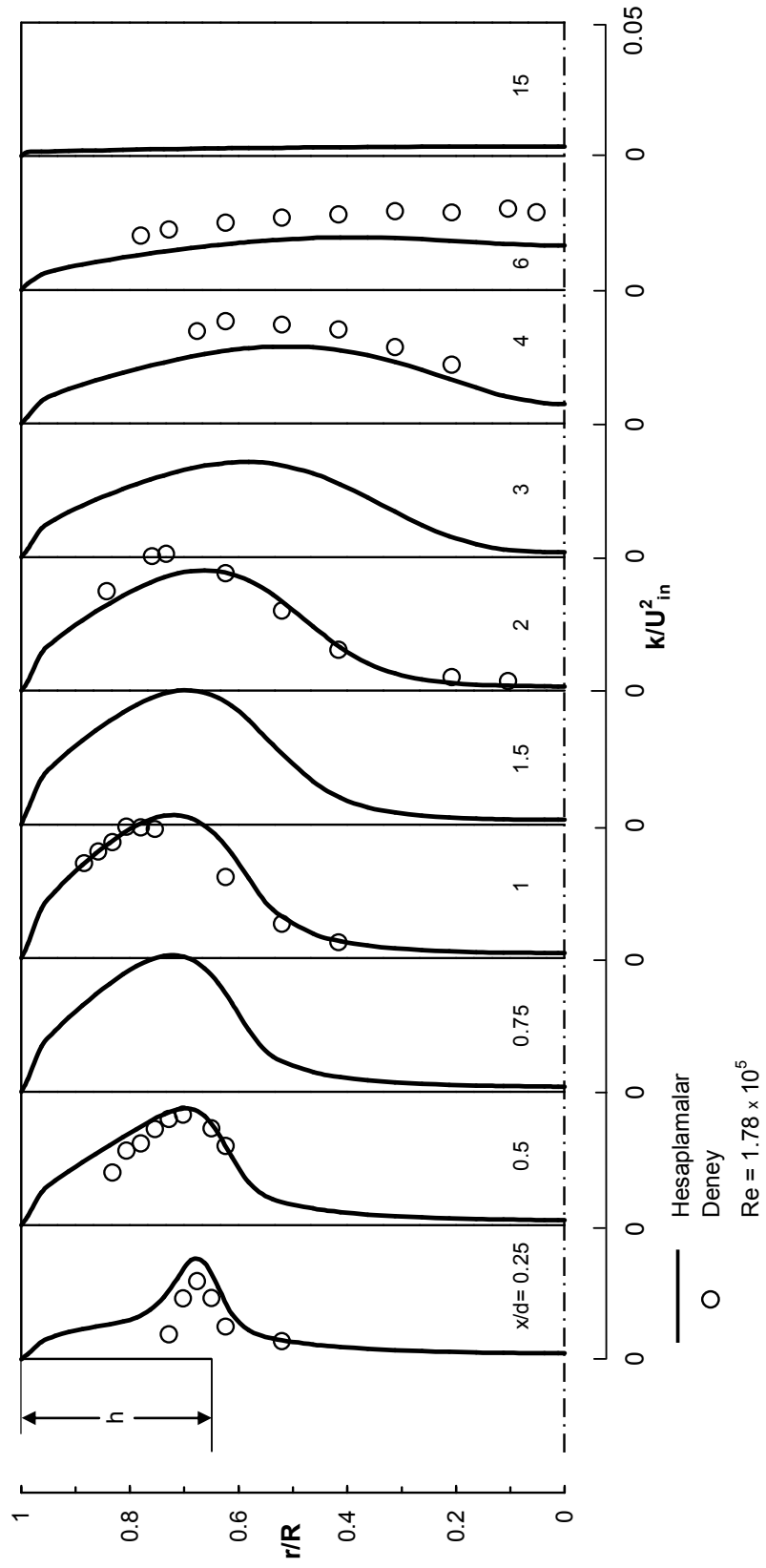
Castro ve Pinho'nun (1995) anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite radyal profillerinin gelişimi sırasıyla, Şekil 2.146 ve Şekil 2.147'den görülmektedir.



