

Çift ve Tek Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda
Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

Melikşah Kandilci

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2009

Numerical Computation Of Turbulent Flow
In Single- and Double-sided Planar Sudden Expansions In Channels

Melikşah Kandilci

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

December 2009

Çift ve Tek Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda
Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

Melikşah Kandilci

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.

Aralık 2009

ONAY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Melikşah Kandilci'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Çift ve Tek Yanlı Düzlemsel Anıgenişlemeli Kanallarda Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

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

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Tahir KARASU, D.I.C.

Üye : Doç. Dr. Neře Öztürk

Üye : Yrd. Doç. Dr. Necati Mahir

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ertunç Tat

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 tezde, çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda sürekli, sıkıştırılmayan, kompleks çevrintili türbülanslı 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, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda çeşitli kesitlerde, yerel akış yönü hız profilleri, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite profilleri, geri akışın geometrik yeri, kanallardaki üst cidar ile alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı, cidar sürtünme katsayısı ile cidar statik-basınç katsayısının değişimi için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama sonuçları deneysel bulgularla iyi uyum göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Anigenişlemeli düzlemsel kanal, $k-\varepsilon$ modeli, çevrintili türbülanslı akış.

SUMMARY

In this thesis, the results of an extensive study of numerical computation of steady, incompressible complex turbulent separated recirculating flow in single- and double-sided planar sudden expansions in channels 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 $k-\varepsilon$ turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall functions are employed. Numerical computations for local streamwise velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, locus of flow reversal, streamwise variation of centre-line velocity, distribution of wall static-pressure coefficient, skin friction coefficient and distribution of wall-shear stress along top and bottom wall of planar sudden expansion flow geometry are presented and compared with experimental measurements. The results of numerical predictions show good agreement with experimental data.

Keywords: Planar sudden expansion channel, $k-\varepsilon$ model, recirculating turbulent flow.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımda, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarımda, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren, zamanımı ayıran, büyük bir sabırla her türlü ilgi ve yardımını esirgemeyen danışmanım, değerli hocam, sayın Prof. Dr. Tahir KARASU, D.I.C.'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL	4
2.1. Hareket Denklemleri.....	4
2.2. Türbülans Modeli.....	5
2.3. Cidar Fonksiyonları.....	7
3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ	9
3.1. Genel Diferansiyel Denklem.....	9
3.2. Sınır Koşulları.....	9
3.3. Hesaplama Ayrıntıları.....	11
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	13
4.1. Çift Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması.....	13
4.2. Tek Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması	42
5. SONUÇLAR	101
6. KAYNAKLAR DİZİNİ	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Koordinat sistemi ve çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi.....	10
3.2. Koordinat sistemi ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi.....	10
4.1.1. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	15
4.1.2. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.(Re=40000).....	16
4.1.3. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=40000).....	17
4.1.4. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. (Re=40000).....	18
4.1.5. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri. (Re=40000)....	19
4.1.6. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri ekseninde hesaplanan yatay hızın değişimi. (Re=40000).....	20
4.1.7. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$). (Re=40000).....	21
4.1.8. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. (Re=40000).....	22
4.1.9. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi.(Re=40000)..	23
4.1.10. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=14100)	25

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1.11. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=14100).....	26
4.1.12. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. (Re=14100).....	27
4.1.13. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.(Re=14100)....	28
4.1.14. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi. (Re=14100).....	29
4.1.15. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri (u=0). (Re=14100)	30
4.1.16. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. (Re=14100).....	31
4.1.17. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi. (Re=14100).....	32
4.1.18. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=4000).....	34
4.1.19. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=4000).....	35
4.1.20. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. (Re=4000).....	36
4.1.21. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri. (Re=4000)....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1.22. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi. ($Re=4000$).....	38
4.1.23. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$). ($Re=4000$).....	39
4.1.24. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. ($Re=4000$).....	40
4.1.25. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi. ($Re=4000$)...	41
4.2.1. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	44
4.2.2. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	45
4.2.3. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	46
4.2.4. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	47
4.2.5. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	48
4.2.6. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	49
4.2.7. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	50
4.2.8. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2.9. Hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	51
4.2.10. Hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	51
4.2.11.a. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel Anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	54
4.2.11.b. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel Anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	54
4.2.11.c. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel Anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	54
4.2.12. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	55
4.2.13. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	56
4.2.14. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	57
4.2.15. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	58
4.2.16. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	59
4.2.17. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	60
4.2.18. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	60
4.2.19. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2.20. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	63
4.2.21. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	64
4.2.22. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	65
4.2.23. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	66
4.2.24. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	67
4.2.25. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	68
4.2.26. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	68
4.2.27. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.....	69
4.2.28. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	71
4.2.29. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	72
4.2.30. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	73
4.2.31. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2.32. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	75
4.2.33. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	76
4.2.34. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	76
4.2.35. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi...	77
4.2.36. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	79
4.2.37. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Denham et. al.'ın (1975) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	80
4.2.38. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	81
4.2.39. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	82
4.2.40. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	83
4.2.41. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	84
4.2.42. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	85
4.2.43. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	85
4.2.44. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2.45. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	88
4.2.46. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	89
4.2.47. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	90
4.2.48. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	90
4.2.49. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi....	91
4.2.50. Hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının Driver ve Seegmiller'ın (1985) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	91
4.2.51. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	93
4.2.52. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Stevenson et. al.'ın (1984) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	94
4.2.53. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.....	95
4.2.54. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	96
4.2.55. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	97
4.2.56. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).....	98
4.2.57. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
4.2.58.	Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.....	99
4.2.59.	Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel ani genişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısı dağılımı.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Standart k- ϵ türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri.....	6
3.1. Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı...	12

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C_1, C_2, C_μ	: Türbülans modeli sabitleri
C_f	: Cidar sürtünme katsayısı ($= 2 \tau_w / \rho U_b^2$)
C_p	: Basınç katsayısı ($= \Delta P / 0.5 \rho U_b^2$)
E	: Logaritmik yasa sabiti ($E=9.0$)
G	: Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
H', d	: Kanal Giriş Yüksekliği
H, D	: Kanal Çıkış Yüksekliği
h, s	: Basamak Yüksekliği
k	: Türbülans kinetik enerji
k_p	: Cidara yakın P düğüm noktasındaki türbülans kinetik enerji
p	: Basınç
Re	: Reynolds sayısı
S_ϕ	: Taşınım denkleminde kaynak terimi
U	: Yerel akış yönü hızı
U_b	: Debiden hesaplanan ortalama hız (bulk velocity)
U_c	: Simetri eksenindeki hız
U_{max}	: Kanal içerisinde herhangi bir kesitteki maksimum hız.
U_0, U_{ref}	: Anıgenişlemeli kanal girişindeki referans hız
u^+	: Boyutsuz hız ($= u_p / u_\tau$)
u_p	: Cidar yakınında P düğüm noktasında cidara paralel ortalama hız
u_τ	: Sürtünme hızı ($= \sqrt{\tau_w / \rho}$)
u', v', w'	: Türbülans çalkantıları
v	: y-yönü normal hız bileşeni
x	: Akış yönünde ölçülen mesafe
x_τ	: Çevrıntili akış bölgesi uzunluğu
y_p	: Cidardan, cidar yakınındaki P ağ düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
y^+	: Boyutsuz cidar mesafesi ($=y_p u_\tau / \nu$)
ε	: Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
ϕ	: Genel değişken
κ	: Von Karman sabiti ($=0.41$)
μ	: Laminar dinamik viskozite
μ_t	: Türbülans dinamik viskozite
μ_e	: Efektif viskozite ($=\mu + \mu_t$)
ν	: Laminar kinematik viskozite ($=\mu / \rho$)
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
Γ_ϕ	: Yayınım mübadele katsayısı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: k ve ε 'nin yayınımları için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
τ_w	: Cidar kayma gerilmesi
τ_{wd}	: Tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi değeri
<u>Alt İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
e	: Efektif değerler
in	: Giriş
k, ε	: Türbülans kinetik enerji ve onun kaybolma miktarına ait değerler
max	: Maksimum değer
p	: Cidara bitişik P düğüm noktasındaki değerler
r	: Dolaşım ya da çevrinti
ref	: Referans
t	: Türbülans değerleri
w	: Cidar değerleri
ϕ	: Genel değişken

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Türbülanslı akışların ayrışma ve yeniden birleşme işlemleri, bu akışların pratiksel öneminden dolayı büyük bir dikkati üzerine çekmiştir. Buna rağmen bu akışlar iyi anlaşılmaktan hala çok uzaktır. Çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallardaki türbülanslı akış, bu tip kompleks çevrıntili türbülanslı akışların incelenmesinde bir temel teşkil etmesinden dolayı hem deneysel hem de teorik çalışmaların odak noktalarından biri haline gelmiştir. Şekil 3.1 ve 3.2’de çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallar içindeki akışlar için koordinat sistemi ve akış geometrileri gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi türbülanslı akış alanı çok karmaşık olup bir potansiyel göbek, türbülans seviyeleri yüksek eğri bir serbest kayma tabakası, birincil bir çevrıntili akış bölgesi ve basamağın çok yakınında ikincil bir çevrıntili akış bölgesinden oluşmuştur. Cidarda kayma tabakasının birleşmesinden sonra, akış düzlemsel anigenişlemeli kanal boyunca ilerleyerek gelişmektedir.

Çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallardaki türbülanslı akış üzerinde yapılan pek çok çalışma vardır. Bu çalışmalar içerisinde; Karasu (2001a, 2001b, 2002, 2003, 2004), $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak geliştirdiği programla düzlemsel anigenişlemeli kanallarda türbülanslı akışın sayısal hesaplamalarını yapmış ve deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Karasu et al. (1985), Upwind ve Hybrid diskritizasyon metotları ile $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak bazı türbülanslı akışların hesaplanması üzerine çalışmışlardır. Karasu ve Karabulut (1998), geriye doğru basamaklar arkasında türbülanslı akışın sayısal hesaplanmasıyla ilgilenmişlerdir. Amano ve Goel (1985), iki farklı basamak oranı için sayısal bir çalışma yapmışlar ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile diğer modellerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Autret et al. (1987), iki boyutlu kanal içerisindeki anigenişlemeli çevrıntili akış için sayısal hesaplamalar yapmışlar ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Chun ve Sung (1996), geriye doğru basamak arkasındaki akış için farklı Reynolds sayılarında deneyler yapmışlar ve bulguları literatürdeki deneysel karşılıklarıyla mukayese etmişlerdir. Driver ve Seegmiller (1985), geriye doğru basamak kanalının üst cidarı açılarını değiştirerek kanal

içerisinde deneysel ölçümler yapmışlar ve bunları sayısal hesaplamalarla karşılaştırmışlardır. Etheridge ve Kemp (1978), geriye doğru basamak kanalında; ayrılma bölgesinde ve bu bölge civarında deneysel ölçümler yapmışlardır. Fessler ve Eaton (1997), iki boyutlu kanal içerisindeki anigenişlemeli çevrintili akış için sayısal hesaplamalar yapmışlar ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Kasagi ve Matsunaga (1995), bir kanal içerisindeki geriye doğru basamak arkasında, üç boyutlu partiküller kullanarak deneyler yapmışlar ve sonuçları literatürdeki hesaplamalarla mukayese etmişlerdir. Lien ve Leschziner (1994a, 1994b), kanal içerisindeki geriye doğru basamak arkasındaki ayrılmış akış için birkaç farklı modelle sayısal hesaplamalar yapmışlardır. Ötügen (1991), aynı Reynolds sayılı üç farklı basamak geometrisi için basamak arkasındaki türbülanslı akışta deneysel ölçümler yapmıştır. Papadopoulos ve Ötügen (1995), bir kanal içerisindeki geriye doğru basamak üzerinden türbülanslı akış için deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Ruck ve Makiola (1988), bir kanal içerisinde geriye doğru basamaklar arkasında tek yönlü akışı, Lazer Doppler Anemometre (LDA) kullandıkları deneylerinde incelemişlerdir. Thangam ve Hur (1991), geriye doğru basamaklar üzerindeki tamamıyla gelişmiş türbülanslı akışın sayısal hesaplanmasında kullanılan ağın sıklığının hesap sonuçlarına etkilerini araştırmıştır. Thangam ve Speziale (1992), iki denklemlilik türbülans modelinin performansını araştırmak için örnek olarak geriye doğru basamak üzerindeki türbülanslı akışı ele almışlardır. De Zilwa et al. (2000), Escudier et al. (2002), yaptıkları çalışmalarda anigenişlemeli kanal içerisindeki türbülanslı akışları incelemişlerdir. Vogel ve Eaton (1985), iki boyutlu kanal içerisindeki anigenişlemeli çevrintili akış için deneysel ölçümler yapmışlardır. Isomoto ve Honami (1989), serbest akımdaki türbülansa ek olarak yerel türbülans şiddetini değiştirmek için basamak üst akımında iki boyutlu bir boşluk oluşturarak ya da bir çubuk yerleştirerek geriye doğru basamak üzerindeki kayma tabakasının davranışını ve çevrintili akışı incelemişlerdir. Wesphal ve Johnston (1984), iki boyutlu basamak üzerinde türbülanslı çevrintili akışta kayma tabakasında deneysel ölçümler yapmışlardır. Yang et al. (1994), geriye doğru bir basamak üzerinden türbülanslı akışta basamak arkasında deneysel ölçümler yapmışlardır. Szymocha (1984), anigenişlemeli çevrintili akış için deneysel ölçümler yapmıştır. Smyth (1979), Restivo ve Whitelaw (1978), çift taraflı simetrik anigenişlemeli kanallardaki türbülanslı akışla ilgilenmişlerdir. Piirto et al. (2003), geriye

doğru basamaklar üzerindeki türbülanslı akışı inceleyip Particle Image Velocimetry (PIV) kullanarak deneysel ölçümler yapmışlardır. Furuichi ve Kumada (2002), Kim et al. (1980), Eaton ve Johnston (1981), bir kanal içerisindeki geriye doğru basamak üzerindeki türbülanslı akışta yeniden birleşme noktası üzerine çalışmalar yapmışlardır. Hall et al. (2003), geriye doğru basamaklar üzerindeki türbülanslı akışta meydana gelen ikincil çevrintili akış bölgesini inceleyip Particle Image Velocimetry (PIV) kullanarak deneysel ölçümler yapmışlardır. Lai et al. (2002), metal bir kanatçığın geriye doğru basamaklar üzerindeki türbülanslı akışa etkilerini araştırmışlardır. Adams ve Johnston (1988a, 1988b, 1988c), anigenişlemeli kanal içerisindeki türbülanslı akışlar üzerine kapsamlı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Abbott ve Kline (1962), çift ve tek yanlı anigenişlemeli kanallarda ses-altı hızlardaki türbülanslı akışları yaptıkları deneylerle incelemişlerdir.

Bu çalışmada sayısal hesaplamalarla karşılaştırmak için, Poole and Escudier (2003a, 2003b), Adams ve Eaton (1988), Ötügen (1991), Denham et al. (1975) , Stevenson et al. (1984), Driver ve Seegmiller'in (1985) deneysel ölçümleri kullanılmıştır. Sekiz farklı Reynolds sayısıyla, on farklı akış geometrisi için sayısal hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar deneysel ölçümlerle grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

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

BÖLÜM 2

MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

2.1. Hareket Denklemleri

İki boyutlu, sıkıştırılmayan, sürekli, çevrıntili türbülanslı akımı yöneten kısmi diferansiyel denklemler, türbülans gerilmelerinin yerini alan eddy viskozite bağıntılarıyla, Şekil 3.1'de gösterilen kartezyen koordinatlar sisteminde aşağıdaki gibi yazılabilir.

Süreklilik denklemi :

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

Momentum denklemleri :

x - yönü :

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

burada ;

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

y - yönü :

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

burada ;

$$S_v = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

Yukarıdaki denklemlerde u ve v sırasıyla yatay (x) ve dikey (y) yönlerindeki hız bileşenleridir. ρ akışkanın yoğunluğu, p ise basıncıdır. S_u ve S_v terimleri sırasıyla x-yönü ve y-yönü momentum denklemlerindeki kaynak terimleridir. Efektif viskozite μ_e aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

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

Burada μ ve μ_t sırasıyla laminar ve türbülans viskozitelerdir.

2.2. Türbülans modeli

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

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

k ve ε 'nun dağılımları aşağıdaki model taşınım denklemlerinin çözülmesiyle elde edilmiştir.

Türbülans kinetik enerji k :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + S_k \quad (2.6)$$

burada ;

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

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

Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ε :

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

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 Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Standart k- ε türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Katı cidarlar yakınında türbülans etkileri kaybolur. Kullanılan standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli ise, yüksek Reynolds sayılı akışların yalnız tamamıyla türbülanslı bölgelerinde uygulanabildiği için iç bölgelerle cidar arasındaki aralığı birbirine bağlamak maksadıyla ampirik cidar fonksiyonları kullanılır. Bu çalışmada, yakın-cidar akışlarını modellemek için Launder ve Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları kullanılmıştır.

2.3. Cidar fonksiyonları

Katı cidarlar yakınında türbülans etkilerinin kaybolmasından dolayı yüksek Reynolds sayısı varsayımlarına dayanan standart türbülans modelleri bu bölgelerde geçerliliklerini kaybederler. Burada Launder ve Spalding'in (1974) cidar-fonksiyonları yöntemi yakın-cidar akışlarının modellenmesi için uygun bir alternatif sağlamaktadır. Buna göre cidar tabakasında aşağıdaki bağıntıların geçerliliği kabul edilmiştir.

$$y^+ < 11.6 \text{ için} \quad u^+ = y^+ \quad (2.8)$$

$$y^+ \geq 11.6 \text{ için} \quad u^+ = \left(\frac{1}{\kappa} \right) \ln(Ey^+)$$

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

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

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.

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

Yukarıdaki denklemlerde u_p , k_p , ε_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 κ 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.

BÖLÜM 3

SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

3.1. Genel diferansiyel denklem

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = S_{\phi} \quad (3.1)$$

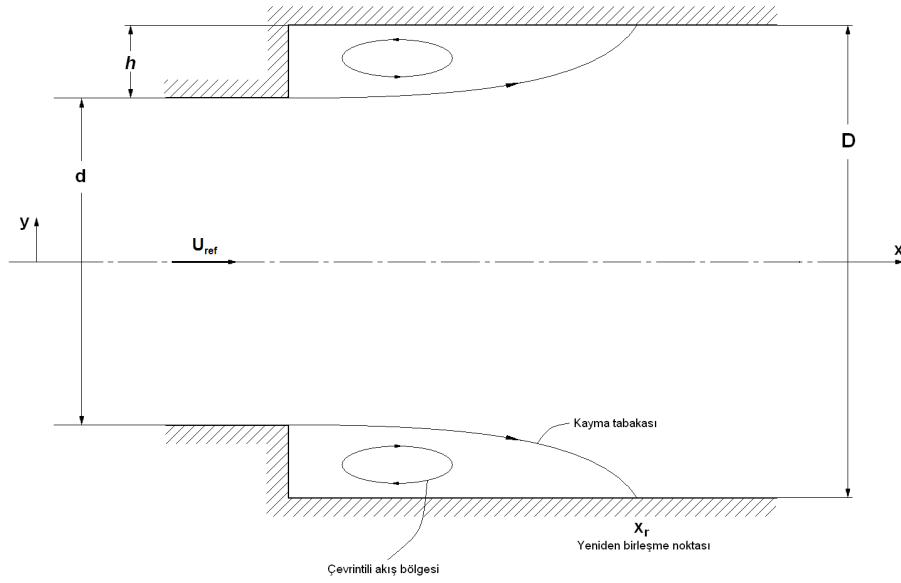
halini alır. Bu denklem genel bir değişken ϕ için bir hareket denklemini gösterir. u ve v değişkenleri sırasıyla yatay (x) ve dikey (y) yönlerindeki hız bileşenleridir. ρ akışkanın yoğunluğu, Γ_{ϕ} ise taşınım katsayısıdır. Son terim S_{ϕ} , kaynak terimidir. Burada ϕ değişkenleri sırasıyla u , v , k ve ε 'dur. Eğer ϕ değişkeni bire, Γ_{ϕ} ve S_{ϕ} sıfıra eşitlenirse yukarıdaki 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. (3.1) 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.

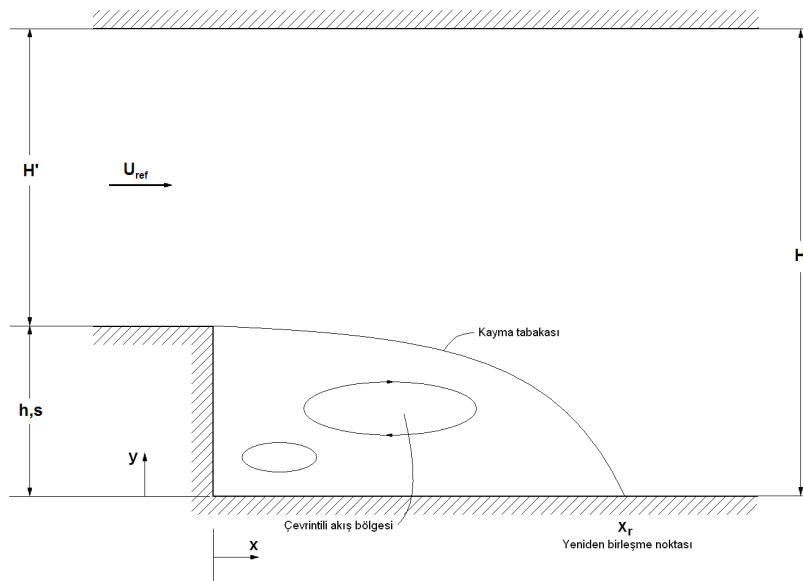
3.2. Sınır koşulları

Bu çalışmanın bir bölümünü oluşturan çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Burada d anigenişleme giriş yüksekliği,

D ise türbülanslı akışın geliştiği kanal çıkış yüksekliğidir. Çalışmanın diğer bölümünde bahsi geçen tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Burada kanal çıkış yüksekliği H , giriş yüksekliği de H' ile gösterilmiştir. Her iki şekilde de ortak olarak h ve s basamak yüksekliğini U_{ref} ise anigenişleme girişinde ölçülen referans hızı göstermektedir.



Şekil 3.1. Koordinat sistemi ve çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi



Şekil 3.2. Koordinat sistemi ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi

Her iki geometride de basamaktan aşağı akışta eğri bir kayma tabakası ve bunun altında birincil bir çevrintili akış bölgesi ve basamağın çok yakınında ikincil bir çevrintili akış bölgesi oluşmaktadır. Basamaktan uzaklaştıkça çevrintili akış bölgesi daralmakta ve nihayetinde yeniden birleşme noktası tabir edilen yerde (X_r) son bulmaktadır. Cidarda kayma tabakasının birleştiği bu noktadan sonra akış düzlemsel anigenişlemeli kanal boyunca ilerleyerek gelişmektedir.

Bu çalışmada basamak giriş düzleminde akış yönü hız dağılımı deneysel ölçümlerden belirlenirken, dikey hız sıfır kabul edilmiştir. Bazı sayısal analizlerde, ilgili makalelerde bildirilen düzgün (uniform) giriş hızı ölçümleri giriş koşulu olarak alınmıştır. Giriş düzleminde türbülans kinetik enerji dağılımı bildirilmemişse türbülans kinetik enerji seviyesi belirlenmiş ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani, $k=(0.001-0.005) U_0^2$ (ya da U_{ref}^2) ve $\varepsilon = (C_\mu k^{3/2} / 0.03H)$, burada U_0 veya U_{ref} kanal girişindeki ortalama hızdır, H (ya da D) ise kanalın çıkış yüksekliğidir. Çıkışta tamamıyla gelişmiş akım koşullarının olduğu kabulünü yapabilmek için, çıkış düzlemi çevrintili akış bölgesinden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde dikey hız sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyantlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın orta çizgisinde simetri kabul edilmiştir. Yani, $(\partial\phi/\partial y) = v = 0$, ϕ burada u , k veya ε olabilir.

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

3.3. Hesaplama ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.6 Ghz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Kullanılan tüm sayısal ağlar, çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Yatay (akış yönü) ve dikey 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 kütlelerin 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. Çizelge 3.1 her akış durumunun hesaplama ayrıntılarını göstermektedir. Bu çizelgede N yakınsamış çözüme ulaşılan iterasyon sayısıdır, T ise saniye cinsinden cpu zamanı ve T/N ise iterasyon başına zamandır.

Çizelge 3.1. Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon Sayısı

Akış Durumu	Re	Ağ büyüklüğü (x) x (y)	T cpu zamanı (saniye)	N İterasyon Sayısı	T/N
Poole and Escudier	4×10^4	40 x 30	6.421875	440	0.014595
Poole and Escudier	1.41×10^4	40 x 30	5.59375	411	0.01361
Poole and Escudier	4×10^3	40 x 30	5.1875	385	0.013474
Adams and Eaton	3.6×10^4	40 x 30	3.625	274	0.013229
Ötügen	1.66×10^4	40 x 30	5.78125	428	0.013507
Ötügen	1.66×10^4	40 x 30	5.796875	423	0.013704
Ötügen	1.66×10^4	40 x 30	5.421875	380	0.014268
Denham et al.	3025	40 x 30	6.671875	521	0.012805
Driver and Seegmiller	37215	40 x 30	4.109375	305	0.013473
Stevenson et al.	172518	40 x 30	8.09375	567	0.014273

Bu tezde, yukarıdaki çizelgede sıralandığı gibi sekiz farklı Reynolds sayısı, on farklı geometriye sahip çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda türbülanslı akış için sayısal hesaplamalar yapılmış ve bildirilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çift Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanması kısmında Poole ve Escudier'in (2003a, 2003b) aynı kanal geometrisinde, üç farklı Reynolds sayısı için ($Re=40000$, $Re=14100$ ve $Re=4000$) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Üç farklı sayısal hesaplama için ortak kullanılan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 4.1.1'de gösterilmiştir. Bu ağ, x ve y yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktasından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal $D/d=1.42857$ genişleme oranına sahiptir.

İlk olarak kanal girişinde $Re=40000$ ($Re=\rho U_b h/\mu$) olan akış durumunun sayısal hesaplamaları yapılmıştır. Referans olarak alınan giriş ortalama akış hızı $U_b=6.67$ m/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı sudur.

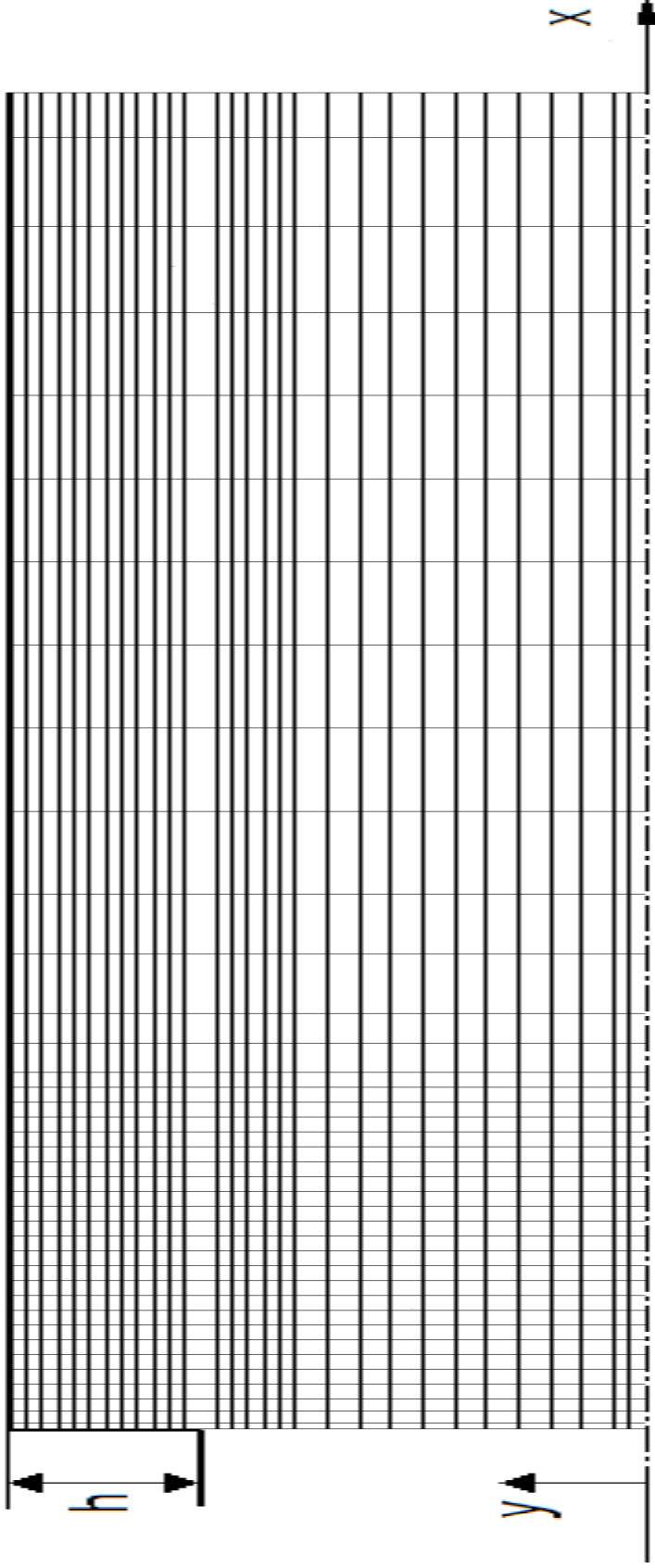
Poole ve Escudier (2003b) bahsi geçen çalışmalarında $x/h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12$ ve 18 kesitlerinde akış yönü hız profillerini ve türbülans kinetik enerji profillerini deneysel olarak ölçüp sunmuşlardır. Sayısal hesaplama alanı ise giriş kesitinden 45 basamak (h) yüksekliğinde, akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Deneysel veriler dokuz kesitte bildirildiğinden sayısal hesaplamalar sadece bu kesitlerdeki ölçümlerle kıyaslanmakla birlikte ek olarak $x/h=32$ ve $x/h=45$ kesitlerindeki hesaplanan değerler de grafiklere yansıtılmıştır.

Şekil 4.1.2'de sunulan grafikte, hesaplanan ve ölçülen akış yönü hız profilleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan akış yönü hızları girişteki referans ortalama hız (U_b) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.1.2'den de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum vardır.

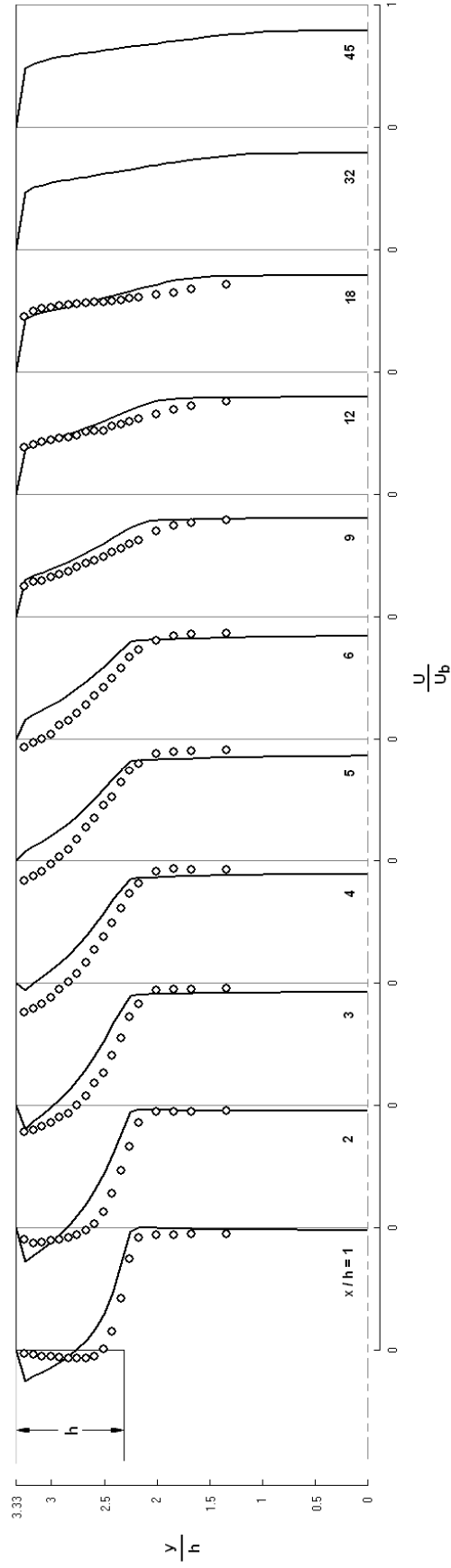
Şekil 4.1.3'te görüldüğü gibi, türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri ile ölçülen değerleri arasında elde edilen uyum da oldukça iyidir. Hesaplanan türbülans kinetik enerji değerleri girişteki referans ortalama hızın karesiyle (U_b^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.1.4 ve 4.1.5, sırasıyla Poole ve Escudier'in (2003b) $Re=40000$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalında hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 4.1.6'da Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri ekseninde hesaplanan yatay hızın değişimi, Şekil 4.1.7'de ise hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 4.1.7'deki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_r) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/h=4.1$ kesitinde olup, deneysel akış tutunma uzunluğunun $x/h=6.5$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar kompleks çevrintili türbülanslı akışların layıkıyla hesaplanmasında kifayetsiz kalan standart $k-\epsilon$ türbülans modelinden gelmektedir.

