

Kanallarda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması

Hakan Demirci

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2009

Numerical Computation of Turbulent Flows in Channels

Hakan Demirci

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2009

Kanallarda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması

Hakan Demirci

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

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

Ocak 2009

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hakan Demirci'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kanallarda Türbülanslı Akışların Sayısal Hesaplanması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

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

İkinci Danışman : ----

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Tahir Karasu, D.I.C.

Üye : Yrd. Doç. Dr. Necati MAHİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ertunç TAT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan TOZLUK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Salih KÖSE

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

KANALLARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞLARIN SAYISAL HESAPLANMASI

HAKAN DEMİRCİ

ÖZET

Paralel iki levha arasında gelişen türbülanslı kanal akımları 10000, 14000, 30800, 140000, ve 192000 Reynolds sayıları için sayısal olarak hesaplanmıştır. Standart k-epsilon türbülans modeliyle kapanışı sağlanan eliptik diferansiyel denklemlerin sayısal çözümleri, bir kontrol hacme dayanan iteratif sonlu fark tekniğiyle sağlanmıştır. Çeşitli akım koşullarına cevap veren sınır koşulları dikkatli olarak tespit edilmiştir. Cidar yakınındaki bölgeye özel özen gösterilmiş ve onun için cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Yatay hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve cidar sürtünme katsayısı dağılımları için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Hesaplamaların sonuçları deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Türbülanslı kanal akışı
İki-boyutlu kanal akışı

NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS IN CHANNELS

HAKAN DEMİRCİ

SUMMARY

Developing turbulent flows in channels between two parallel plates have been computed numerically at Reynolds numbers of 10000, 14000, 30800, 140000 and 192000. Numerical solutions of the elliptic differential equations, which incorporate standard k-epsilon turbulence model closure, are obtained using a control volume-based iterative finite-difference technique. Boundary conditions are carefully set up to account for various flow conditions. Special attention has been given to the near-wall region, for which wall-functions have been employed. Numerical computations for streamwise velocity, turbulence kinetic energy, dissipation rate of turbulence kinetic energy and skin friction factor distributions are presented and compared with experimental data. The results of numerical predictions are generally in good agreement with experimental measurements.

Keywords: Turbulent channel flow
Two-dimensional channel flow

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımda, gerek derslerimde ve gerekse tez aşamasında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren, çalışmalarımın en küçük ayrıntısına kadar ilgilenen, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen 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.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	2
2.1. Hareket Denklemleri.....	2
2.2. Türbülans Modeli	3
2.3. Cidar Fonksiyonları	5
3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	7
3.1. Genel Diferansiyel Denklem	7
3.2. Sınır Koşulları.....	8
3.3. Hesaplama detayları	9
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	10
5. SONUÇLAR.....	69
6. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Koordinat sistemi ve kanal akış geometrisi	8
4.1. Wardana et al'ın (1992) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.	11
4.2-a. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Wardana et al'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması	12
4.2-b. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Wardana et al'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması	13
4.3. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişimi.	14
4.4-a. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri	15
4.4-b. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri	16
4.5-a. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri	18
4.5-b. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri	19
4.6-a. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri	20
4.6-b. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.	21
4.7. Wardana et al'ın (1992) kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişimi.	22
4.8. Wardana et al'ın (1992) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi	23
4.9. Bradshaw et al'ın (1973) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.	25
4.10. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.	26

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.11. $Re=1.92 \times 10^5$ için $x/h=150$ kesitinde hesaplanan yatay hız profilinin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması	27
4.12. Kanal boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişiminin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması	28
4.13. Bradshaw et al'ın (1973) kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.....	29
4.14. Bradshaw et al'ın (1973) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	31
4.15. Bradshaw et al'ın (1973) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri	32
4.16. Kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişiminin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması.	33
4.17. Bradshaw et al'ın (1973) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.	34
4.18. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.	36
4.19. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal geometrisi boyunca hesaplanan akış yönü hız profilleri.....	37
4.20. Kanal boyunca hesaplanan gelişen yatay hız değişiminin Byrne et al'ın (1969, 1970) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.	38
4.21. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişimi.....	39
4.22. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.....	41
4.23. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	42
4.24. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	43
4.25. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.26. Breyer et al' ın (1993) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	46
4.27. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Breyer et al' ın (1993) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.	47
4.28. Kanalda hesaplanan yatay hız profilinin $x/h=293$ kesitinde Breyer et al' ın (1993) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	48
4.29. Breyer et al' ın (1993) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişimi.....	49
4.30. Breyer et al' ın (1993) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.....	50
4.31. Breyer et al' ın (1993) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.....	52
4.32. Breyer et al' ın (1993) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.....	53
4.33. Breyer et al' ın (1993) kanalı cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişimi.	54
4.34. Breyer et al' ın (1993) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.	55
4.35. Laufer' ın (1951) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.....	57
4.36. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Laufer' ın (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.	58
4.37. $Re=30800$ için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan yatay hız profilinin Laufer' ın (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	59
4.38. Laufer' ın (1951) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişimi.....	60
4.39. Kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin Laufer' ın (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.....	61
4.40. $Re=30800$ için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profilinin Laufer' ın (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.41. Kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin Laufer' ın (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.	64
4.42. $Re=30800$ için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilinin Laufer' ın (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.	65
4.43. Laufer' ın (1951) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.	66
4.44. Laufer' ın (1951) kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişimi.	67
4.45. Laufer' ın (1951) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Standart k-ε türbülans modelinde kullanılan sabitlerin değerleri	4
3.1.	Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, CPU zamanı ve iterasyon sayısı	9

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C_f	Cidar sürtünme katsayısı
k	Türbülans kinetik enerji
Re	Reynolds sayısı
S	Kaynak terim
u	Yatay hız
v	Dikey hız
U_b	Ortalama yatay hız
U_c	Kanalın simetri eksenindeki yatay hız
ε	Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
ε_{in}	Girişteki 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 ($\mu + \mu_t$)
μ_{ein}	Girişteki efektif viskozite
ν	Laminar kinematik viskozite
ρ	Akışkanın yoğunluğu
Γ_ϕ	Yayınlam mübadele katsayısı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	k ve ε ' un yayınlam için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
τ_w	Cidar kayma gerilmesi
τ_{wd}	Tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Alt İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
ϕ	Genel değişken
k, ϵ	Türbülans kinetik enerji ve onun kaybolma miktarına ait değerler
p	Cidara bitişik P düğüm noktasındaki değerler
t	Türbülans değerleri
w	Cidar değerleri
max	Maksimum deęer
e	Efektif değerler
in	Giriş
ref	Referans

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Katı cidar sınırlı türbülanslı akımların yapısının anlaşılmasını artırmak için tamamıyla gelişmiş sıkıştırılmayan türbülanslı kanal akımları geniş ölçüde incelenmiştir. Kanalin geometrik basitliği katı cidar yakınındaki karmaşık türbülans etkileşimlerin hem deneysel ve hem de sayısal olarak incelenmesi için çok çekicidir. Netice olarak, kanal akımlarının büyük sayıda deneysel ve sayısal incelemeleri yapılmıştır. Wardana et al (1992) , Bradshaw et al (1973) , Byrne et al (1969, 1970) , Breyer et al (1993) , Laufer (1951), Eckelman (1974), Kreplin and Eckelman (1979), Clark (1968), Patel and Head (1969) çeşitli Reynolds sayılarında tamamıyla gelişmiş türbülanslı kanal akımları için deneysel ölçümler bildirmişlerdir. Diğer taraftan, türbülanslı kanal akımlarının sayısal simülasyonları Kim (1990) , Ahmadi and Chowdhury (1991) , Stephenson (1976) , Kim et al (1987) , Moin and Kim (1982) tarafından literatürde bildirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı standart $k-\epsilon$ türbülans modelini (Launder and Spalding, 1974) kullanarak, kanallarda türbülanslı akımlar için sayısal hesaplamalar yapmak ve bunları literatürde mevcut olan deneysel bulgularla karşılaştırmaktır. İncelenen fiziksel geometriler Wardana et al (1992) , Bradshaw et al (1973) , Byrne et al (1969, 1970) , Breyer et al (1993) , Laufer (1951) , deneysel durumlarına karşılık olmaktadır.

BÖLÜM 2

MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

2.1. Hareket Denklemleri

İki boyutlu, sıkıştırılmayan, sürekli türbülanslı akımı yöneten kısmi diferansiyel denklemler, türbülans gerilmelerinin yerini alan eddy viskozite bağıntılarıyla, Şekil 3.1' de gösterilen kartezyen koordinatları 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 basıncını ifade etmektedir. S_u ve S_v terimleri sırasıyla x-yönü ve y-yönü momentum denklemlerindeki kaynak terimlerdir.

Efektif viskozite μ_e aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

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

burada, μ ve μ_t sırasıyla laminar ve türbülans viskoziteleridir. (Karasu, 1993)

2.2. Türbülans Modeli

Bu çalışmada kullanılan standart k- ϵ modeli (Launder and Spalding, 1974) eddy viskozitesi kavramını benimsemektedir. Eddy viskozitesi, zaman ortalaması alınmış türbülans kinetik enerji k ile onun kaybolma miktarı ϵ ' un değerlerinden aşağıdaki bağıntıya göre tespit edilmiştir.

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

k ve ϵ 'un dağılımları aşağıdaki model taşınım denklemlerinin çözülmesinden elde edilmiştir.

Türbülans kinetik enerji k :

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

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:

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

(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 k-ε türbülans modeli yüksek Reynolds sayılı akımların yalnız tamamıyla türbülanslı bölgelerinde uygulanabilir. Bundan dolayı iç bölgelerle cidar arasındaki aralığı bağlamak için ampirik cidar-fonksiyonları kullanılmalıdır. Burada, Launder ve Spalding (1974) 'in cidar-fonksiyonları yakın-cidar akışlarını modellemek için kullanılmıştır.

2.3.Cidar Fonksiyonları

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

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

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

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

ve

$$u^+ = \frac{u_p}{u_\tau}$$

$$y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu}$$

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

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

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

Yukarıdaki denklemlerde y_p , u_p , k_p , ve ϵ_p cidardan bir y_p mesafesinde cidar yakınında bir P noktasında cidara paralel hız, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi kaybolma miktarı değerleridir. E ve κ sabitlerine sırasıyla 9.0 ve 0.41 değerleri verilmiştir. (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

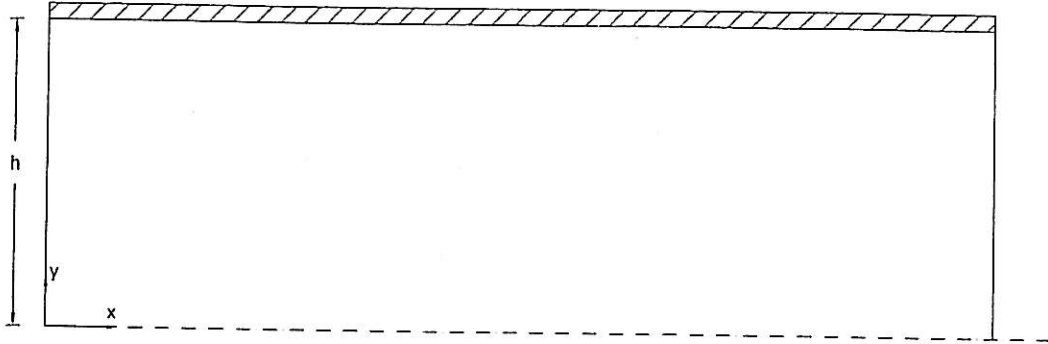
(2.1)-(2.3) diferansiyel denklemleri ile (2.6) ve (2.7) diferansiyel denklemleri aşağıdaki biçimde genel bir diferansiyel denklem halinde ifade edilebilir:

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

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. Bu terim taşınım ve yayılım cinsinden ifade edilemeyen terimleri içerir. Bu çalışmada gerekli ϕ değerleri u, v, k ve ϵ dur. Eğer ϕ bir e ve Γ_{ϕ} ile S_{ϕ} sıfıra eşitlenirse (3.1) denklemi aynı zamanda süreklilik denklemini gösterir. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır (Patankar and Spalding, 1972).

(3.1) numaralı kısmi diferansiyel denklemleri, bir elemansal hücre hacmi etrafında integral edilerek sonlu-hacim biçiminde ifade edilirler. Sınır koşullarıyla birlikte, kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu-hacim biçimleri PHOENICS (Spalding, 1981) bilgisayar programına ilave edilen bir ileri-doğru-ilerleme iteratif sonlu-alan tamamıyla-implicit sayısal çözüm yöntemiyle çözülmüştür. Bu bilgisayar programı SIMPLE algoritmasının bir türevini kullanır (Spalding, 1981).

3.2.Sınır Koşulları



Şekil 3.1. Koordinat sistemi ve kanal akış geometrisi

Kanal akışları için akış geometrisi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Burada h kanalın simetri ekseninden cidara kadar olan mesafe, kanalın yarı genişliğidir. Dört farklı sınır koşulu kullanılmıştır; giriş düzlemi, çıkış düzlemi, simetri eksenini ve katı cidar. Katı cidar yakınında akışın özelliklerinin değişimi daha çok sarp olduğundan momentum (u, v) ve skalar (k, ϵ) taşınım işlemleri cidar fonksiyonları vasıtasıyla modellenmiştir. Bu kavramın bir detaylı tartışması Launder and Spalding (1974) tarafından sağlanmıştır.

Kanalın giriş düzleminde bütün büyüklükler için üniform bir profil kabul edilmiştir; yani, yatay (x) yönündeki hıza ortalama U_b değeri verilmiş, dikey (y) yönündeki hız ise sıfır kabul edilmiştir. k ve ϵ türbülans büyüklüklerine giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır; yani, $k=0.005U_b^2$ ve $\epsilon=(C_\mu k^{3/2}/0.03h)$.

Kanalın çıkış düzleminde tamamıyla gelişmiş bir akış koşulunun hüküm sürdüğü kabul edilmiştir; yani, bütün yatay (x) yönündeki türevlerin ihmal edilebileceği ve dikey hızın sıfır olduğu kabul edilmiştir. Kanalın ekseninde simetri kabul edilmiştir; $(\partial\phi/\partial y)=v=0$, ϕ burada u , k ya da ϵ olabilir. Kanal cidarındaki hız bileşenleri u , v ve türbülans büyüklükleri k ve ϵ için sıfır değerleri verilmiştir. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için başlangıç hesaplama alanı değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

3.3.Hesaplama detayları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Kullanılan tüm sayısal ağlar büyük gradyanlı bölgelerde (cidar yakınındaki bölgede), daha küçük aralıklarla üniform olmayan bir şekilde düzenlenmiştir. Yatay ve dikey hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. İlgili diğer tüm büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış çözümler elde etmek için kolon-kolon yöntemi iteratif olarak kullanılmıştır. Mutlak kalıcı hataların toplamı 10^{-3} 'den daha küçük olduğu zaman iterasyonlar bitirilir. Her durum için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ yoğunluklarıyla ağ testleri yapılmıştır. Bu çalışmada sunulmuş olan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdırlar. Çizelge 3.1, her bir durum için hesaplama gereksinimlerinin detaylarını özetlemektedir. Bu çizelgede N bir yakınsamış çözüm elde etmek için yapılmış olan iterasyonların sayısıdır, T, saniye cinsinden cpu zamanı ve T/N 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	T/N
Wardana et al	1.4×10^4	40 x 30	2.734375	365	0.0074914
Bradshaw et al	1.92×10^5	40 x 30	3.296875	443	0.0074421
Byrne et al	1.4×10^5	40 x 30	3.375	451	0.0074833
Breyer et al	10^4	40 x 30	5.640625	741	0.0076121
Laufer	30800	40 x 30	2.21875	297	0.0074705

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

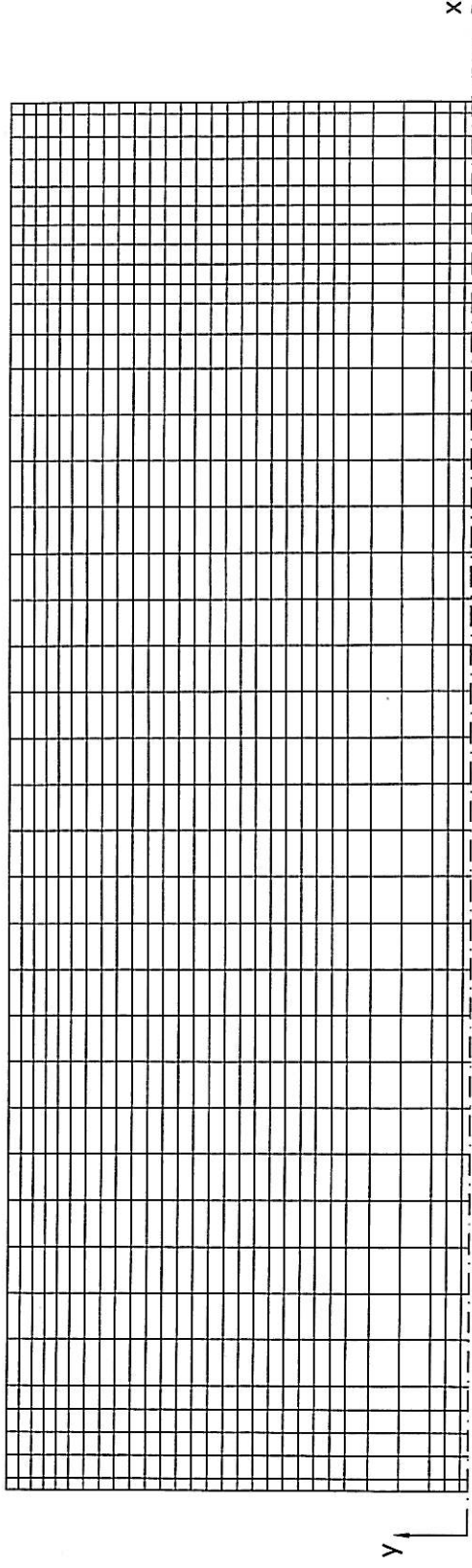
Kanallarda türbülanslı akımlar için beş farklı Reynolds sayısında sayısal hesaplamalar yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Wardana et al (1992) , Bradshaw et al (1973) , Byrne et al (1969, 1970) , Breyer et al (1993) ve Laufer'in (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır.