Şekil 2.143. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenal simetrik anıgenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

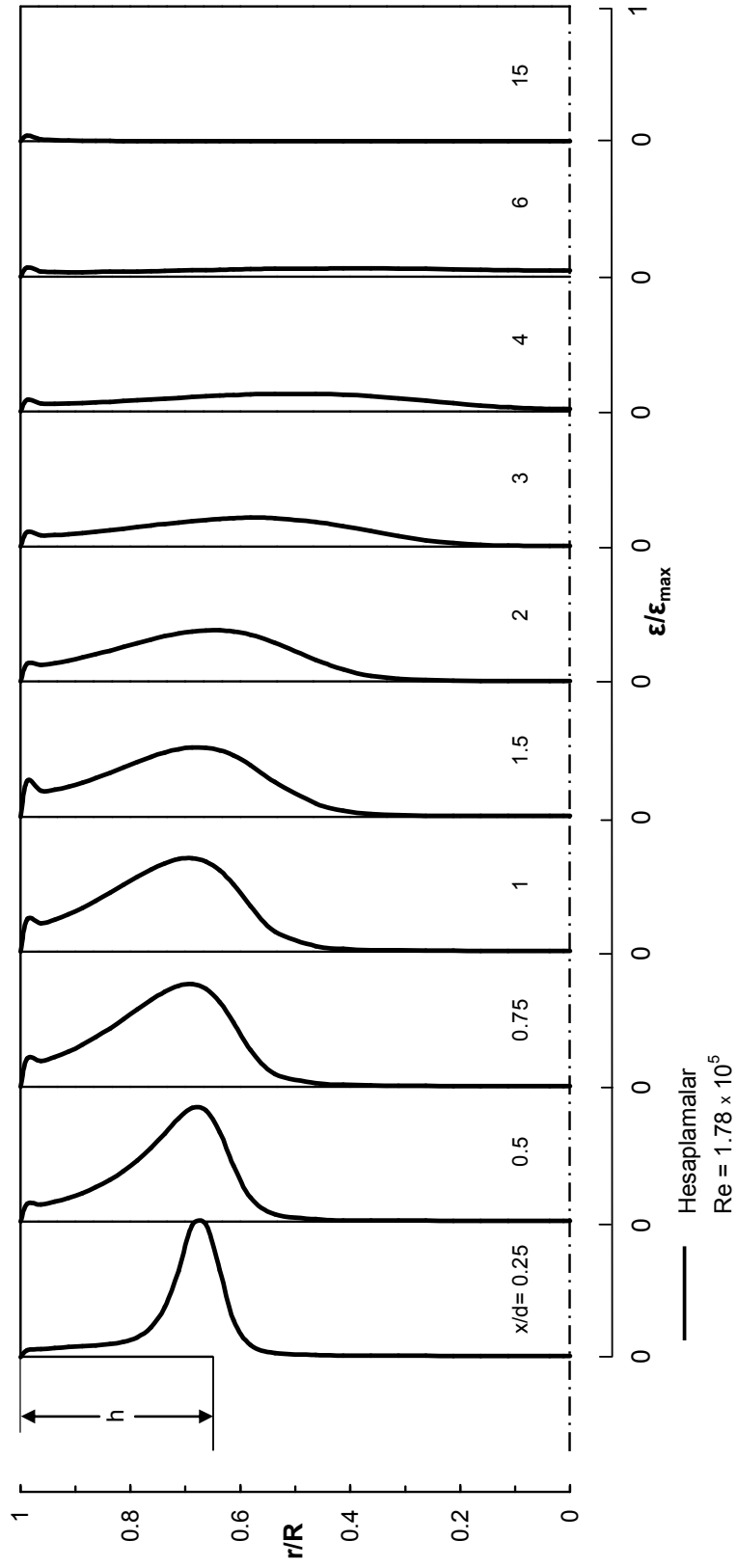


Şekil 2.144. Eksenel simetrik anıgenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksene hız radyal profillerinin Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