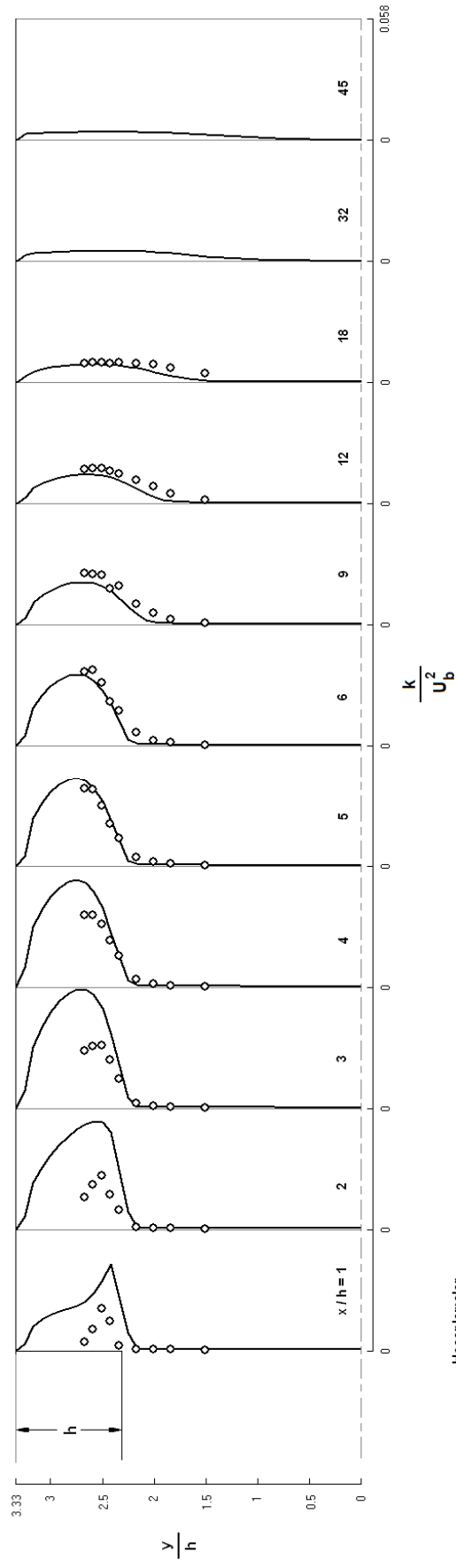
Poole ve Escudier'in (2003b) $Re=40000$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı Şekil 4.1.8'de, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılmış halde verilmiştir. Buna göre başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=4.5$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden τ_w negatif değerler almaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi takribi $x/h=45$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır. Şekil 4.1.9'da ise hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının ($C_p=\Delta P/0.5\rho U_b^2$) değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, girişten hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrintili akıştan dolayı, $x/h=13$ kesitine kadar ani yükseliş göstermektedir. $x/h=13$ kesitinden sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



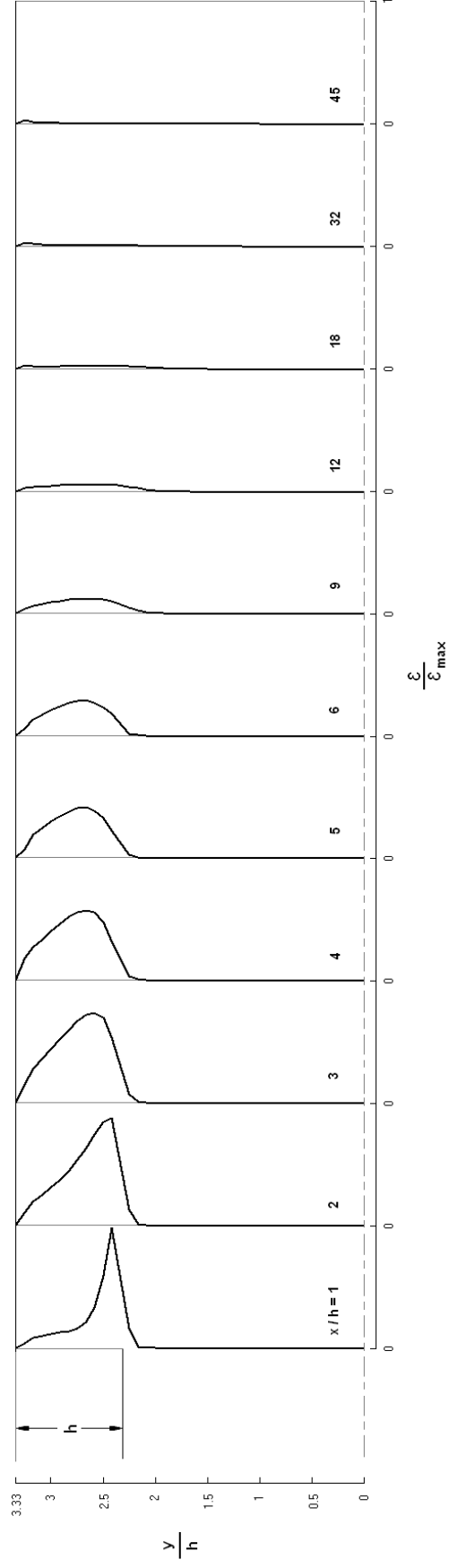
Şekil 4.1.1. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



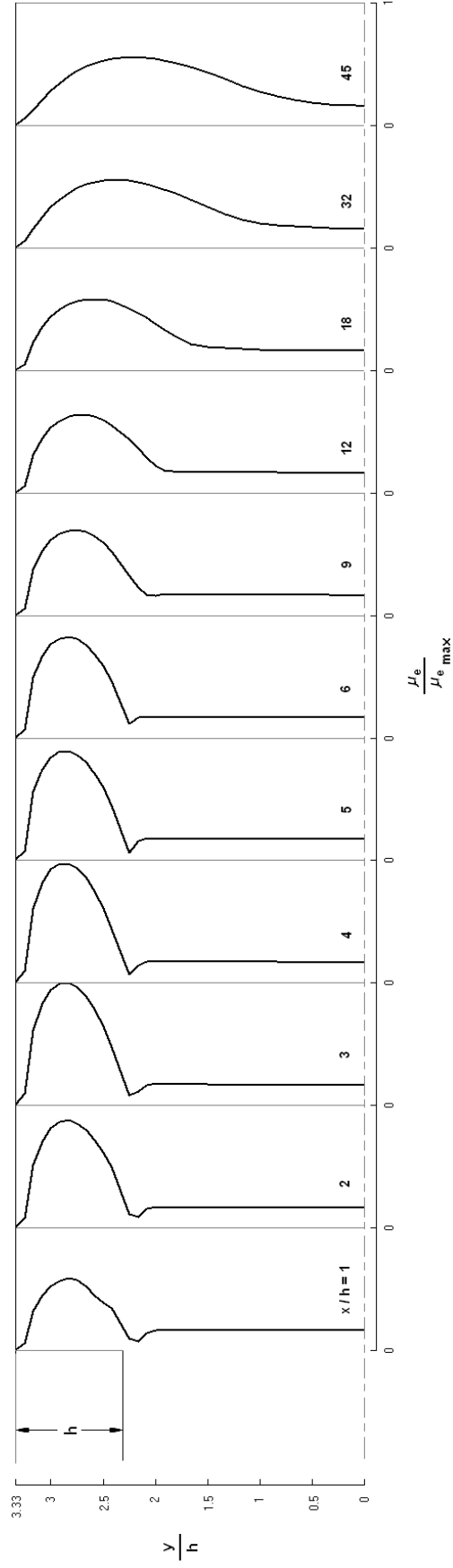
Şekil 4.1.2. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=40000)



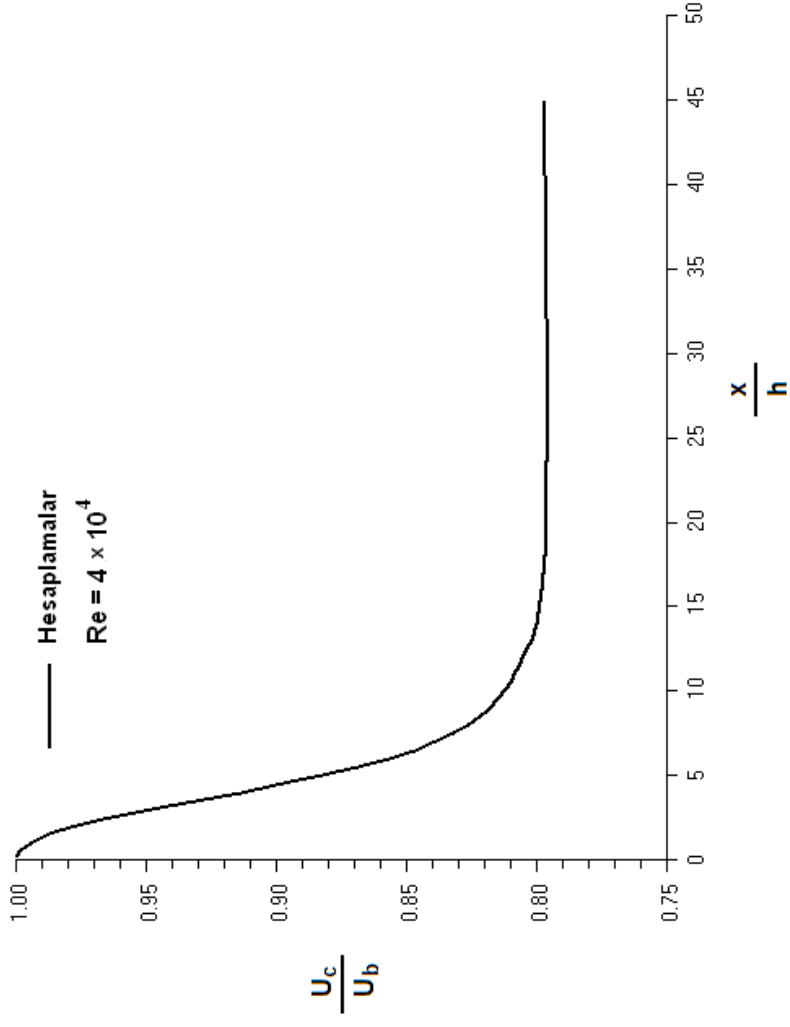
Şekil 4.1.3. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=40000)



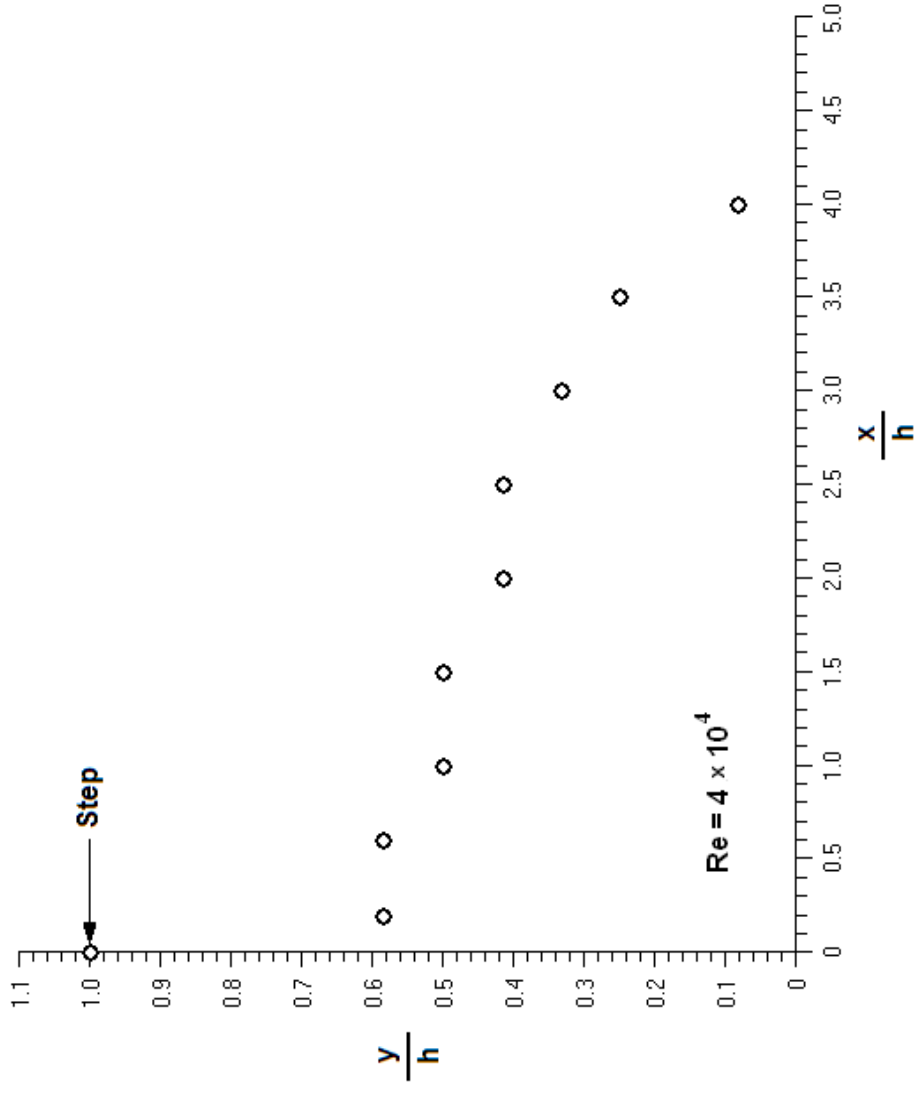
Şekil 4.1.4. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. ($Re=40000$)



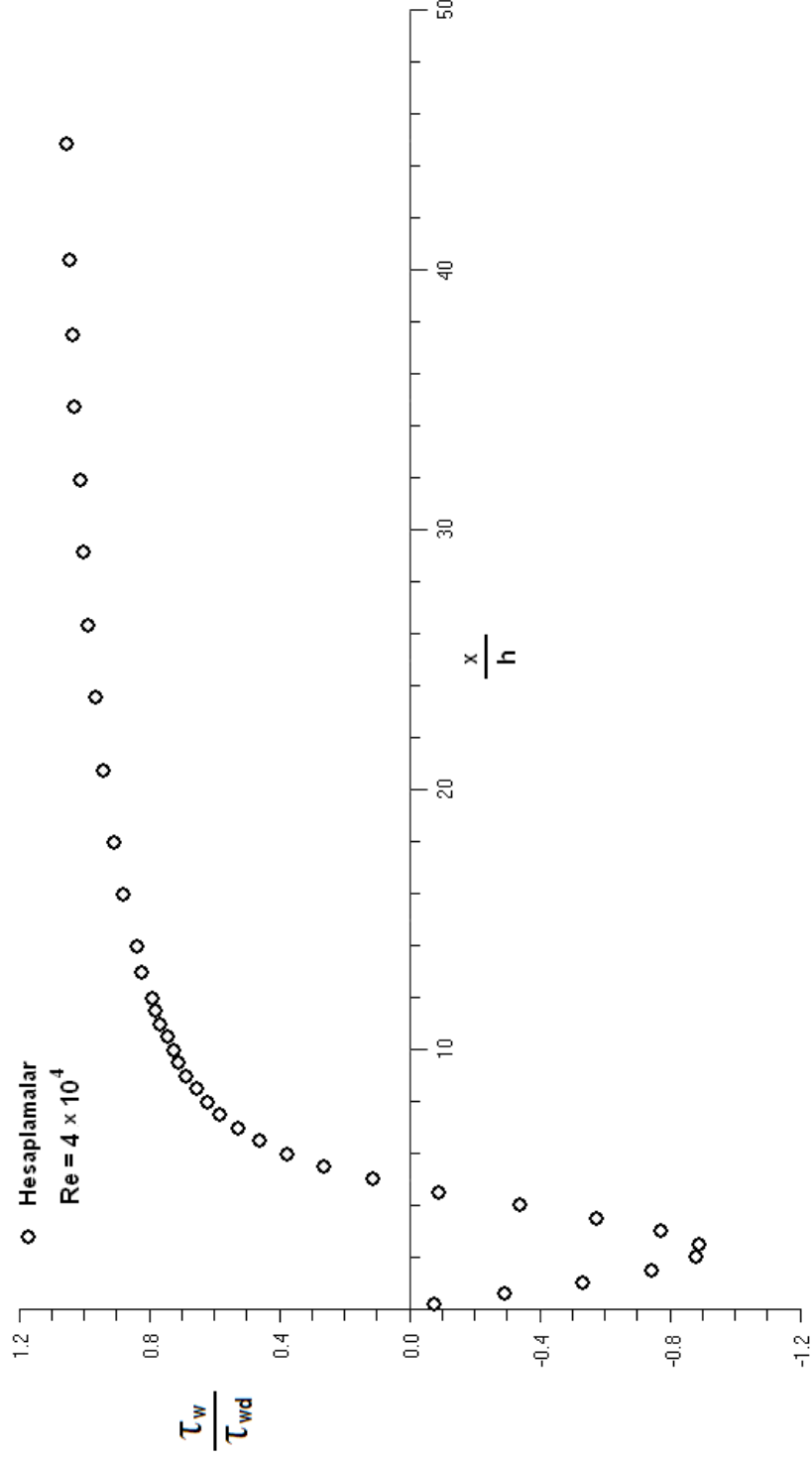
Şekil 4.1.5. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri. (Re=40000)



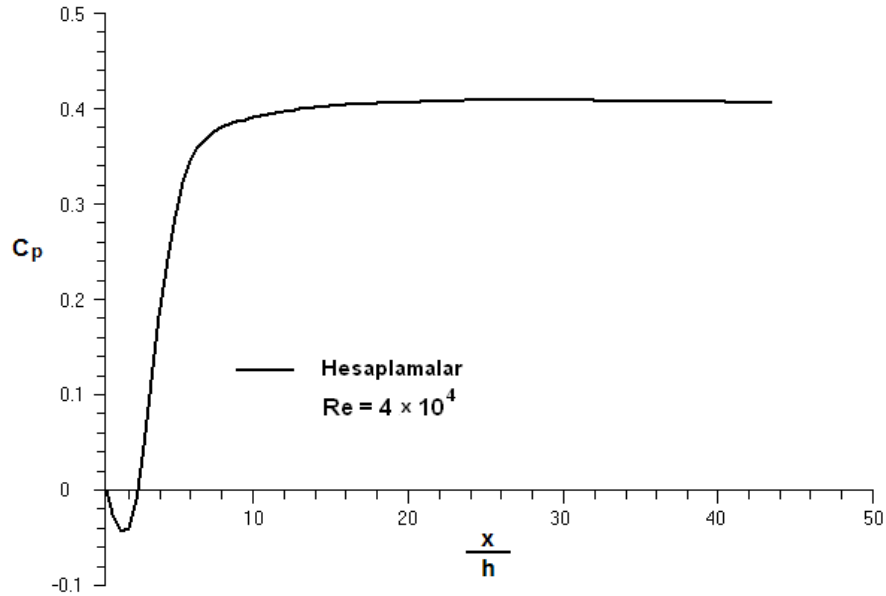
Şekil 4.1.6. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi. ($Re=40000$)



Şekil 4.1.7. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$). ($Re=40000$)



Şekil 4.1.8. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. ($Re=40000$)



Şekil 4.1.9. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi. ($Re=40000$)

Yapılan ikinci çalışma Poole ve Escudier'in (2003a) $Re=14100$ ($Re=\rho U_b h/\mu$) olan akış durumunun sayısal hesaplanmasıdır. Bu hesaplama için de Şekil 4.1.1'de gösterilen sonlu-fark ağ dağılımı kullanılmıştır. Referans olarak alınan giriş ortalama akış hızı $U_b=2.35$ m/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı sudur. Önceki çalışmada olduğu gibi $x/h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12$ ve 18 kesitlerinde akış yönü hız profilleri ve türbülans kinetik enerji profilleri Poole ve Escudier (2003a) tarafından ölçülmüştür. Sayısal hesaplama alanı ise giriş kesitinden 45 basamak (h) yüksekliğinde, akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Deneysel ölçümler dokuz kesitte bildirildiğinden sayısal hesaplamalar sadece bu kesitlerdeki ölçümlerle kıyaslanmış, ayrıca $x/h=32$ ve $x/h=45$ kesitlerindeki hesaplanan değerler de grafiklere yansıtılmıştır.

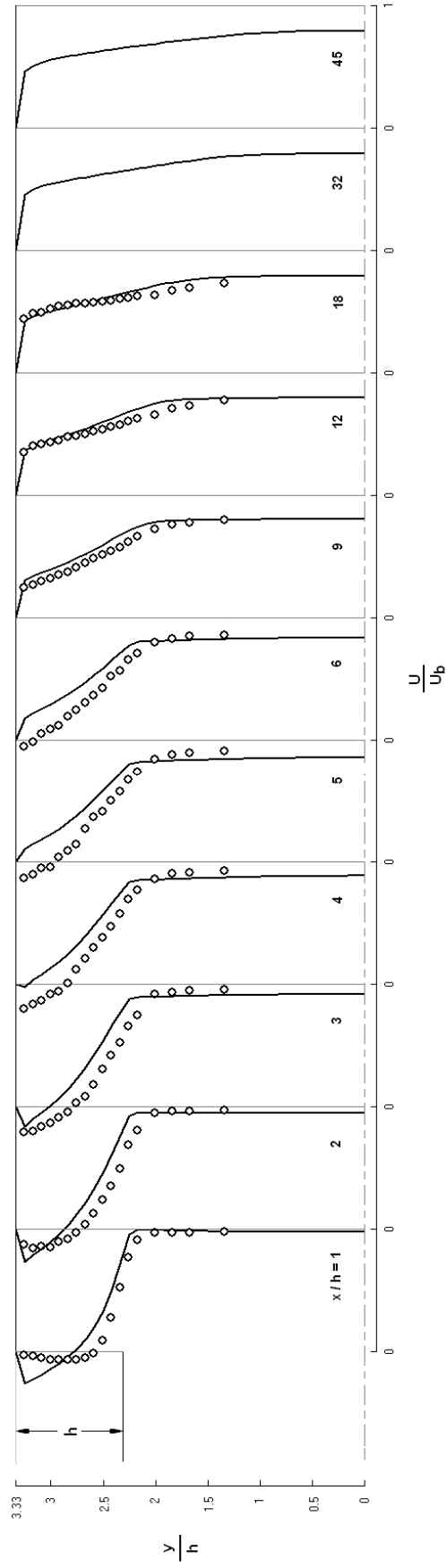
Şekil 4.1.10'da sunulan grafikte akış yönü hız profillerinin, Şekil 4.1.11'de ise türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan ve ölçülen değerleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan akış yönü hızları girişteki referans ortalama hız (U_b) ile, türbülans kinetik enerji değerleriyse girişteki referans ortalama hızın karesiyle (U_b^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.1.10 ve Şekil 4.1.11'den görüldüğü üzere hesaplanan değerler ve deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır.

Şekil 4.1.12 ve 4.1.13, sırasıyla Poole ve Escudier'in (2003a) $Re=14100$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalında hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır.

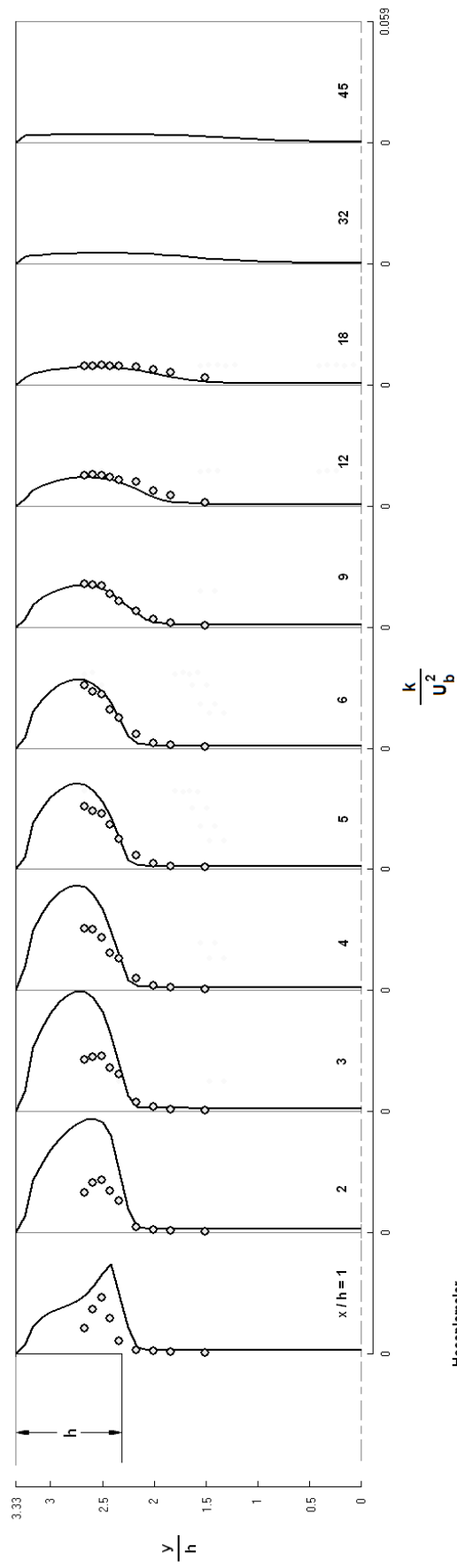
Şekil 4.1.14'te akış kanalı boyunca simetri ekseninde hesaplanan yatay hızın değişimi, Şekil 4.1.15'te ise hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 4.1.15'teki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_r) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/h=4.3$ kesitinde olup, deneysel akış tutunma uzunluğunun $x/h=6.33$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar kompleks çevrintili türbülanslı akışların layıkıyla hesaplanmasında kifayetsiz kalan standart $k-\epsilon$ türbülans modelinden gelmektedir.

Poole ve Escudier'in (2003a) $Re=14100$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak Şekil 4.1.16'da verilmiştir. Buna göre başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=4.5$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden τ_w negatif değerler almaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi takribi $x/h=39$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır.

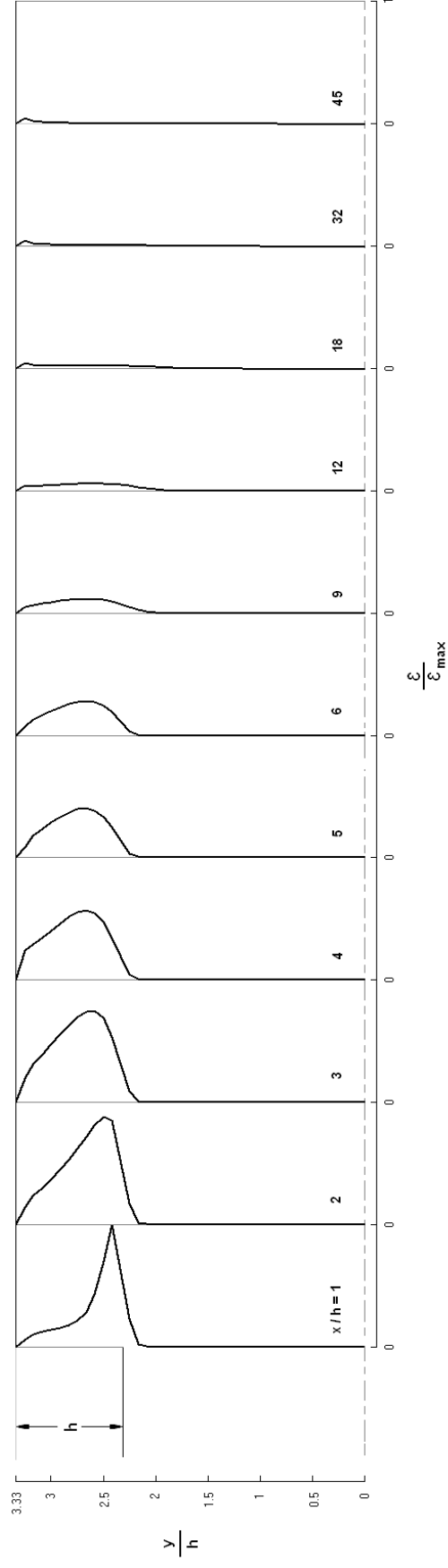
Şekil 4.1.17'de sunulan grafikte görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, ($C_p = \Delta P / 0.5\rho U_b^2$) girişten hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrintili akıştan dolayı, $x/h=11$ kesitine kadar ani yükseliş göstermektedir. Bu kesitten sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



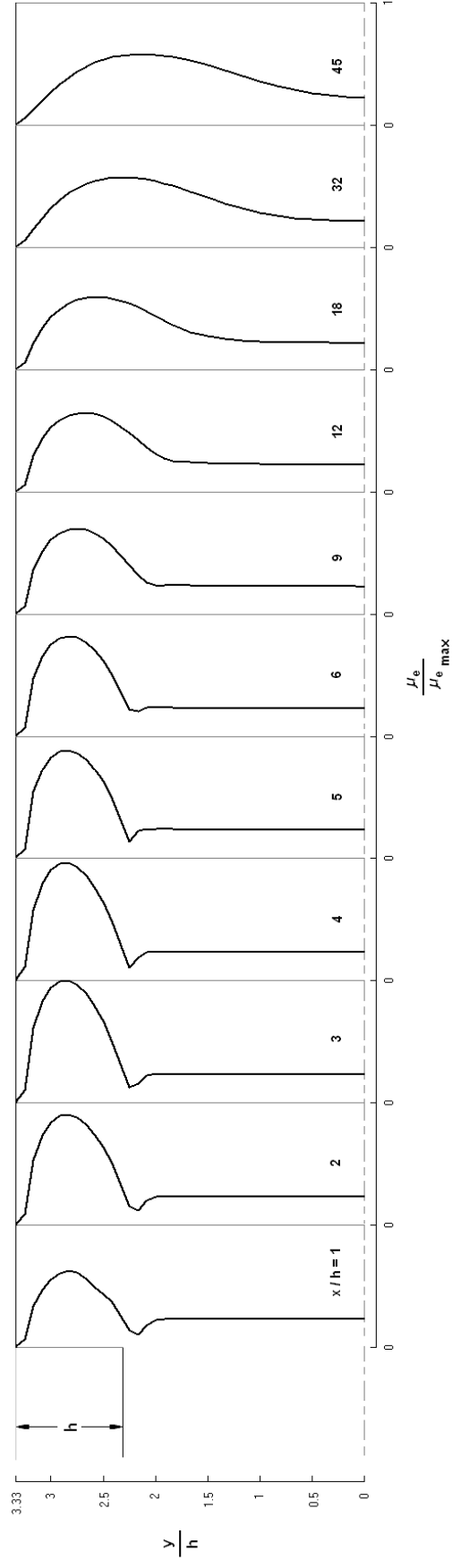
Şekil 4.1.10. Çift yanlı düzlemsel anizotropik akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. ($Re=14100$)



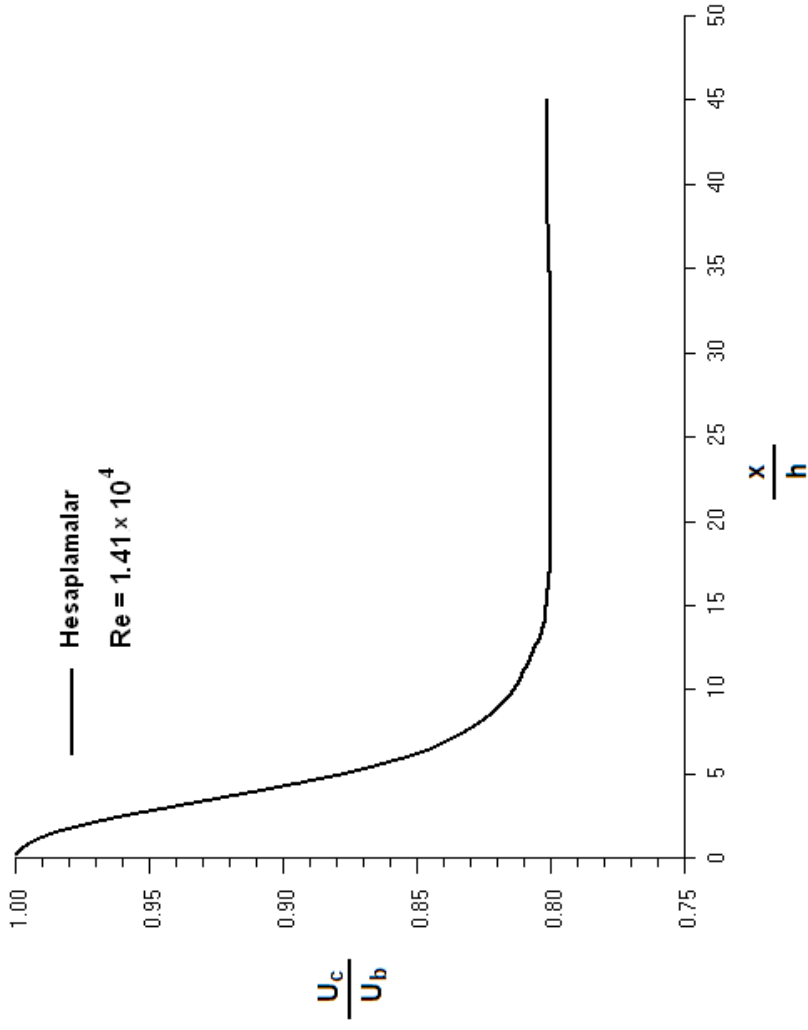
Şekil 4.1.11. Çift yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003a) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=14100)