Wardana et al'in (1992) kanal geometrisi; kanal uzunluğu $L=1800$ mm, kanalın yarı genişliği $h=15$ mm' dir. Kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Ağ x ve y yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktalarından oluşmaktadır.

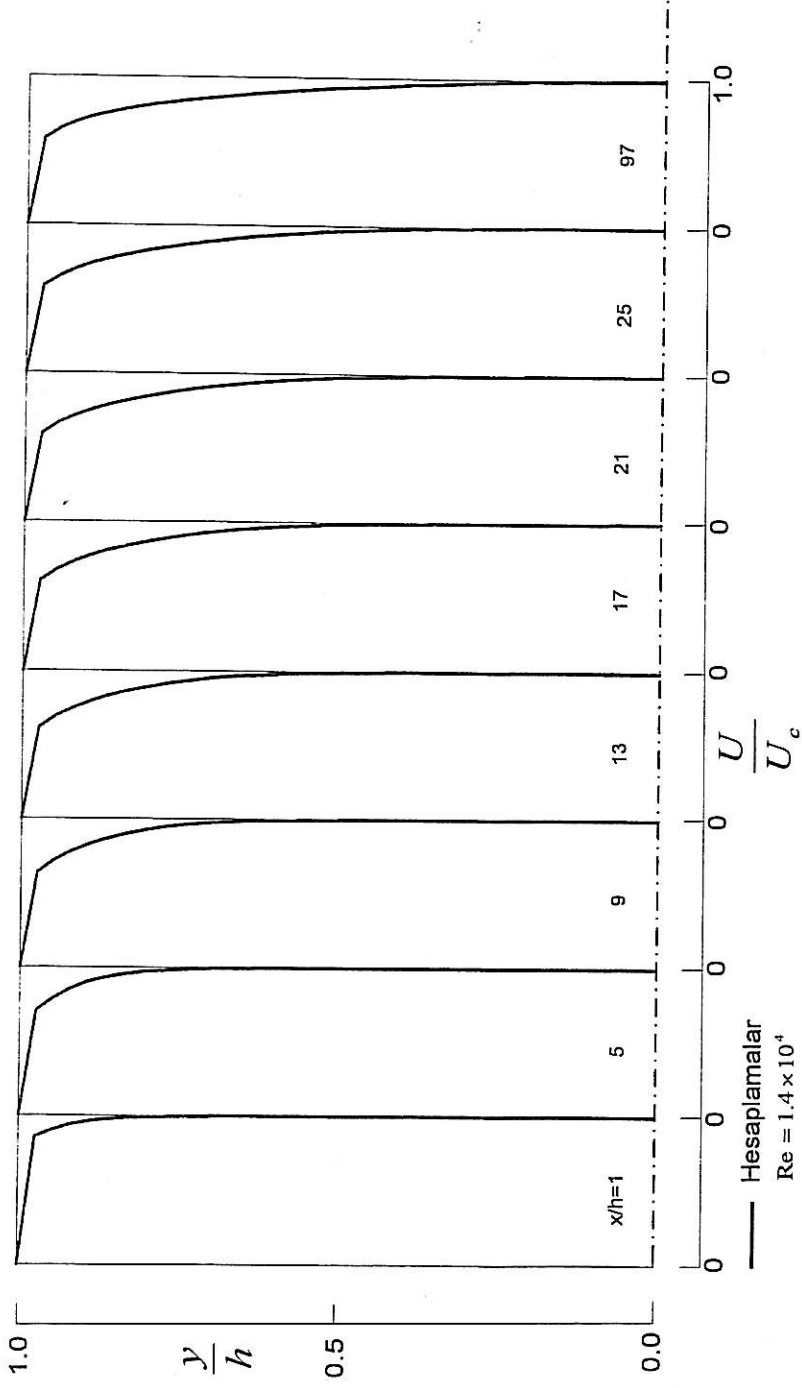
Kanal akışı için akış yönü hız profilleri, $x/h=1$ den 112.66 'ya kadar 16 farklı kesitte hesaplanarak, $Re=1.4 \times 10^4$ için Şekil 4.2-a ve Şekil 4.2-b' de Wardana et al' in (1992) $x/h=102.66$, 106 , 109.33 ve 112.66 kesitlerindeki dört farklı deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı U , U_c referans hızıyla boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanalın simetri ekseninden ölçülen mesafedir. Reynolds sayısı U_c referans hızına ve kanalın yarı genişliğine dayanır. Yani, $Re=U_c h / \nu$ dir. Wardana et al'in deneysel çalışmalarında ölçülen referans hız $U_c= 15$ m/s' dir. Şekil 4.2-b' den görüldüğü üzere yatay hız profilleri Wardana et al'in (1992) deneysel bulgularıyla mükemmel uyumdadır.

Şekil 4.3' te Wardana et al'in (1992) kanal akışı için U_c 'nin kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Burada; U_c kanalın simetri eksenindeki hız U_b ortalama hız ile boyutsuzlaştırılmıştır.

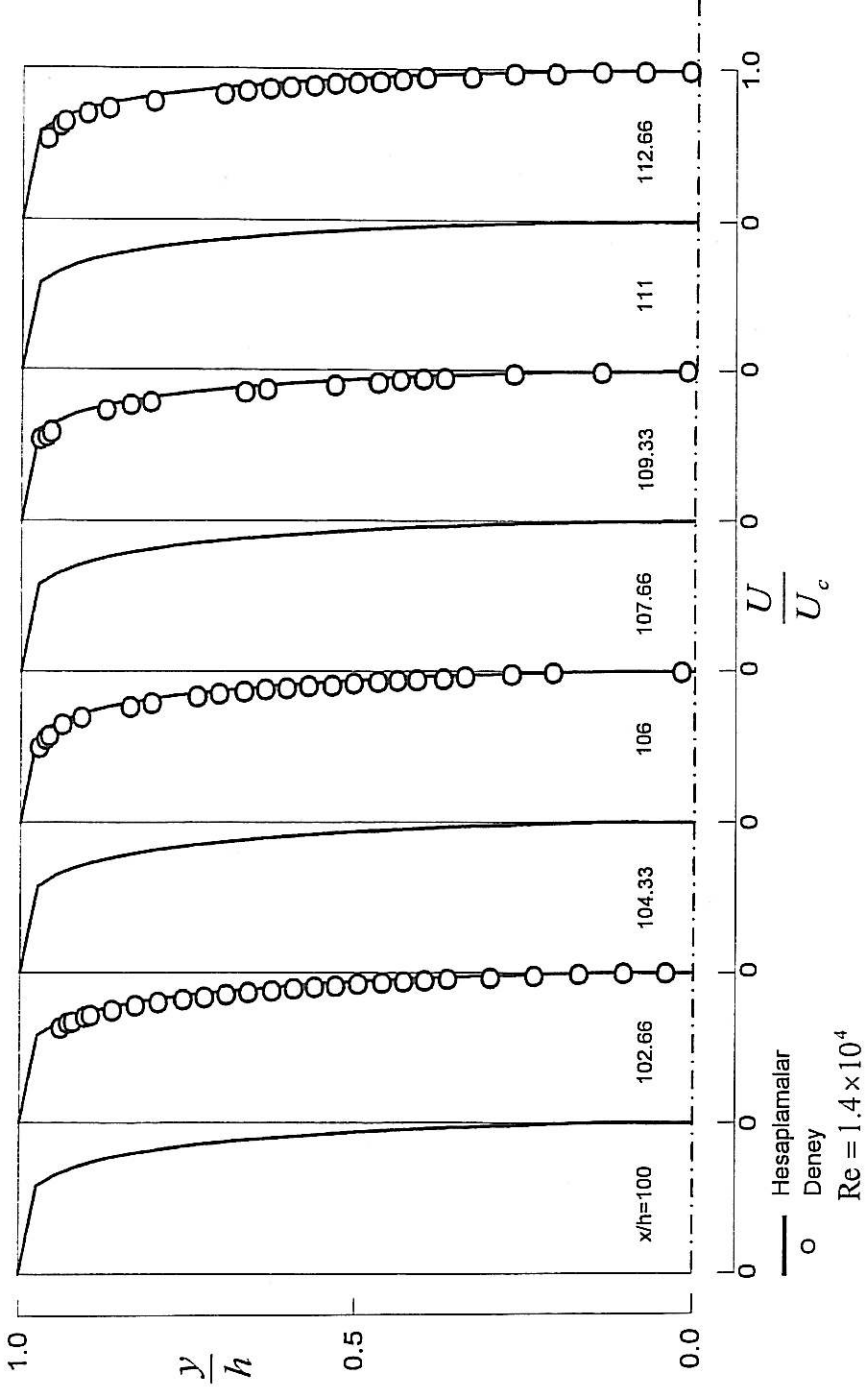
Şekil 4.4-a ve Şekil 4.4-b' de Wardana et al'in (1992) kanalı için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji profilleri U_b^2 ortalama hızın karesiyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir.



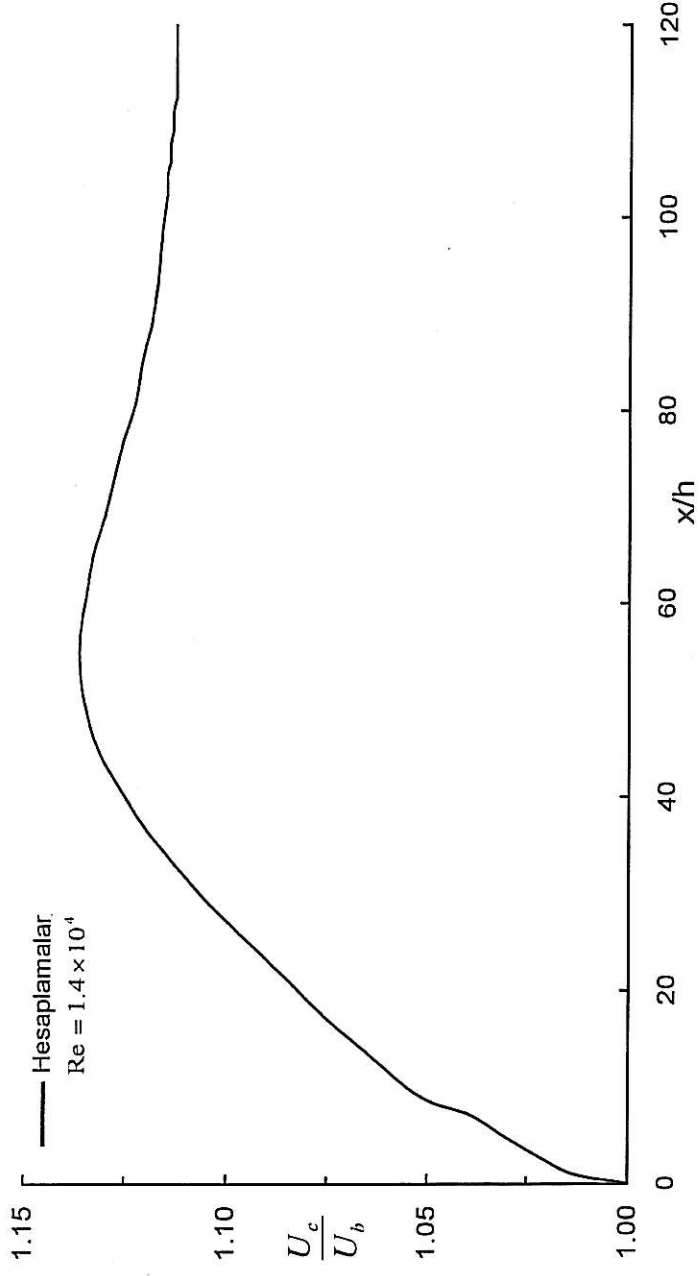
Şekil 4.1.1. Wardana et al'in (1992) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



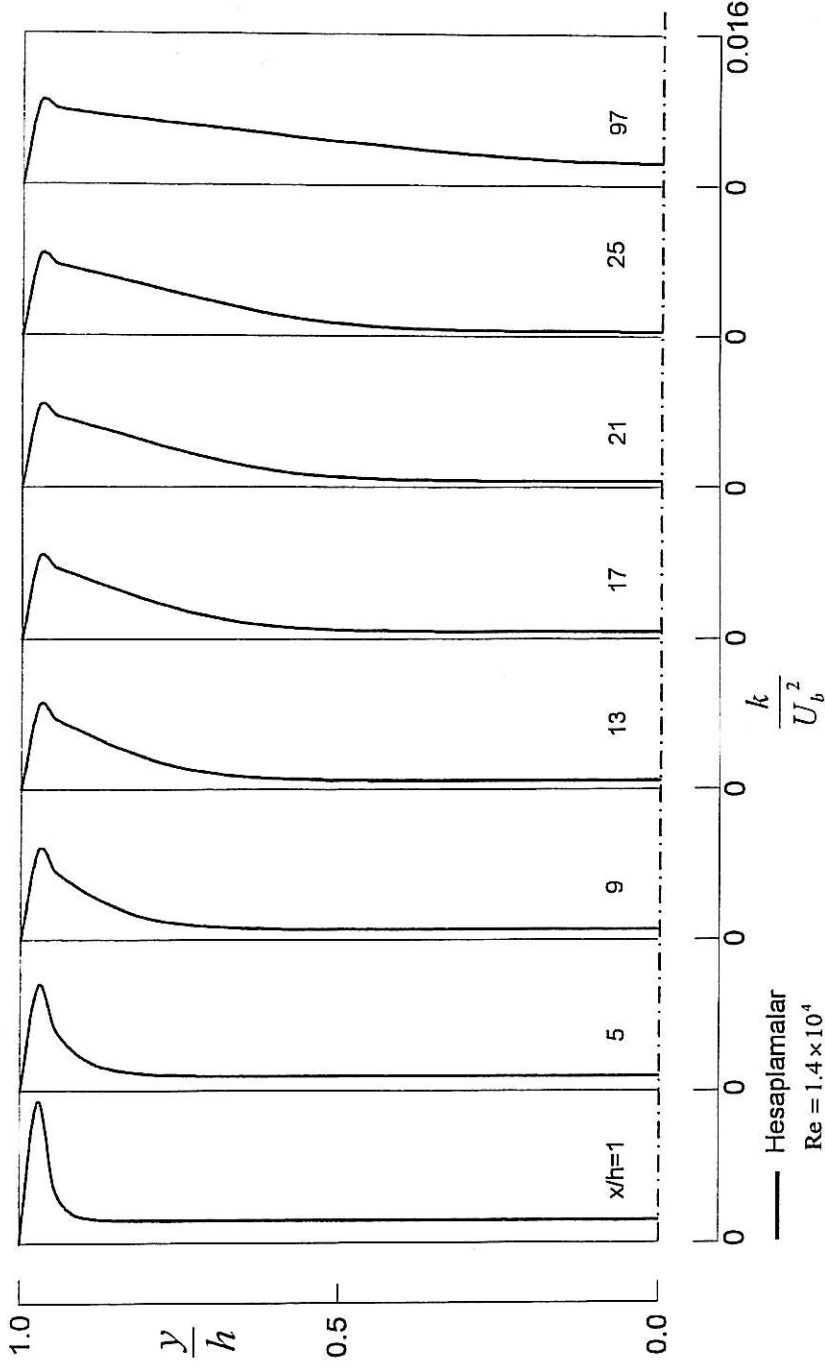
Şekil 4.2-a. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Wardana et al'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması