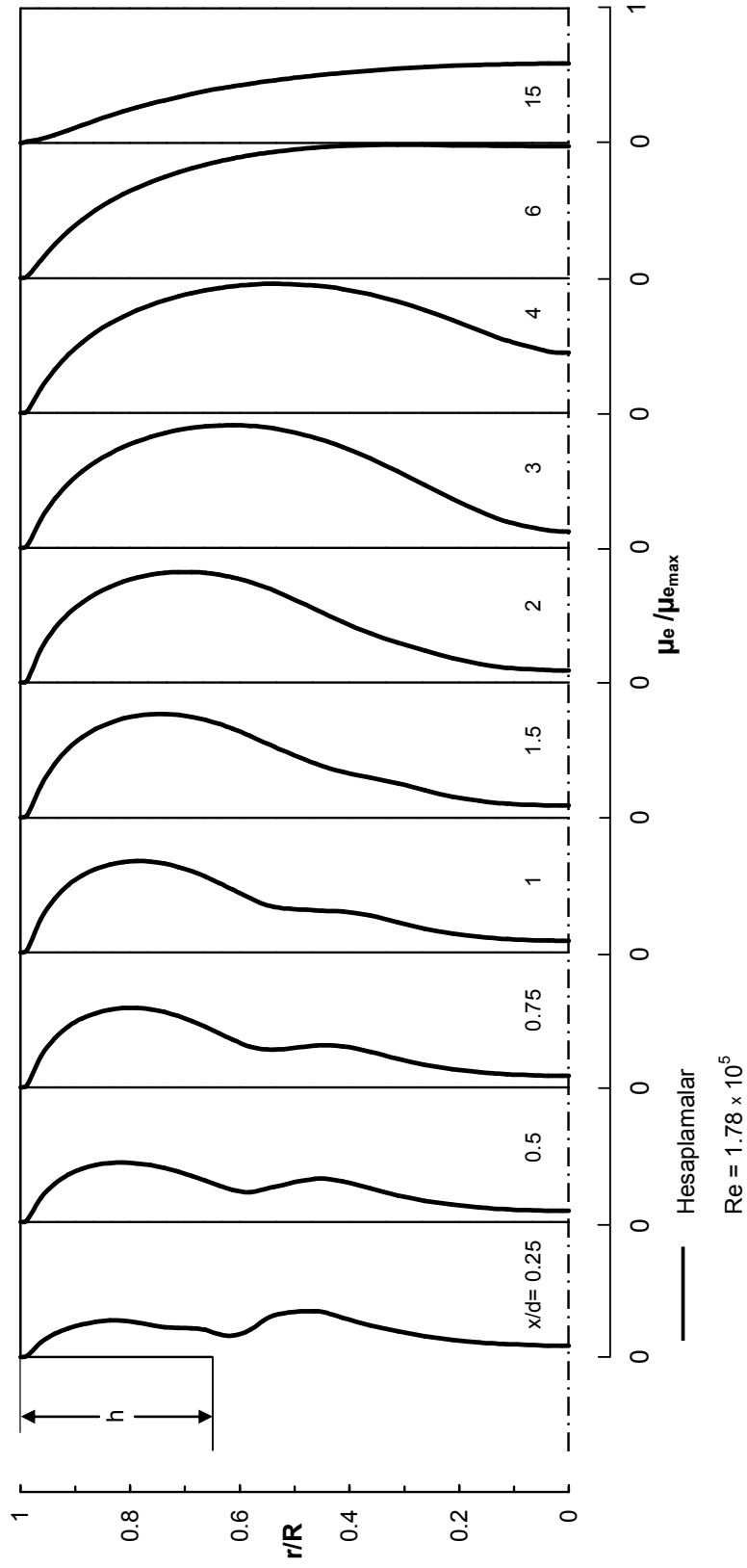


Şekil 2.145. Eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



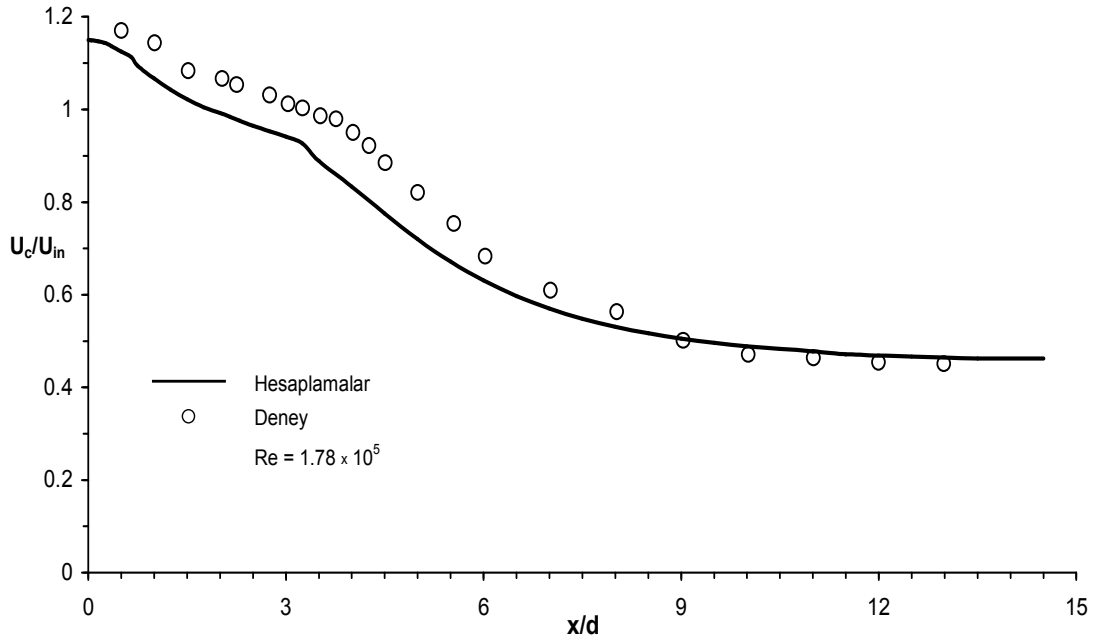


Şekil 2.146. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenal simetrik anigemişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kayboma miktarı radyal profilleri.



Şekil 2.147. Castro ve Pinho'nun (1995) aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