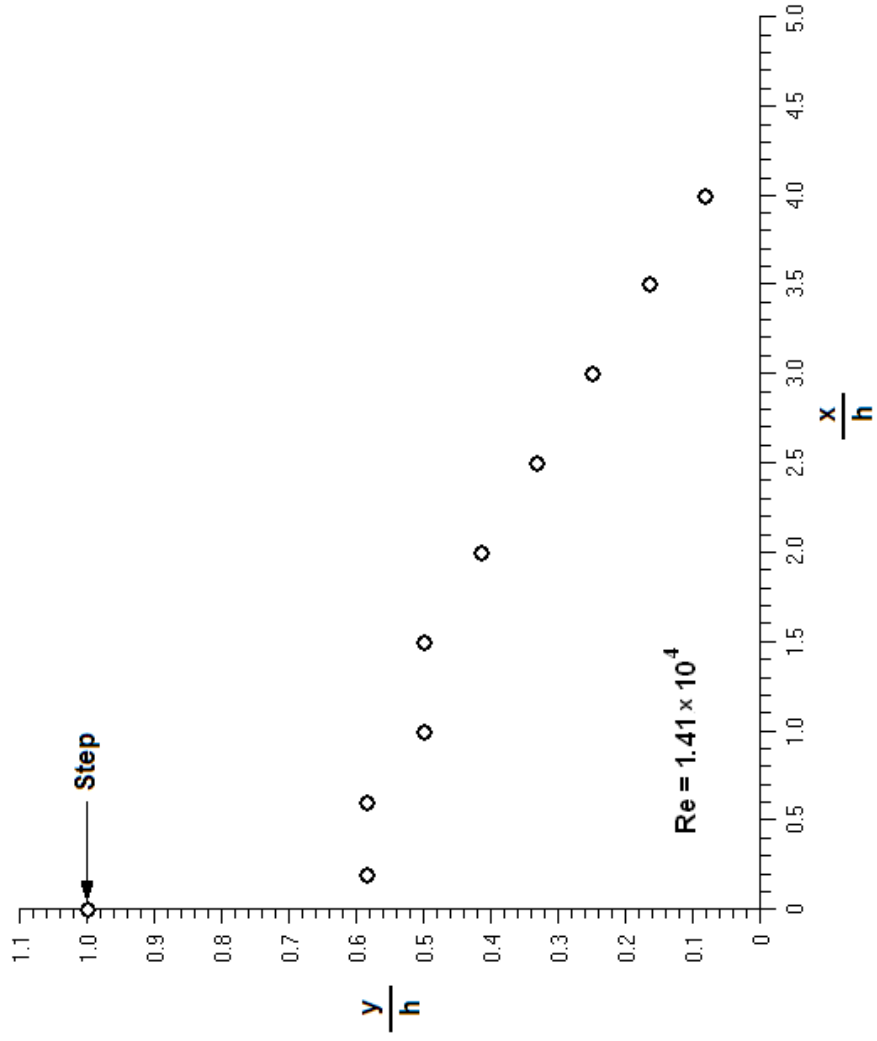
Şekil 4.1.12. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anizotropik akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. ($Re=14100$)



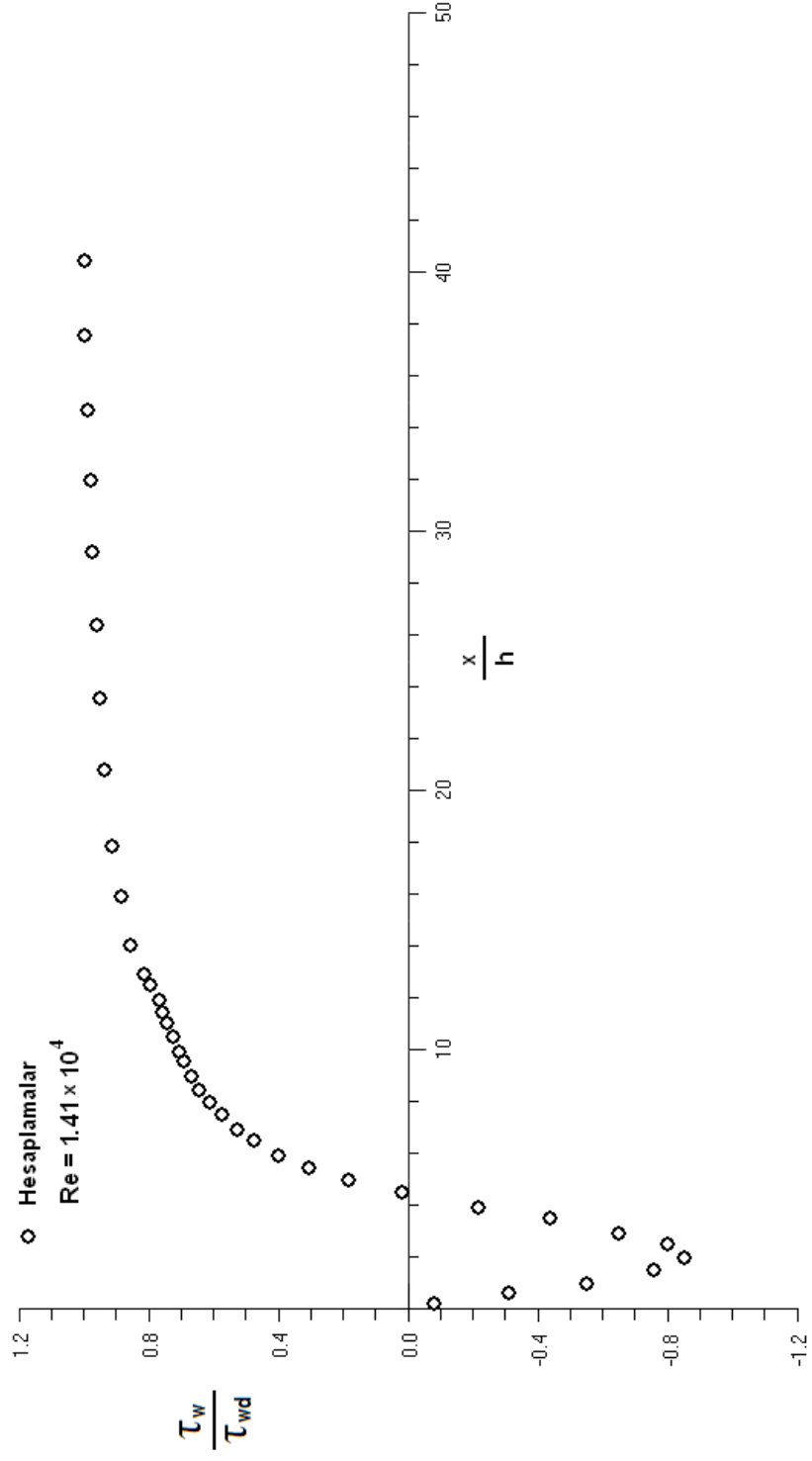
Şekil 4.1.13. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri. (Re=14100)



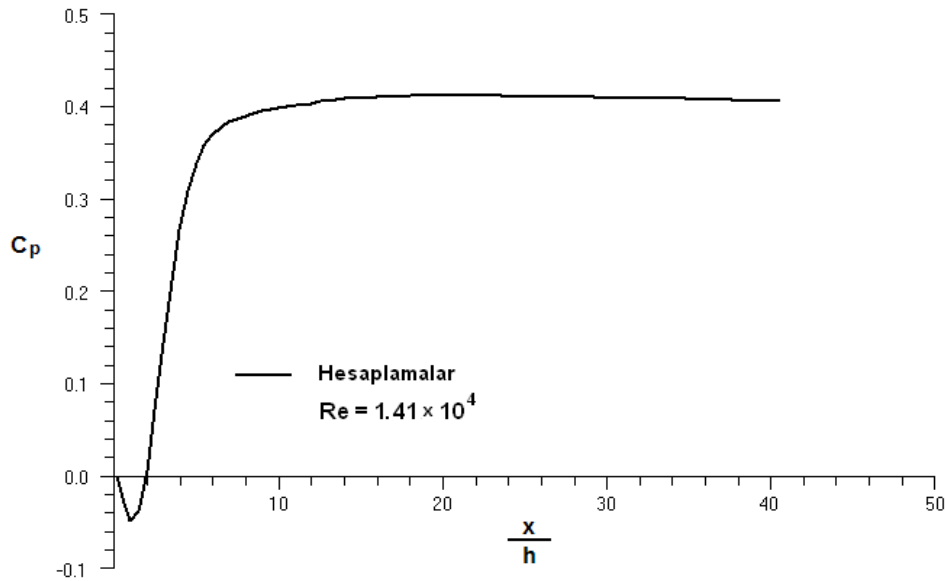
Şekil 4.1.14. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anijenleşmeli akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi. ($Re=14100$)



Şekil 4.1.15. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$). ($Re=14100$)



Şekil 4.1.16. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. (Re=14100)



Şekil 4.1.17. Poole ve Escudier'in (2003a) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi. ($Re=14100$)

Bir diğer sayısal hesaplama Poole ve Escudier'in (2003b) $Re=4000$ ($Re=\rho U_b h/\mu$) olan akış durumunun sayısal hesaplanmasıdır. Yine Şekil 4.1.1'de gösterilen sonlu-fark ağ dağılımının kullanıldığı çalışmada referans olarak kabul edilen giriş ortalama akış hızı $U_b=0.664$ m/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı öncekiler gibi sudur. Poole ve Escudier (2003b) $x/h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12$ ve 18 kesitlerinde akış yönü hız profillerini ve türbülans kinetik enerji profillerini yaptıkları deneysel ölçümler sonucunda bildirmişlerdir. Sayısal hesaplama alanı ise giriş kesitinden 45 basamak (h) yüksekliğine eş mesafe kadar akış yönüne doğru uzatılmıştır. Önceki iki çalışmada olduğu gibi deneysel ölçümler dokuz kesitte bildirildiğinden sayısal hesaplamalar sadece bu kesitlerdeki ölçümlerle kıyaslanmış, ayrıca $x/h=32$ ve $x/h=45$ kesitlerindeki hesaplanan değerler de grafiklerde sunulmuştur.

Akış yönü hız profillerinin hesaplanan ve ölçülen değerleri Şekil 4.1.18'de, türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan ve ölçülen değerleri ise Şekil 4.1.19'da mukayese edilmiştir. Hesaplanan akış yönü hızları ilk iki çalışmada olduğu gibi girişteki referans ortalama hız (U_b) ile, türbülans kinetik enerji değerleri ise girişteki referans ortalama hızın karesiyle (U_b^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.1.18 ve Şekil

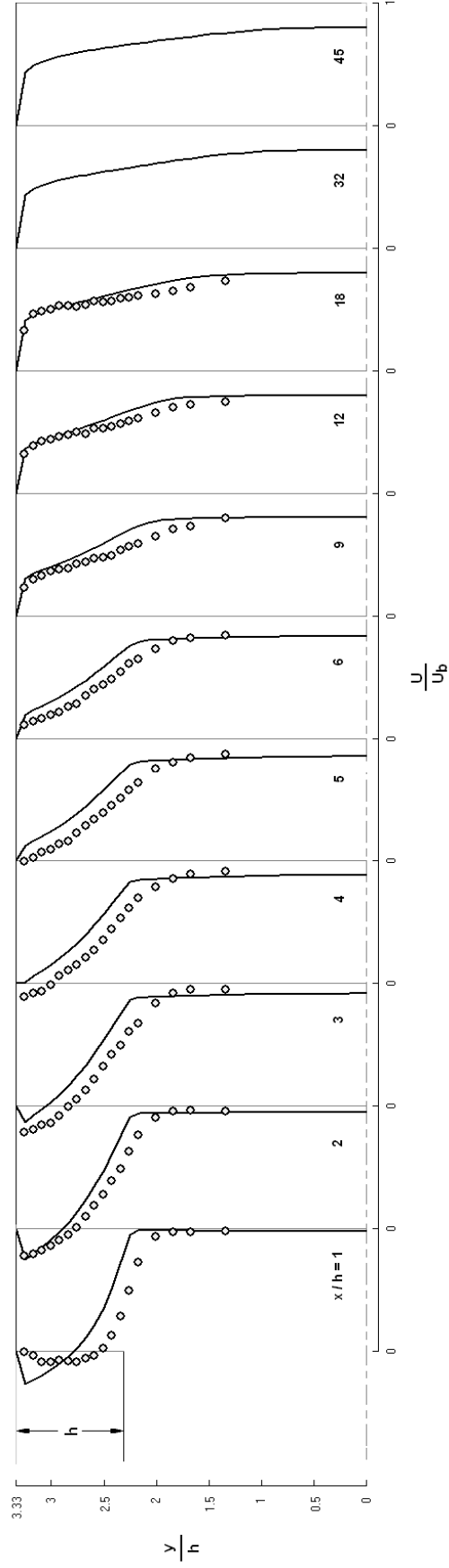
4.1.19'dan görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler arasında iyi bir uyum mevcuttur.

Şekil 4.1.20 ve 4.1.21, sırasıyla Poole ve Escudier'in (2003b) $Re=4000$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalında hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır.

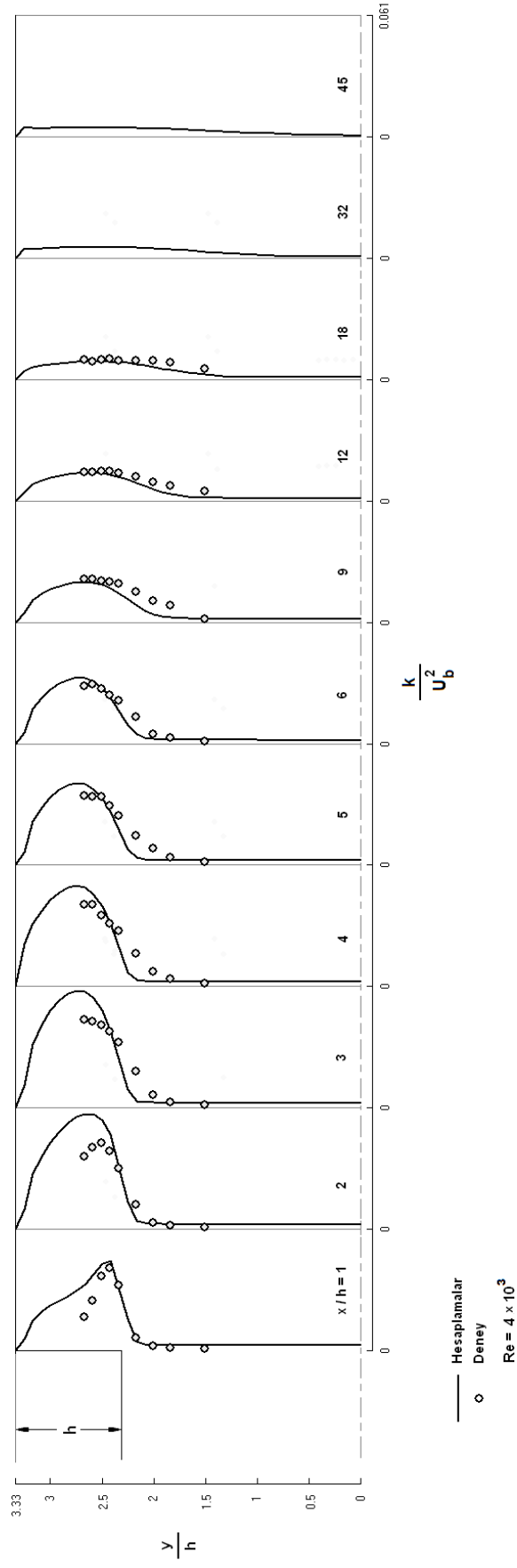
Şekil 4.1.22'de akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi, Şekil 4.1.23'te ise hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 4.1.23'teki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_r) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/h=3.8$ kesitinde olup, deneysel akış tutunma uzunluğunun $x/h=5.0$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar kompleks çevrıntili türbülanslı akışların layıkıyla hesaplanmasında kifayetsiz kalan standart $k-\epsilon$ türbülans modelinden gelmektedir.

Poole ve Escudier'in (2003b) $Re=4000$ için çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak Şekil 4.1.24'te verilmiştir. Buna göre başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=4.5$ kesitine kadar, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden τ_w negatif değerler almaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi takribi $x/h=29$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşır.

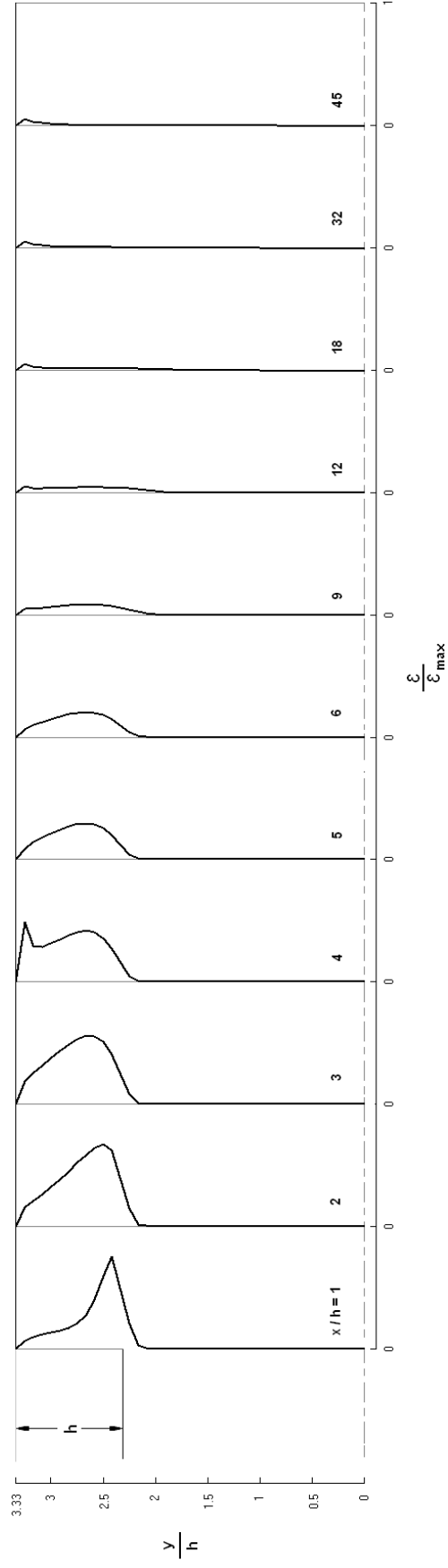
Şekil 4.1.25'te sunulan grafikte görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı ($C_p = \Delta P / 0.5\rho U_b^2$), girişten hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrıntili akıştan dolayı, $x/h=9$ kesitine kadar ani yükseliş gösterip devamında yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



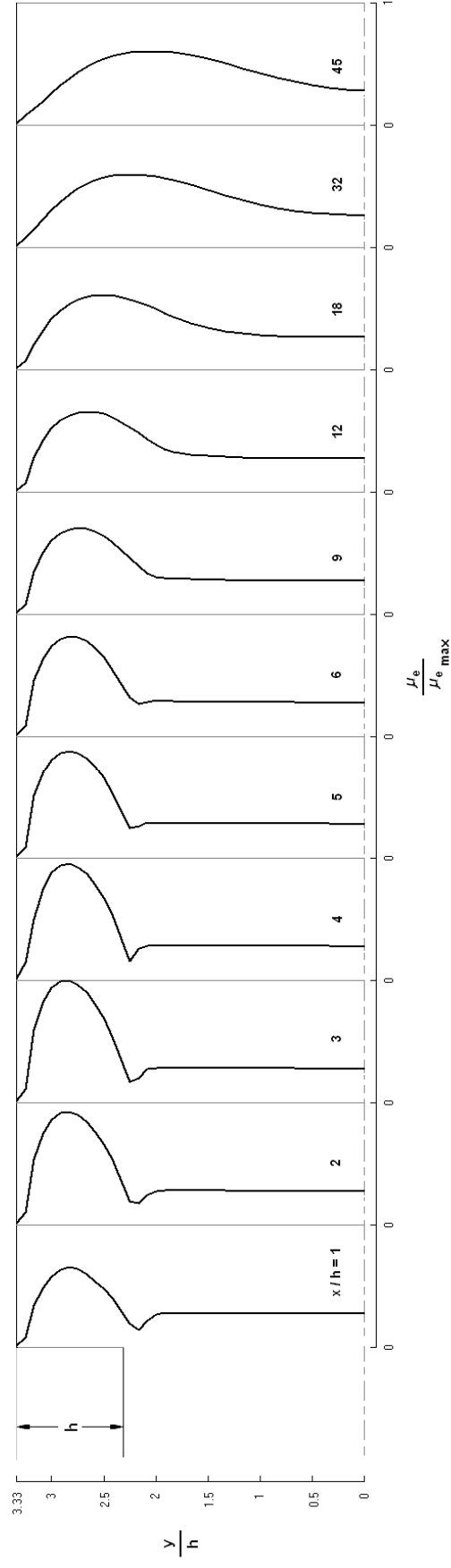
Şekil 4.1.18. Çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=4000)



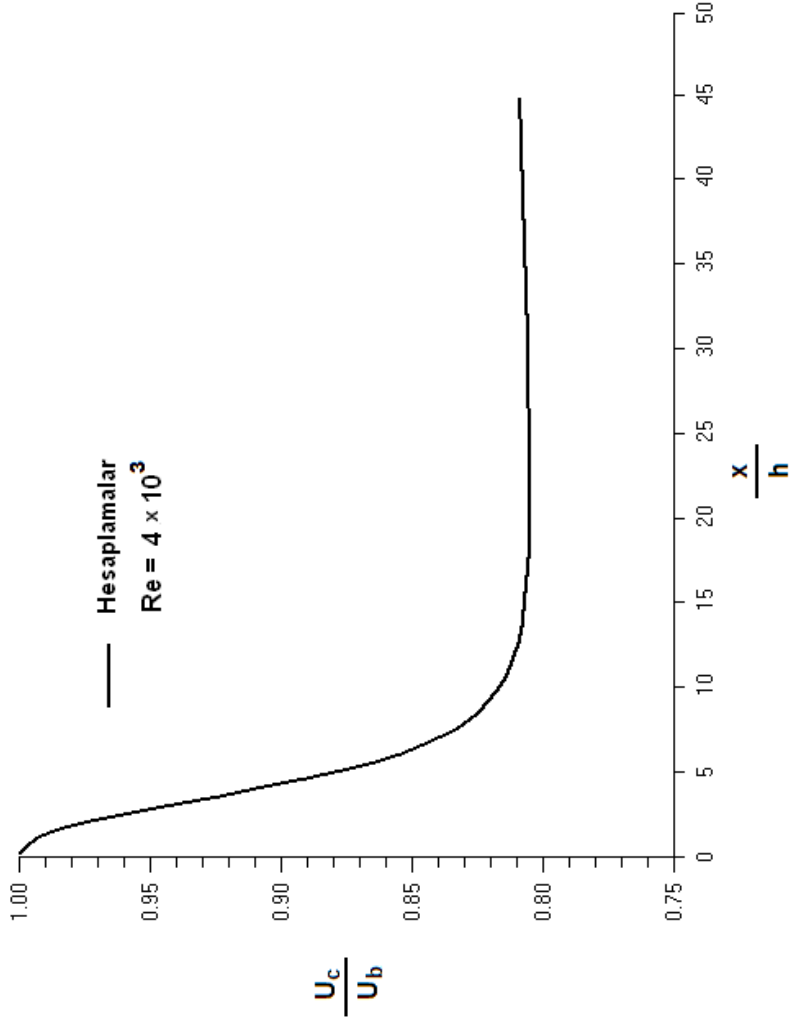
Şekil 4.1.19. Çift yanlı düzlemsel anizotropik akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Poole ve Escudier'in (2003b) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması. (Re=4000)



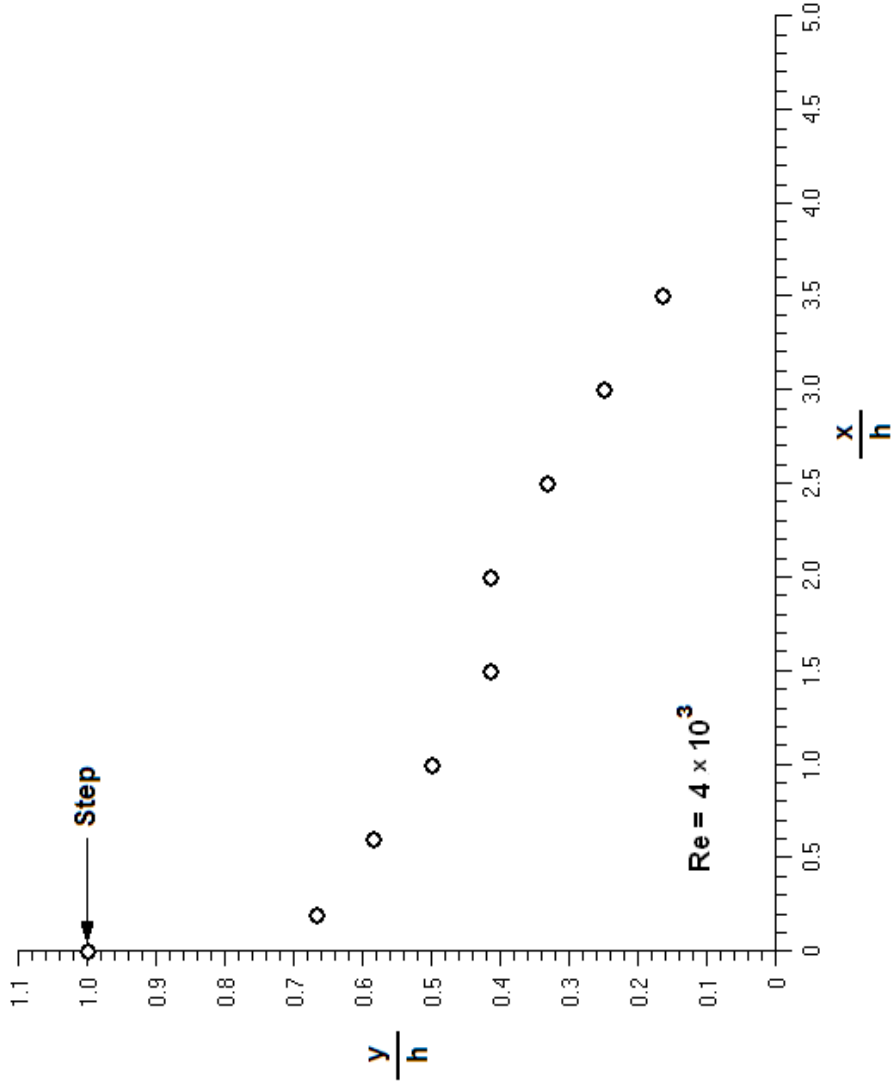
Şekil 4.1.20. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri. (Re=4000)



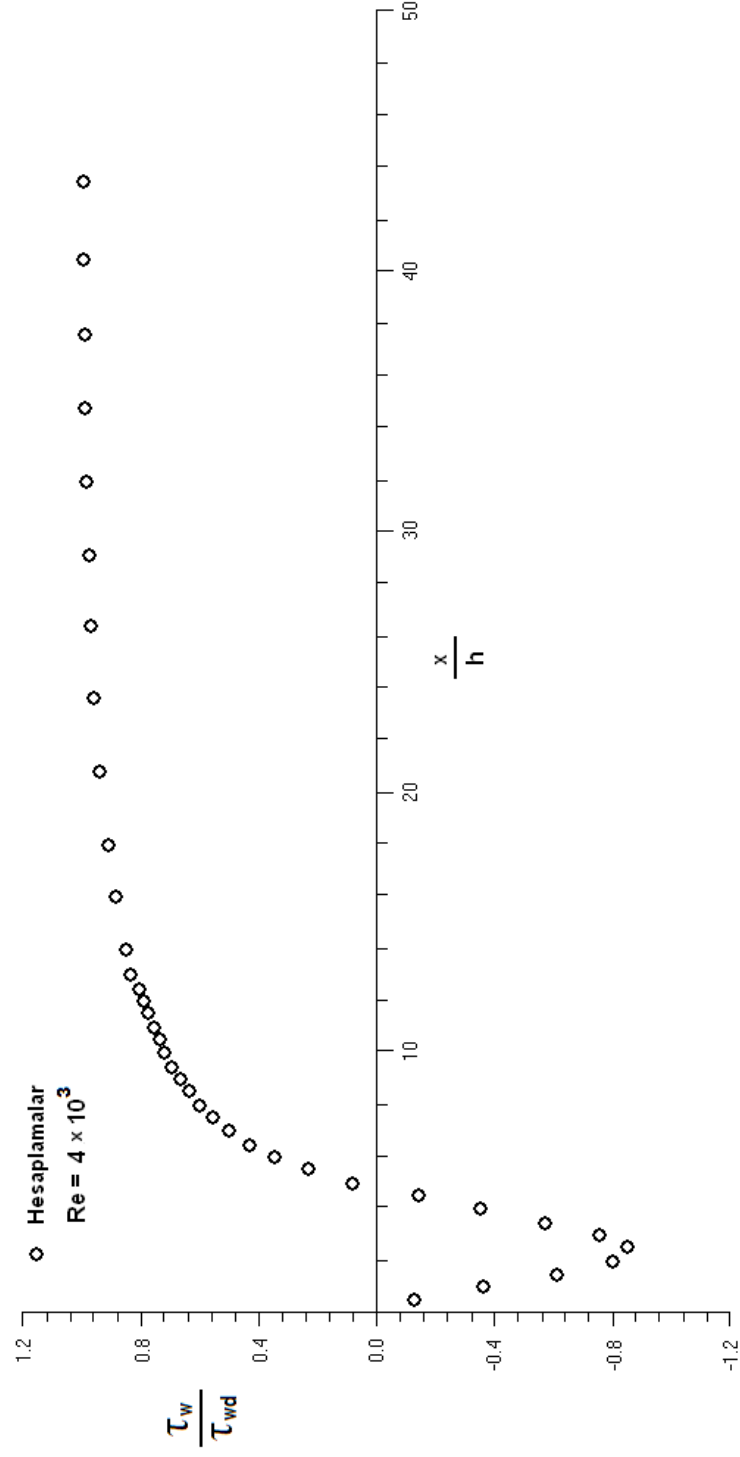
Şekil 4.1.21. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri. ($Re=4000$)



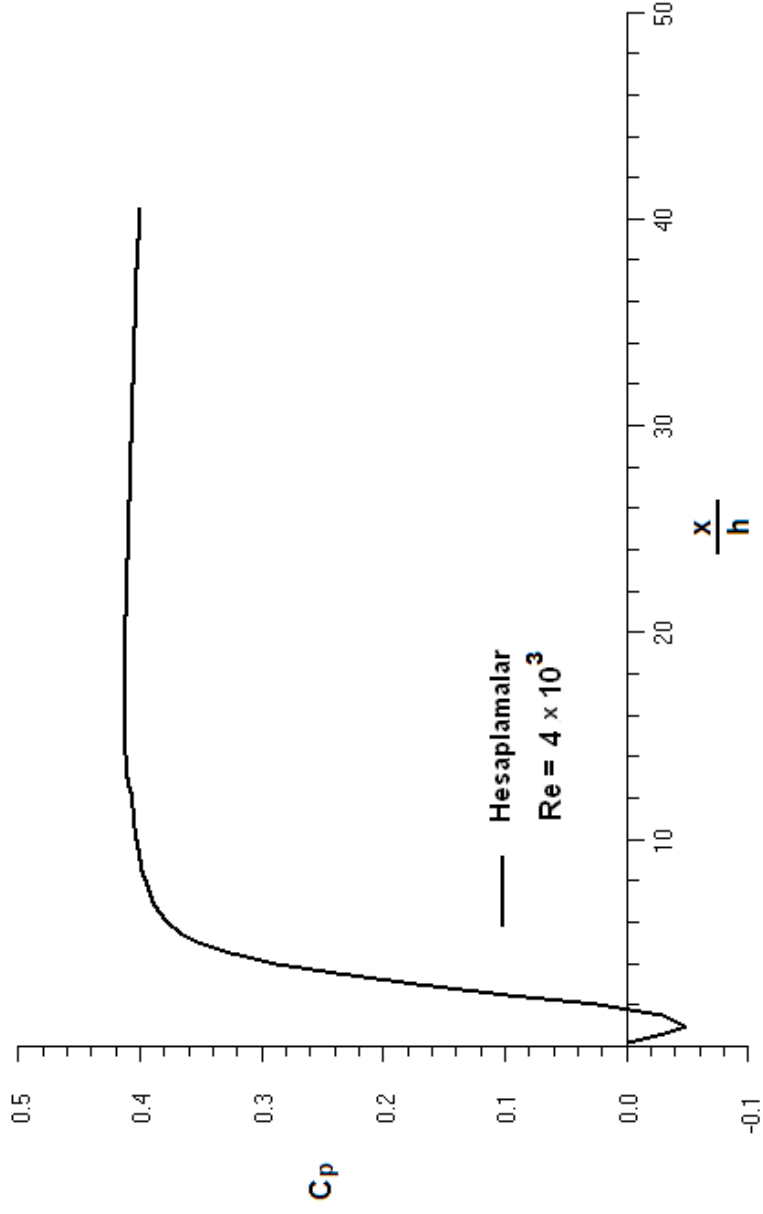
Şekil 4.1.22. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın değişimi. (Re=4000)



Şekil 4.1.23. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$). ($Re=4000$)



Şekil 4.1.24. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı. (Re=4000)



Şekil 4.1.25. Poole ve Escudier'in (2003b) çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi. ($Re=4000$)

4.2. Tek Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması

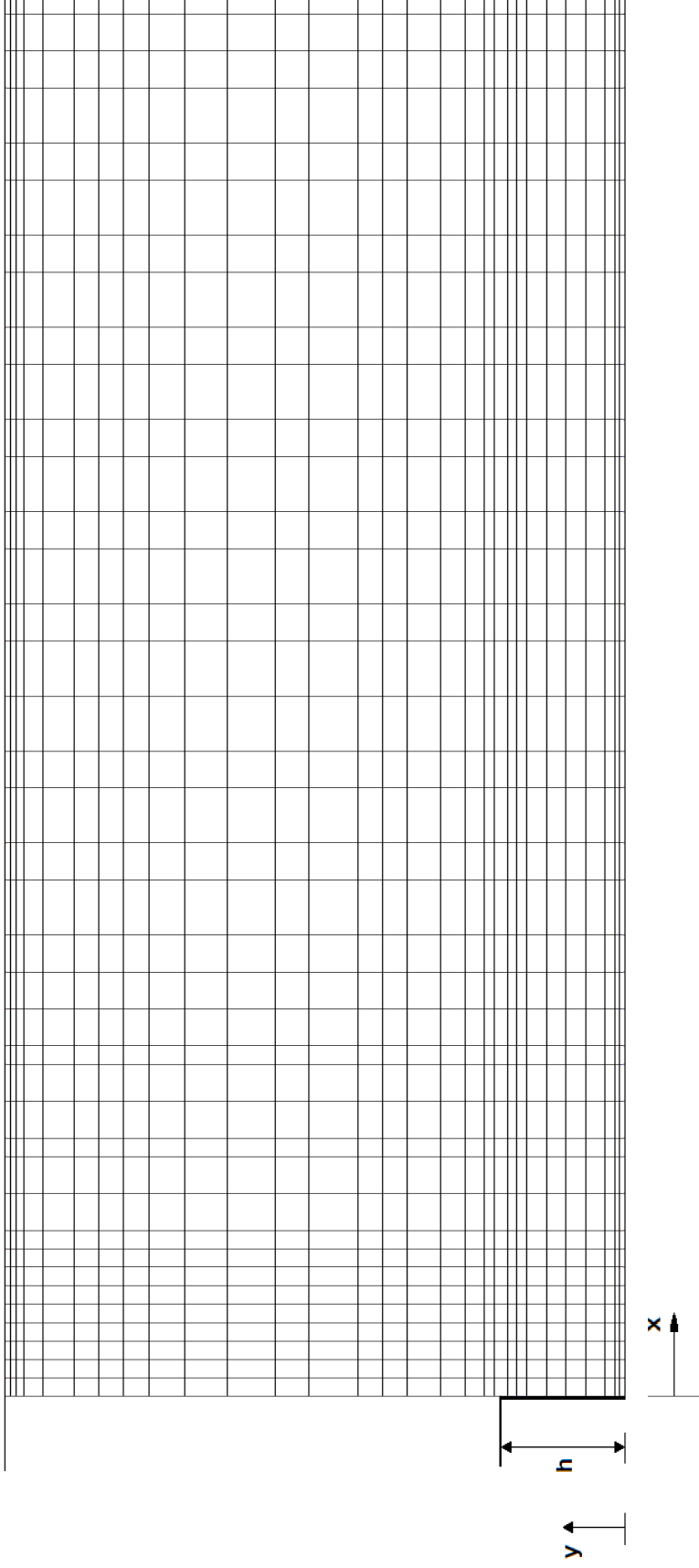
Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda çevrintili türbülanslı akış için yedi farklı sayısal hesaplama yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Adams ve Eaton (1988), Ötügen (1991), Denham et. al. (1975), Driver ve Seegmiller (1985) ve Stevenson et. al. (1984) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır.