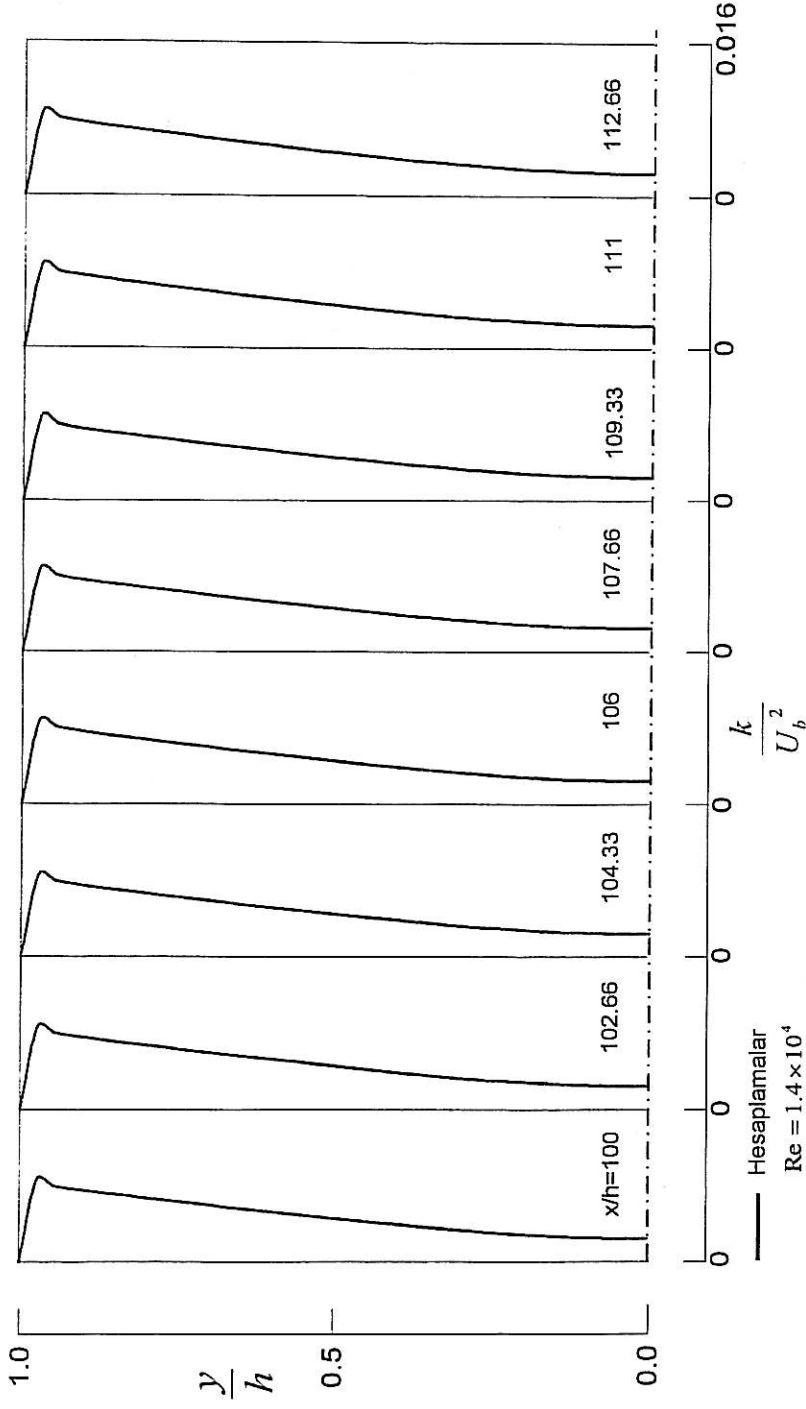
Şekil 4.2-b. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Wardana et al'ın (1992) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması



Şekil 4.3. Wardana et al'in (1992) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişimi.



Şekil 4.4-a. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri .



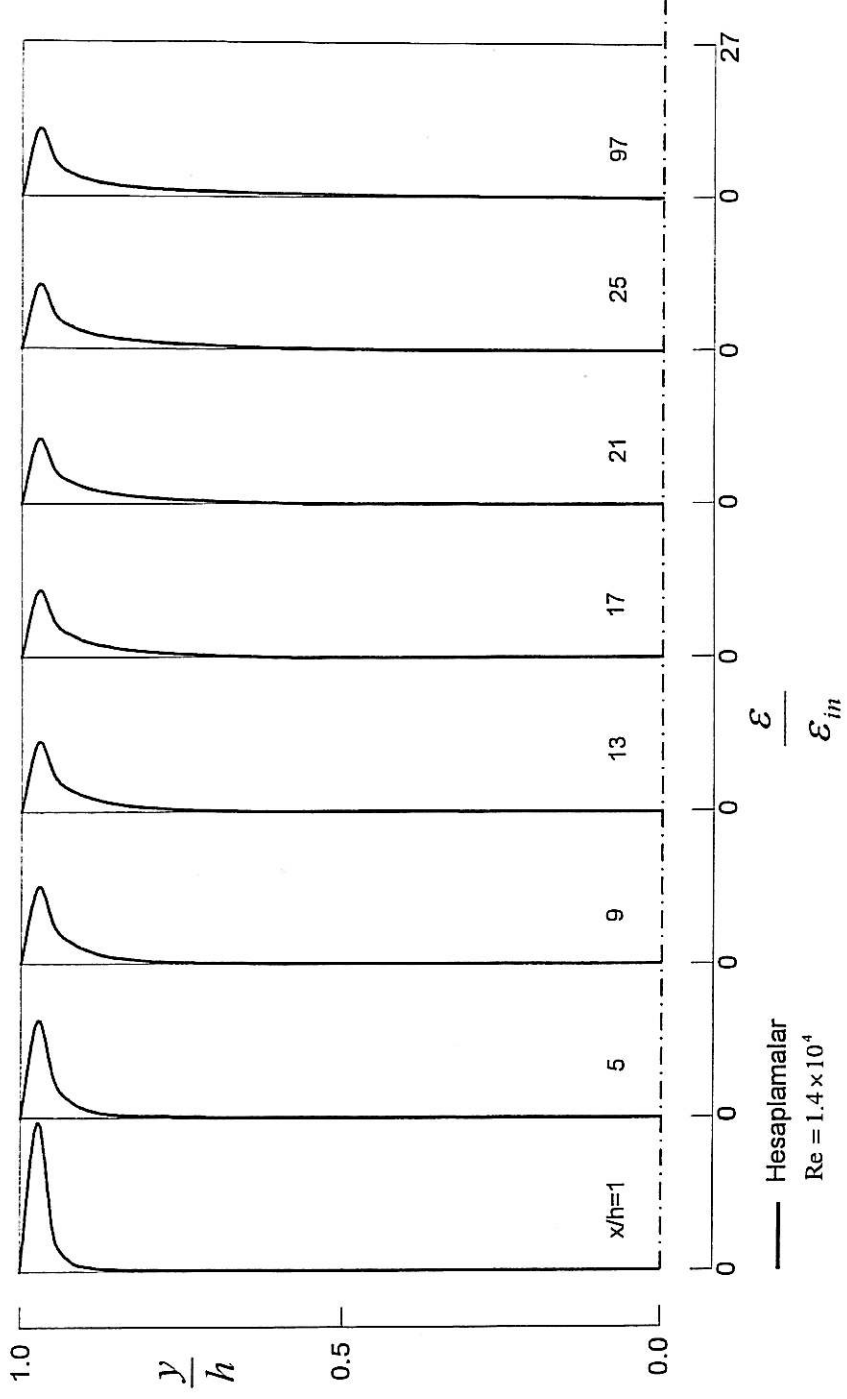
Şekil 4.4-b. Wardana et al'in (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri .

Şekil 4.5-a ve Şekil 4.5-b' de Wardana et al.'ın (1992) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ , girişte hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{in} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin gelişimini göstermektedir.

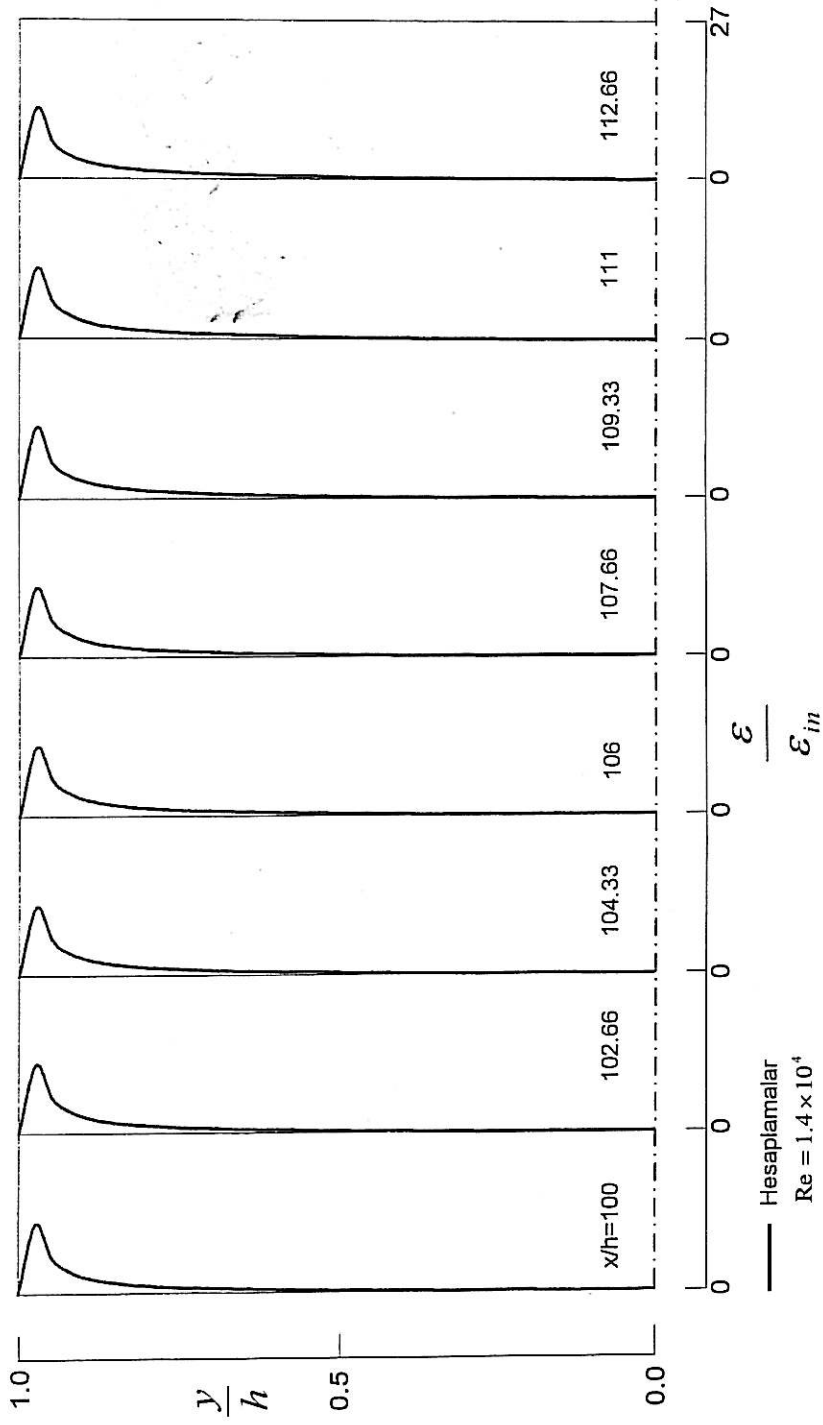
Şekil 4.6-a ve Şekil 4.6-b' de Wardana et al.'ın (1992) kanal akışı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri $x/h=1$ 'den 112.66'ya kadar 16 değişik akış yönü kesitlerinde gösterilmiştir. Şekilde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_e , kanal girişinde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_{ein} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan efektif viskozite profillerinin gelişimini göstermektedir.

Şekil 4.7' de Wardana et al.'ın (1992) kanal akışı için hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f=2\tau_w/\rho U_b^2$) kanal cidarı boyunca değişimini göstermektedir. Burada; τ_w cidar kayma gerilmesi, ρ akışkanın yoğunluğu, U_b ortalama hızı göstermektedir. Hesaplamalar, cidar sürtünme katsayısının tamamıyla gelişmiş değerine, ilk olarak $x/h=17$ aksenal kesitinde ulaştığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra, tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=97$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değeri sabit kalmaktadır.

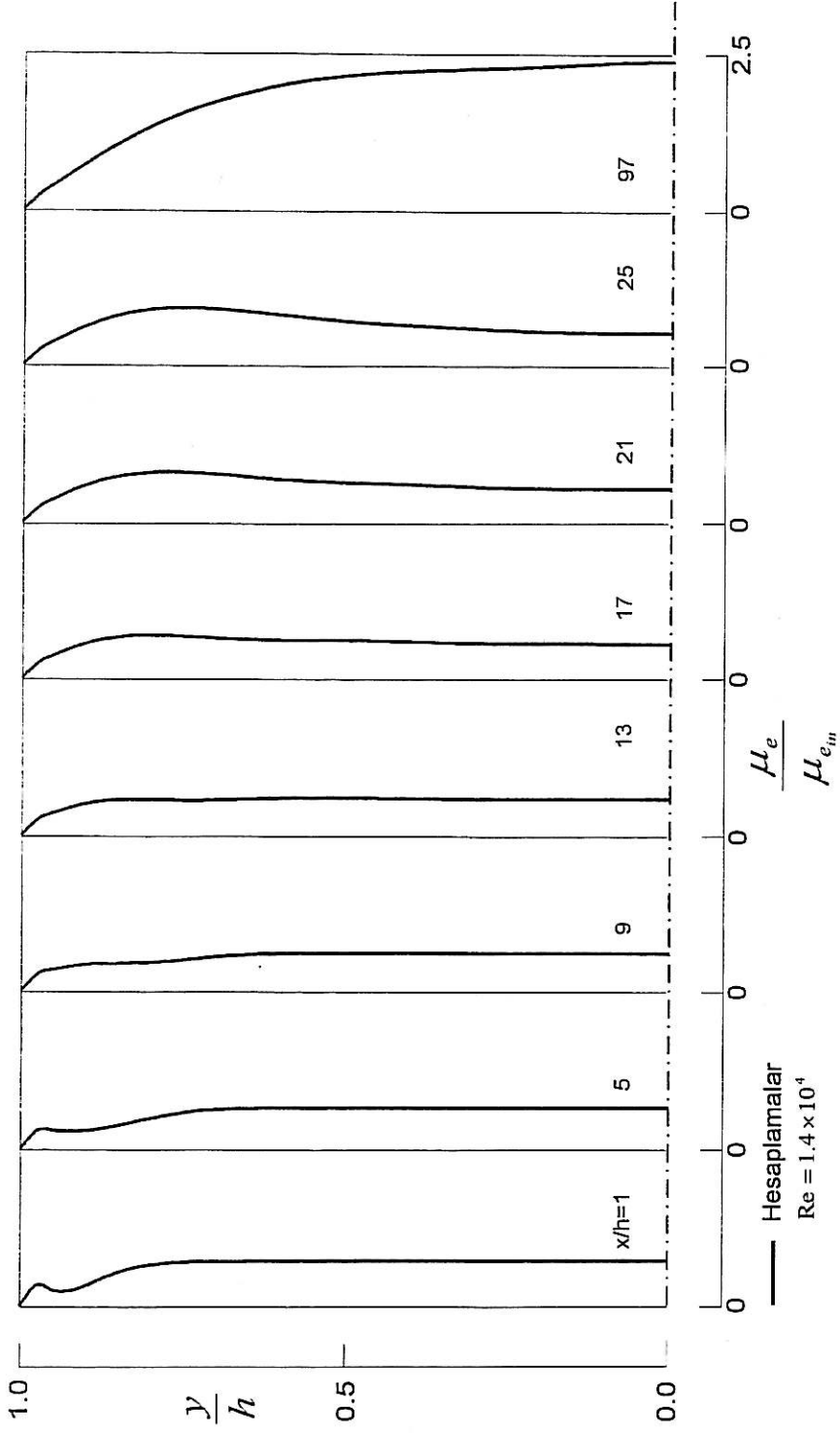
Şekil 4.8' de Wardana et al.'ın (1992) kanal akışı için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimini boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} oranı cinsinden göstermektedir. Burada yerel cidar kayma gerilmesi τ_w , tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi τ_{wd} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Cidar kayma gerilmesi, tamamıyla gelişmiş değerine ilk olarak $x/h=17$ aksenal kesitinde ulaşıldığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=97$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra cidar kayma gerilmesinin değeri pratik olarak sabit kalmaktadır.