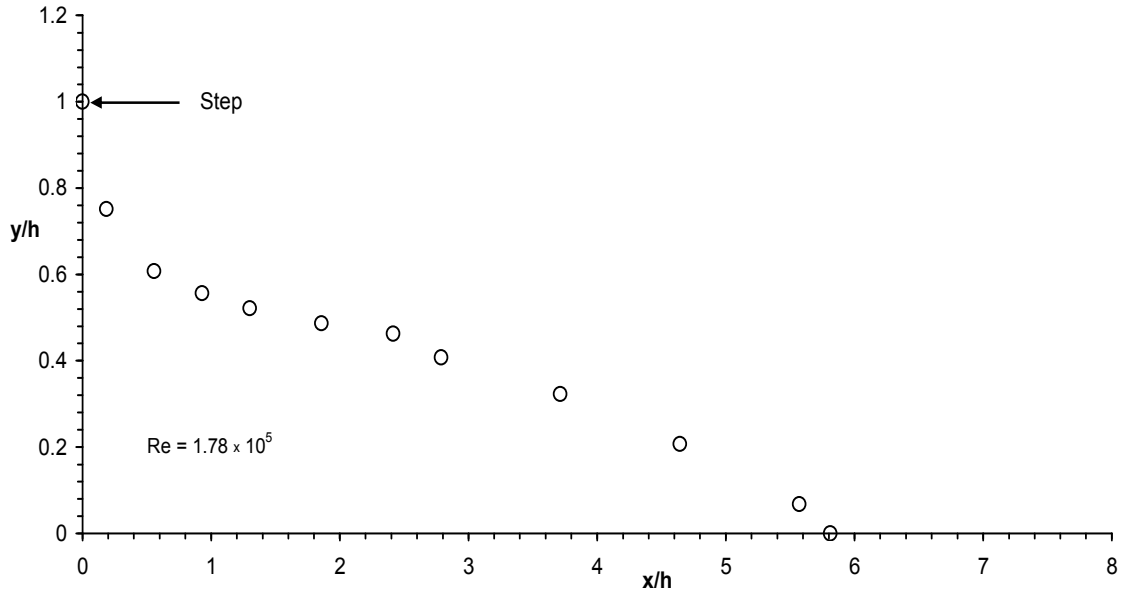
Castro ve Pinho (1995), aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca  $x=13d$  mesafesine kadar simetri ekseni üzerindeki aksel hızı ölçmüştür. Bu ölçümlerle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması Şekil 2.148'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum vardır.