İlk olarak Adams ve Eaton'nın (1988) gerçekleştirdikleri deney ele alınmıştır. Sayısal hesaplama için kullanılan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 4.2.1'de gösterilmiştir. Bu ağ, x ve y yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktasından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın genişleme oranı $H/H'=1.25$ 'dir (Şekil 3.2). Reynolds sayısı 36000 ($Re=U_{ref}h/\nu$), referans olarak alınan basamak yukarı akış hızı $U_{ref}=15$ m/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı havadır.

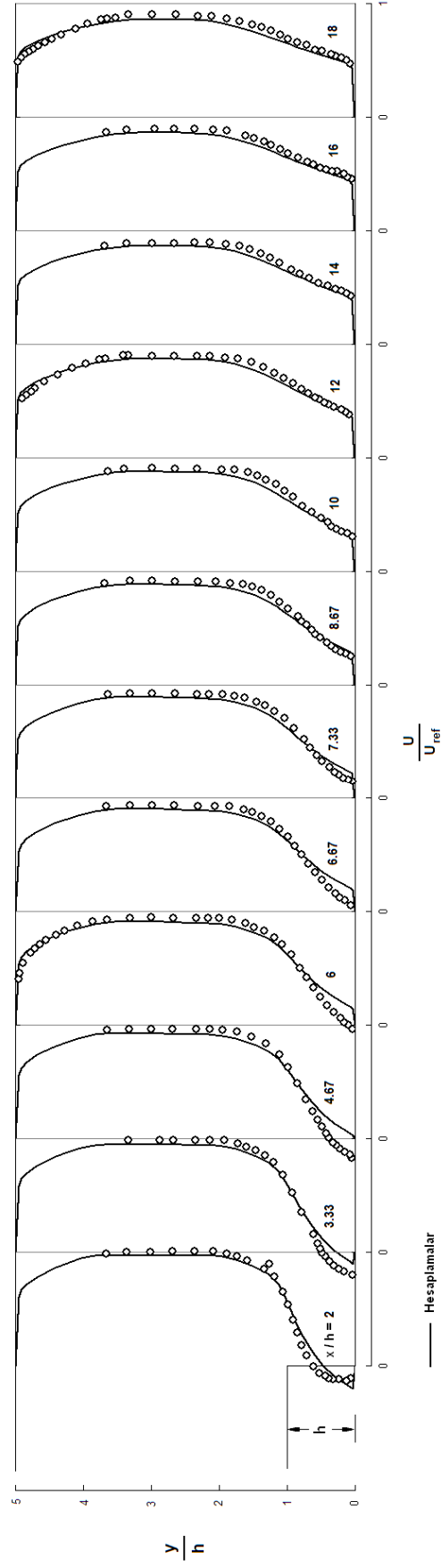
Sayısal hesaplama alanı giriş kesitinden 20 basamak (h) yüksekliğindeki akış yönü mesafesine ($L=20h$) kadar uzatılmıştır. Şekil 4.2.2'de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen akış yönü hız profilleri oniki kesitte mukayese edilmiştir. Hesaplanan akış yönü hızları referans hız (U_{ref}) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafiklerden de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum vardır. Şekil 4.2.3'te türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri sunulmuştur. Hesaplanan türbülans kinetik enerji değerleri basamaktan yukarı akışta serbest akımda ölçülen referans hızın karesiyle (U_{ref}^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profilleri sırasıyla Şekil 4.2.4 ve 4.2.5'te görülmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük (ϵ_{max} , $\mu_{e,max}$) değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıyla efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.

Şekil 4.2.6’da Adams ve Eaton’nın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, alt cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin (x/h) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_r) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/h=4.5$ kesitinde olup, deneysel akış tutunma uzunluğunun $x/h=6.6$ kesitinde olduğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar standart $k-\epsilon$ türbülans modelinin kompleks çevrıntili türbülanslı akışların hesaplanmasında kifayetsiz kalmasından ileri gelmektedir.

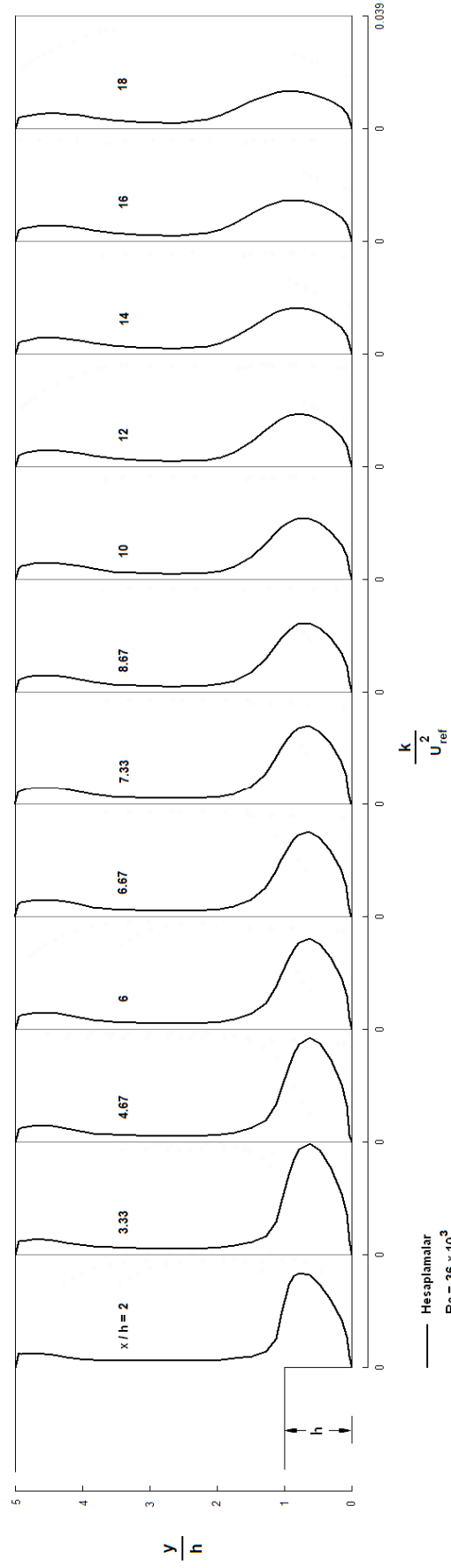
Adams ve Eaton’nın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.7 ve Şekil 4.2.8’de sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.7’de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi girişteki akış bölgesinde, $x/h=1$ kesitinde en yüksek değerine ulaşır $x/h=10$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve akabinde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.8’de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=4.5$ kesitine kadar, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almakta ve yaklaşık $x/h=19$ kesitinde gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.2.9’da, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f = \tau_w / 0.5 \rho U_{ref}^2$) Adams ve Eaton’nın (1988) on farklı noktada yaptıkları ölçümlerle karşılaştırılması görülmektedir. C_f değerinin sıfır olduğu $x/h=4.5$ kesiti akışın yeniden birleşme noktasına (akış tutunma uzunluğu) tekabül etmektedir. Şekil 4.2.10’da ise hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [$C_p = (P - P_{ref}) / 0.5 \rho U_{ref}^2$] değişimi, ondokuz farklı noktada bildirilen deneysel ölçüm sonuçlarıyla mukayese edilmiştir. Adams ve Eaton (1988), yaptıkları çalışmada $-X^*=0$ noktasını akışın yeniden birleşme noktası olarak belirtmiş ve deneysel ölçüm sonuçlarını şekilde görüldüğü gibi yeniden birleşme noktasından itibaren ters yöne doğru sunmuşlardır. Bu çalışmada hesaplanan değerler de Adams ve Eaton’nın (1988) sunumlarına sadık kalınarak aynı biçimde grafiğe yansıtılmıştır. Hesaplanan ve ölçülen cidar statik-basınç katsayısı değerleri bire-bir örtüşmeseler de benzer bir trend göstermektedirler.



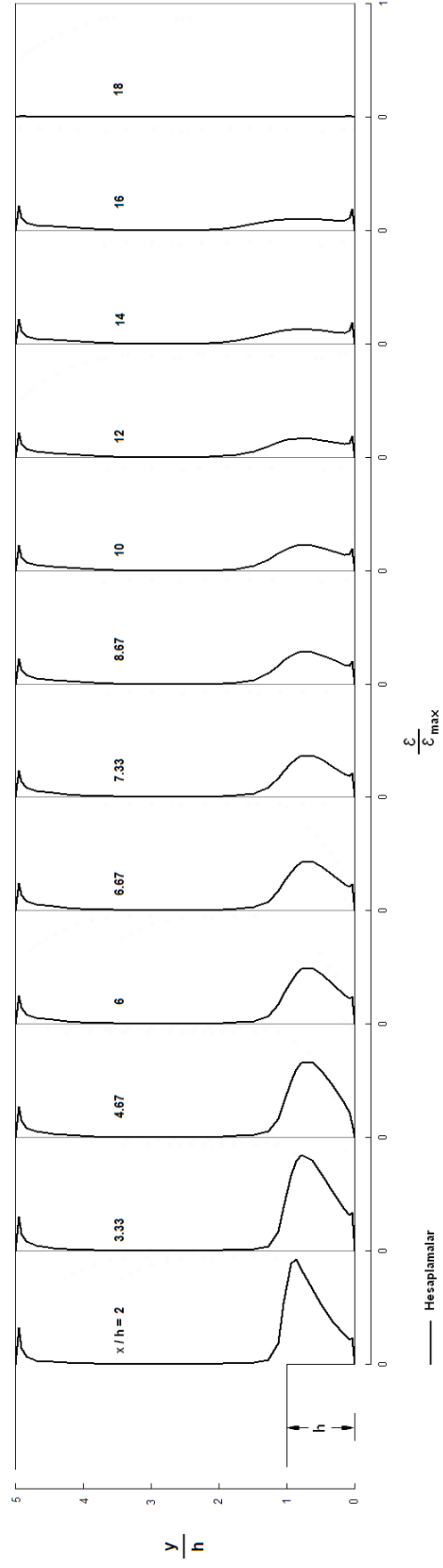
Şekil 4.2.1. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anizotropik kanallı akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



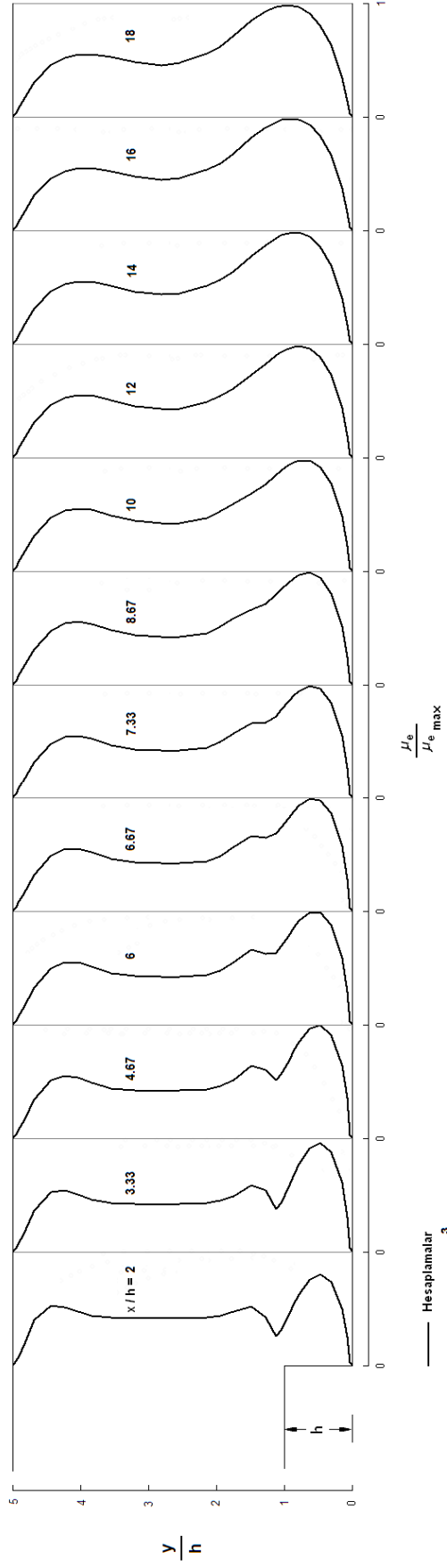
Şekil 4.2.2. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz hız profillerinin Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



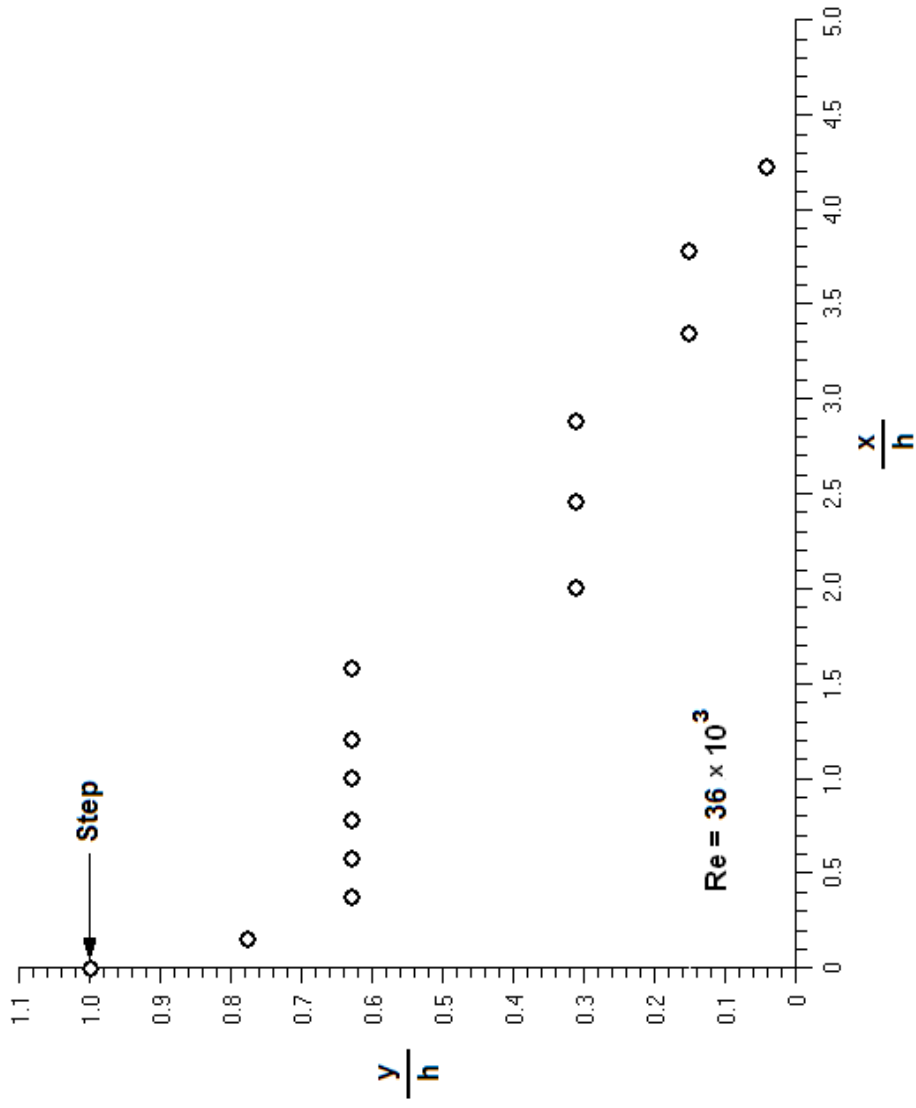
Şekil 4.2.3. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



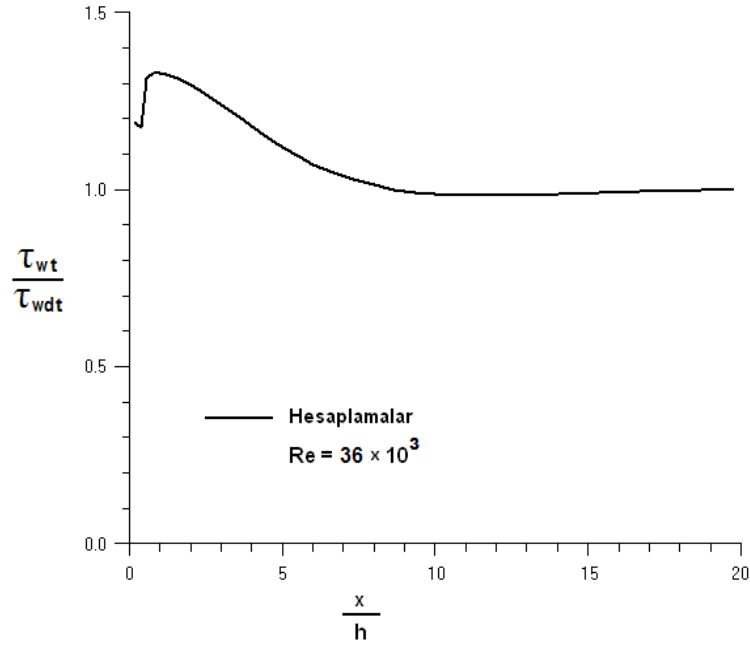
Şekil 4.2.4. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



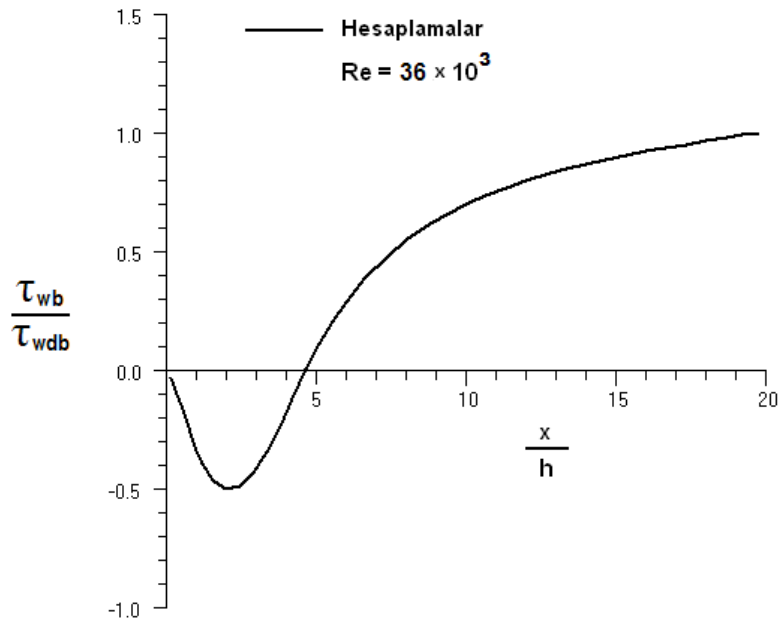
Şekil 4.2.5. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



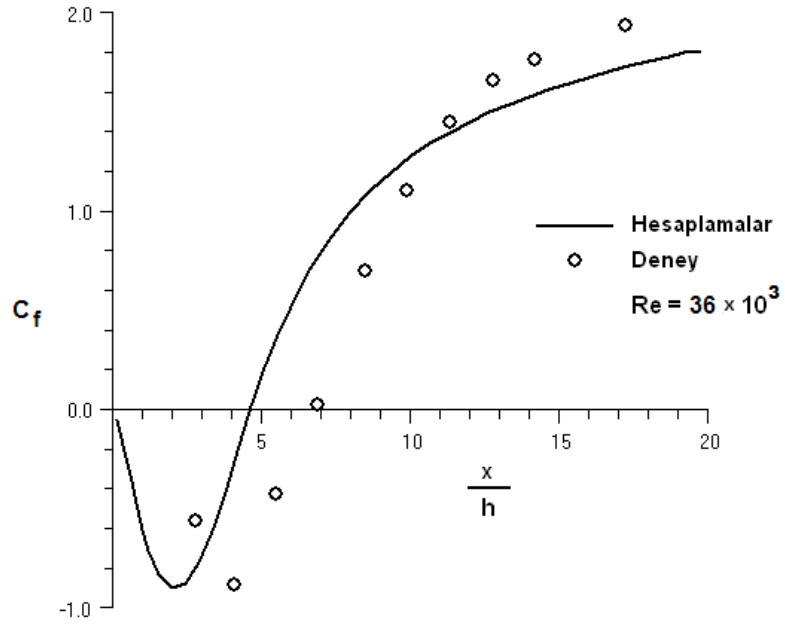
Şekil 4.2.6. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



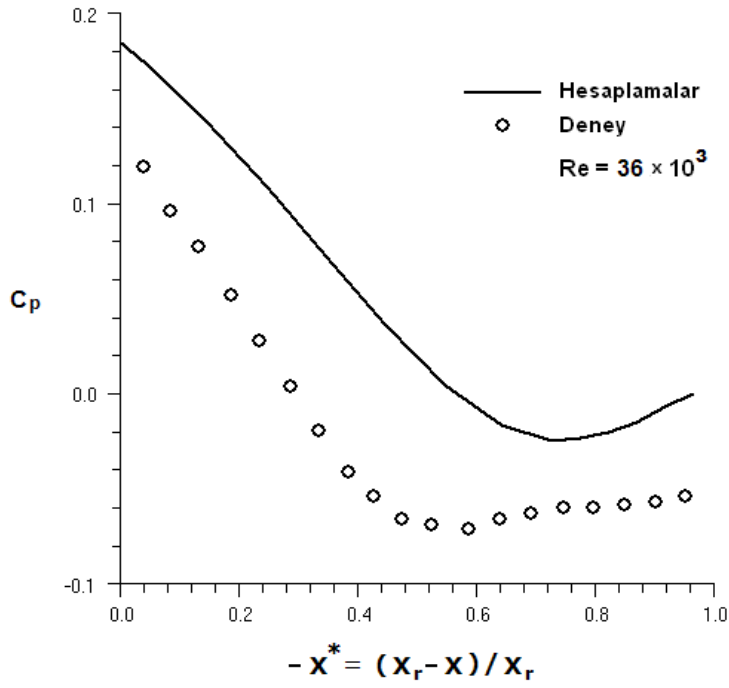
Şekil 4.2.7. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.8. Adams ve Eaton'ın (1988) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.9. Hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.



Şekil 4.2.10. Hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının Adams ve Eaton'ın (1988) deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarla ilgili ikinci olarak yapılan sayısal hesaplamaların sonuçları Ötügen'nin (1991) yapmış olduğu deneylerin ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Ötügen (1991), Bölüm 4.1'de bahsi geçen Poole ve Escudier'in (2003a, 2003b) aynı çift yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalda, üç farklı Reynolds sayısı için gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaların benzerini, bu sefer aynı Reynolds sayısında üç farklı genişleme oranına sahip tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda gerçekleştirmiştir. Reynolds sayısının ($Re=U_0H'/\nu$, $Re=16600$) sabit kalması için, kanal girişinde basamak üst akımındaki giriş akış hızı ($U_0=16$ m/s) ve kanal giriş yüksekliği ($H'=0.0163$ m) her geometride sabit tutulmuştur. Üç farklı kanal genişleme oranı, kanal yüksekliğinin (H) değiştirilmesiyle sağlanmıştır. İncelenecek genişleme oranları sırasıyla $s/H'=0.5$, $s/H'=1$, $s/H'=2.13$ olup çalışma akışkanı havadır. Hesaplamalarda kanal girişinde basamak üst akımındaki giriş akış hızı ($U_0=16$ m/s) referans hız olarak kabul edilmiştir.

Sayısal hesaplamalar için oluşturulan sonlu-fark ağ dağılımları Şekil 4.2.11'de gösterilmiştir. Ağlar, x ve y yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktasından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır.

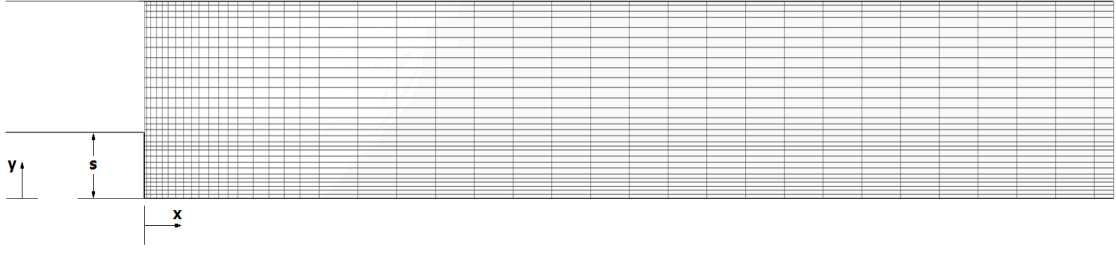
Ötügen (1991), $x/s=0.6$, $x/s=2.4$ ve $x/s=4$ kesitlerinde yaptığı ölçümlerle bu kesitlerin muhtelif noktalarındaki yerel akış yönü hızlarını tespit etmiş ve sunmuştur. Sayısal hesaplama alanı ise giriş kesitinden 25 basamak (s) yüksekliğinde, akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Deneysel ölçümler üç kesitte bildirildiğinden sayısal hesaplamalar sadece bu kesitlerdeki ölçümlerle kıyaslanmakla birlikte toplam olarak on kesitte hesaplanan değerler grafiklerde sunulmuştur.

Şekil 4.2.12'de sunulan grafikte, genişleme oranının $s/H'=0.5$ olduğu akış için hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hız profilleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hızları, Ötügen'nin (1991) deney sonuçlarını sunuş tarzına uydurmak için her kesitteki en yüksek hız (U_m) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.2.12'den de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum vardır.

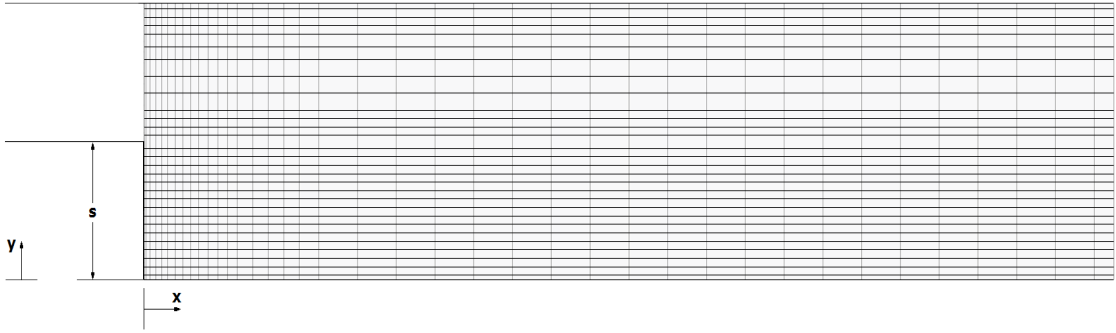
Türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri girişteki referans hızın karesiyle (U_0^2) boyutsuzlaştırılarak Şekil 4.2.13'te sunulmuştur. Şekil 4.2.14 ve 4.2.15 sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük (ϵ_{max} , $\mu_{e_{max}}$) değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır.

Genişleme oranının $s/H'=0.5$ olduğu tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 4.2.16'da sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, alt cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (s) ile boyutsuzlaştırılmış ve yine basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin (x/s) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_f) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/s=4.2$ kesitindedir.