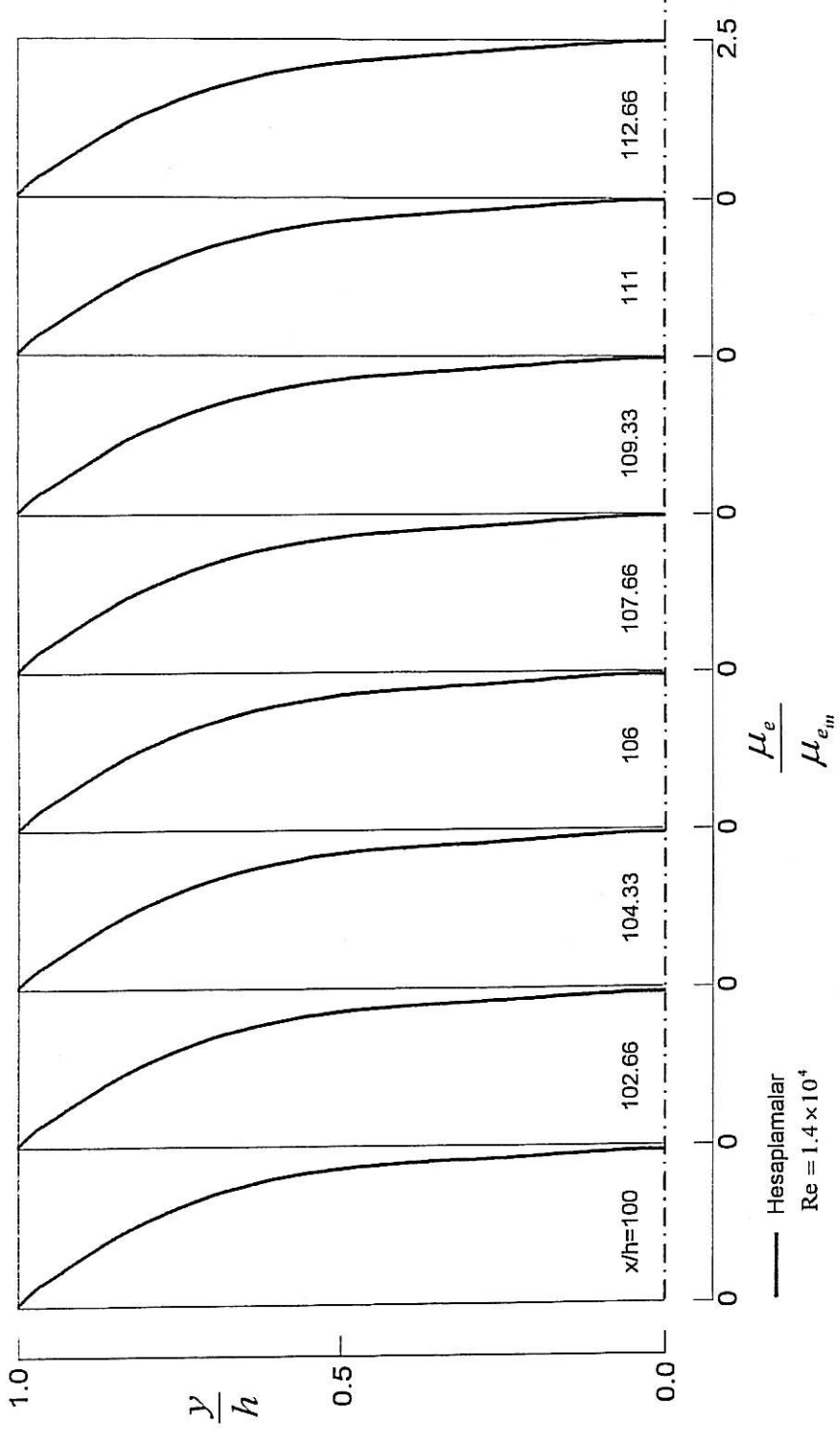
Şekil 4.5-a. Wardana et al'in (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri .



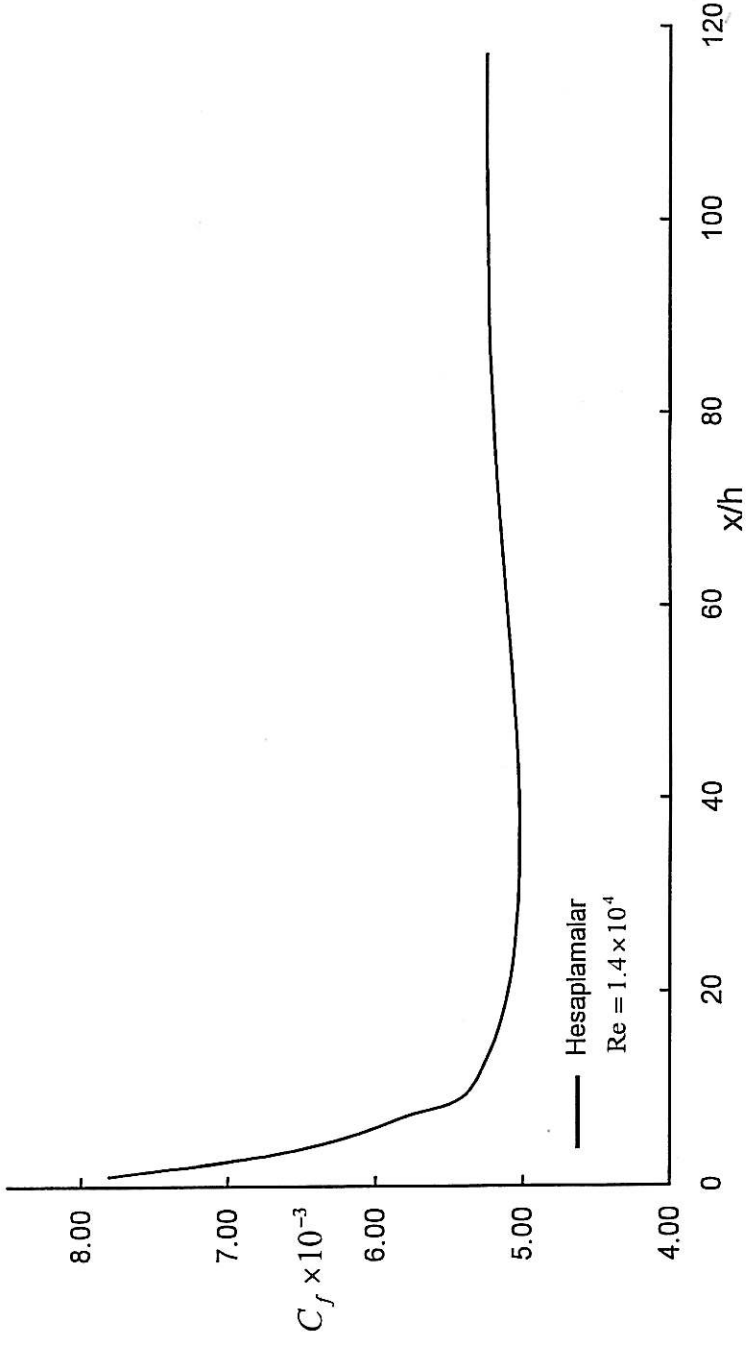
Şekil 4.5-b. Wardana et al'in (1992) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri .



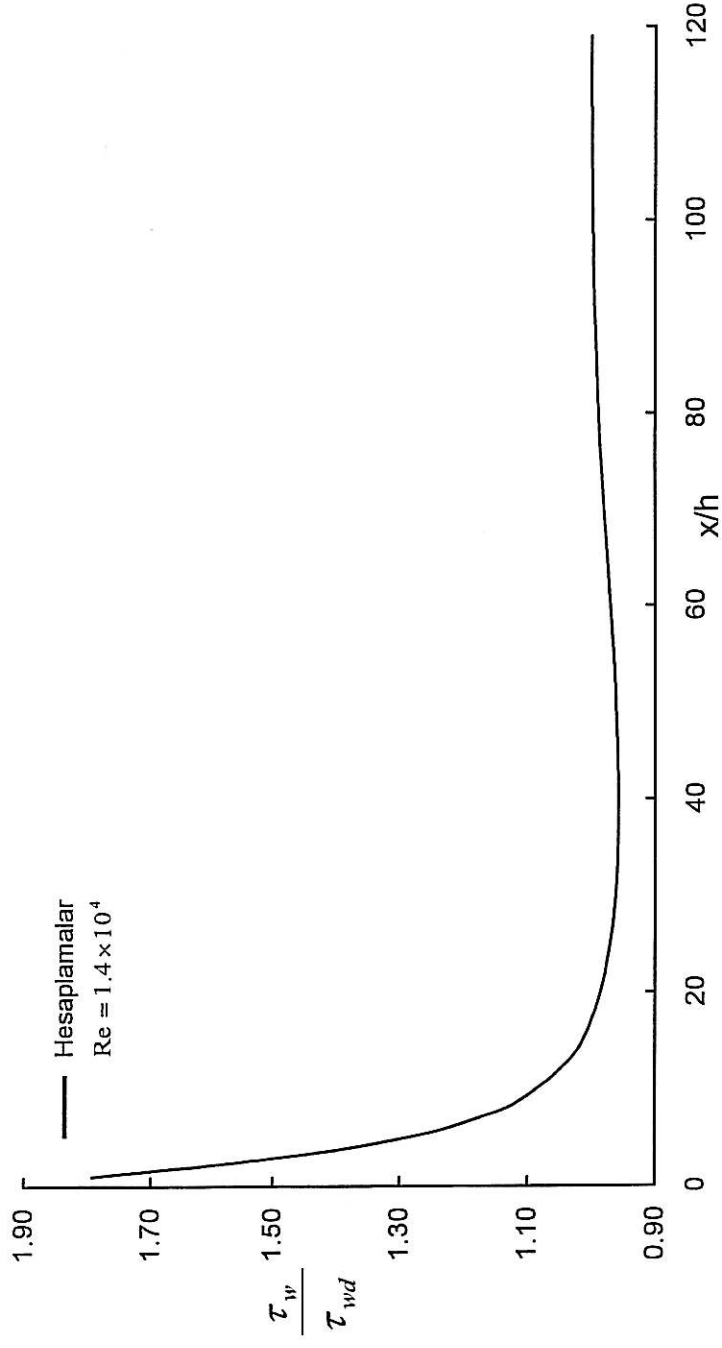
Şekil 4.6-a. Wardana et al'ın (1992) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri .



Şekil 4.6-b. Wardana et al.'in (1992) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



Şekil 4.7. Wardana et al'in (1992) kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişimi.



Şekil 4.8. Wardana et al'ın (1992) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi

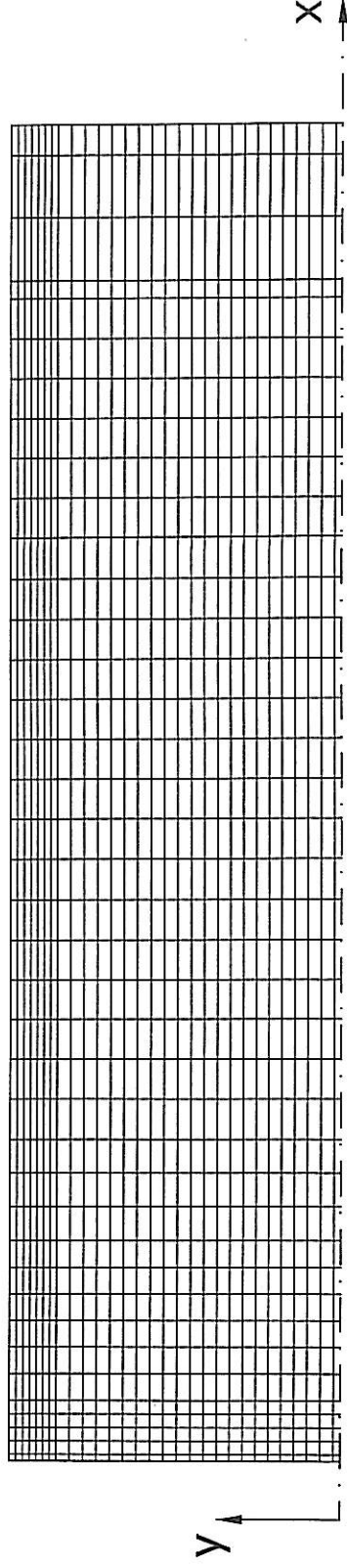
Bradshaw et al'ın (1973) deneysel ölçümleri bu çalışma için karşılaştırmaya esas teşkil etmek üzere ikinci olarak seçilmiştir.

Bradshaw et al'ın (1973) kanal geometrisi; kanal uzunluğu $100L=5m$, kanalın genişliği $L=0.05m$ ' dir. Kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ağ x- ve y- yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktalarından meydana gelmiştir. Başlangıçtaki bölgede ve kanal cidarına yakın kısımda ağ daha sık oluşturulmuştur.

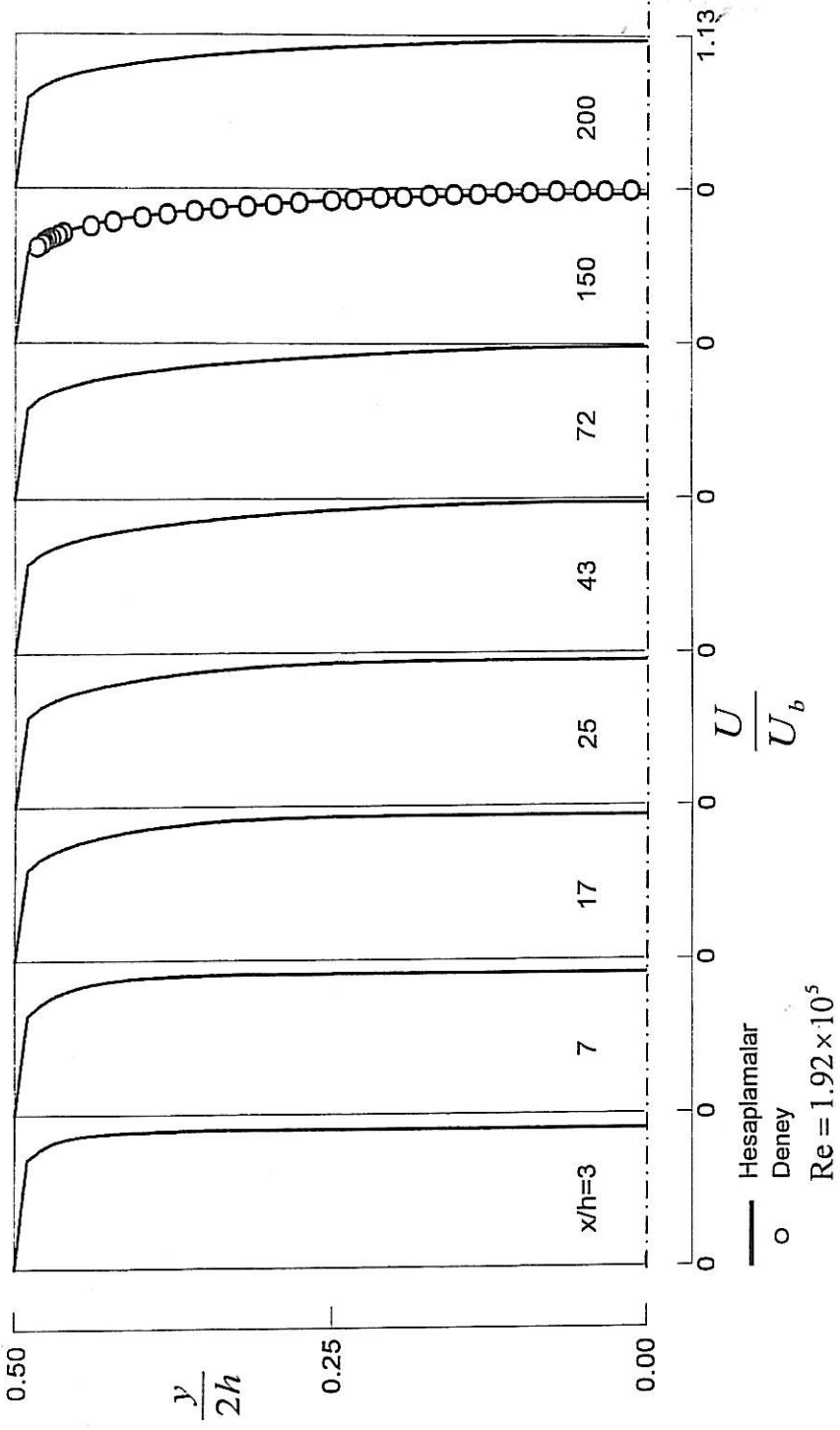
Şekil 4.10'da akış yönü hız profilleri kanalın girişinden çıkışına $x/h=3$ 'den 200 'e kadar değişen 8 farklı akış yönü kesitinde $Re=1.92 \times 10^5$ için hesaplanmış ve $x/h=150$ kesitinde Bradshaw et al'ın (1973) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı ölçülen ortalama hız U_b referans hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanalın simetri ekseninden ölçülen mesafedir. Reynolds sayısı U_b referans hızına ve kanalın 2 kat genişliği olan $2L$ mesafesine dayanır. Yani, $Re=U_b 2L/v$ 'dür. Bradshaw et al'ın (1973) deneysel çalışmalarında ölçülen referans hızı $U_b=28.992$ m/s, $2L$ ise 0.1 m.' dir. Şekil 4.11'de görüleceği üzere hesaplanan akış yönü hız profili Bradshaw et al'ın (1973) deneysel hız profili ile mükemmel bir uyum göstermektedir.