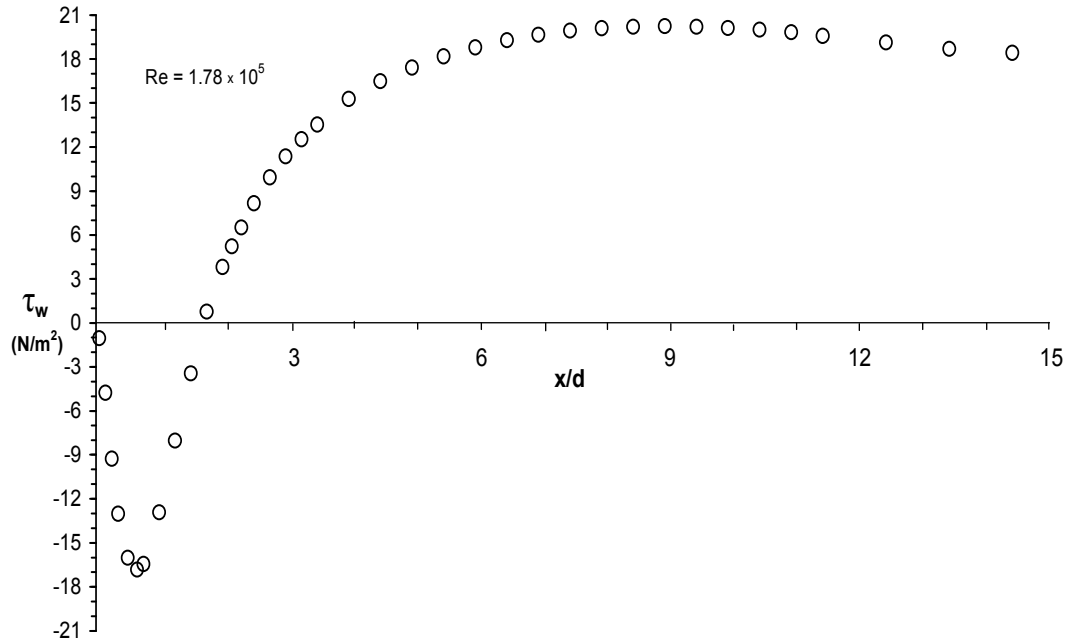
Şekil 2.148. Aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseni üzerinde hesaplanan aksel hızın Castro ve Pinho'nun (1995) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Şekil 2.149'da Castro ve Pinho'nun (1995) aksel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) gösterilmektedir. Cidardan ölçülen dikey mesafe  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Akış tutunma uzunluğu takriben  $x_r=5.8h$  olarak hesaplanmasına rağmen, Castro ve Pinho (1995), bu uzunluğun deneysel değerini  $x_r=8.67h$  olarak bildirmiştir.

Castro ve Pinho'nun (1995) aksel simetrik anigenişleme geometrisi için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 2.150'de verilmiştir. Anigenişlemenin başlangıcından yaklaşık olarak  $x/d=1.5$  mesafesine kadar  $\tau_w$  negatif değerler almaktadır.



Şekil 2.149. Castro ve Pinho'nun (1995) eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 2.150. Castro ve Pinho'nun (1995) eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda ayrımlı çevrintili türbülanslı akış, standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\varepsilon$  türbülans modelini kullanarak çeşitli Reynolds sayılarında sayısal olarak hesaplanmıştır. Geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, Patankar ve Spalding'in (1980) SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. On altı farklı akış durumu için  $k-\varepsilon$  türbülans modelinin performansı araştırılmıştır.

Standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeline dayanan eksenel hız, türbülans kinetik enerji, simetri eksenini boyunca eksenel hızın değişimi, sabit radyal mesafelerde eksenel hızın değişimi, cidar statik-basınç katsayısı değerleri için yapılan hesaplamalar literatürdeki deneysel ölçümlerle mukayese edilmiştir. Ayrıca eksenel simetrik anigenişlemeli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri, efektif viskozite radyal profilleri, geri akışın geometrik yeri ve cidar kayma gerilmesinin dağılımı için sayısal hesaplamalar sunulmuştur.