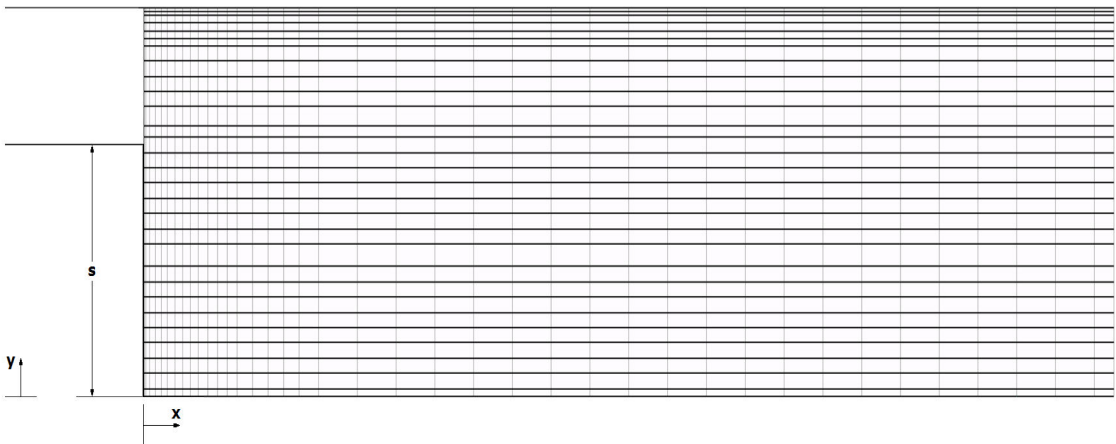
Ötügen'in (1991) tek yanlı düzlemsel ve $s/H'=0.5$ oranlı anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.17 ve Şekil 4.2.18'de sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.17'de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi yaklaşık $x/s=1$ kesitinde en yüksek değerine ($\tau_{wt} / \tau_{wdt} = 2.95$) ulaşır $x/s=21$ kesitine kadar düşüş göstermektedir. Bu kesitten sonra da $\tau_{wt} / \tau_{wdt} = 1$ değeri seviyesinde yaklaşık sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.18'de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/s=4.4$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almaktadır. $x/s=2$ kesitinde en düşük değerine ($\tau_{wb} / \tau_{wdb} = -0.875$) ulaşır artış trendine girmiş ve yaklaşık $x/s=23$ kesitinde $\tau_{wb} / \tau_{wdb} = 1$ gelişmiş değerine ulaşmıştır. Şekil 4.2.19'da ise hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5 \rho U_0^2$] değişimi görülmektedir. Girişten hemen sonra, $x/s=2$ kesitine kadar negatif değerler alan cidar statik basınç katsayısı, $x/s=10$ kesitine kadar ani yükseliş gösterip ardından yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



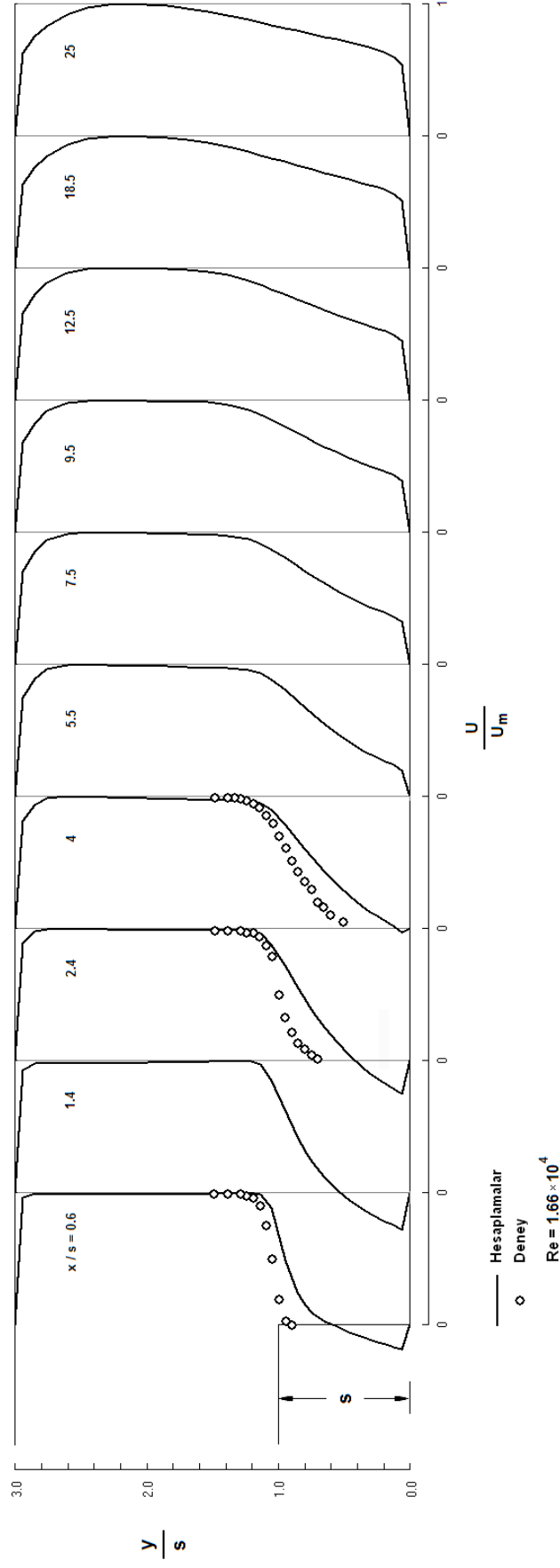
Şekil 4.2.11.a. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



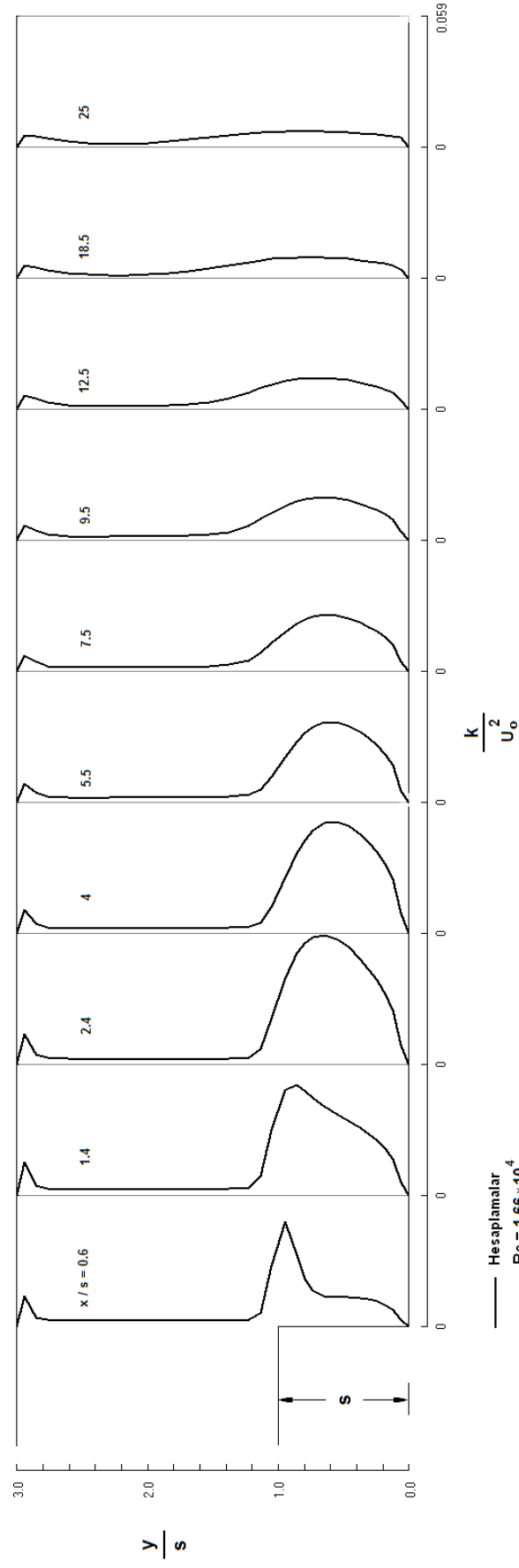
Şekil 4.2.11.b. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel Anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



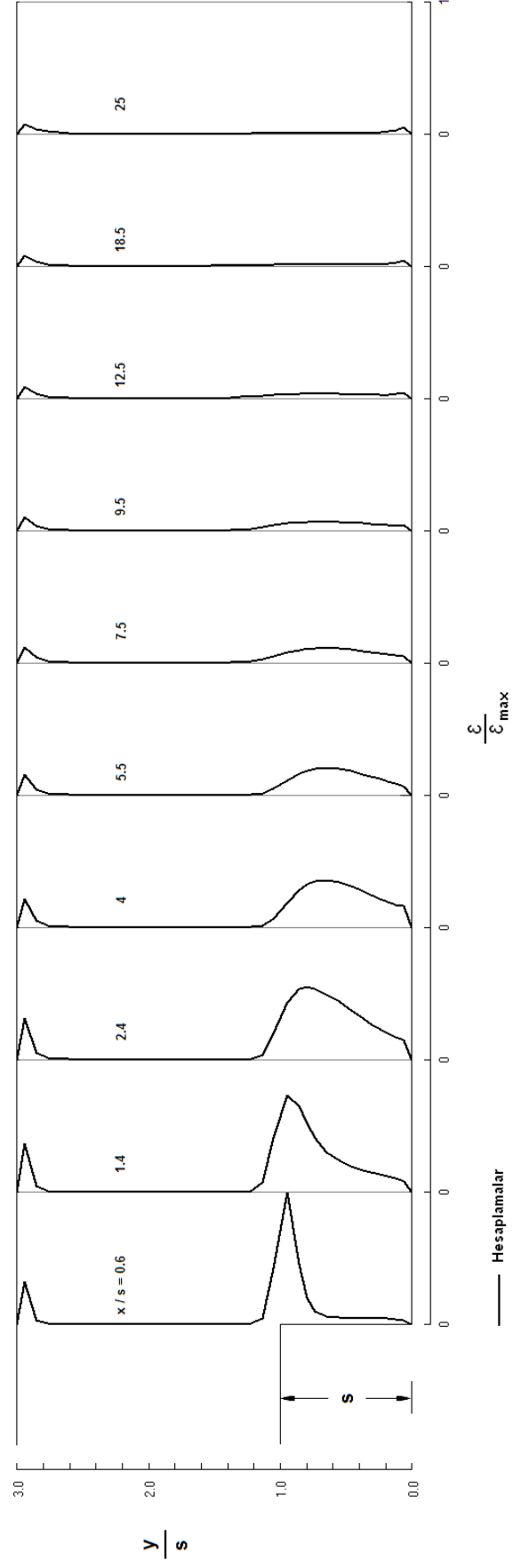
Şekil 4.2.11.c. Ötügen'nin (1991) genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



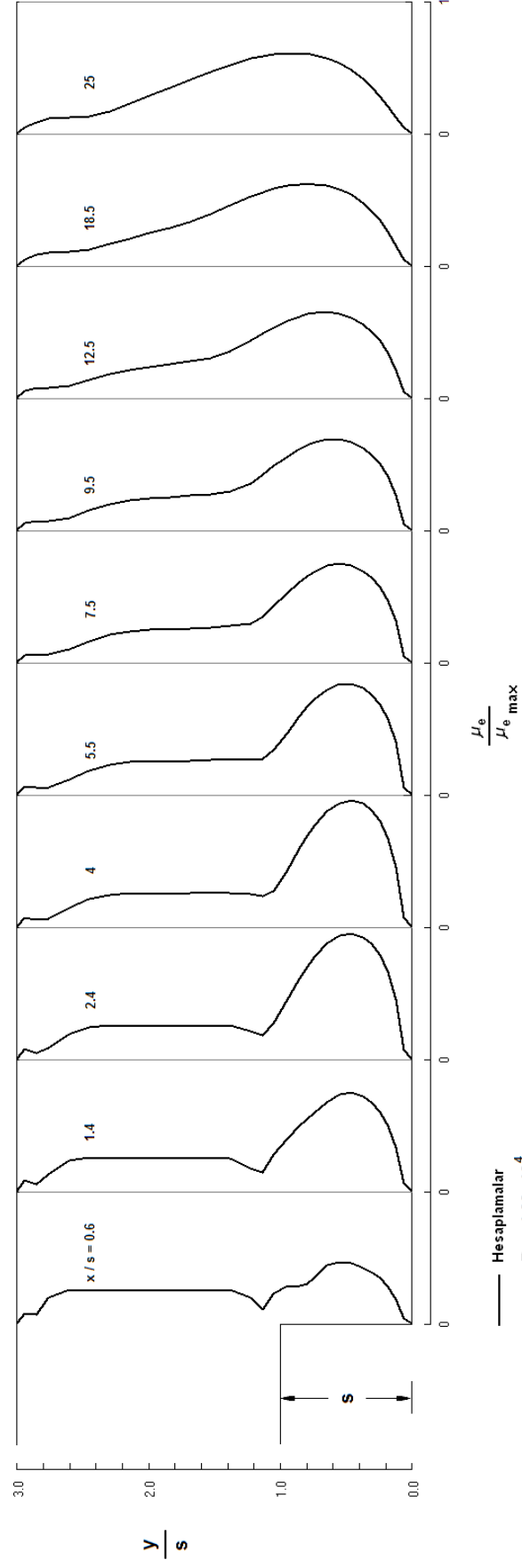
Şekil 4.2.12. Genişleme oranı $s/H=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



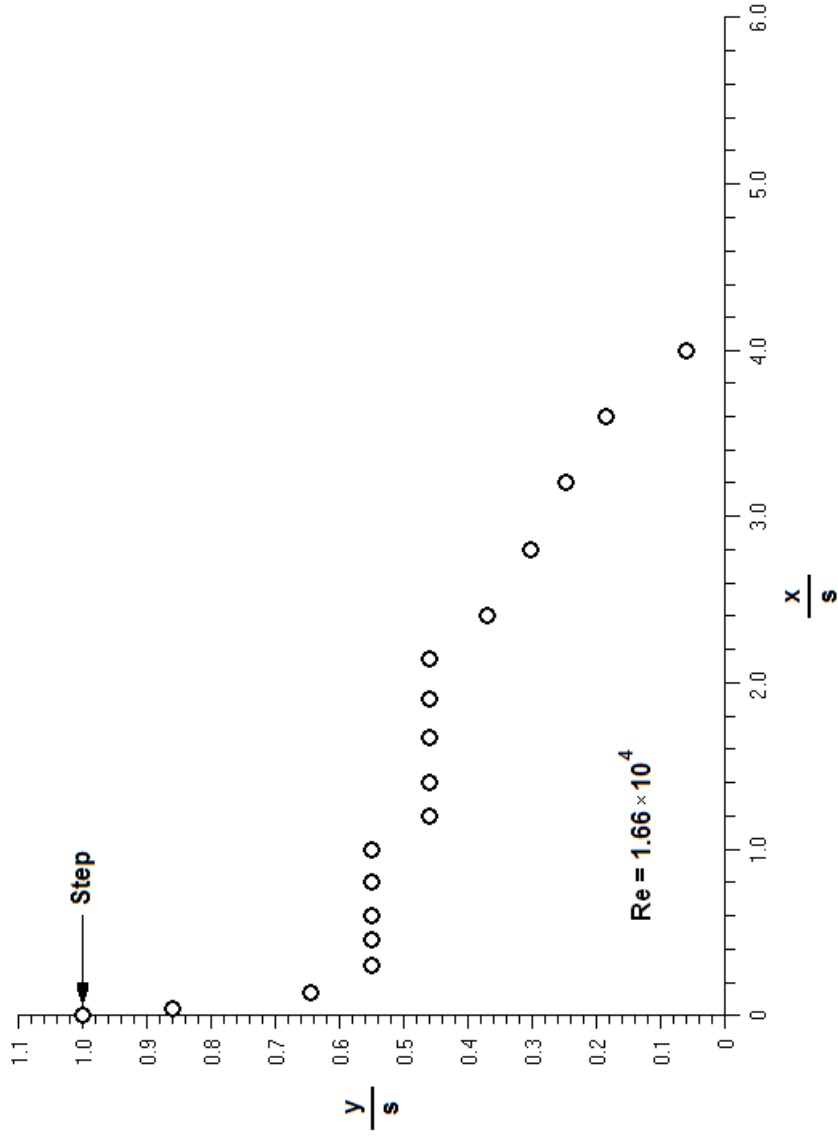
Şekil 4.2.13. Genişleme oranı $s/H^2=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



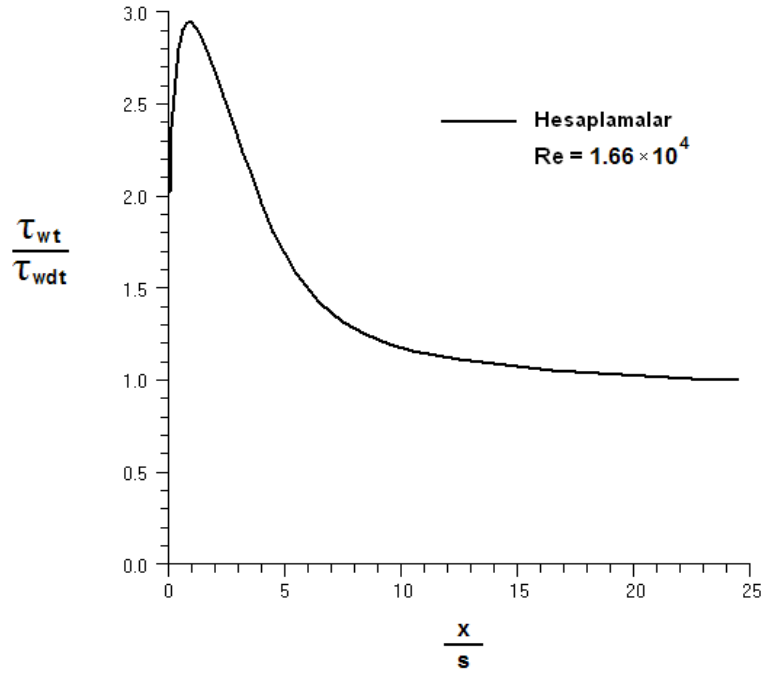
Şekil 4.2.14. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



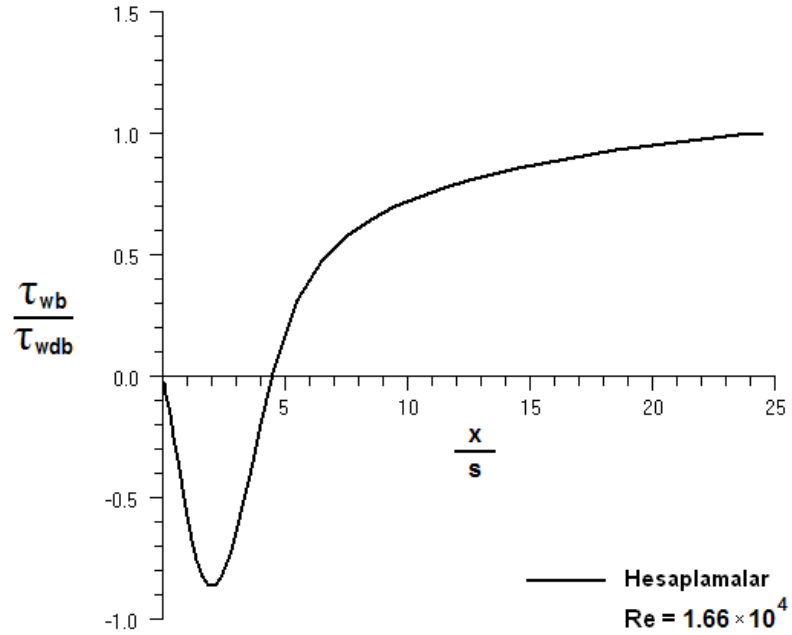
Şekil 4.2.15. Genişleme oranı $s/H^*=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



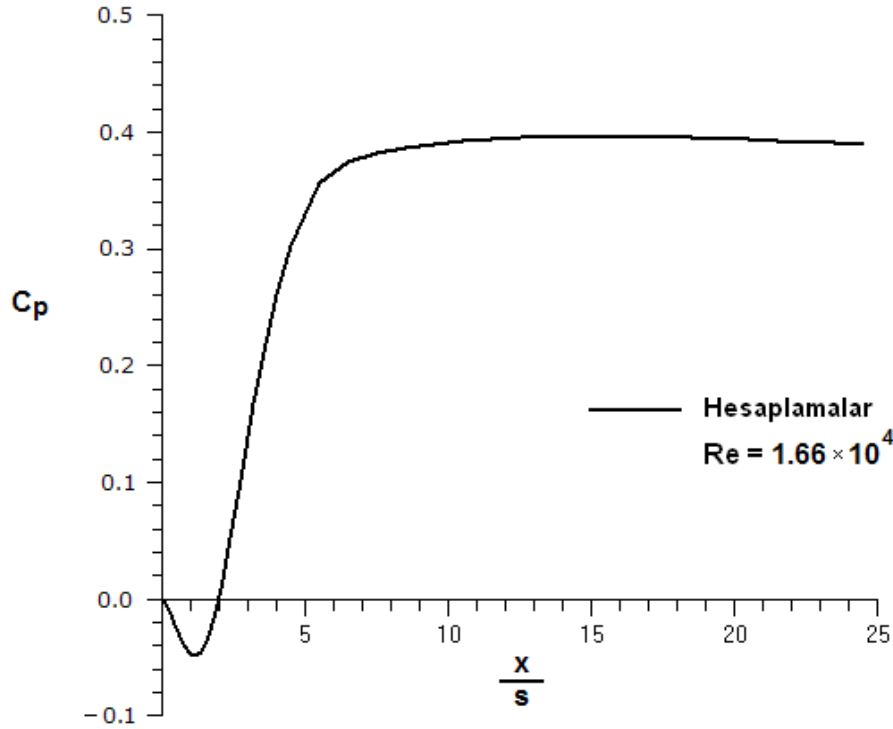
Şekil 4.2.16. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 4.2.17. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.18. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.19. Genişleme oranı $s/H'=0.5$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.

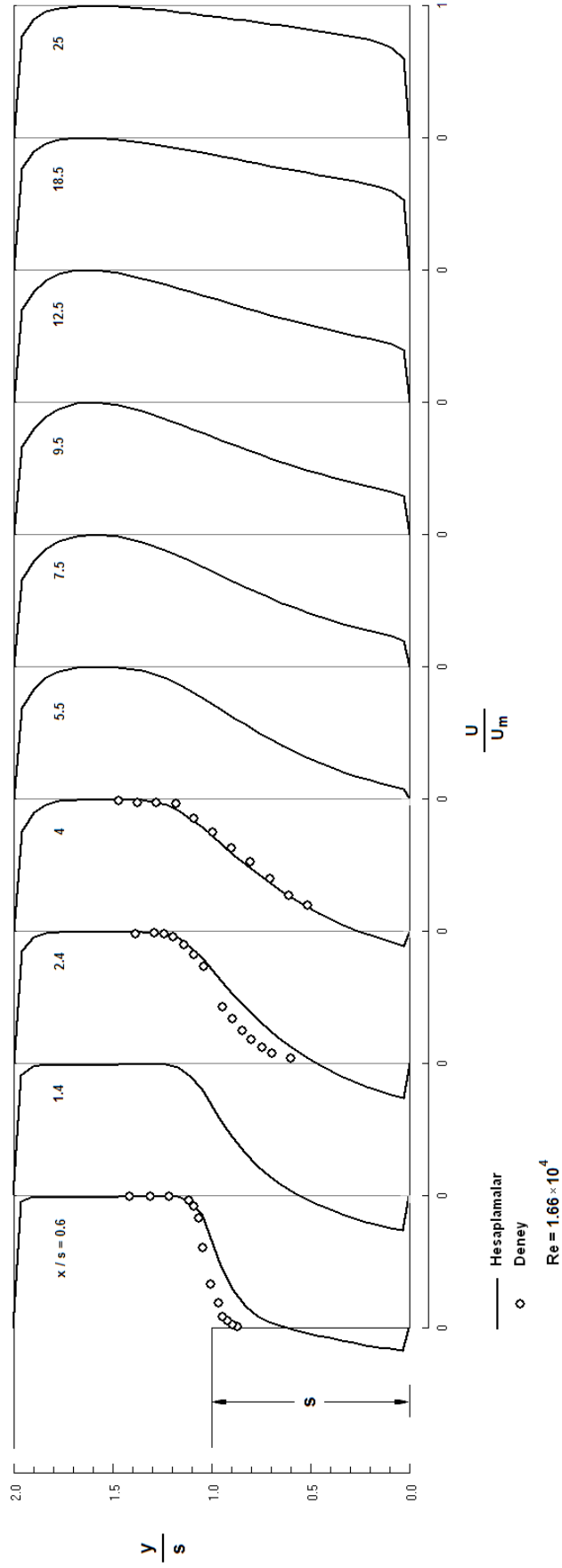
Şekil 4.2.20'de sunulan grafikte, genişleme oranının $s/H'=1$ olduğu akış için hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hız profilleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hızları, Ötügen'nin (1991) deney sonuçlarını sunuş tarzına uydurmak için her kesitteki en yüksek hız (U_m) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.2.20'den de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum vardır.

Şekil 4.2.21'de türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri girişteki referans hızın karesiyle (U_0^2) boyutsuzlaştırılarak sunulmuştur. Şekil 4.2.22 ve 4.2.23 sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleriyle (ϵ_{max} , μe_{max}) boyutsuzlaştırılmıştır.

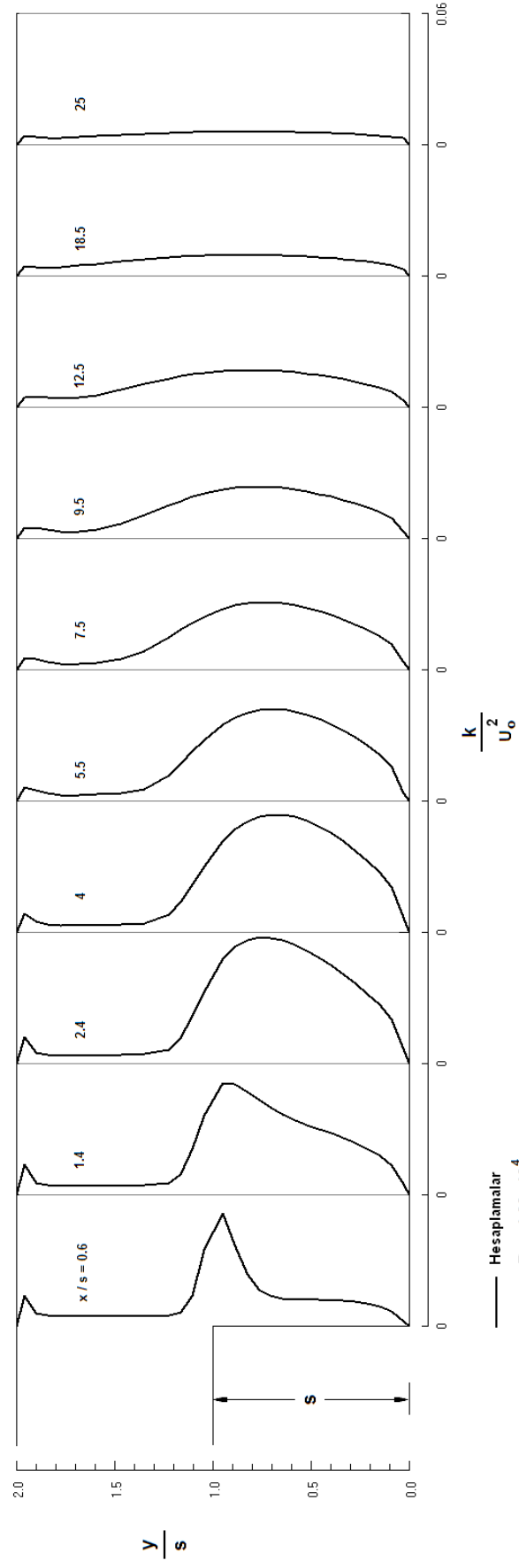
Genişleme oranının $s/H'=1$ olduğu tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 4.2.24'te sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, alt cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (s) ile boyutsuzlaştırılmış ve yine basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin (x/s) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sifira eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_t) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/s=4.6$ kesitindedir.

Ötügen'in (1991) tek yanlı düzlemsel ve $s/H'=1$ oranlı anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.25 ve Şekil 4.2.26'de sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.25'de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi yaklaşık $x/s=1$ kesitinde en yüksek değerine ($\tau_{wt} / \tau_{wdt} = 3.75$) ulaşmış ve $x/s=23$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve devamındaki kesitlerde $\tau_{wt} / \tau_{wdt} = 1$ değeri seviyesinde yaklaşık sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.26'de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/s=5.5$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almaktadır. $x/s=2$ kesitinde en düşük değerine ($\tau_{wb} / \tau_{wdb} = -1.12$) ulaşmış ve artış trendine girmiş ve yaklaşık $x/s=24$ kesitinde $\tau_{wb} / \tau_{wdb} = 1$ gelişmiş değerine ulaşmıştır.

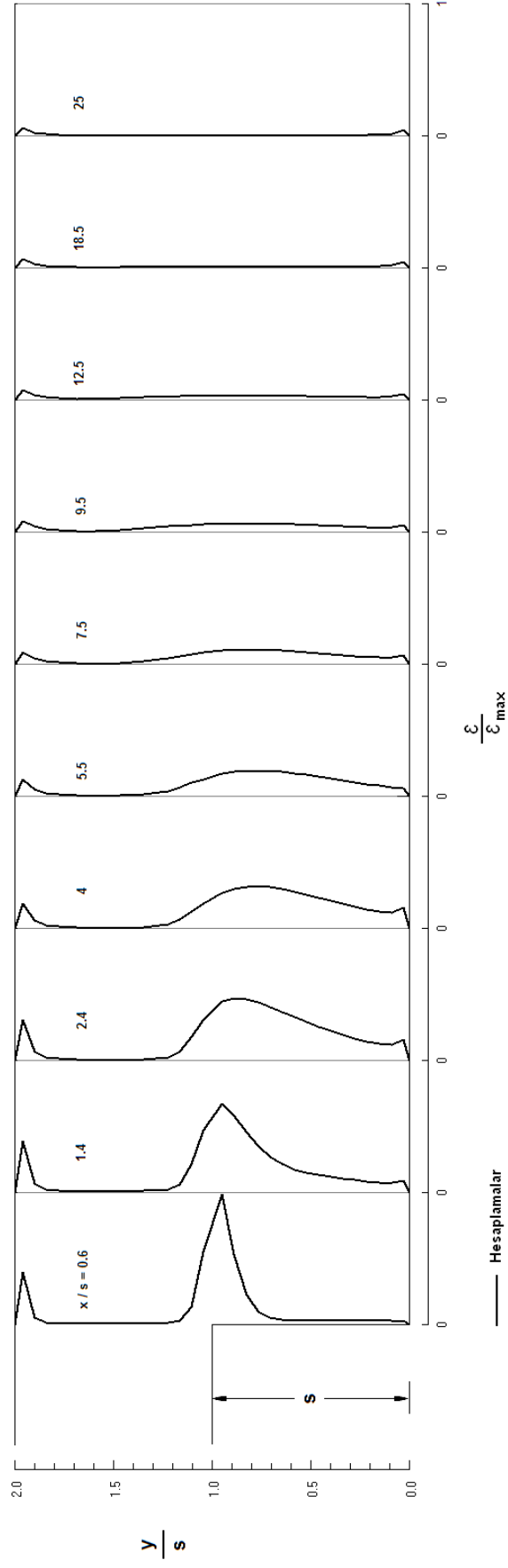
Şekil 4.2.27'de ise hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5\rho U_0^2$] değişimi görülmektedir. Girişten hemen sonra, $x/s=2$ kesitine kadar negatif değerler alan cidar statik basınç katsayısı, $x/s=10$ kesitine kadar ani yükseliş gösterip ardından yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



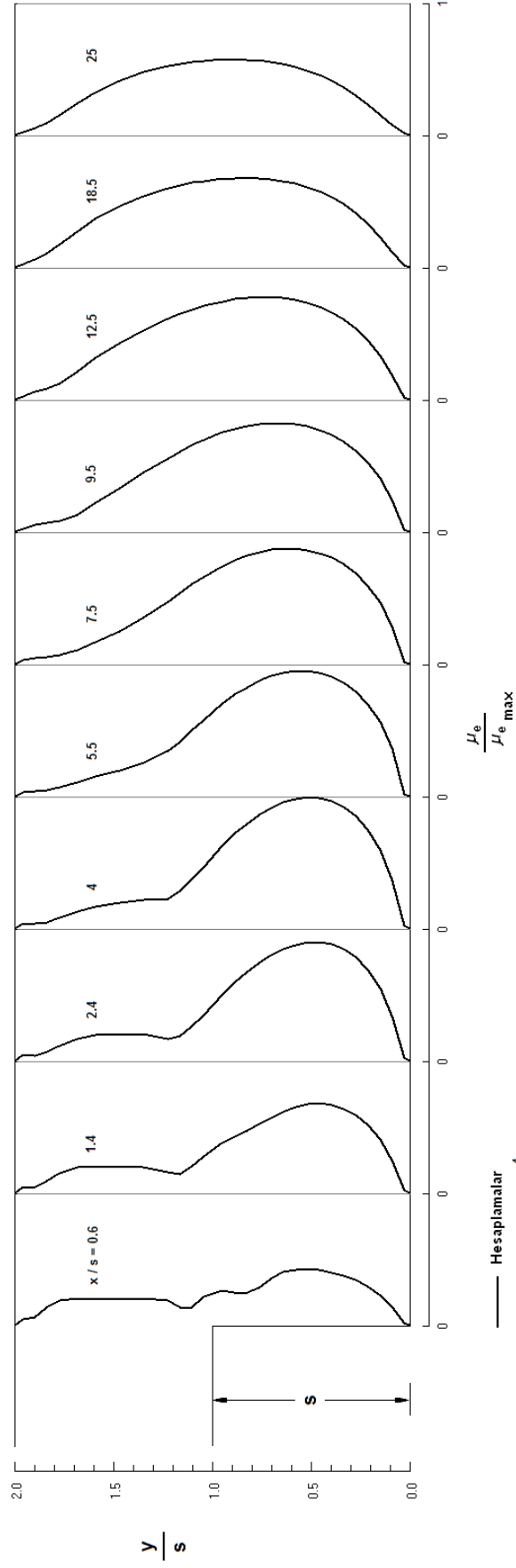
Şekil 4.2.20. Genişleme oranı $s/H=1$ olan tek yanlı düzlemsel anijenleşmeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



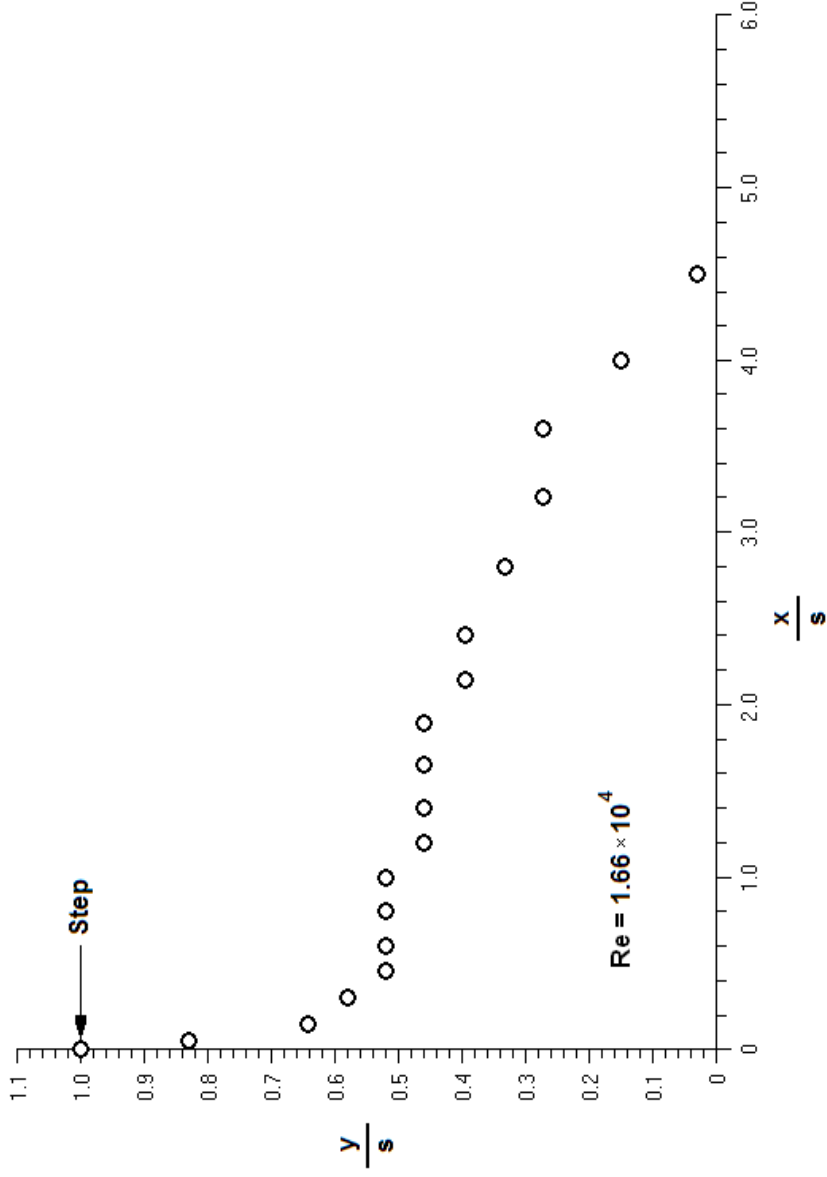
Şekil 4.2.21. Genişleme oranı $s/H = 1$ olan tek yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



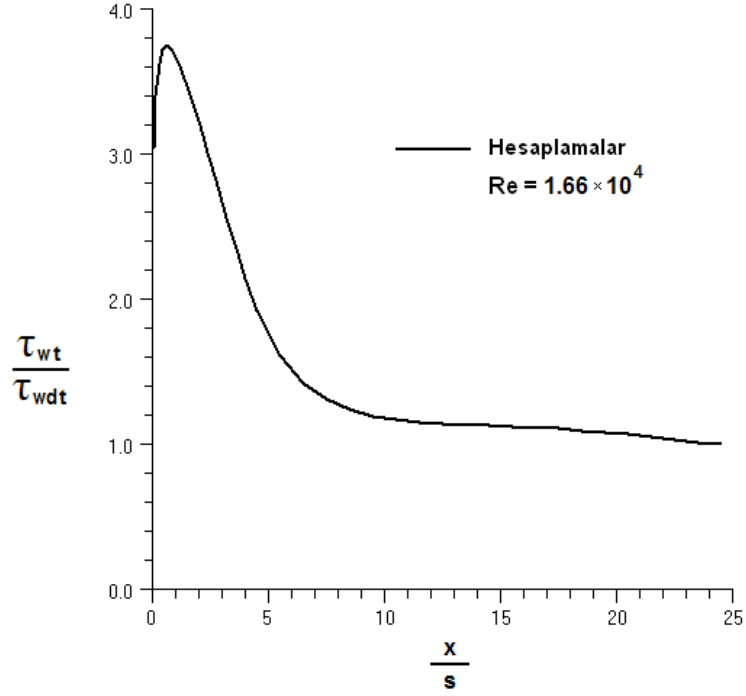
Şekil 4.2.22. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



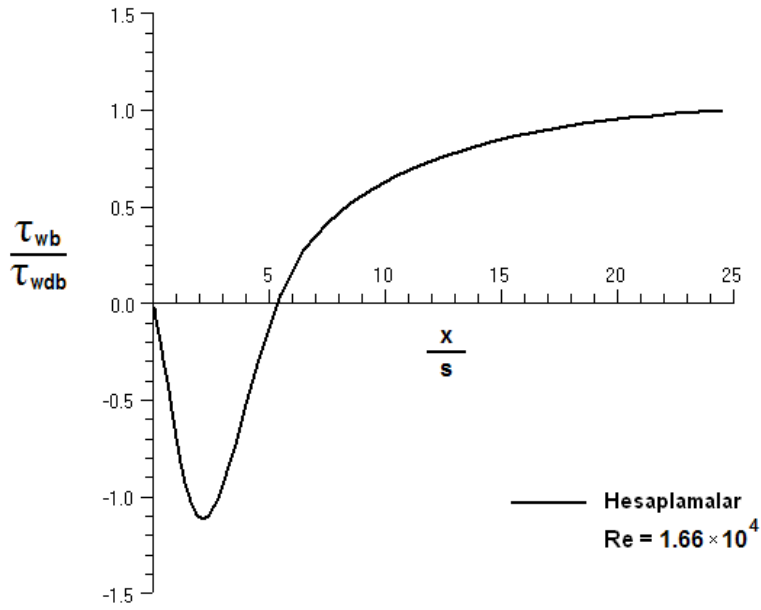
Şekil 4.2.23. Genişleme oranı $s/H^* = 1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



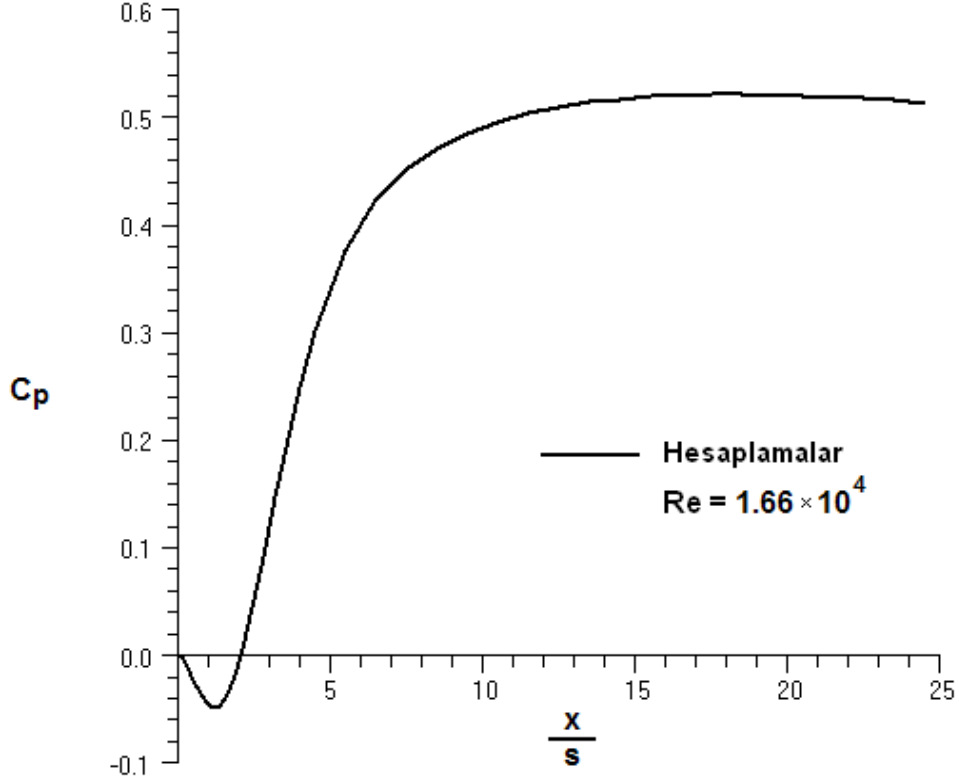
Şekil 4.2.24. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 4.2.25. Genişleme oranı $s/H^2=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.26. Genişleme oranı $s/H^2=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.27. Genişleme oranı $s/H'=1$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.