Şekil 4.12' de kanal boyunca hesaplanan kanal simetri eksenini üzerindeki boyutsuz yatay hızın değişimi Bradshaw et al'ın (1973) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü üzere hesaplanan yatay hız kendi maksimum değerinden, deneysel ölçümlere göre, daha çabuk düşmektedir. Bu durum k-ε türbülans modelinin kanalda daha hızlı bir akış gelişimi hesapladığı kanısını vermektedir. Bununla beraber, hesaplanan yatay hız deneysel bulgularla aynı trendi göstermektedir.

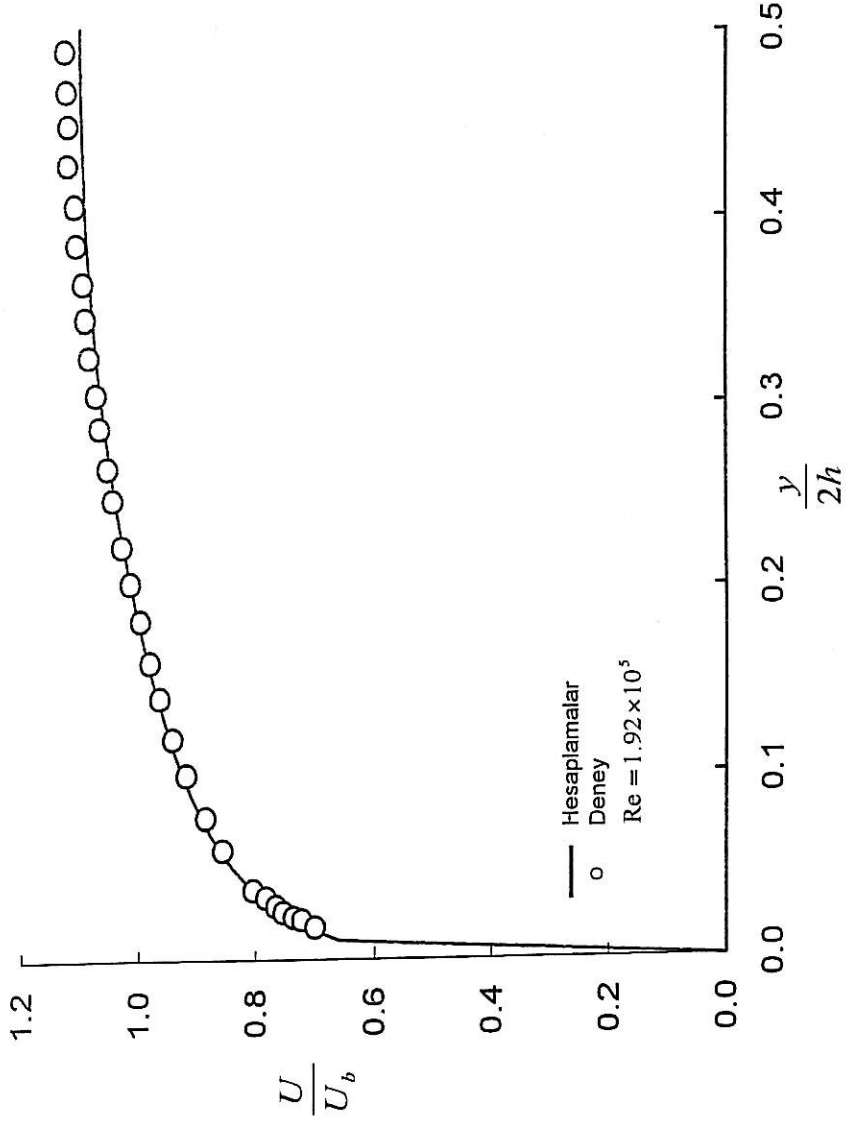
Şekil 4.13' te Bradshaw et al'ın (1973) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji profilleri U_b^2 ortalama hızın karesiyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller 8 farklı kesitte kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir.



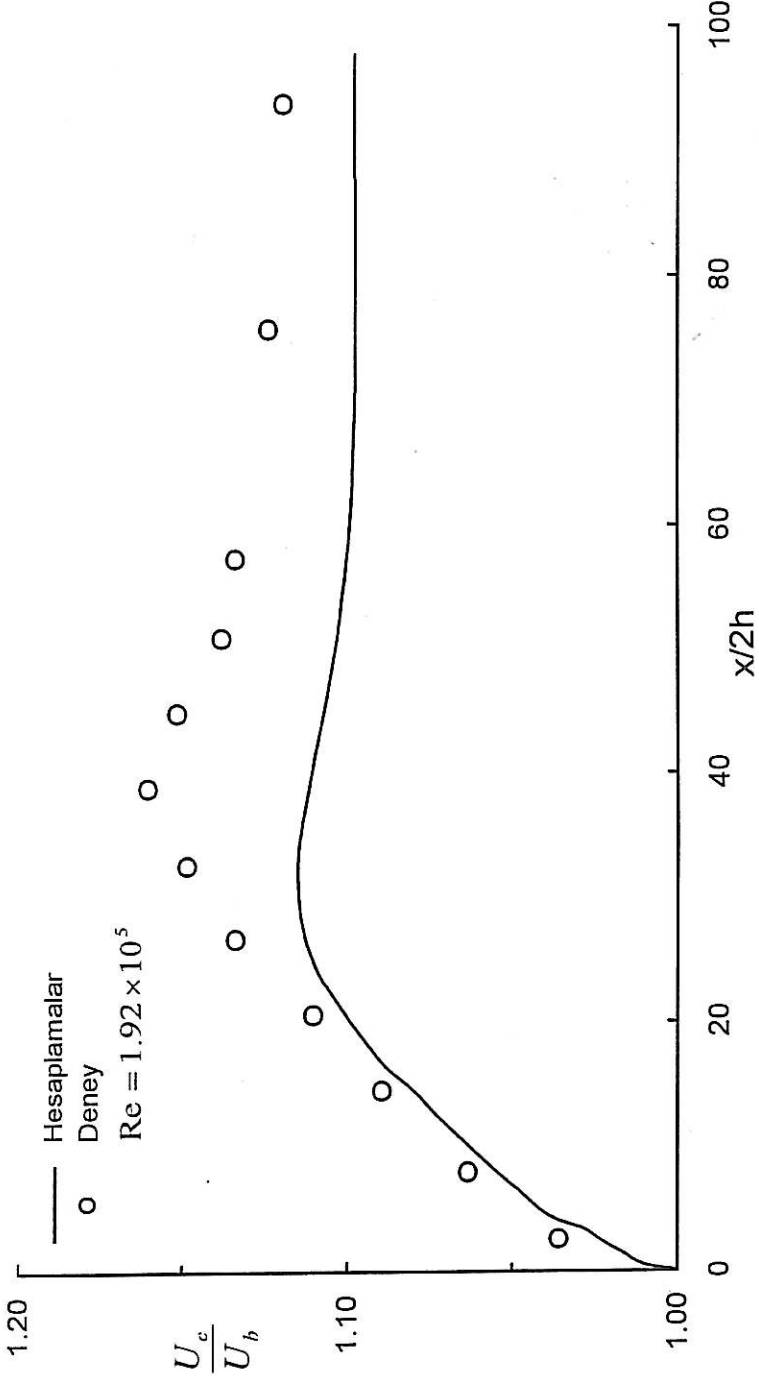
Şekil 4.9. Bradshaw et al'ın (1973) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



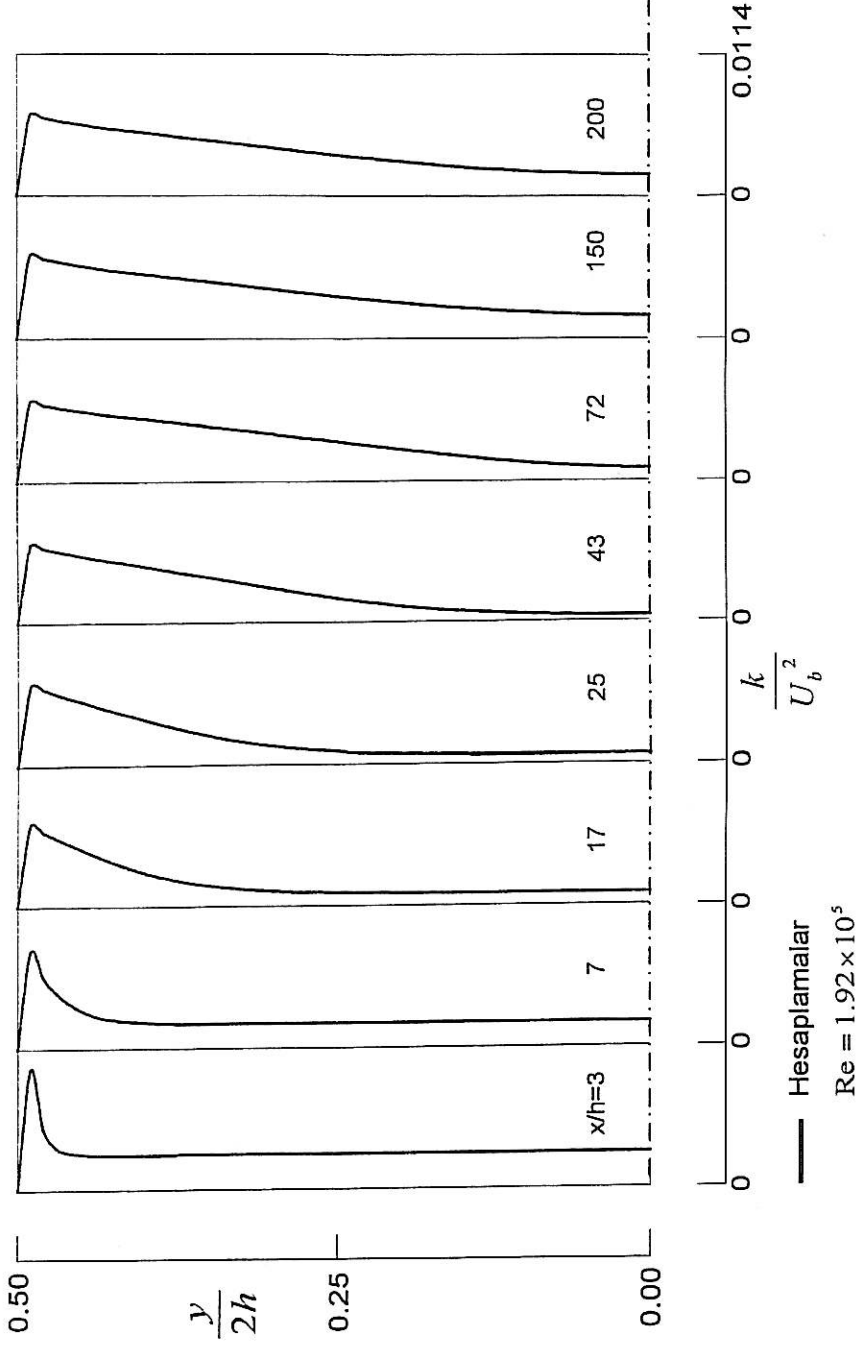
Şekil 4.10. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 4.11. $Re=1.92 \times 10^5$ için $x/h=150$ kesitinde hesaplanan yatay hız profilinin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 4.12. Kanal boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki yatay hız değişiminin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



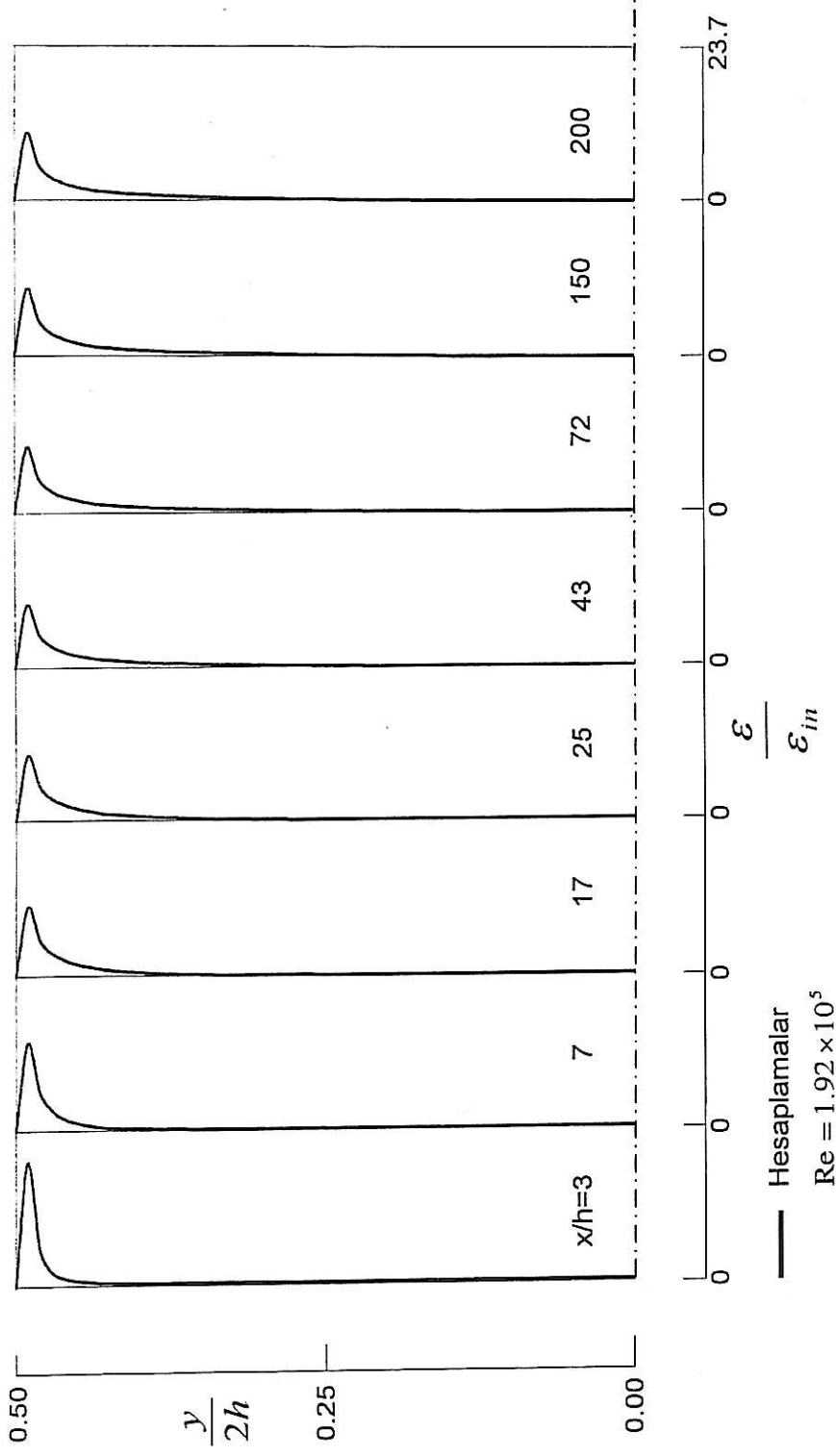
Şekil 4.13. Bradshaw et al'ın (1973) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.