Eksenel hızın hesaplanan ve ölçülen değerleri arasındaki uyum genel olarak oldukça iyidir. Buna rağmen, çevrintili akış bölgesinin tutunma uzunluğu ve genişliği  $k-\varepsilon$  türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanmıştır. Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenini üzerindeki eksenel hızın azalışı biraz daha çabuk olmuştur. Ayrımlı akışın kayma tabakasından anigenişlemeli borunun simetri eksenine doğru türbülans kinetik enerjinin radyal yayılımı,  $k-\varepsilon$  türbülans modeli tarafından daha küçük hesaplanması hariç olmak üzere, hesaplanan ve ölçülen türbülans kinetik enerji değerlerinin karşılaştırılması oldukça iyidir. Hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının deneysel ölçümlerle olan uyumu da genellikle iyidir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, S.A., 1998, Velocity measurements and turbulence statistics of a confined isothermal swirling flow, *Int. J. Exp. Thermal and Fluid Science* 17, 256-264.
- Ahmed, S.A., 1997, Three component velocity measurements of an isothermal confined swirling flow, *Journal of Aerospace Eng., IMechE, Part G*, Vol. 211, 113-122.
- Ahmed, S.A., 1998, An isothermal experimental investigation of turbulence transport through an abrupt axisymmetric expansion, *Journal of Aerospace Eng., IMechE, Part G*, Vol. 212, 45-55.
- Ahmed, S.A., 1992, ERCOFTAC Database : Isothermal dump combustor with swirl experiments, Retrieved, from the World Wide Web: <https://cfcd.me.umist.ac.uk/ercoftac/classif.htm>,1992.
- Ahmed, S.A., and Abidogun, K., 1998, Measurements of turbulence statistics and energy budgets in a model combustor, *Int. J. of Energy*, Vol. 23, No9, 741-752.
- Ahmed, S.A., and Abidogun, K., 1997, An experimental investigation of turbulence statistics in an axisymmetric sudden expansion, *Nat.Heat.Tr.Conf.Vol.8, ASME*, 101-110
- Ahmed, S.A., and Nejad, A.S., 1993, Velocity measurements in a research combustor, Part 1. Isothermal swirling flows, *Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.5, No. 2,162-174.
- Ahmed, S.A., and Nejad, A.S., 1992, Premixed, turbulent combustion of axisymmetric sudden expansion flow. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.13, No. 1, 15-21.
- Ahmed, S.A., Nejad, A.S., and Al-Garni,A., 1996, Near Field study of a turbulent free jet, and velocity bias effects, *Journal of Propulsion and Power* 12 (1) ,155-158.
- Amano, R.S., 1982, A study of turbulent flow downstream of an abrupt pipe expansion, *AIAA Journal* 21 (10), 1400-1405.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Castro, O.S., Pinho, F.T., 1995, Turbulent expansion flow of low molecular weight shear-thinning solutions, *Exp. Fluids* 20, 42-55.
- Chaturvedi, M.C., 1963, Flow characteristics of axisymmetric sudden expansions, *Proc. ASCE, J. Hydraulics Div.* 89, 61-92.
- Cole, D.R. and Glauser, M.N., 1998a, Flying hot-wire measurements in an axisymmetric sudden expansion, *Exp. Thermal Fluid Science*, 18, 150-167.
- Cole, D.R. and Glauser, M.N., 1998b, Application of stochastic estimation in the axisymmetric sudden expansion, *Physics of Fluids*, Vol.10, No11, 2941-2949.
- Dales, C., Escudier, M.P., Poole, R.J., 2005, Asymmetry in the turbulent flow of a viscoelastic liquid through an axisymmetric sudden expansion, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.* 125, 61-70.
- Dellenback, P. A., Metzger, D. E. and Neitzel, G. P., 1988, Measurements in turbulent swirling flow through an abrupt axisymmetric expansion. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J.* 26(6), 669-681.
- Devenport, W.J., Sutton, E.P., 1993, An experimental study of two flows through an axisymmetric sudden expansion, *Exp Fluids* 14, 423-432.
- Durrett, R. P., Stevenson, W. H., and Thompson, H. D., 1988, Radial and axial turbulent flow measurements with an LDV in an axisymmetric sudden expansion air flow, *ASME J. Fluids Eng.*, 110, 367-372.
- Escudier, M.P., Smith S., 1999, Turbulent flow of Newtonian and shear-thinning liquids through a sudden axisymmetric expansion, *Exp. Fluids* 27, 427-434.
- Escudier, M.P., Oliveira P.J. and Poole, R.J., 2002, Turbulent flow through a plane sudden expansion of modest aspect ratio, *Physics of Fluids*, 14, 3641-3654.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Favaloro, S.C., Nejad, A.S., Ahmed, S.A., 1989, Experimental and computational investigation of isothermal swirling flow in an axisymmetric dump combustor, *Journal of Propulsion, AIAA*, Vol 7 , No3, 348-356.