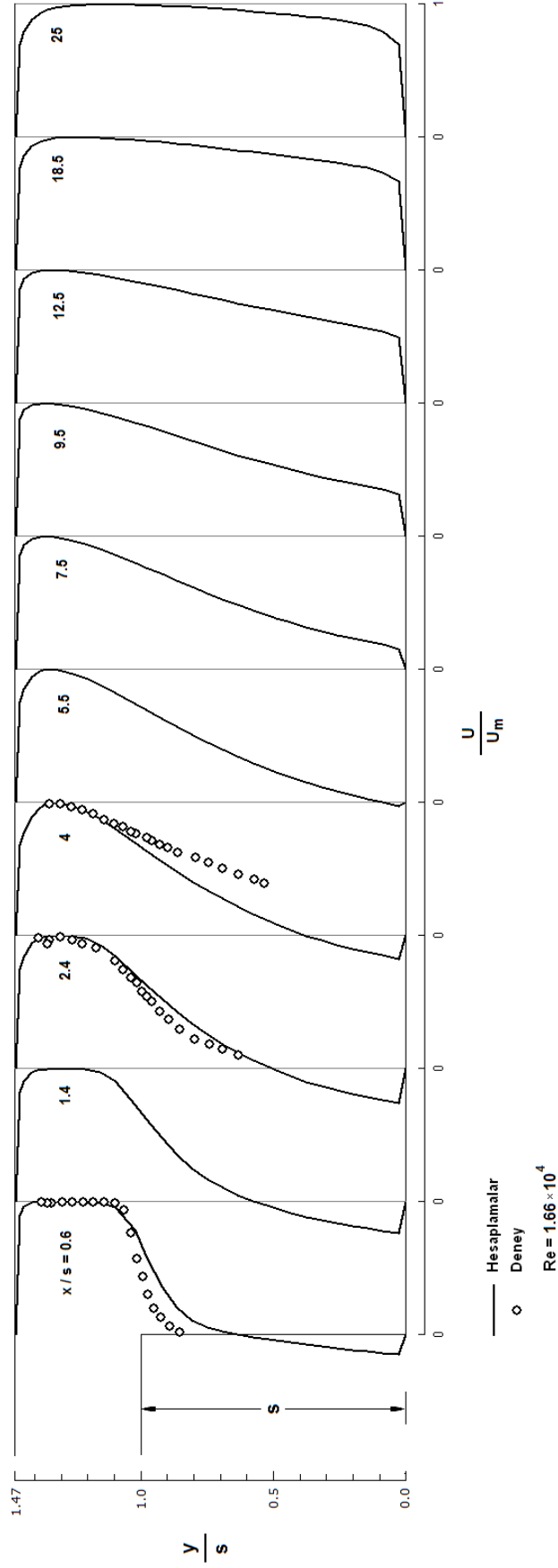
Şekil 4.2.28'de sunulan grafikte, genişleme oranının $s/H'=2.13$ olduğu akış için hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hız profilleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hızları, Ötügen'nin (1991) deney sonuçlarını sunuş tarzına uydurmak için her kesitteki en yüksek hız (U_m) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 4.2.28'den de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları arasında iyi bir uyum vardır.

Şekil 4.2.29'da türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri girişteki referans hızın karesiyle (U_0^2) boyutsuzlaştırılarak sunulmuştur. Şekil 4.2.30 ve 4.2.31 sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük (ϵ_{max} , $\mu_{e_{max}}$) değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır.

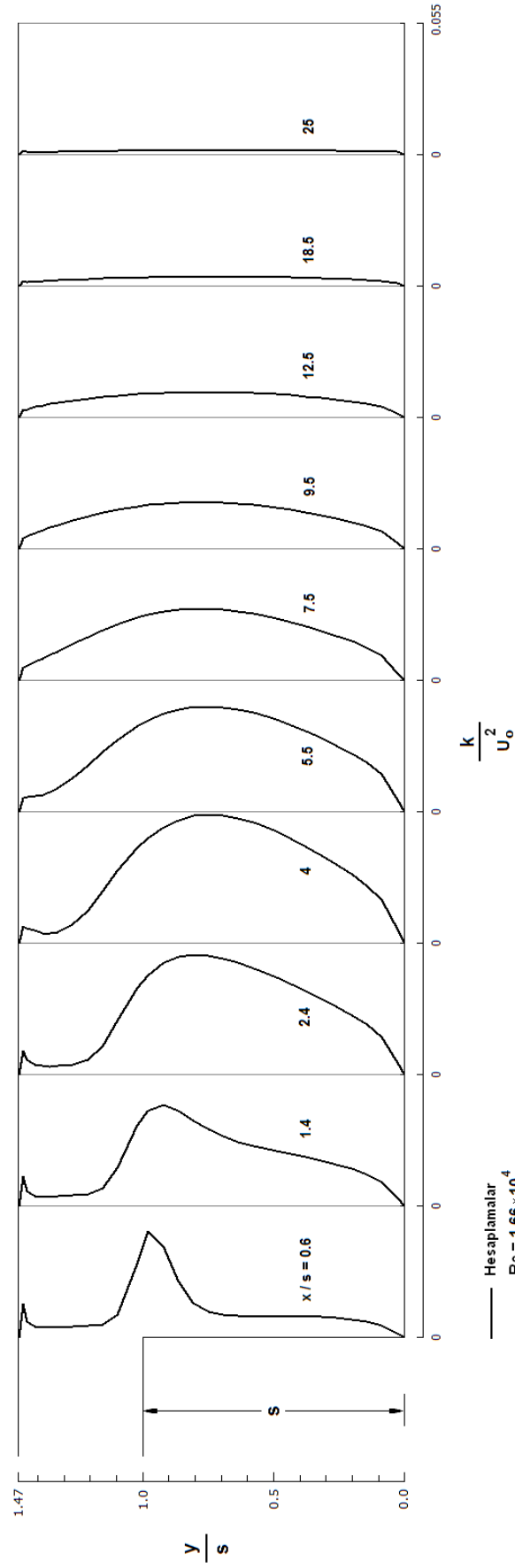
Genişleme oranının $s/H'=2.13$ olduğu tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 4.2.32'de sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, alt cidardan ölçülen dikey mesafe y , basamak yüksekliği (s) ile boyutsuzlaştırılmış ve yine basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin (x/s) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sifira eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır. Hesaplanan akış tutunma uzunluğu (X_r) şekilden de görülebileceği gibi takriben $x/s=5.9$ kesitindedir.

Ötügen'in (1991) tek yanlı düzlemsel ve $s/H'=2.13$ oranlı anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.33 ve Şekil 4.2.34'te sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.33'te görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi yaklaşık $x/s=0.2$ kesitinde en yüksek değerine ($\tau_{wt} / \tau_{wdt} =9.7$) ulaşır $x/s=23$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve devamındaki kesitlerde $\tau_{wt} / \tau_{wdt} =1$ değeri seviyesinde yaklaşık sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.34'te görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/s=6.4$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almaktadır. $x/s=2.5$ kesitinde en düşük değerine ($\tau_{wb} / \tau_{wdb} = -1.95$) ulaşır artış trendine girmiş ve yaklaşık $x/s=16$ kesitinde $\tau_{wb} / \tau_{wdb} =1$ gelişmiş değerine ulaşmıştır. Şekil 4.2.35'te ise hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5 \rho U_o^2$] değişimi görülmektedir. Girişten hemen sonra, $x/s=2.3$ kesitine kadar negatif değerler alan cidar statik basınç katsayısı, $x/s=12$ kesitine kadar ani yükseliş gösterip ardından yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.

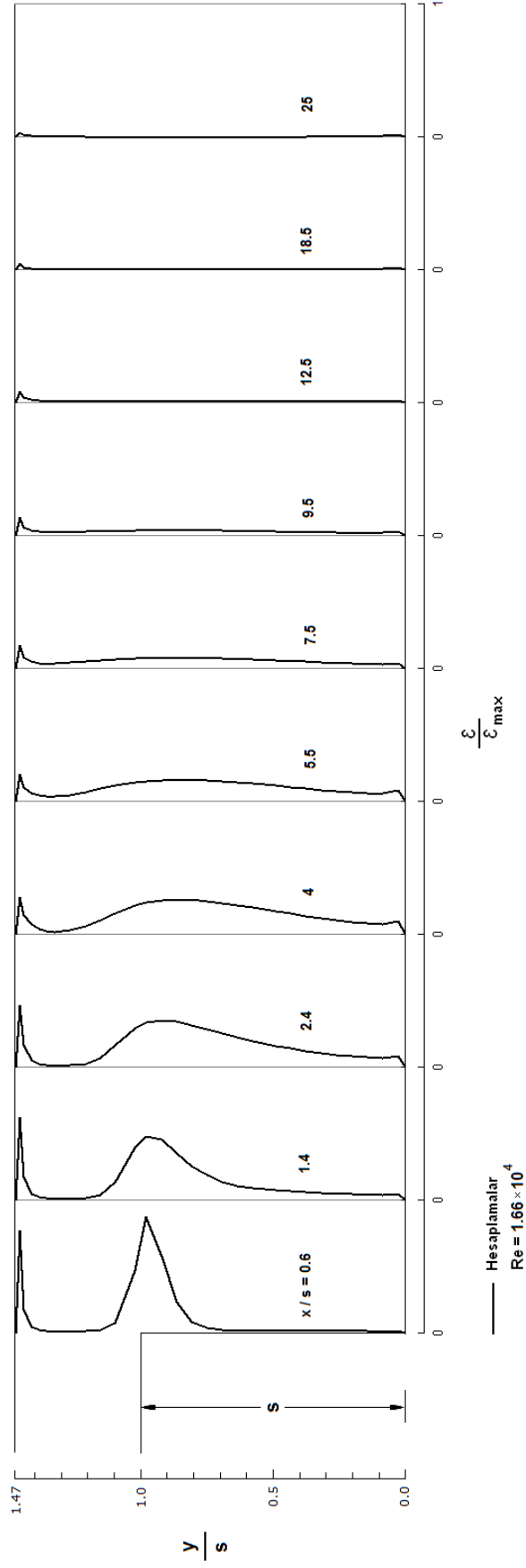
Sabit Reynolds sayısı ($Re=16600$) ve üç farklı genişleme oranında yapılan hesaplamalar sonucunda tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda, genişleme oranının artmasıyla akışın yeniden birleşme (X_r) mesafesinin de arttığı görülmektedir.



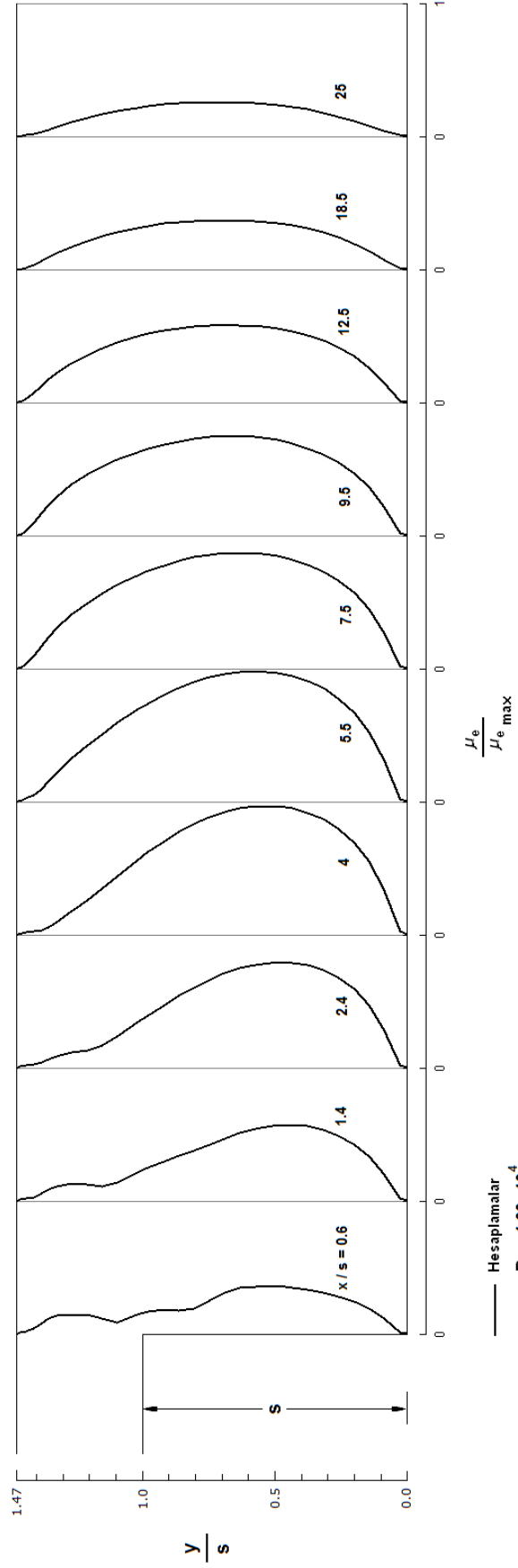
Şekil 4.2.28. Genişleme oranı $s/H=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ötügen'in (1991) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



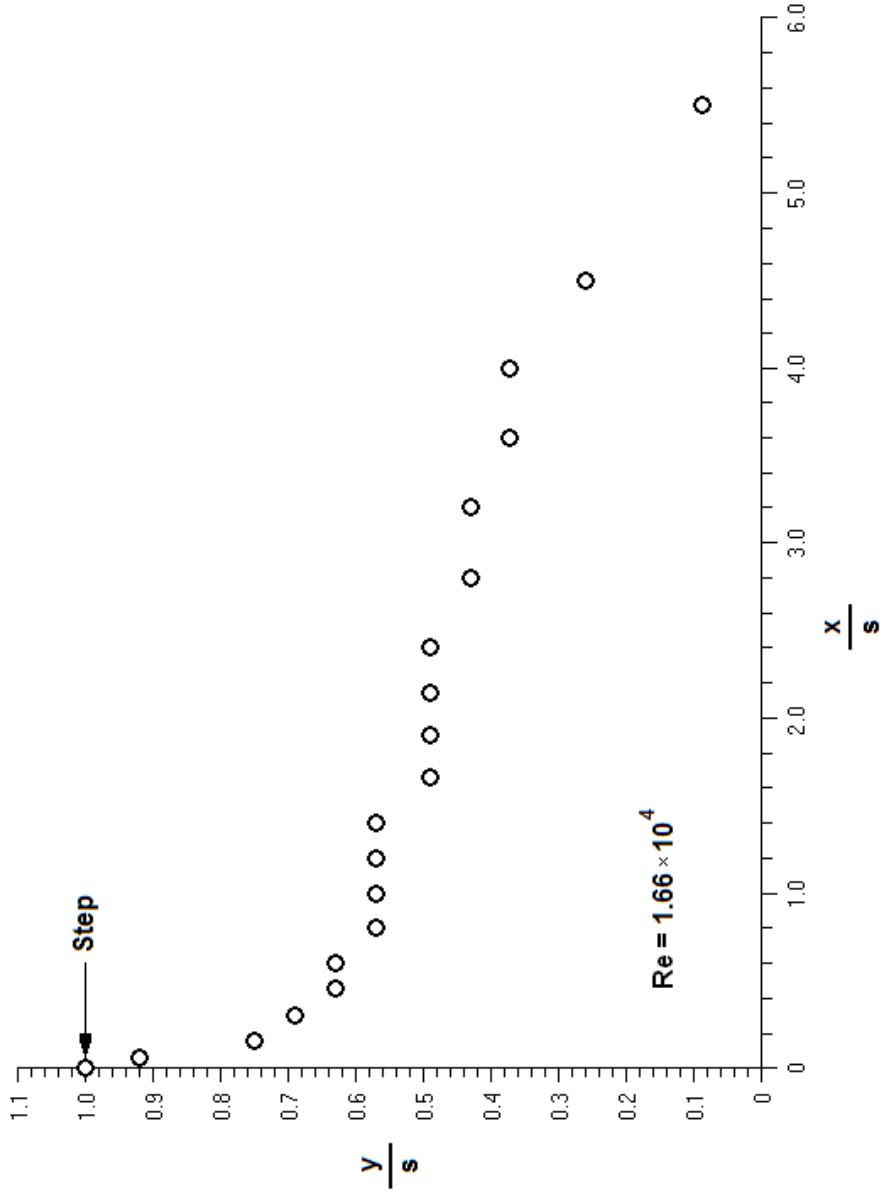
Şekil 4.2.29. Genişleme oranı $s/H=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişleme li akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



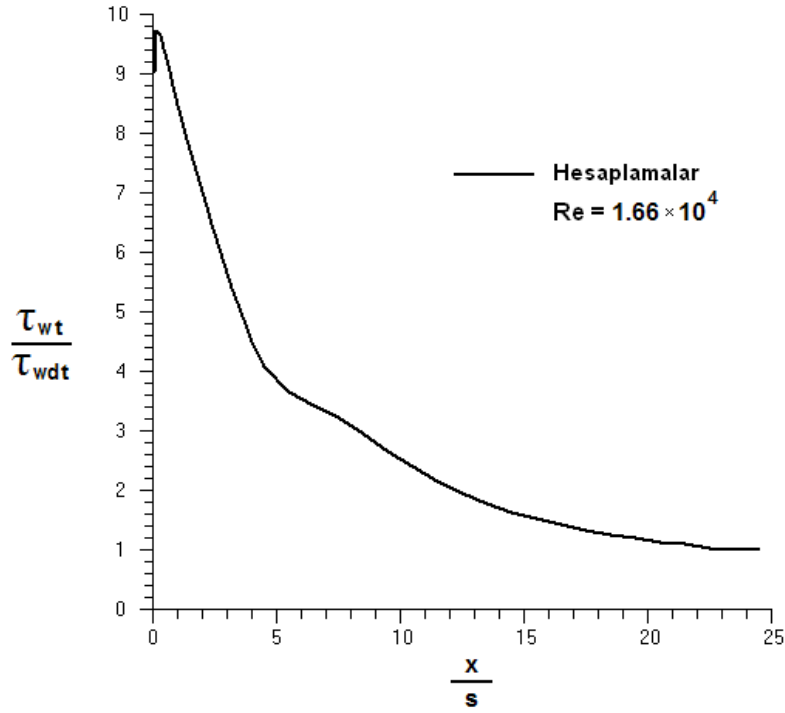
Şekil 4.2.30. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



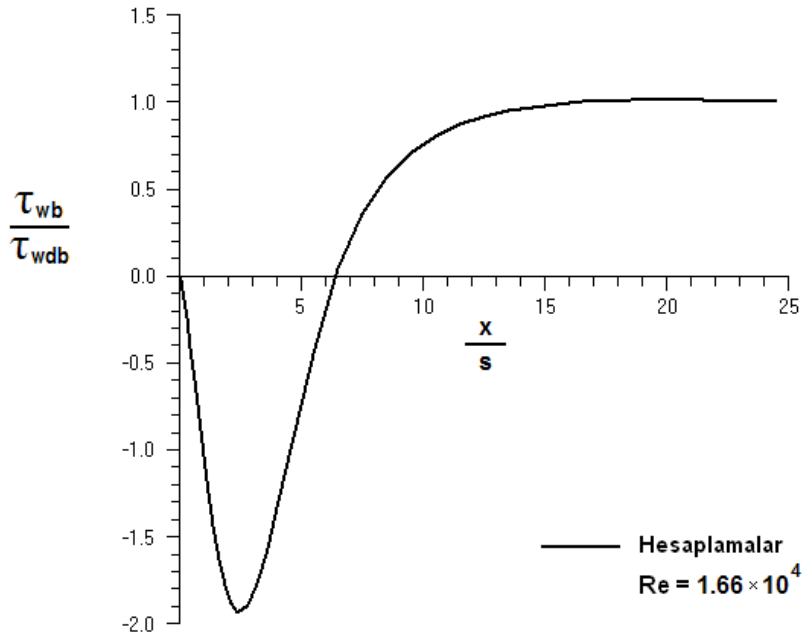
Şekil 4.2.31. Genişleme oranı $s/H=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



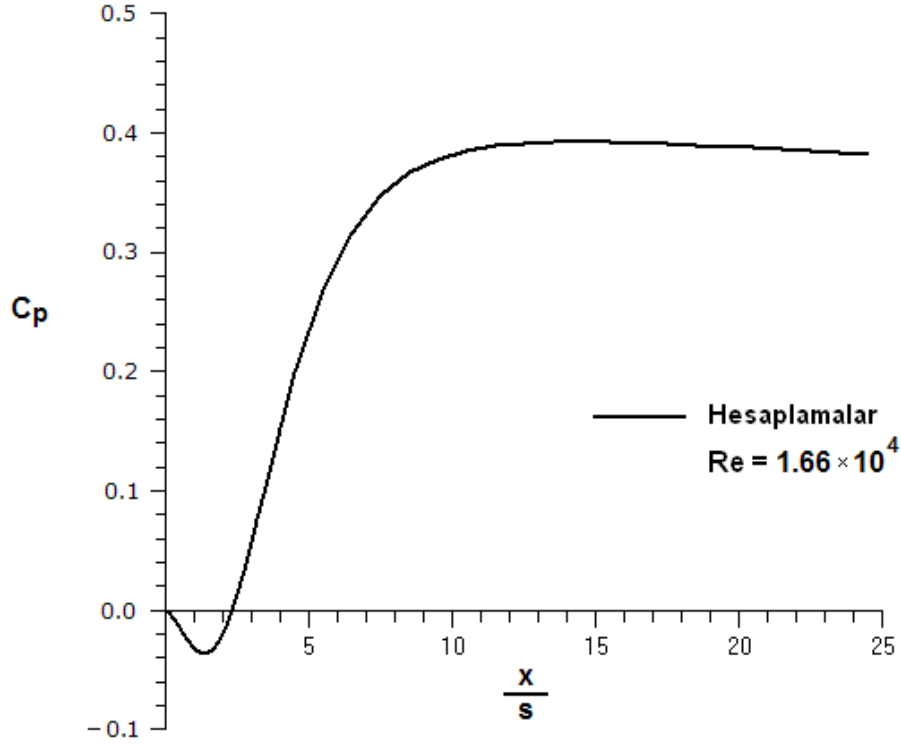
Şekil 4.2.32. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel an genişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 4.2.33. Genişleme oranı $s/H^2=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.34. Genişleme oranı $s/H^2=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.35. Genişleme oranı $s/H'=2.13$ olan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.

Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için kullanılan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 4.2.36'da gösterilmiştir. Bu ağ da diğerleri gibi, x ve y yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın genişleme oranı $H/H'=1.5$ 'tir. Reynolds sayısı 3025 ($Re=U_b h/\nu$), referans olarak alınan giriş ortalama akış hızı $U_b=202$ mm/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı sudur.

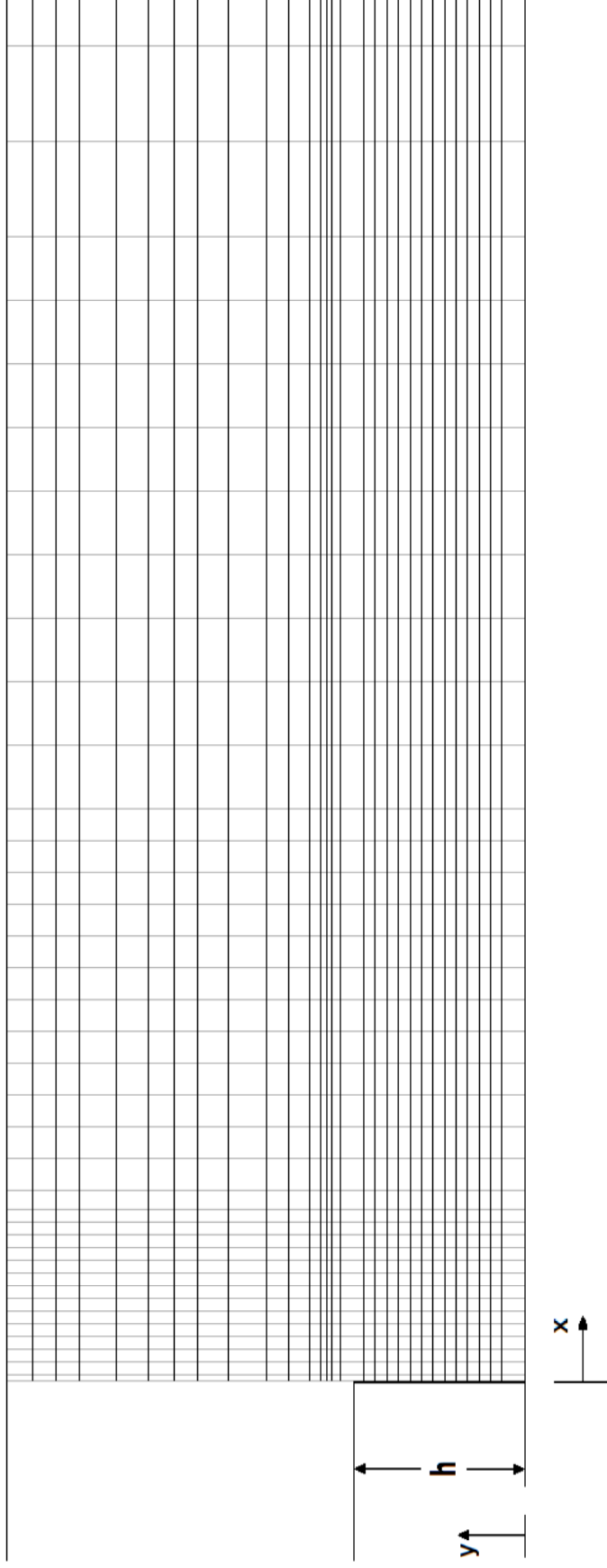
Denham et. al. (1975) $x/h=2, 4, 6, 8$ ve 12 kesitlerinde akış yönü hız profillerini yaptıkları deneysel ölçümler sonucunda bildirmişlerdir. Sayısal hesaplama alanı ise giriş kesitinden 29 basamak (h) yüksekliğine eş mesafe kadar akış yönüne doğru uzatılmıştır. Şekil 4.2.37'de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hız profilleri mukayese edilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hızları referans hız ($U_b=202$ mm/s) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafiklerden de görüldüğü üzere hesaplanan hız

profilleriyle deneysel karşılıkları arasında çok iyi bir uyum vardır. Bununla beraber, hesaplanan çevrıntili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha dardır. Bunun sebebi mevcut standart k-ε türbülans modelinin yetersizliğidir.

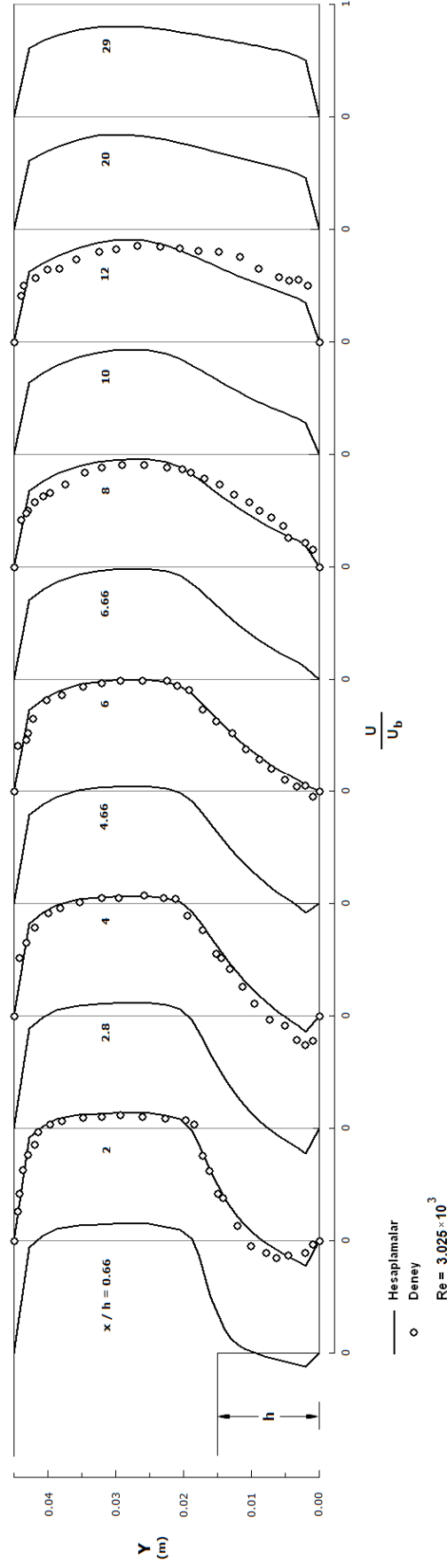
Şekil 4.2.38’de türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri sunulmuştur. Hesaplanan türbülans kinetik enerji değerleri girişteki referans hızın karesiyle (U_b^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profilleri sırasıyla Şekil 4.2.39 ve 4.2.40’ta görülmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük (ϵ_{max} , $\mu_{e_{max}}$) değerleriyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıyla efektif viskozite profillerinin kanal boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.

Denham et. al.’ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 4.2.41’de sunulmuştur. Grafikte yatay eksenindeki akış mesafesi, basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır.