Şekil 4.14 'de Bradshaw et al'ın (1973) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ , girişte hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{in} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin gelişimini göstermektedir.

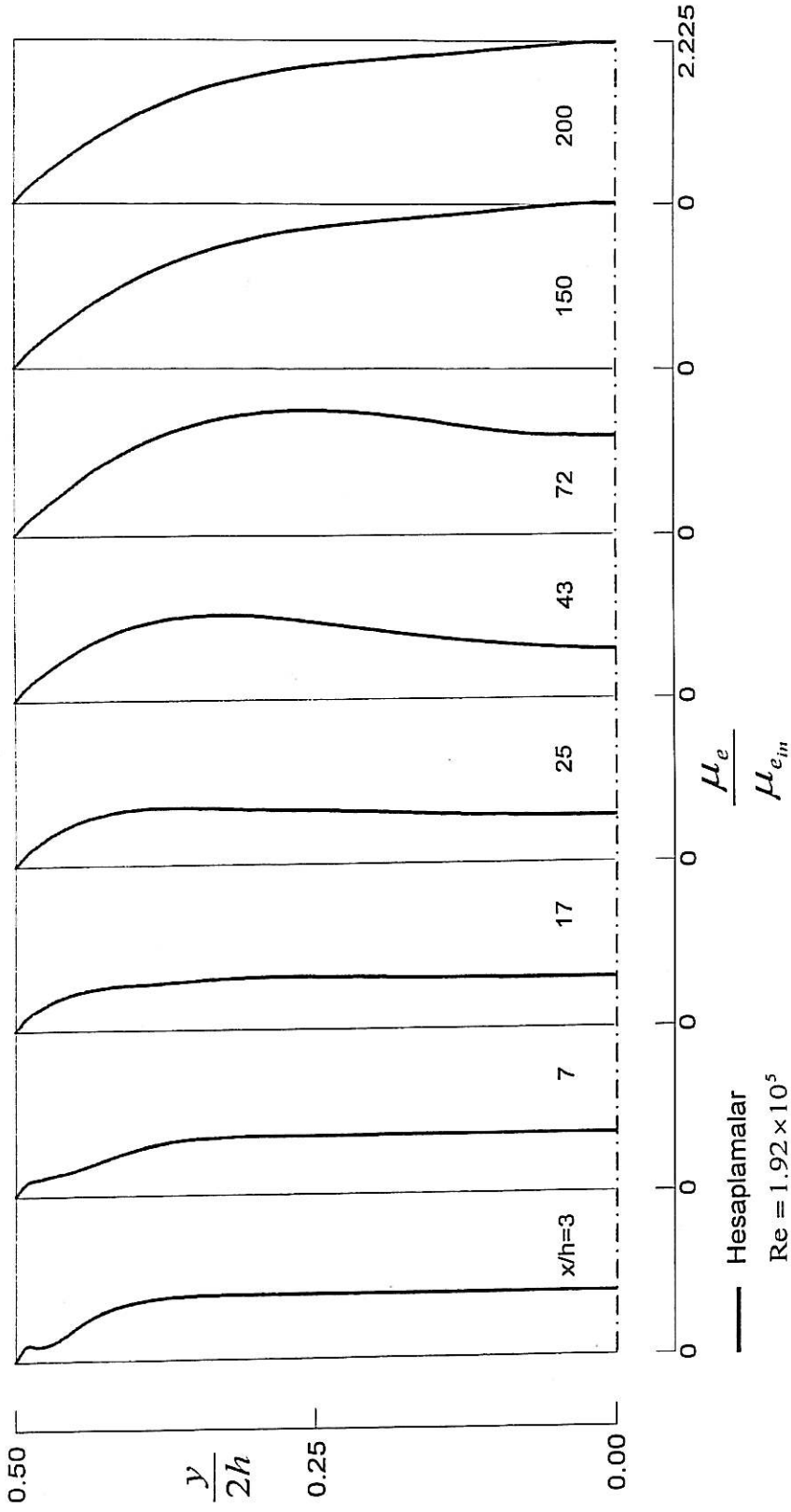
Şekil 4.15' de Bradshaw et al'ın (1973) kanal akışı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri $x/h=3$ 'den 200'e kadar 8 değişik akış yönü kesitlerinde gösterilmiştir. Şekilde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_e , kanal girişinde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_{ein} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan efektif viskozite profillerinin gelişimini göstermektedir.

Cidar sürtünme katsayısının ($C_f=2\tau_w/\rho U_b^2$) kanal cidarı boyunca değişimi Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla Şekil 4.16'da karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar, cidar sürtünme katsayısının tamamıyla gelişmiş değerine, ilk olarak $x/2h=10.5$ aksenal kesitinde ulaştığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra, tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/2h=60$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değeri sabit kalmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere $x/2h=40$ kesitine kadar hesaplamalar ile deneysel bulgular arasında oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir. Bu kesitten sonra hesaplamalar deneysel ölçümlerin altında kalmaktadır. Bununla beraber, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının dağılımı deneysel bulgularla aynı trendi göstermektedir.

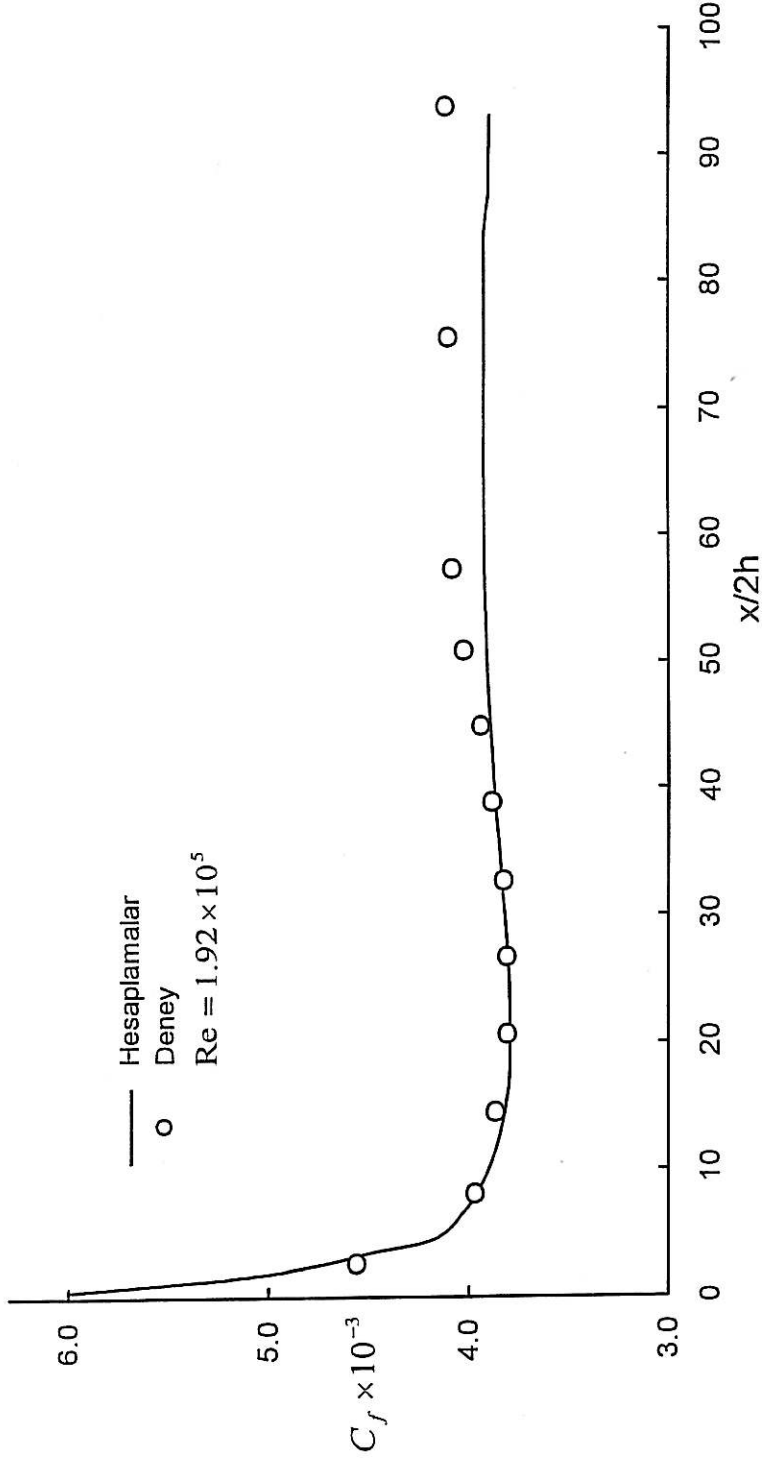
Şekil 4.17' de Bradshaw et al'ın (1973) kanal akışı için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} oranı cinsinden gösterilmiştir. Burada yerel cidar kayma gerilmesi τ_w , tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi τ_{wd} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Cidar kayma gerilmesi, tamamıyla gelişmiş değerine ilk olarak $x/2h=10.5$ aksenal kesitinde ulaştığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/2h=60$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra cidar kayma gerilmesinin değeri pratik olarak sabit kalmaktadır.



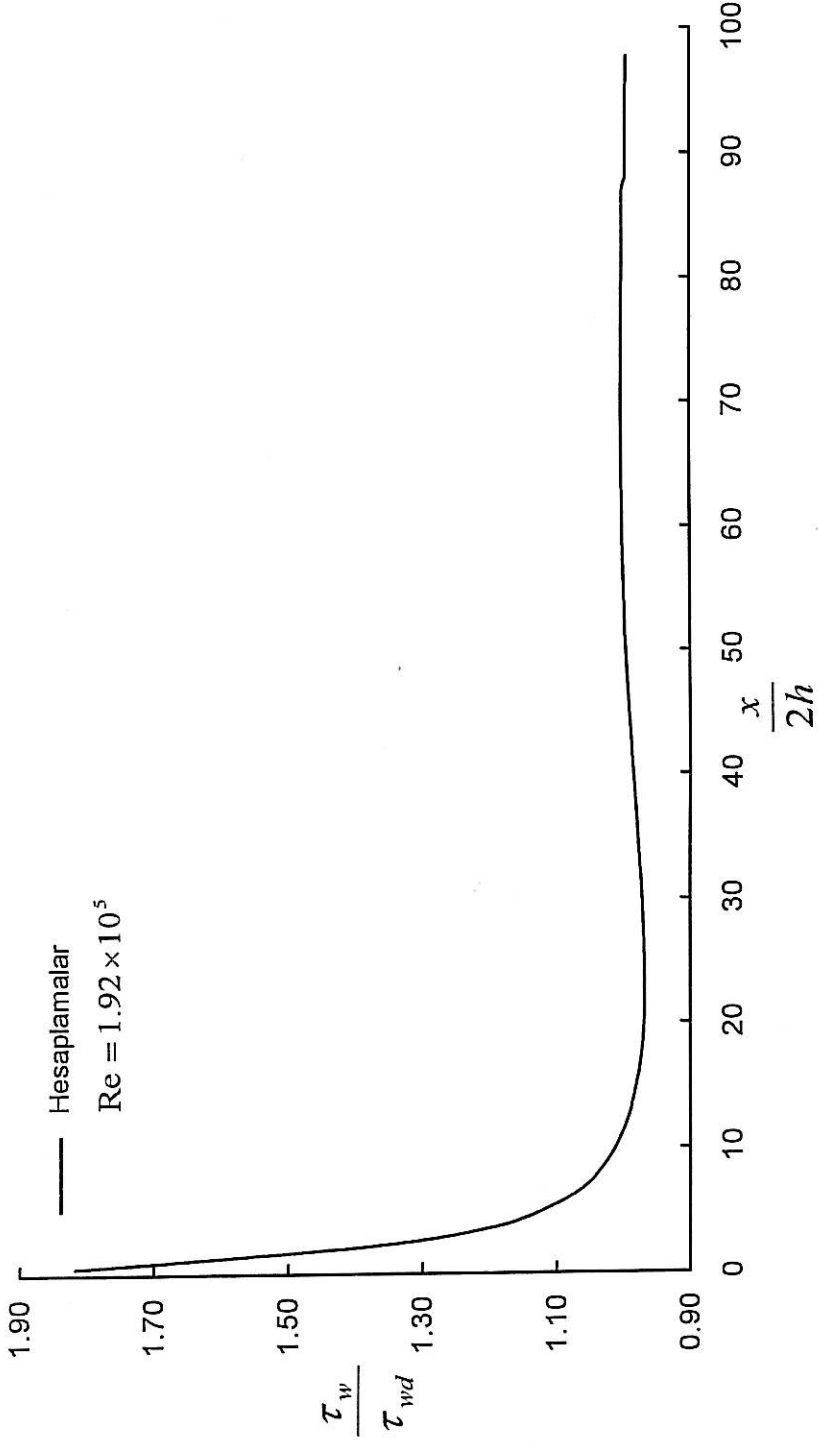
Şekil 4.14. Bradshaw et al'in (1973) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolla miktarı profilleri



Şekil 4.15. Bradshaw et al'in (1973) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri



Şekil 4.16. Kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişiminin Bradshaw et al'ın (1973) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 4.17. Bradshaw et al'ın (1973) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.

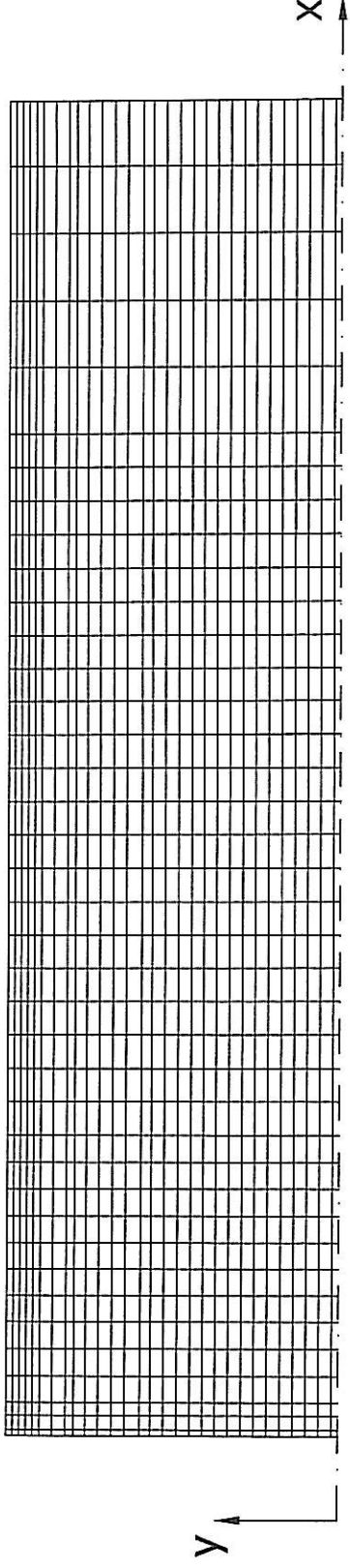
Byrne et al (1969, 1970) deneysel ölçümleri bu çalışma için karşılaştırmaya esas teşkil etmek üzere üçüncü olarak seçilmiştir.

Byrne et al (1969, 1970) kanal geometrisi; kanal uzunluğu $100L=5.1\text{m}$, kanalın genişliği $L=0.051\text{m}$ ' dir. Kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Ağ x- ve y- yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktalarından meydana gelmiştir. Başlangıçtaki bölgede ve kanal cidarına yakın kısımda ağ daha kesafetli oluşturulmuştur.