- Founti, M. and Klipfel, A.,1998, Experimental and computational investigations of nearly dense two-phase sudden expansion flows, *Experimental Thermal Fluid Sciences*,Vol 17, 27-36.
- Furuichi, N., Takeda,Y., and Kumada,M., 2003, Spatial structure of the flow through an axisymmetric sudden expansion, *Experiments in Fluids*, Vol 34, 643-650.
- Glauser, M.N.,and George W.K., 1992, Application of multipoint measurements for flow characterization, *Exp.Thermal and Fluid Science*,Vol 5, 617-632.
- Gould, R.D., Stevenson, W.H., and Thompson, H.D.,1990, Investigation of turbulent transport in an axisymmetric sudden expansion, *AIAA* , Vol 28, 276-283.
- Guo, B., Langrish, T.A.G., and Fletcher, D.F., 2001, Simulation of turbulent swirl flow in an axisymmetric sudden expansion, *AIAA Journal* , Vol 39, 96-102.
- Guo, B., Langrish, T.A.G., and Fletcher, D.F., 2001, Numerical simulation of unsteady turbulent flow in axisymmetric sudden expansions, *Journal of Fluids Eng.*,123,574-587.
- Guo, B., Langrish, T.A.G, and Fletcher, D.F., 2002, CFD simulation of precession in sudden pipe expansion flows with low inlet swirl, *Applied Mathematical Modelling*, 26, 1-15.
- Karasu, T., 1995, Numerical simulation of turbulent flow in axisymmetric sudden expansions, 10<sup>th</sup> Turkish National Conference on Thermal Sciences and Technologies, Ankara, Turkey, Proceedings, vol.1, pp. 169-180.
- Karasu, T., Kural, O., 1996, Eksenel simetrik anigenişlemelerde türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 2. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, Trabzon, Bildiri Kitabı, 245-254.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Karasu, T., 1997, Numerical prediction of turbulent recirculating flow through axisymmetric sudden expansions, 10th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Swansea, U.K., Proc., 10, 357-368.
- Karasu, T., 2001, Computer simulation of complex turbulent recirculating flow in an axisymmetric sudden expansion, 6. Türk-Alman Enerji Sempozyumu, İzmir, Bildiriler Kitabı, ss. 179-186.
- Karasu, T., 2001, Eksenel simetrik anigenişlemeli bir boruda türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, Mühendislikte Modern Yöntemler Sempozyumu, İstanbul, Bildiri Kitabı, ss. 328-336.
- Karasu, T., 2001, Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda kompleks çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 12. Ulusal Mekanik Kongresi, Konya, Bildiriler Kitabı, ss. 553-564.
- Karasu, T., 2008, Anigenişlemeli borularda türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 4.Ege Enerji Sempozyumu, 21-23 Mayıs, İzmir, Bildiriler Kitabı, ss. 597-605.
- Karasu, T., 2008, Eksenel simetrik anigenişlemeli bir boruda türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 10th International Combustion Symposium, Sakarya University, Bildiriler Kitabı ss. 533-542.
- Koronaki, E.D., Liakos, H.H., Founti, M.A., Markatos, N.C., 2001, Numerical study of turbulent diesel flow in a pipe with sudden expansion, Applied Mathematical Modelling 25, 319-333
- Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol 3, 269-289.
- Lee, D.H., and Sung, H.J., 1994, Experimental study of turbulent axisymmetric cavity flow, Experiments in Fluids, 17, 272-281.
- Lilley, D.B., 1979, Flowfield modeling in practical combustor, a review, J. of Energy, Vol. 3 pp.193-210.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Mak, H. and Balabani S., 2007, Near field characteristics of swirling flow past a sudden expansion, *Chemical Engineering Science*, Volume 62, Issue 23, 6726-6746.
- Moon, L.F., and Rudinger, G., 1977, Velocity distribution in an abruptly expanding circular duct, *ASME J. Fluids Eng.*, 99, 226-230.
- Morrison, G.L., Tatterson, G.B., Long, M.W., 1987, 3-D laser velocimeter investigation of turbulent incompressible flow in an axisymmetric sudden expansion, *AIAA, Aerospace Sciences Meeting*, 25th, Reno, Jan. 12-15, 11 p.