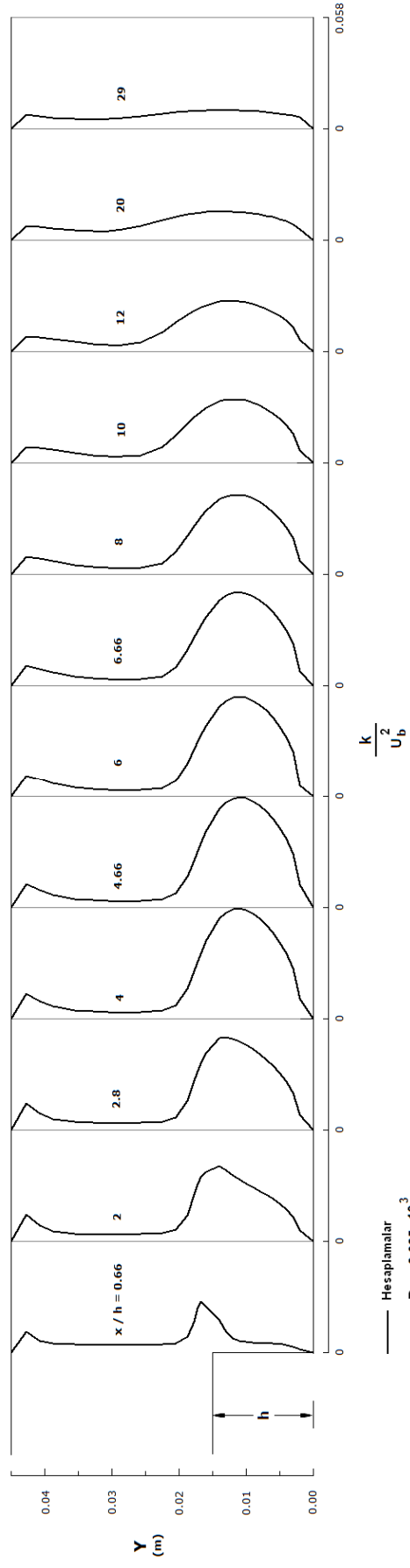
Denham et. al.’ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.42 ve Şekil 4.2.43’te sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.42’de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi $x/h=2.5$ kesitinde en yüksek değerine ulaşır $x/h=18$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve akabinde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.43’te görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=5.9$ kesitine kadar, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almakta ve yaklaşık $x/h=28$ kesitinde gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.2.44’te ise hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5 \rho U_b^2$] değişimi gösterilmiştir.



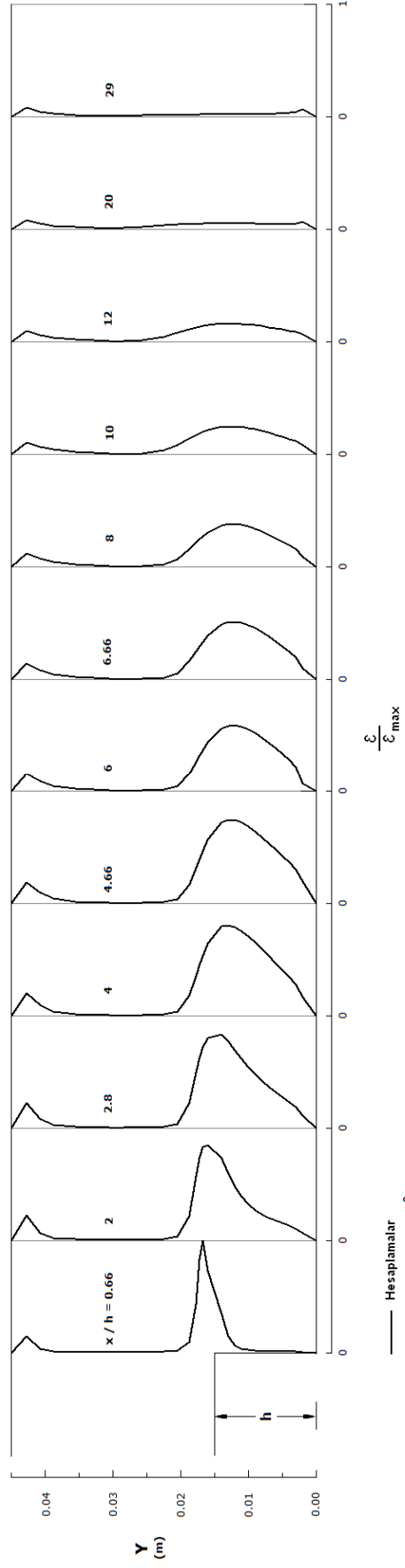
Şekil 4.2.36. Denham et. al.'in (1975) tek yanlı düzlemsel anıgenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



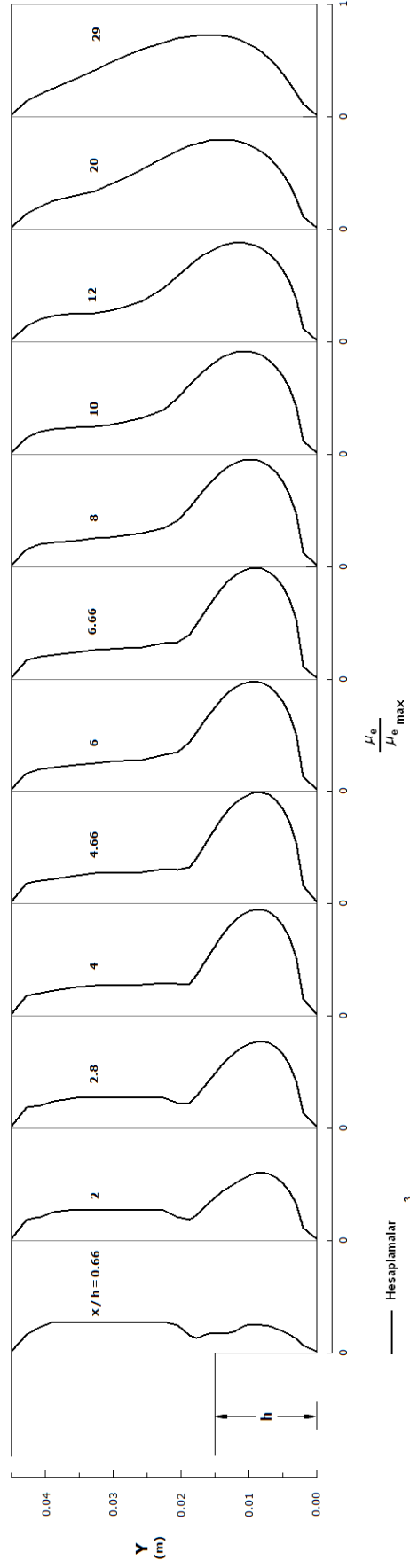
Şekil 4.2.37. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Denham et. al.'ın (1975) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



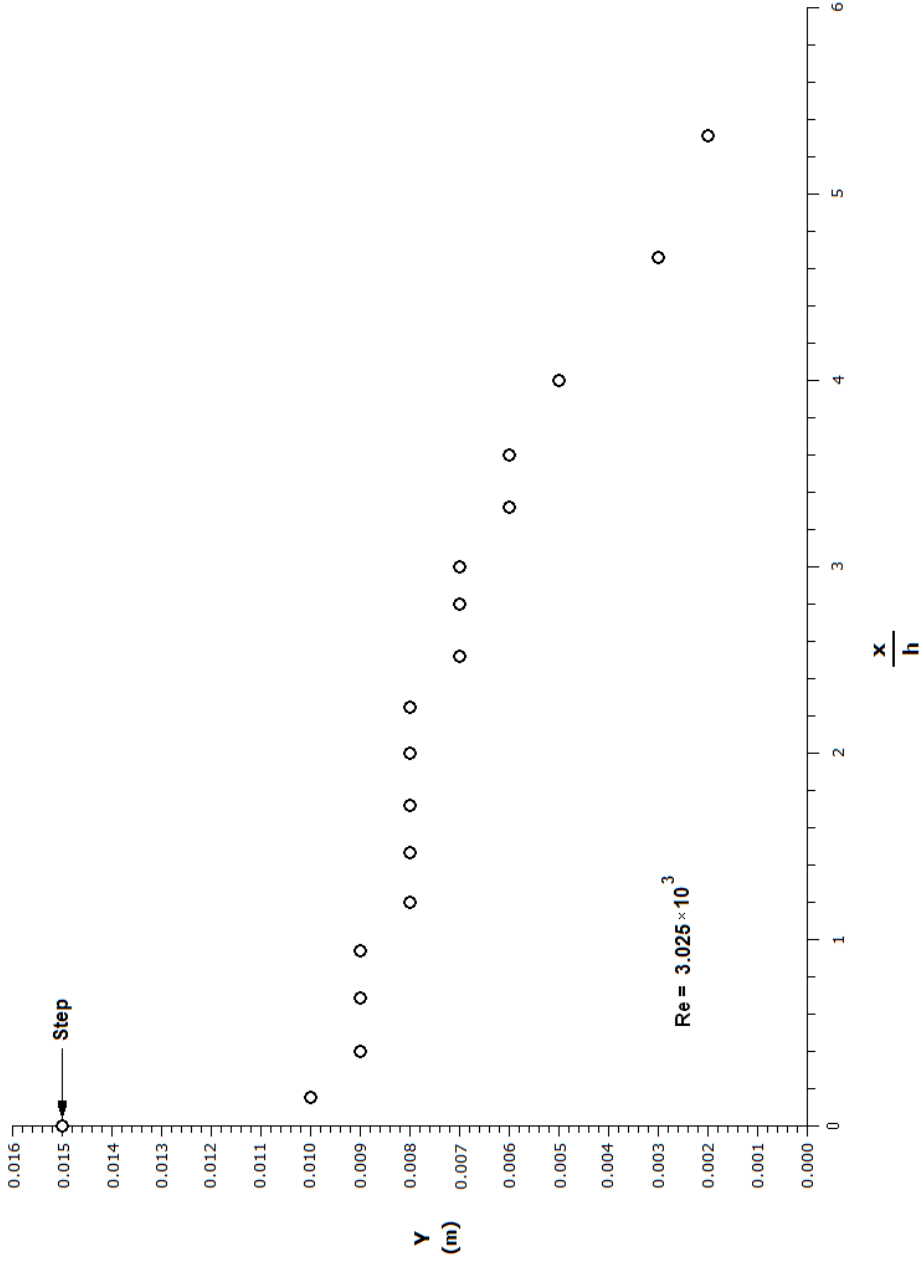
Şekil 4.2.38. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



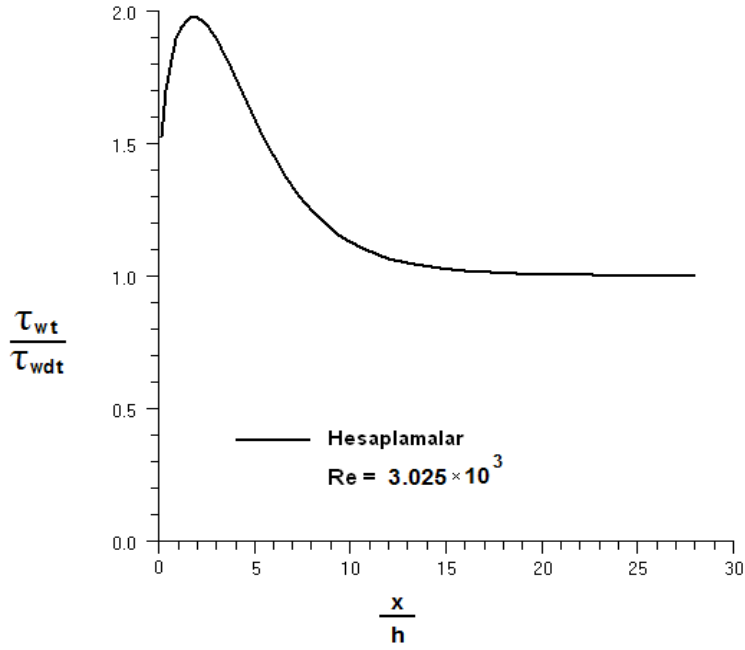
Şekil 4.2.39. Denham et. al.'in (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



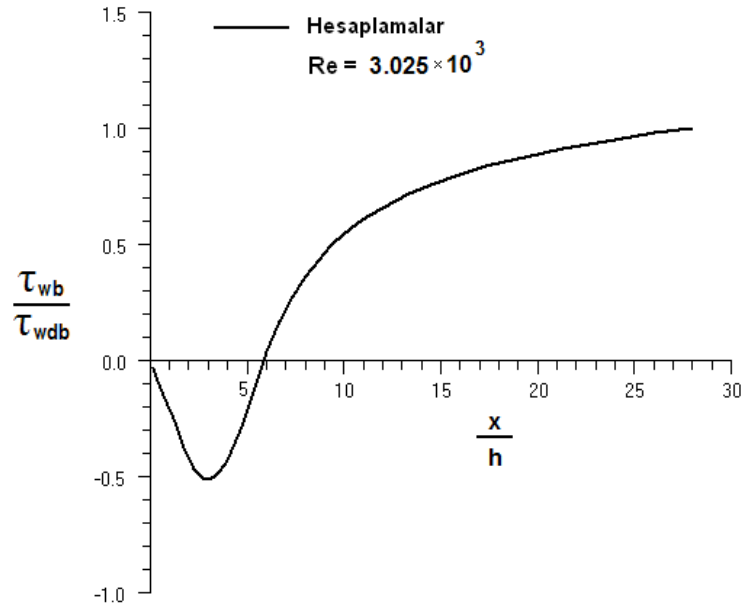
Şekil 4.2.40. Denham et. al.'in (1975) tek yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



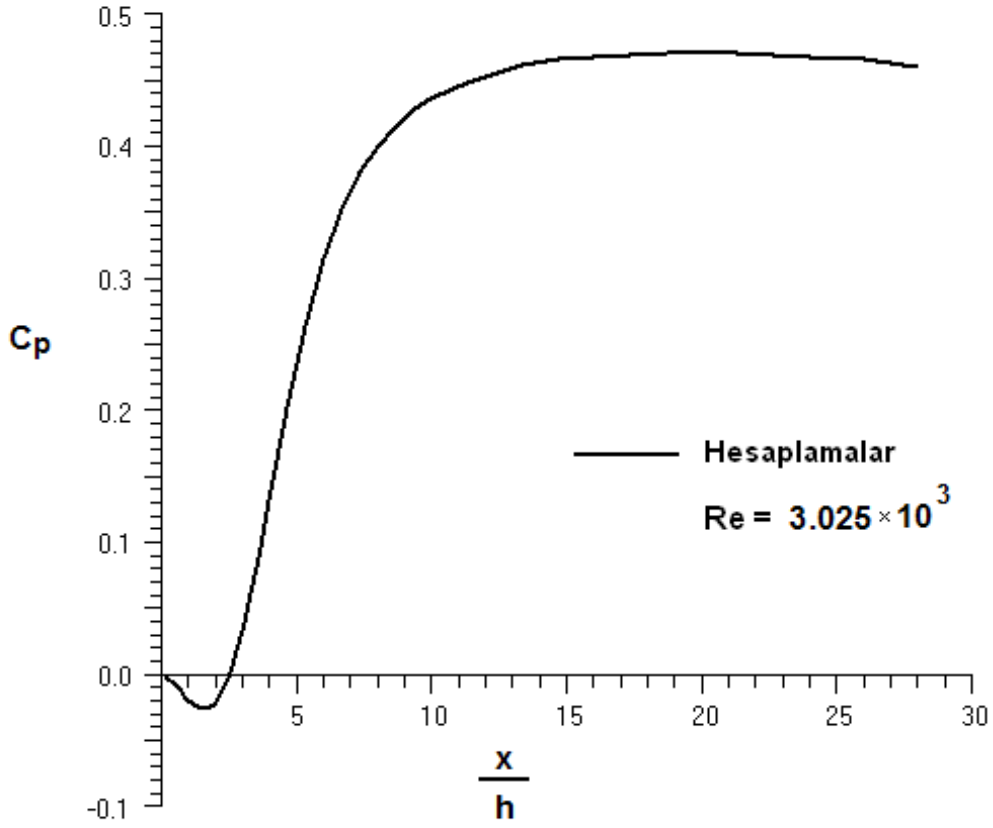
Şekil 4.2.41. Denham et. al.'in (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 4.2.42. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.43. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



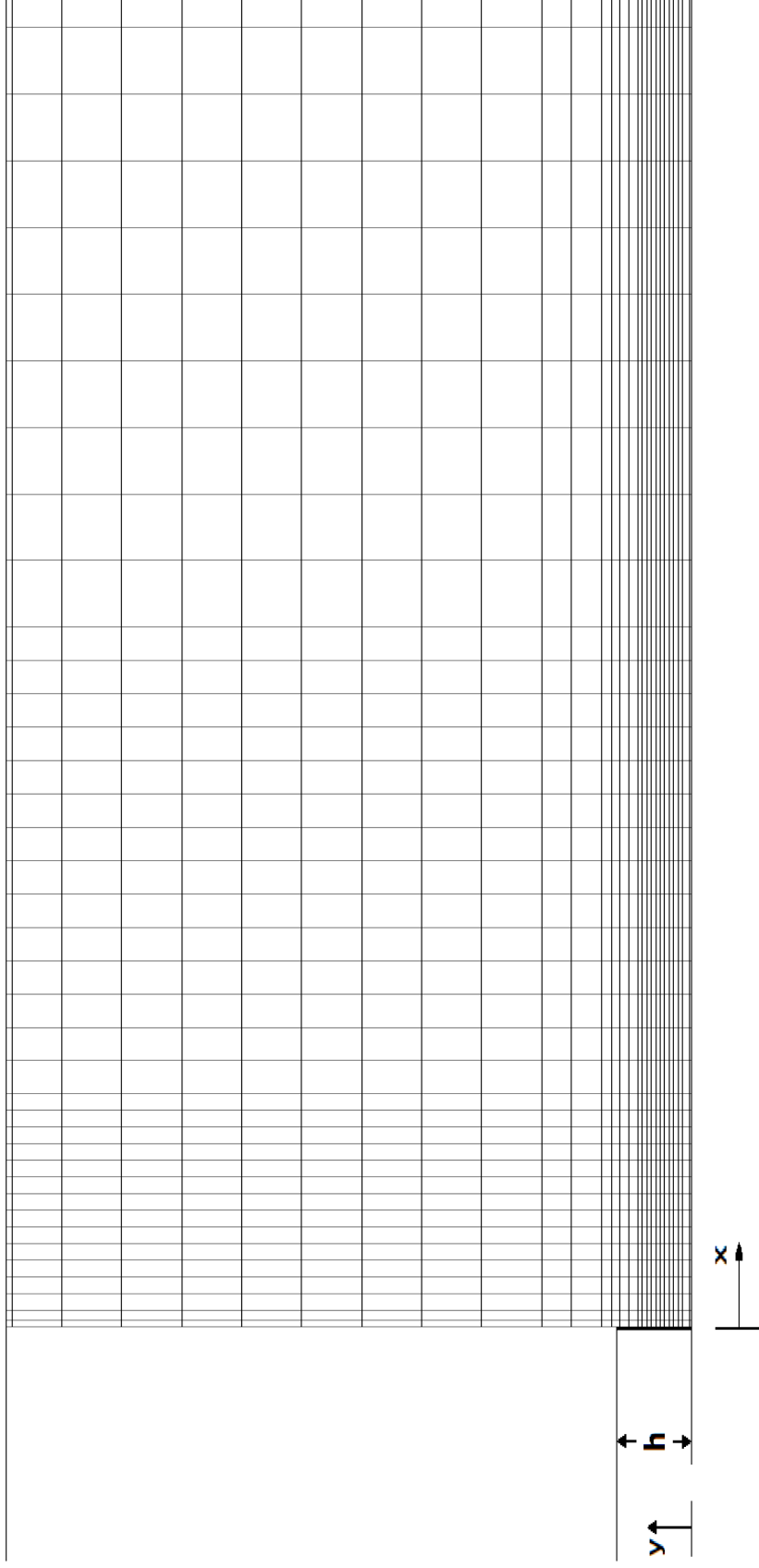
Şekil 4.2.44. Denham et. al.'ın (1975) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının değişimi.

Bu çalışmada yapılan bir diğer sayısal hesaplama sonucu, Driver ve Seegmiller'in (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalında ölçtükleri alt cidar sürtünme katsayısının deneysel verileriyle mukayese yapılmasıdır. Kullanılan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 4.2.45'te gösterilmiştir. Bu ağ, x ve y yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından meydana gelmiştir. Ağın başlangıcında, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrıntili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın basamak yüksekliği $h=0.0127$ m, kullanılan çalışma akışkanı ise havadır. Reynolds sayısı 37215 ($Re=\rho U_{ref}h/\mu$), referans olarak alınan giriş akış hızı ise $U_{ref} = 44.2$ m/s olarak bildirilmiştir.

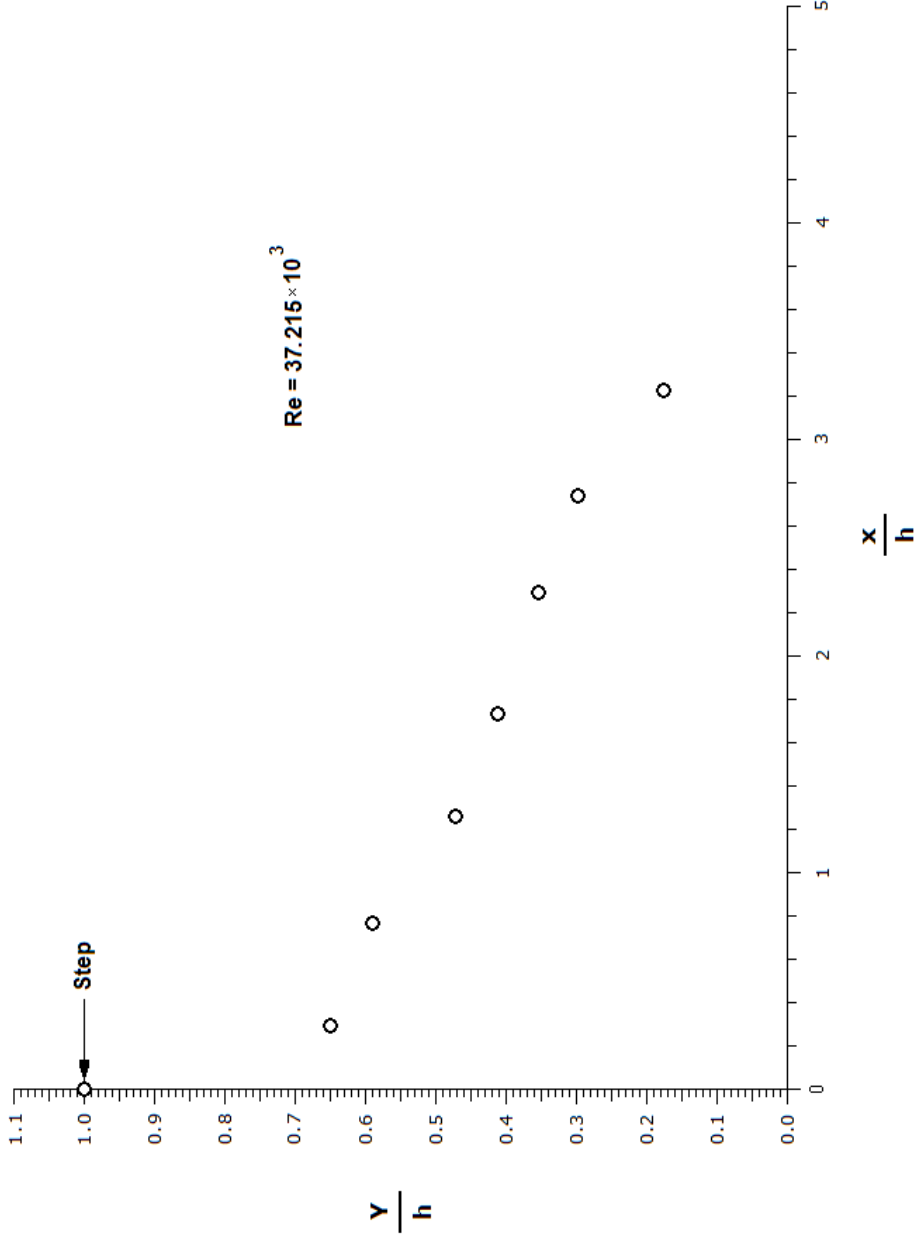
Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 4.2.46'da sunulmuştur. Grafikte yatay eksenindeki akış yönü mesafesi ve dikey eksenindeki kanal yüksekliği, basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmışlardır. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır.

Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.47 ve Şekil 4.2.48'de sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.47'de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi $x/h=3$ kesitinde en yüksek değerine ulaşmış ve $x/h=38$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve akabinde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.48'de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=4.5$ kesitine kadar, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almakta ve yaklaşık $x/h=24$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.2.49'da ise hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5 \rho U_{ref}^2$] değişimi gösterilmiştir.

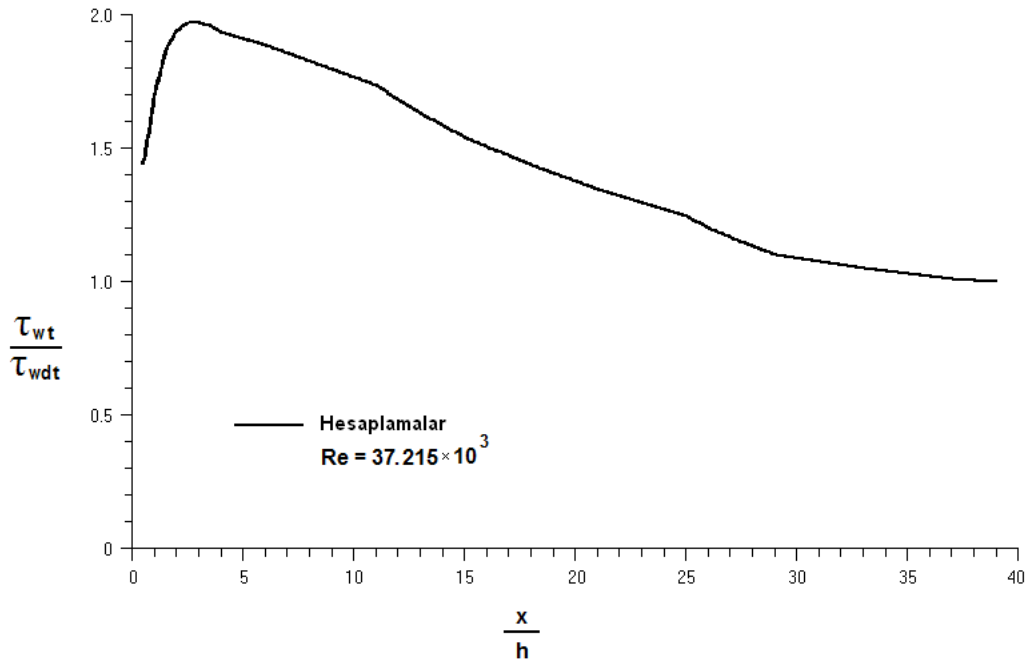
Şekil 4.2.50'de, hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının [$C_f=\tau_w/0.5 \rho U_{ref}^2$] Driver ve Seegmiller'ın (1985) onyediy farklı noktada yaptıkları ölçümlerle karşılaştırılması görülmektedir. C_f değerinin sıfır olduğu $x/h=4.5$ kesiti akışın yeniden birleşme noktasına (akış tutunma uzunluğu, X_t) tekabül etmektedir. Şekil 4.2.50'de görüldüğü gibi hesaplanan C_f değeri yaklaşık $x/h=4.5$ kesitinde, deneysel çalışmalarda ise yaklaşık $x/h=6.5$ kesitinde sıfır olmaktadır. Akış tutunma uzunluğunun sayısal hesaplamalarda daha kısa mesafede çıkmasının sebebi kullanılan standart $k-\epsilon$ türbülans modelinin kifayetsiz kalmasıdır.



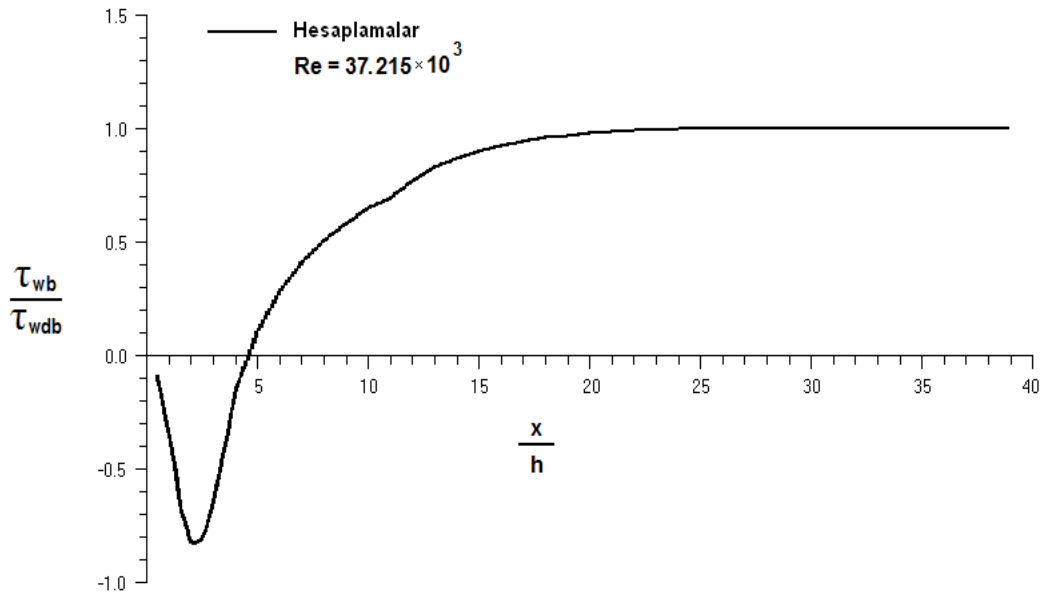
Şekil 4.2.45. Driver ve Seegmiller'in (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



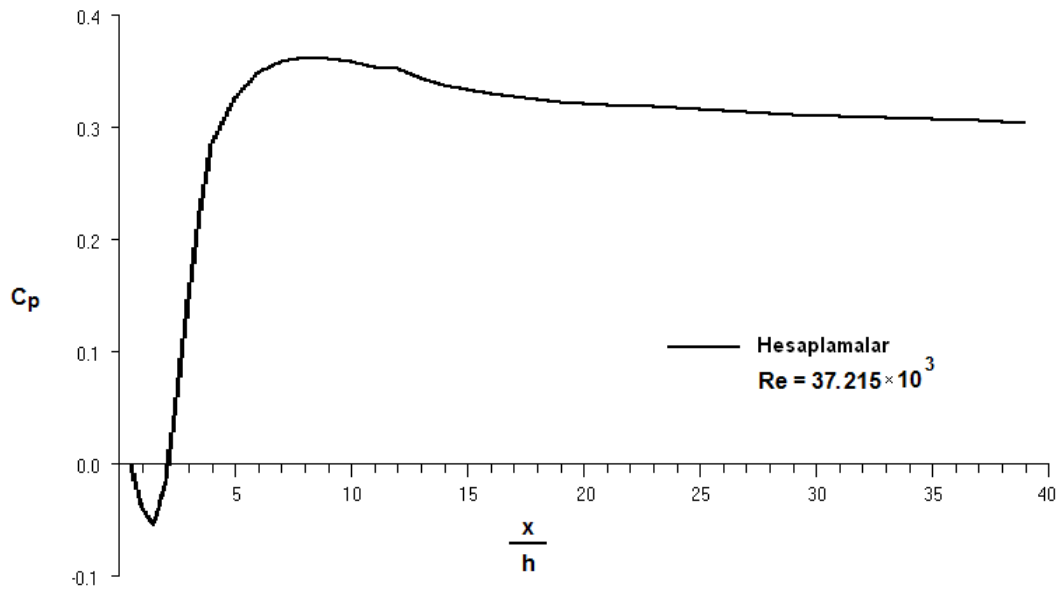
Şekil 4.2.46. Driver ve Seegmiller'in (1985) tek yanlı düzlemsel anjensizlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



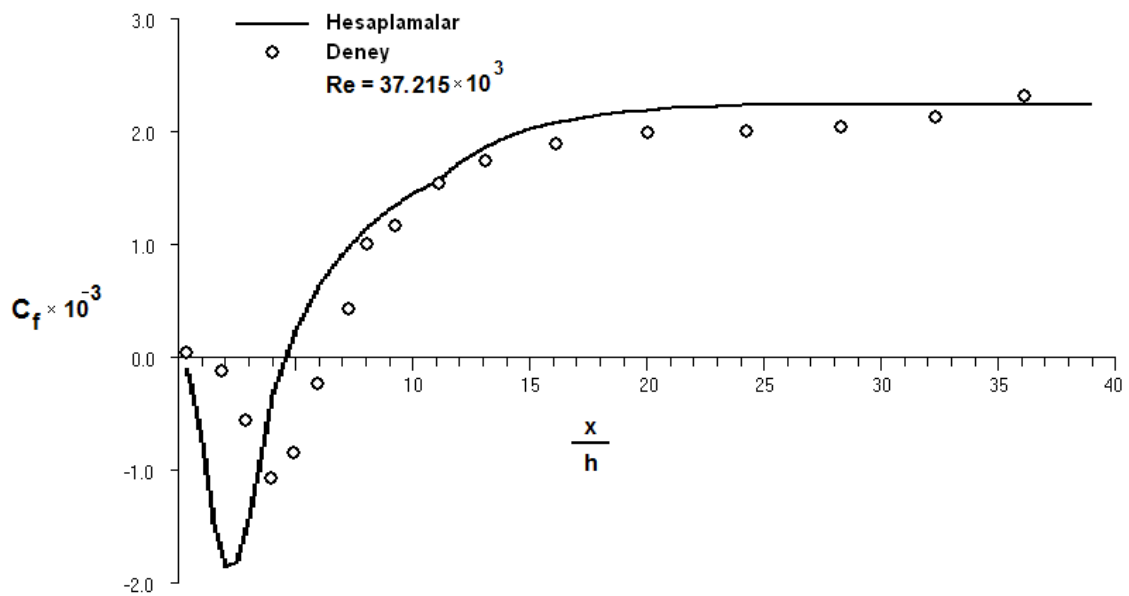
Şekil 4.2.47. Driver ve Seegmiller'in (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.48. Driver ve Seegmiller'in (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.49. Driver ve Seegmiller'ın (1985) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi.