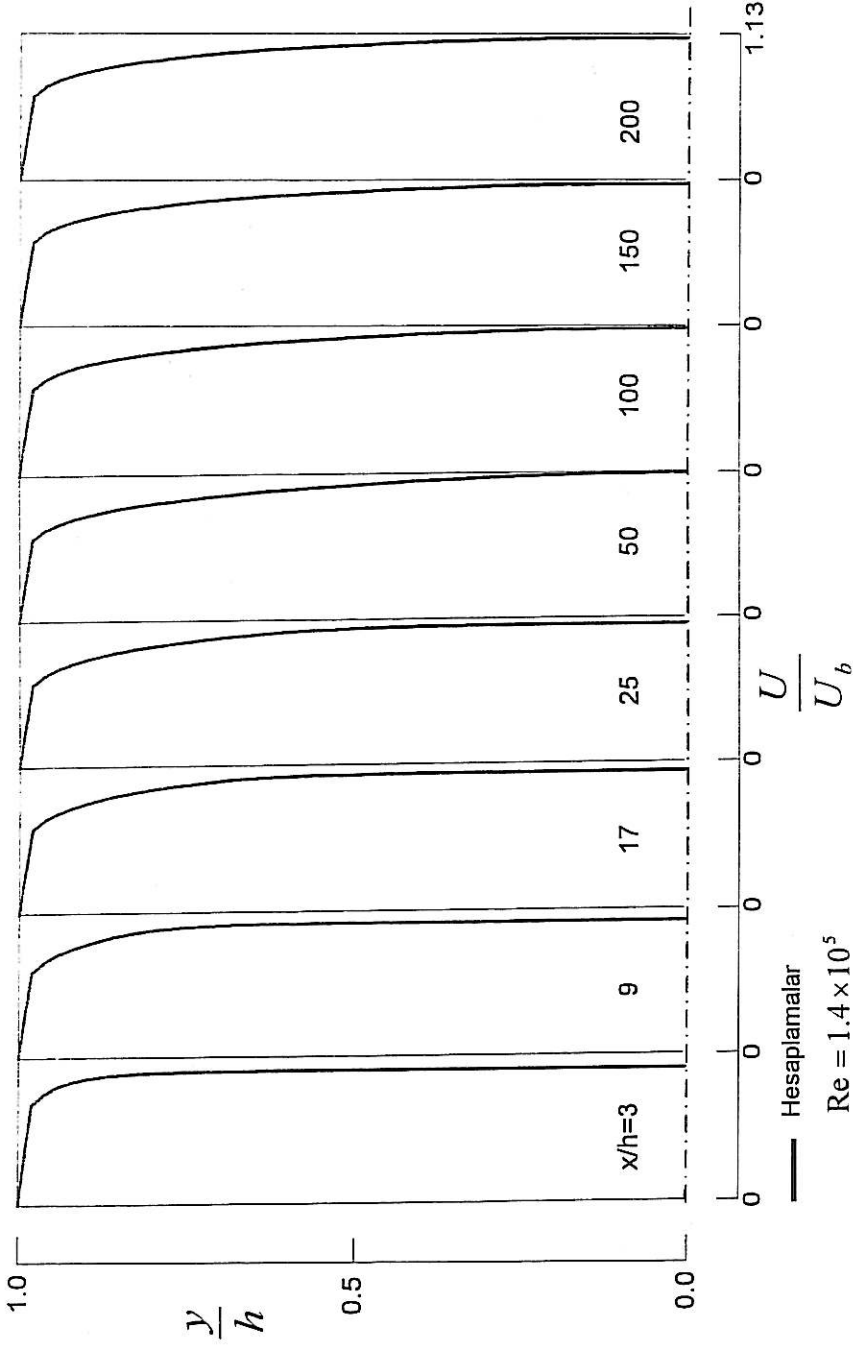
Şekil 4.19'da akış yönü hız profilleri kanalın girişinden çıkışına $x/h=3$ 'den 200 'e kadar değişen 8 farklı akış yönü kesitinde $Re=1.4 \times 10^5$ için hesaplanmıştır. Yerel akış yönü hızı ölçülen ortalama hız U_b referans hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanalın simetri ekseninden ölçülen mesafedir. Reynolds sayısı U_b referans hızına ve kanalın 2 kat genişliği olan $2L$ mesafesine dayanır. Yani, $Re=U_b 2L/\nu$ 'dür. Byrne et al'ın (1969, 1970) deneysel çalışmalarında ölçülen referans hızı $U_b=20.725 \text{ m/s}$, $2L$ ise 0.102 m ' dir.

Şekil 4.20, $Re=1.4 \times 10^5$ için kanal boyunca hesaplanan gelişen yatay hızın değişimini sergilemekte ve Byrne et al'ın (1969, 1970) deneysel bulgularıyla karşılaştırmaktadır. Burada yatay hız, ortalama hız U_b ile boyutsuzlaştırılmıştır. Hesaplamalarla deneysel bulgular arasında makul bir uyum olduğu gözlenmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, kanal simetri ekseninde hesaplanan yatay hız kendi maksimum değerinden, deneysel bulgulara göre, daha hızlı düşmektedir. Bu durum kanalda sınır tabakalar birleştikten sonra, k-ε türbülans modelinin daha süratli bir akış gelişimi hesapladığı izlenimini vermektedir.

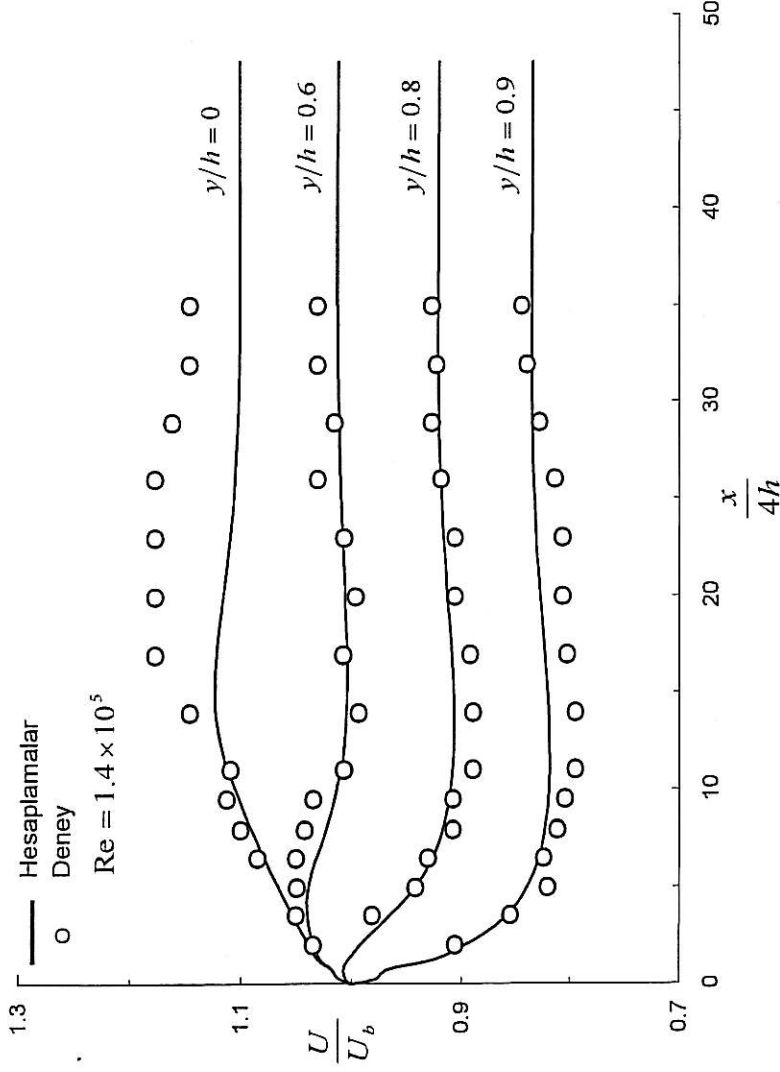
Şekil 4.21' de Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenindeki boyutsuz yatay hızın değişimi gösterilmektedir. Burada kanal simetri eksenindeki hız U_c , ortalama hız U_b ile boyutsuzlaştırılmıştır.



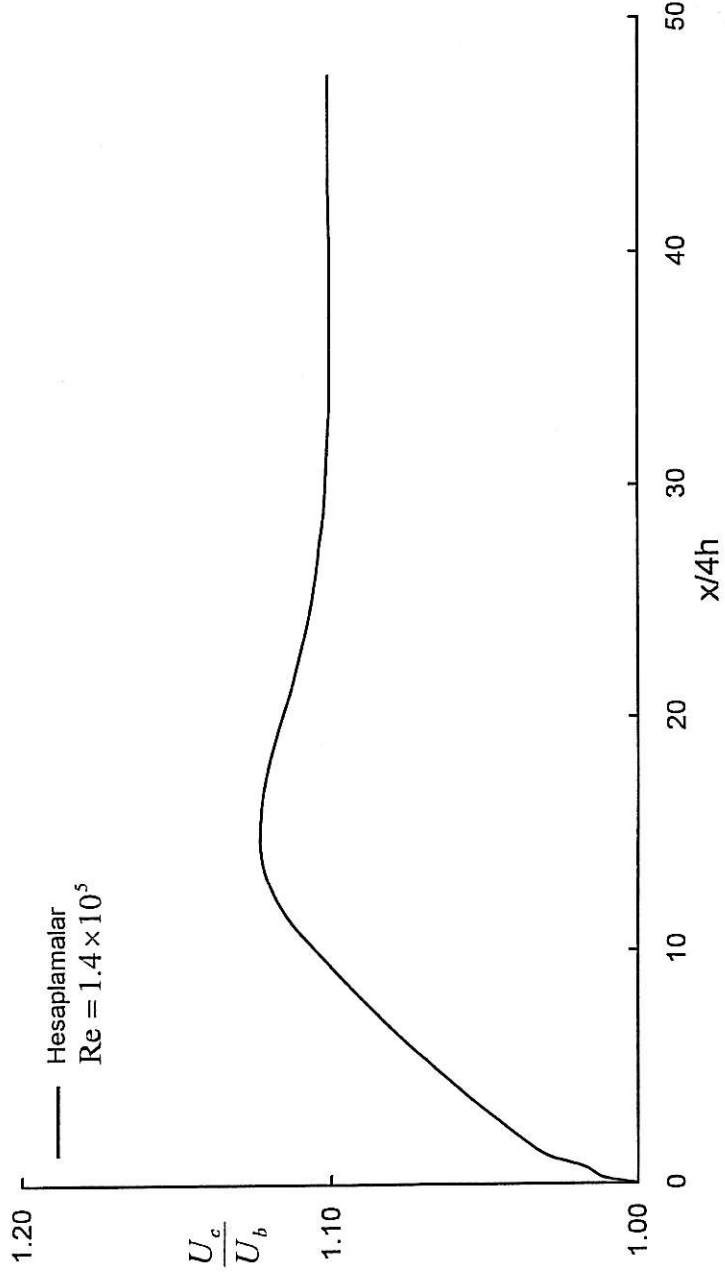
Şekil 4.18. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



Şekil 4.19. Byrne et al'in (1969, 1970) kanal geometrisi boyunca hesaplanan akış yönü hız profilleri.



Şekil 4.20. Kanal boyunca hesaplanan gelişen yatay hız değişiminin Byrne et al'ın (1969, 1970) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



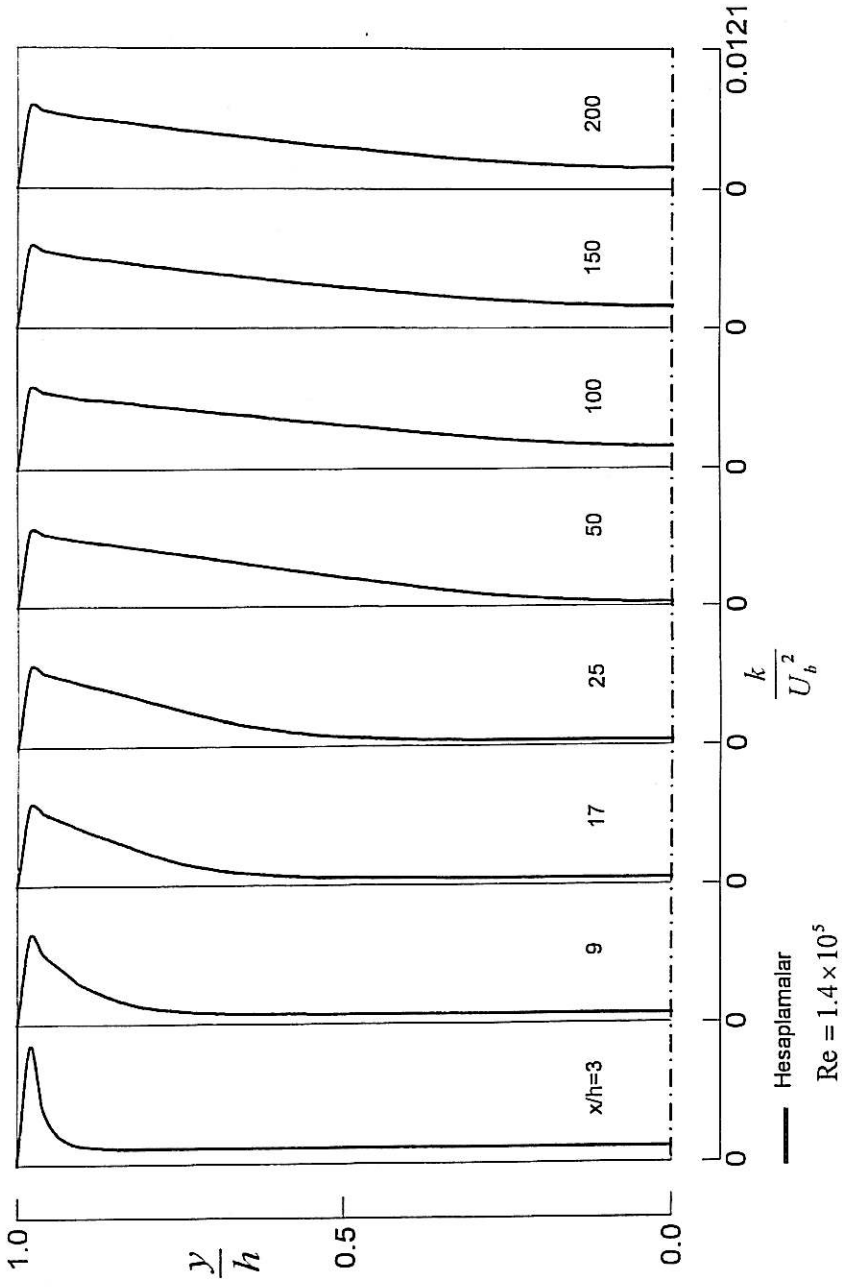
Şekil 4.21. Byrne et al'in (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenli üzerindeki yatay hız değişimi

Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri Şekil 4.22' de gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji profilleri U_b^2 ortalama hızın karesiyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller 8 farklı kesitte kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir.

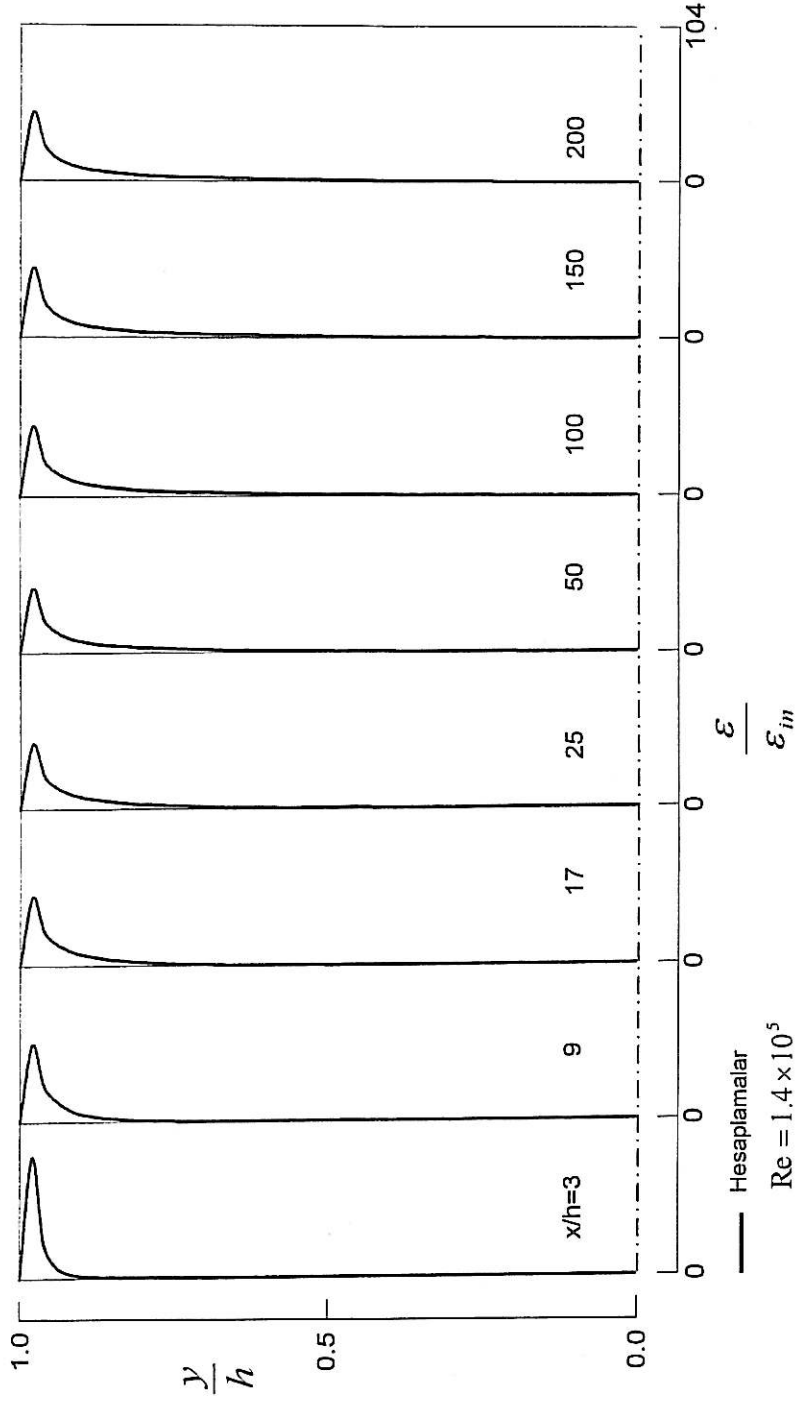
Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri Şekil 4.23'de gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ , girişte hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{in} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin gelişimini göstermektedir. Görüldüğü üzere kanalda akış geliştikçe türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı azalmaktadır.