- Nejad, A.S., Ahmed, S.A., 1992, Flow field characteristics of an axisymmetric sudden-expansion pipe flow with different initial swirl distribution, *Int. Journal of Heat and Fluid Flow* 13,314-321.
- Nejad, A.S., Vanka, S.P., Favaloro, S.C., Samimy M., Langenfeld, C., 1989, Application of laser velocimetry for characterization of confined swirling flow, *J.of Eng. for Gas Turb. and Power*, Vol.111,36-45.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* , Chapters 5 and 6, 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, DC.
- Pereira, A.S., Pinho, F.T., 1994, Turbulent pipe flow characteristics of low molecular weight polymer solutions. *J Non-Newt Fluid Mech* 55,321-344.
- Pereira, A.S., Pinho, F.T., 2000, Turbulent characteristics of shear-thinning fluids in recirculating flows, *Exp. Fluids* 28, 266-278.
- Pereira, A.S., Pinho, F.T., 2001, Recirculating turbulent flows of thixotropic fluids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 99, 183-201.
- Pereira, A.S., Pinho, F.T., 2002, The effect of the expansion ratio on a turbulent non-Newtonian recirculating flow, *Exp. Fluids* 32, 458-471.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Poole, R.J. and Escudier, M.P., 2004, Turbulent flow of viscoelastic liquids through an axisymmetric sudden expansion, *J. of non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.117, 25-46.
- Poole, R.J. and Escudier, M.P., 2004, Turbulent flow of viscoelastic liquids through an axisymmetric sudden expansion, 10<sup>th</sup> EUROMECH European Turbulence Conference, *Advances in Turbulence*, Trondheim, Norway, CIMNE, 653-656.
- Poole, R.J., 2003, Turbulent flow of non-Newtonian liquids through an axisymmetric sudden expansion, 1<sup>st</sup> Osborne Reynolds Seminar, Imperial Coll, London, UK.
- Reddy P., Sujith R. and Chakravarthy S., 2005, Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India AIAA-0217
- Rhode, D.L., Lilley, D.G. and McLaughlin, D.K., 1983, Mean flowfields in axisymmetric combustor geometries with swirl, *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J.* 21(4), 593-600.
- So, R.M.C., 1987, Inlet centerline turbulence effects on reattachment length in axisymmetric sudden-expansion flows, *Experiments in Fluids*, Vol.5, 424-426.
- So, R.M.C., and Ahmed S.A., 1988, Characteristics of dump combustor flows, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol 10, No 1, 66-74.
- Stevenson, W.H., Thompson, H.D., and Craig, R.R., 1984, Laser velocimeter measurements in highly turbulent recirculating flows, *ASME J. Fluids Eng.*, 106, 173- 180
- Stieglmeier, M., Tropea, C., Weiser, N.; Nitsche, W., 1989, Experimental investigation of the flow through axisymmetric expansions, *Journal of Fluids Engineering* vol.111, p. 464-471.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Stieglmeier, M., Tropea, C., Weiser, N.; Nitsche, W., 1989, ERCOFTAC Database: Flow through Axisymmetric Expansions, Retrieved, from the World Wide Web: <https://cfd.me.umist.ac.uk/ercoftac/classif.html>, 1989.
- Tinney, C.E., Eaton E.L., Glauser, M.N., 2002, Multi-point measurements in an axisymmetric sudden expansion, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements Mallorca, Spain, 16-18 September, 485-494.
- Tinney, C.E., Glauser, M.N., Eaton, M.N., Taylor, J.A., 2006, Low-dimensional azimuthal characteristics of suddenly expanding axisymmetric flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 567, 141-155.
- Vanierschot M. and Van den Bulck E., 2008, The influence of swirl on the reattachment length in an abrupt axisymmetric expansion, *Int. J. of Heat and Fluid Flow* 29, 75-82.
- Wang, P. and Bai, X.S., 2004, Large eddy simulation and experimental studies of a confined turbulent swirling flow, *Physics of Fluids* Volume 16, Number 9, 3306-3324.
- Yang B.T. and Yut M.H., 1982, The flow field in a suddenly enlarged combustion chamber, *AIAA Journal* 21(1), 92-97