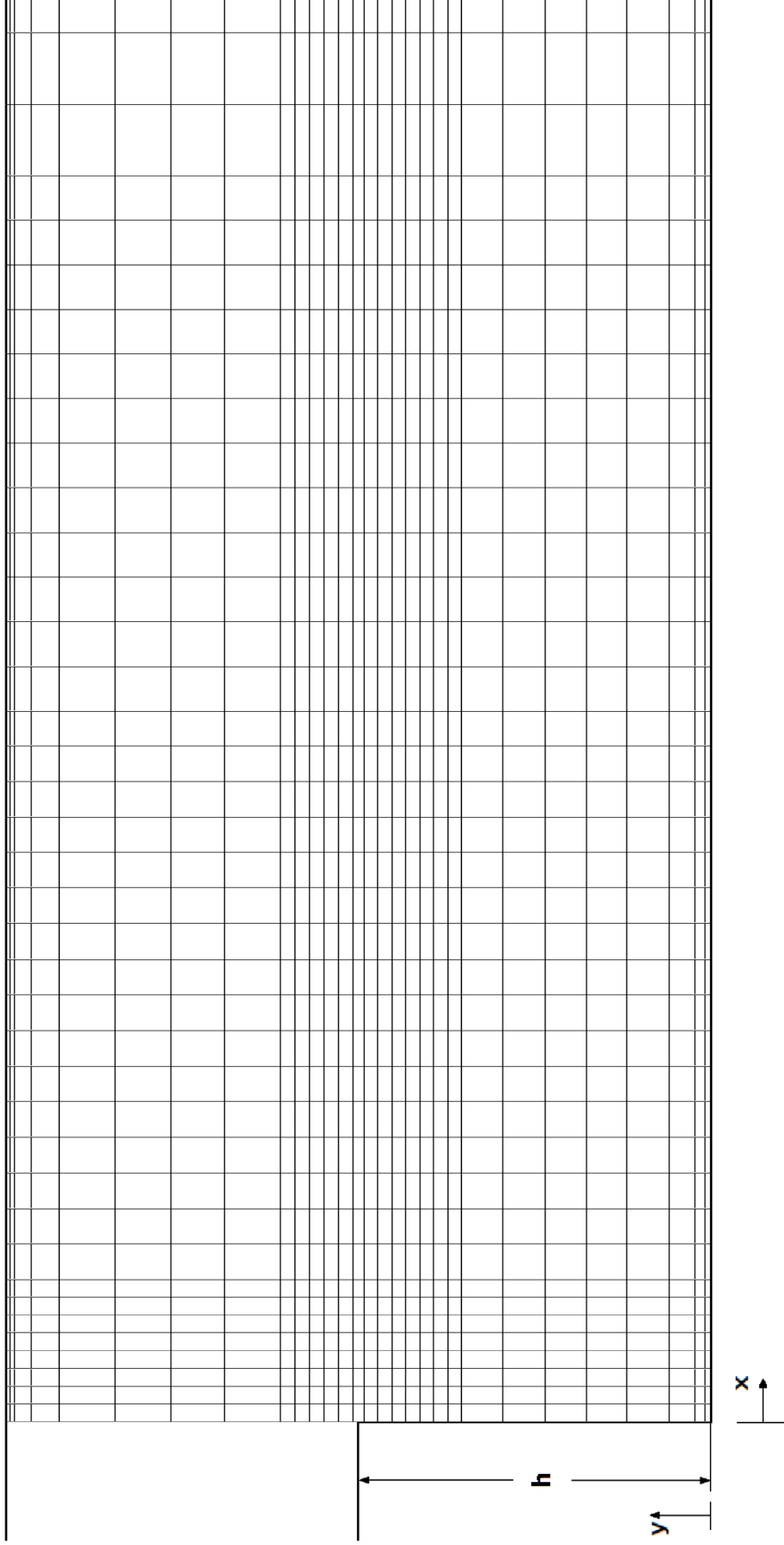
Şekil 4.2.50. Hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının Driver ve Seegmiller'ın (1985) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarla ilgili yapılan son sayısal hesaplama sonuçları Stevenson et. al.'ın (1984) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama için kullanılan sonlu-fark ağ dağılımı Şekil 4.2.51'de gösterilmiştir. Bu ağ, x ve y yönlerinde sırasıyla 40 x 30 ağ noktalarından meydana gelmiş olup, başlangıçta, üst cidar yakınında ve özellikle basamağın arkasındaki çevrintili akış bölgesinde daha sık olacak şekilde tasarlanmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın genişleme oranı $H/H'=2$ 'dir. Reynolds sayısı 172518 ($Re=U_{in}h/\nu$), referans olarak alınan giriş ortalama serbest akış hızı $U_{in}=25.64$ m/s olarak bildirilmiştir. Çalışma akışkanı havadır.

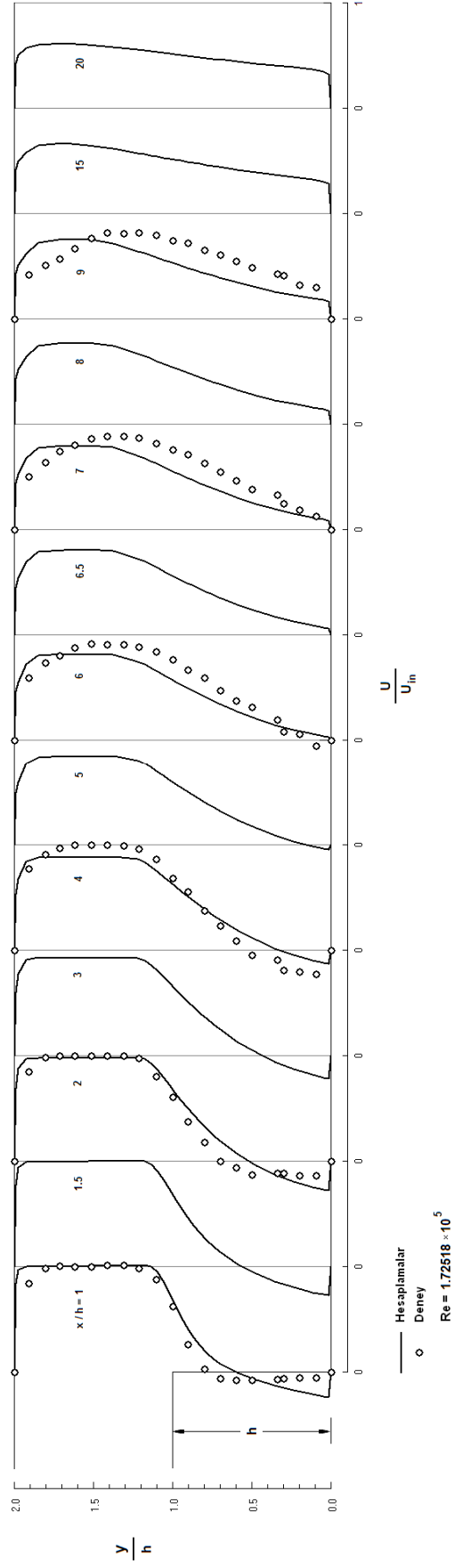
Sayısal hesaplama alanı giriş kesitinden 20 basamak (h) yüksekliğindeki akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Şekil 4.2.52'de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hız profilleri $x/h=1, 2, 4, 6, 7$ ve 9 kesitlerinde mukayese edilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hızları referans hız (U_{in}) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafiklerden de görüldüğü üzere hesaplanan hız profilleriyle deneysel karşılıkları iyi bir uyum içindedir.

Şekil 4.2.53'te türbülans kinetik enerji profillerinin hesaplanan değerleri sunulmuştur. Hesaplanan türbülans kinetik enerji değerleri girişteki referans hızın karesiyle (U_{in}^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profilleri sırasıyla Şekil 4.2.54 ve 4.2.55'te görülmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite değerleri sırasıyla tüm hesaplama alanında bulunan en büyük değerleriyle (ϵ_{max} , $\mu_{e_{max}}$) boyutsuzlaştırılmıştır.

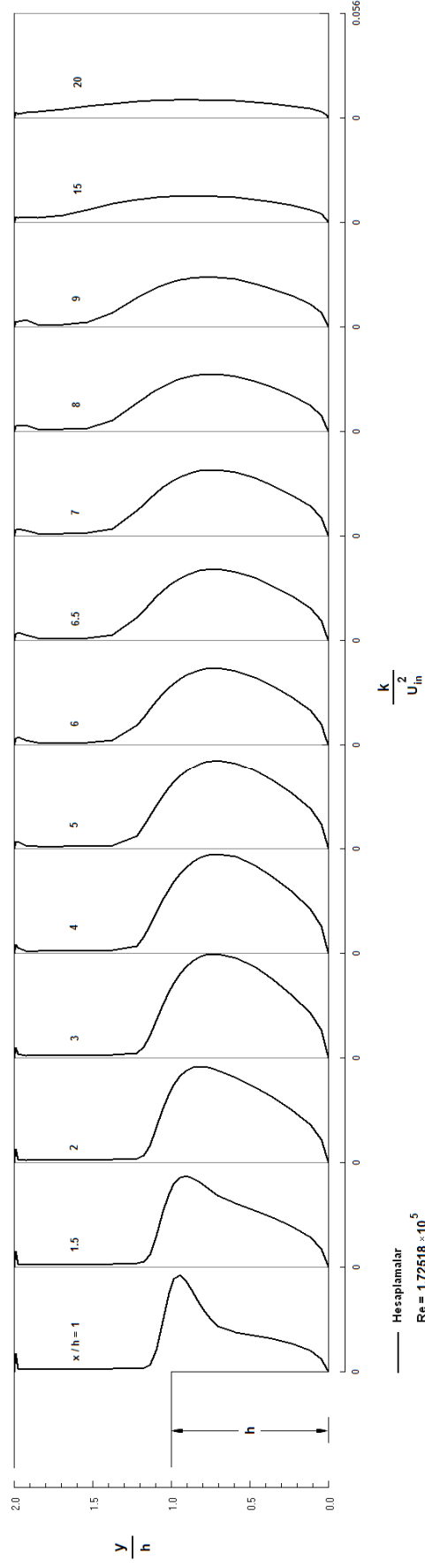
Şekil 4.2.56'da Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) sunulmuştur. Geri akışın geometrik yeri, alt cidardan ölçülen dikey mesafe y, basamak yüksekliği (h) ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan akış mesafesinin (x/h) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Grafikteki içi boş dairelerde yatay doğrultudaki hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin altında kalan bölgede negatif, üstünde kalan bölgede ise pozitif değerler alır.



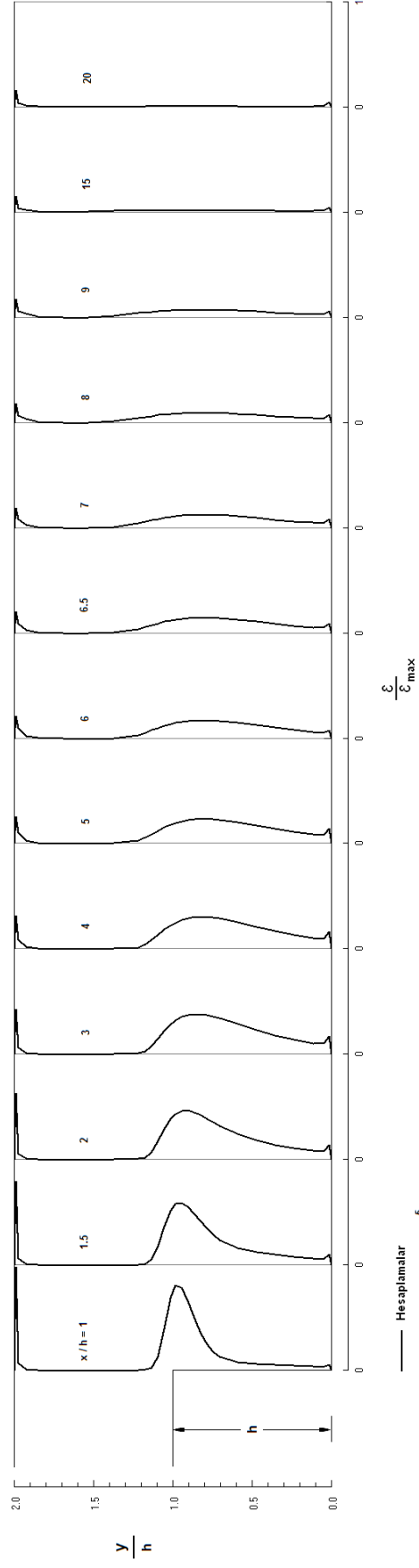
Şekil 4.2.51. Stevenson et. al.'in (1984) tek yanlı düzlemsel anijenleşmeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



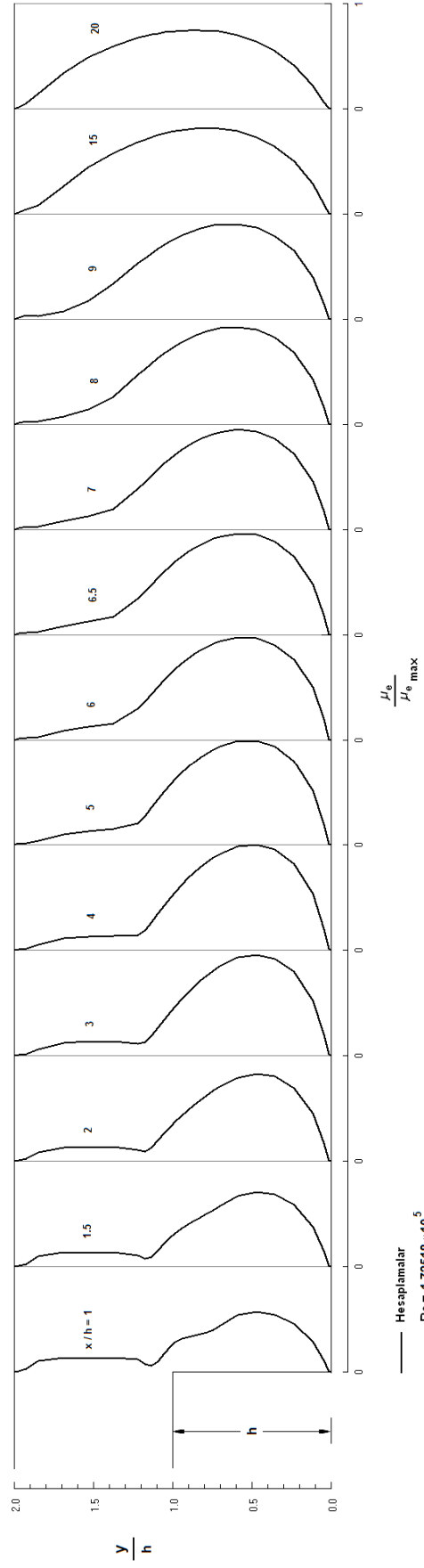
Şekil 4.2.52. Tek yanlı düzlemsel anijenleşmeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Stevenson et. al.'ın (1984) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



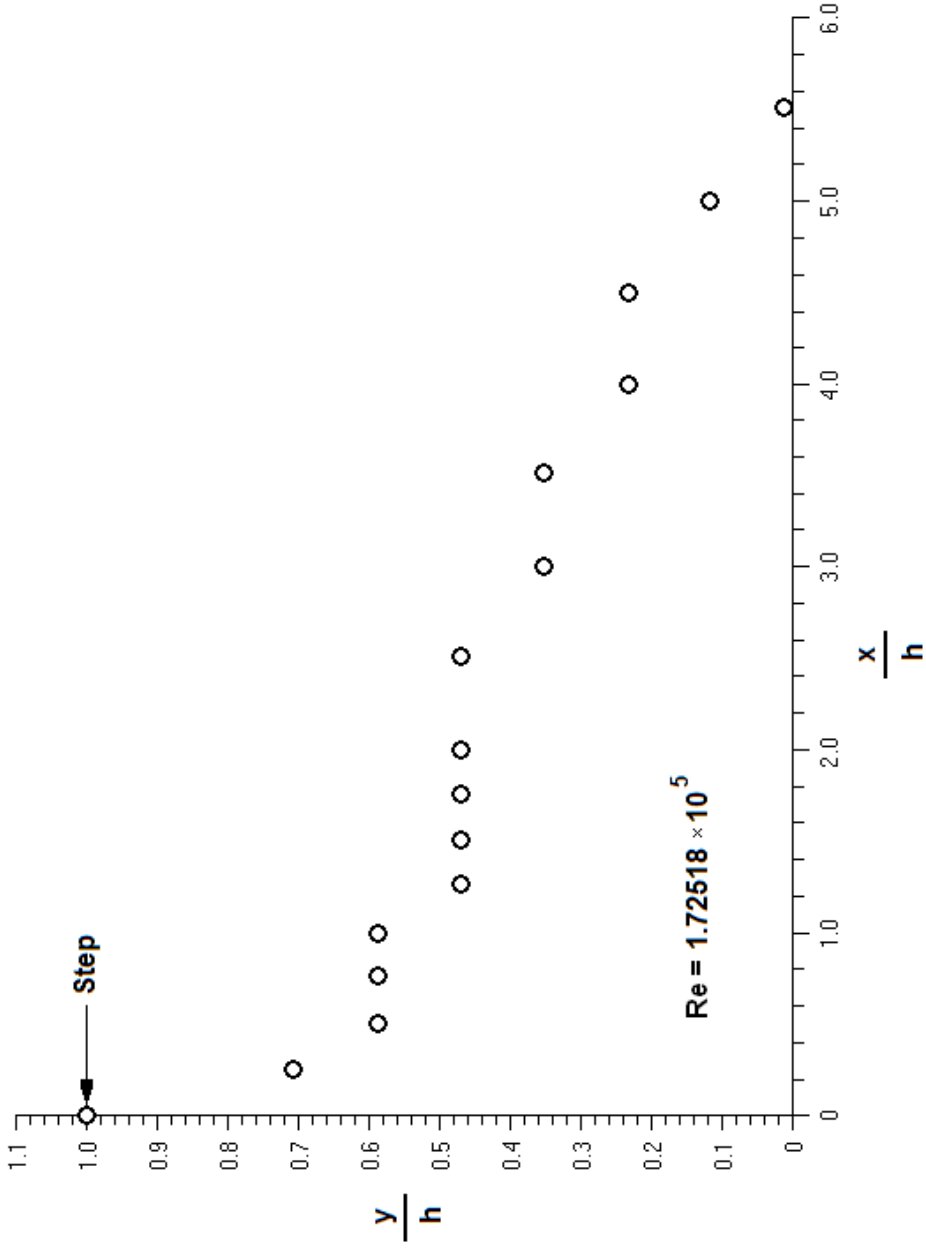
Şekil 4.2.53. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anıgenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



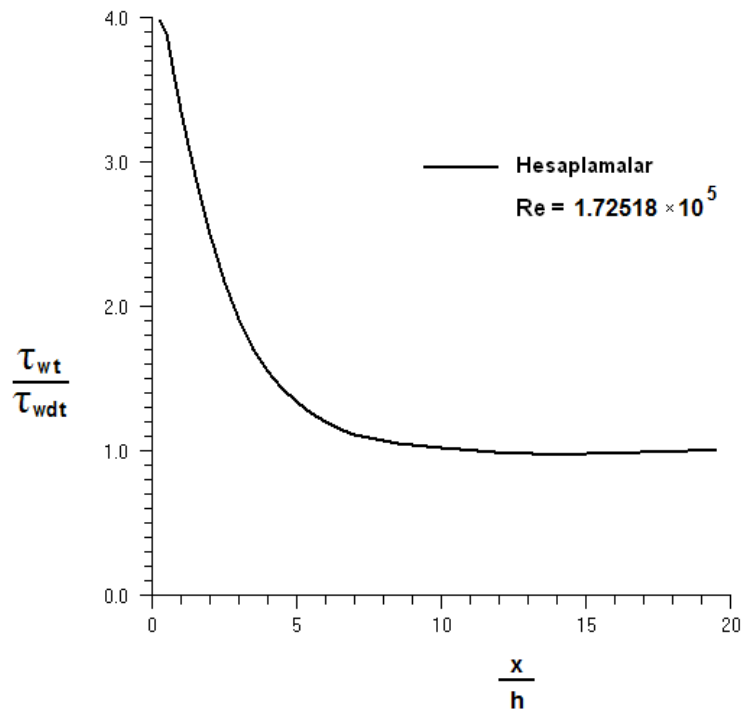
Şekil 4.2.54. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



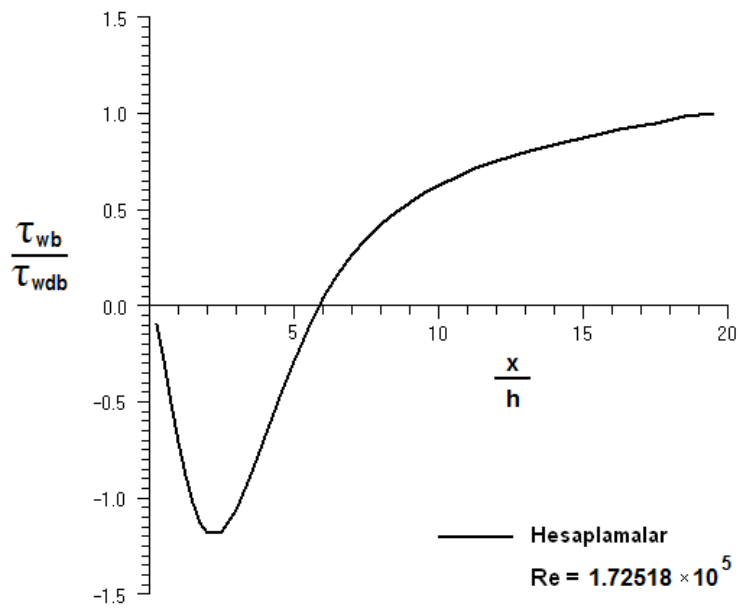
Şekil 4.2.55. Stevenson et. al.'in (1984) tek yanlı düzlemsel anjensizlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



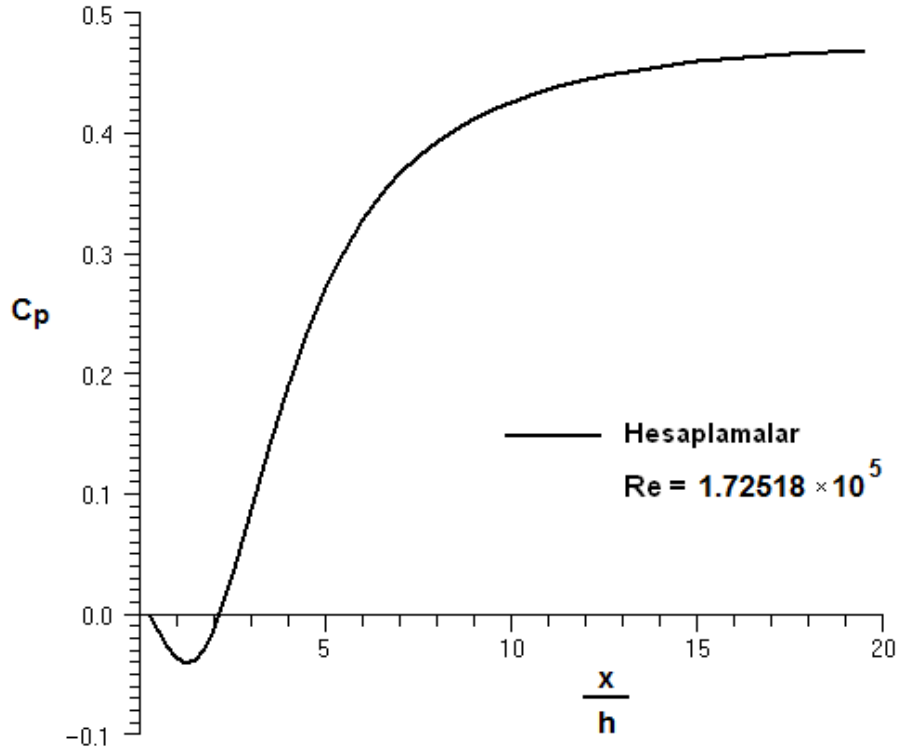
Şekil 4.2.56. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 4.2.57. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.58. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 4.2.59. Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel ani genişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısı dağılımı.

Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri sırasıyla Şekil 4.2.57 ve Şekil 4.2.58'de sunulmuştur. Üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_w) grafikleri tamamıyla gelişmiş değerleriyle (τ_{wd}) boyutsuzlaştırılarak çizilmiştir. Şekil 4.2.57'de görüldüğü gibi üst cidar kayma gerilmesi yaklaşık $x/h=11$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve akabinde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi ise Şekil 4.2.58'de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=5.9$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlar yüzünden negatif değerler almakta ve yaklaşık $x/h=19.5$ kesitinde gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.2.59'da ise Stevenson et. al.'ın (1984) tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının $[C_p=(P-P_{ref})/0.5\rho U_{in}^2]$ değişim grafiği görülmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda ayrımlı ve yeniden birleşmeli kompleks çevrintili türbülanslı akış, standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak çeşitli Reynolds sayılarında sayısal olarak hesaplanmıştır. Geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, Patankar ve Spalding'in (1980) SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Sekiz farklı Reynolds sayısı, on farklı akış geometrisi için standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin performansı araştırılmıştır.

Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri ve türbülans kinetik enerji profilleri literatürde bildirilen çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Bundan başka türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri, efektif türbülans viskozite profilleri, geri akışın geometrik yeri, cidar sürtünme katsayısı, cidar kayma gerilmesinin dağılımı ve cidar statik-basınç katsayısının dağılımı için sayısal hesaplama sonuçları sunulmuştur.

Çift ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallardaki türbülanslı akış için hesaplanan ve literatürde karşılaşılan deney sonuçları arasındaki uyum genel olarak oldukça iyidir. Bununla beraber, basamak arkasındaki kompleks çevrintili türbülanslı akış bölgesinin uzunluğu ve genişliği standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbott, D.E., and Kline, S.J., 1962 Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps, *J. Basic Eng.*, D84, 317-325.
- Adams, E.W., and Eaton, J.K., 1988, An LDA study of the backward-facing step flow, including the effects of velocity bias, *ASME. J. Fluids Eng.*, Vol.110,275-282.
- Adams, E.W., and Johnston, J.P., 1988-a, Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure Part 1: Pressure and turbulence quantities, *Experiments in Fluids*, Vol.6, 400-408.
- Adams, E.W., and Johnston, J.P., 1988-b, Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure Part 2: Reattachment length and wall shear stress, *Experiments in Fluids*, Vol.6, 493-499.
- Adams, E.W., and Johnston, J.P., 1988-c, Flow structure in the near-wall zone of a turbulent separated flow, *AIAA Journal*, Vol.26, No.8, 932-939.
- Amano, R.S., and Goel, P., 1985, Computation of turbulent flow beyond backward-facing steps using Reynolds-stress closure, *AIAA Journal*, Vol.23, No.9, 1356-1361.
- Autret, A., Grandotto, M., and Dekeyser, I., 1987, Finite element computation of a turbulent flow over a two-dimensional backward-facing step, *Int. J. for Num. Meth. In Fluids*, Vol.7, 89-102.
- Chun, K.B., and Sung, H.J., 1996, Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local Forcing, *Experiments in fluids*, Vol.21, 417-426.
- De Zilwa, S.R.N., Khezzar, L., and Whitelaw, J.H., 2000, Flows through plane sudden-expansions, *Int.J. Num. Meth. Fluids*, Vol.32, 313.
- Denham, M.K., Briard, P., and Patrick, M.A., 1975, A directionally sensitive laser anemometer for velocity measurements in highly turbulent flows, *J. Physics E: Scientific Instruments*, 8, 681-683.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Driver, D.M., and Seegmiller, H.L., 1985, Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow, *AIAA Journal*, Vol.23, No.2, 163-171.
- Eaton, J.K., and Johnston, J.P., 1981, A review of research on subsonic turbulent flow reattachment, *AIAA Journal*, Vol.19, No.9, 1093-1100.
- Escudier, M.P., Oliveira, P.J., and Poole, R.J., 2002, Turbulent flow through a plane sudden expansion of modest aspect ratio, *Phys Fluids*, Vol.14, 3641.
- Etheridge, D.W., and Kemp, P.H., 1978, Measurements of turbulent flow downstream of a rearward-facing step, *J. Fluid Mech.*, Vol.86, No.3, 545-566.
- Fessler, J.R., and Eaton, J.K., 1997, Particle response in a planar sudden expansion flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.15, 413-423.
- Furuichi, N., and Kumada, M., 2002, An experimental study of a spanwise structure around a reattachment region of a two-dimensional backward-facing step, *Experiments in Fluids*, Vol.32, 179-187.
- Hall, S.D., Behnia, M., Fletcher, C.A.J., and Morrison, G.L., 2003, Investigation of the secondary corner vortex in a benchmark turbulent backward-facing step using cross-correlation particle imaging velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol.33, 139-151.
- Isomoto, K., and Honami, S., 1989, The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step, *J. Fluids Eng.*, Vol.111, 87-92.
- Karasu, T., 2001-a, Computer analysis of turbulent recirculating flow over backward-facing steps, 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Konya, Bildiri Kitabı, 23-30.
- Karasu, T., 2001-b, Geriye doğru basamaklar arkasında kompleks çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 2. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, İzmir, Bildiriler Kitabı, 475-485. MMO Yayın No: E/2001/278-1.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karasu, T., 2002, Numerical solution of turbulent separated flow past backward-facing steps, 7th International Combustion Symposium, Ankara, Turkey, Proceedings Book, 76-86.
- Karasu, T., 2003, Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 115-126. MMO Yayın No: E/2003/330.
- Karasu, T., 2004, Numerical prediction of complex turbulent separated recirculating flow in single-sided planar sudden expansions, 2. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Kütahya, 578-585.
- Karasu, T., Choudhury, P.R., ve Gerstein, M., 1985, Upwind ve Hybrid diskritizasyon metodları ile $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak bazı türbülanslı akışların hesaplanması. Doğa Bilim Dergisi, Cilt 9, Seri B, 218-234.
- Karasu, T., ve Karabulut, M., 1998, Geriye doğru basamaklar arkasında türbülanslı akışın sayısal hesaplanması, 10. Ulusal Mekanik Kongresi, 15-17 Eylül 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 307-317.
- Kasagi, N., and Matsunaga, A., 1995, Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.6, 477-485.
- Kim, J., Kline, S.J., and Johnston, J.P., 1980, Investigation of a reattaching turbulent shear layer: Flow over a backward-facing step, J. Fluids Eng., Vol.102, 302-308.
- Lai, J.C.S., Yue, J., and Platzer, M.F., 2002, Control of backward-facing step flow using a flapping foil, Experiments in Fluids, Vol.32, 44-54.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., Vol.3, 269-289.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lien, F.S., and Leschziner, M.A., 1994-a, A general non-orthogonal collocated finite volume algorithm for turbulent flow at all speeds incorporating second-moment turbulence-transport closure, Part 2: Application, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.114, 149-167.
- Lien, F.S., and Leschziner, M.A., 1994-b, Assessment of turbulence-transport models including non-linear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure for flow over a backward-facing step, *Computers and Fluids*, Vol.23, 983-1004.
- Ötügen, M.V., 1991, Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step, *Experiments in Fluids*, Vol.10, 273-280.
- Papadopoulos, G., and Ötügen, M.V., 1995, Separating and reattaching flow structure in a suddenly expanding rectangular duct, *J. Fluids Eng.*, Vol.117, 17-23.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, D.C., Chapters 5 and 6, 79-138.
- Piirto, M., Saarenrinne, P., Eloranta, H., and Karvinen, R., 2003, Measuring turbulence energy with PIV in a backward-facing step flow, *Experiments in Fluids*, Vol.33, 219-236.
- Poole, R.J., and Escudier, M.P., 2003-a, Turbulent flow of non-Newtonian liquids over a backward-facing step, Part I. A thixotropic and shear-thinning liquid, *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.109, 177-191.
- Poole, R.J., and Escudier, M.P., 2003-b, Turbulent flow of non-Newtonian liquids over a backward-facing step, Part II. Viscoelastic and shear-thinning liquid, *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.109, 193-230.
- Restivo, A., and Whitelaw, J.H., 1978 Turbulence characteristics of the flow downstream of a symmetric plane sudden expansion, *J. Fluids Eng.*, Vol.100, 308.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ruck, B., and Makiola, B., 1988, Particle dispersion in a single-sided backward-facing step flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.14, 787-800.
- Smyth, R., 1979, Turbulent flow over a plane symmetric sudden expansion, *J. Fluids Eng.*, Vol.101, 348.
- Stevenson, W.H., Thompson, H.D., and Craig, R.R., 1984, Laser velocimeter measurements in highly turbulent recirculating flows, *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.106, 173-180.
- Szymocha, K., 1984, An experimental analysis of the turbulent flow downstream of a plane sudden expansion, *Arch. Mech.*, Vol.36, 705.
- Thangam, S., and Hur, N., 1991, A highly-resolved numerical study of turbulent separated flow past a backward-facing step, *Int. J. Engng. Sci.*, Vol.29, No.5, 607-615.
- Thangam, S., and Speziale, C.G., 1992, Turbulent flow past a backward-facing step: Critical evaluation of two-equation models, *AIAA Journal*, Vol.30, No.5, 1314-1320.
- Vogel, J.C., and Eaton, J.K., 1985, Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step, *ASME J. Heat Transfer*, Vol.107, 922-929.
- Westphal, R.V., and Johnston, J.P., 1984, Effect of initial conditions on turbulent reattachment downstream of a backward-facing step, *AIAA Journal*, Vol.32, No.12, 1727-1732.
- Yang, J.T., Tsai, B.B., and Tsai, G.L., 1994, Separated-reattaching flow over a backstep with uniform normal mass bleed, *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.116, 29-35.