Şekil 4.24' de Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal akışı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri $x/h=3$ 'den 200'e kadar 8 değişik akış yönü kesitlerinde gösterilmiştir. Şekilde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_e , kanal girişinde hesaplanan efektif viskozite değeri $\mu_{e,in}$ ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan efektif viskozite profillerinin gelişimini göstermektedir. Akış iki boyutlu kanal boyunca geliştikçe, efektif viskozite değeri artmaktadır.

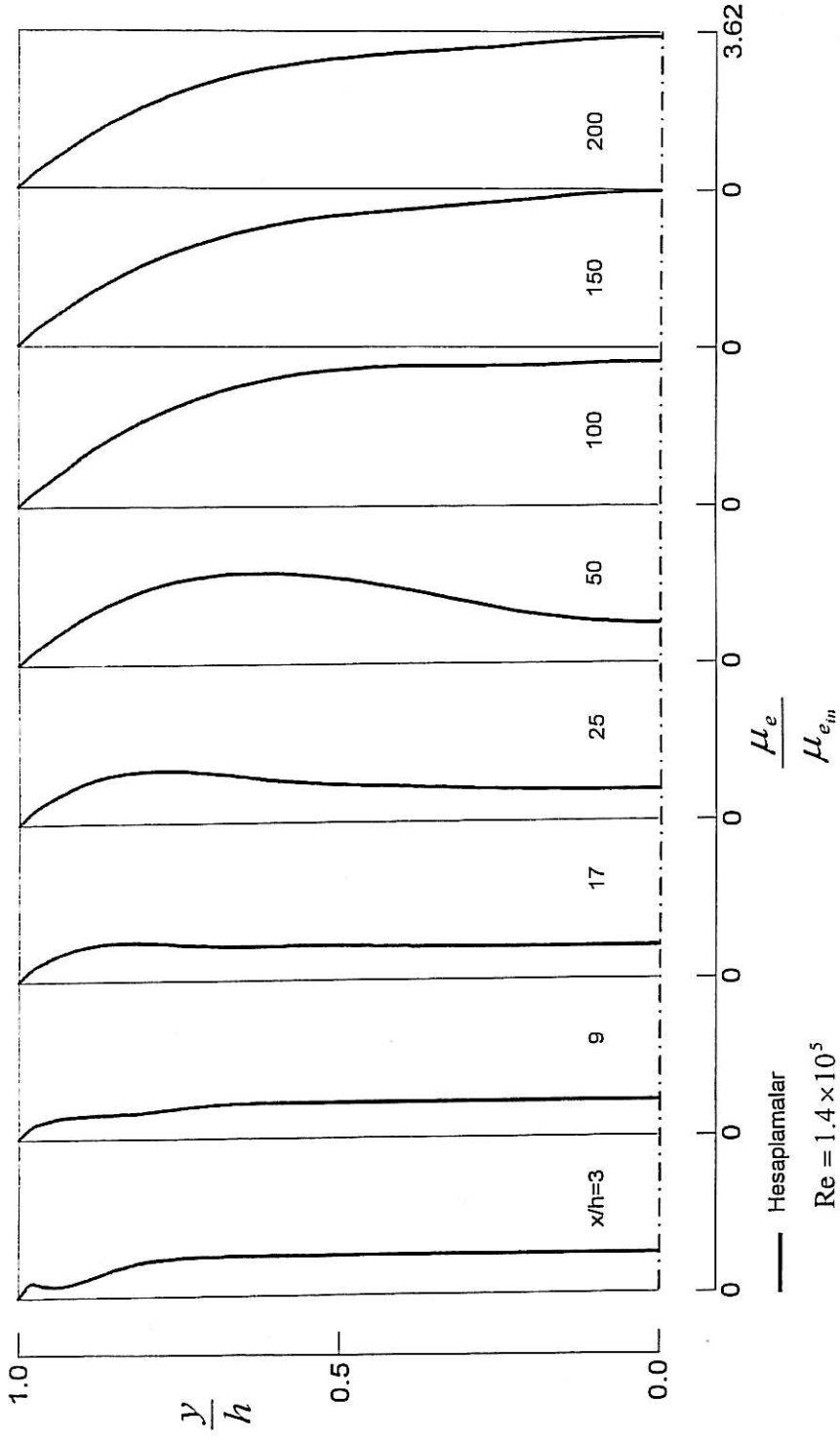
Şekil 4.25' de Byrne et al'ın (1969, 1970) kanal akışı için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} oranı cinsinden gösterilmektedir. Burada yerel cidar kayma gerilmesi τ_w , tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi τ_{wd} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Cidar kayma gerilmesi, tamamıyla gelişmiş değerine ilk olarak $x/4h=4.3$ eksenel kesitinde ulaşıldığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/4h=26.3$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra cidar kayma gerilmesinin değeri pratik olarak sabit kalmaktadır.



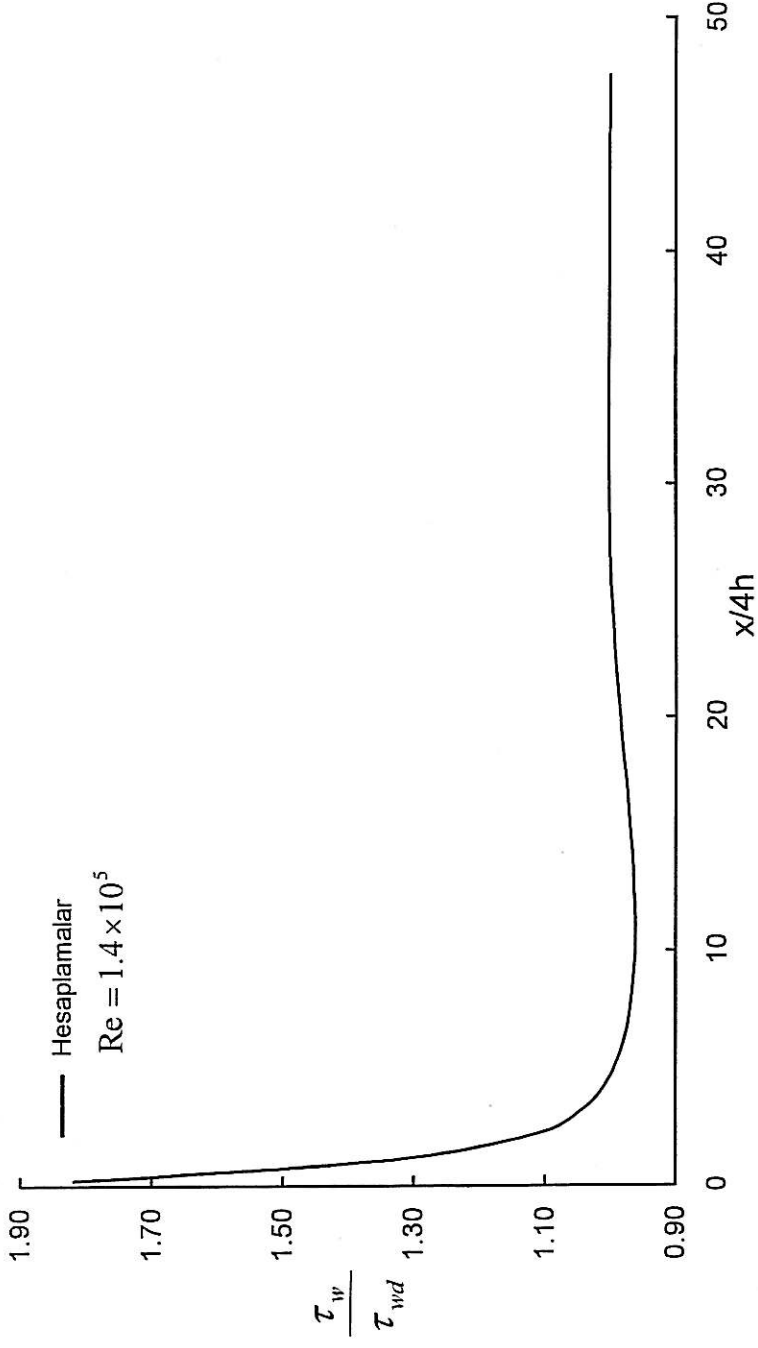
Şekil 4.22. Byrne et al'in (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.



Şekil 4.23. Byrne et al'ın (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



Şekil 4.24. Byrne et al'in (1969, 1970) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



Şekil 4.25. Byrne et al'in (1969, 1970) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.

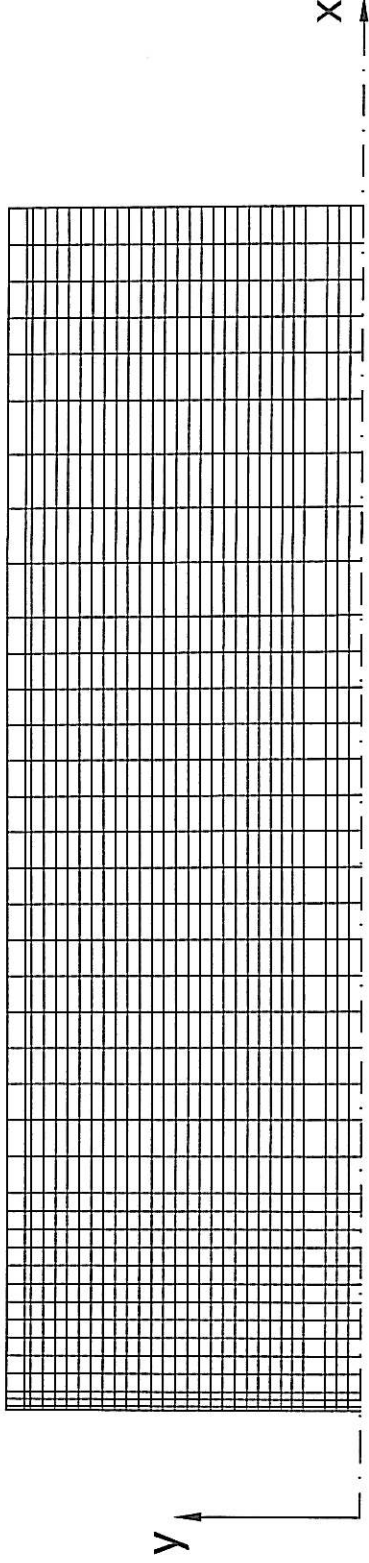
Breyer et al' ın (1993) deneysel ölçümleri bu çalışma için karşılaştırmaya esas teşkil etmek üzere dördüncü olarak seçilmiştir.

Breyer et al' ın (1993) kanal geometrisi; kanal uzunluğu $L=5$ m., kanalın genişliği $2h=0.03$ m' dir. Kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Ağ x- ve y- yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktalarından meydana gelmiştir. Başlangıçtaki bölgede ve kanal cidarına yakın kısımda ağ daha kesafetli oluşturulmuştur.

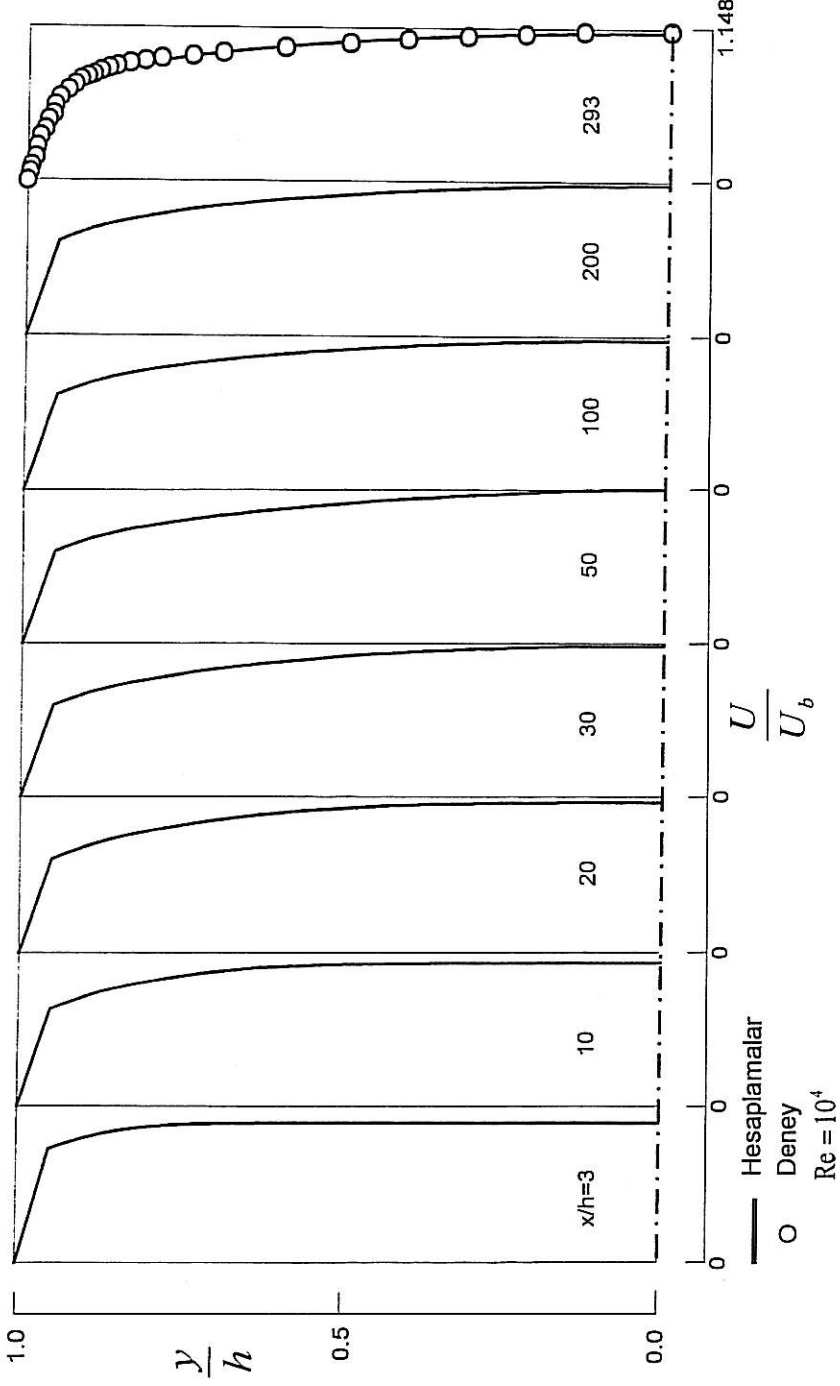
Şekil 4.27'de akış yönü hız profilleri kanalın girişinden çıkışına $x/h=3$ 'den 293'e kadar değişen 8 farklı akış yönü kesitinde $Re=10^4$ için hesaplanmış ve $x/h=293$ kesitinde Breyer et al' ın (1993) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı ölçülen ortalama hız U_b referans hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanalın simetri ekseninden ölçülen mesafedir. Reynolds sayısı U_c referans hızına ve kanalın genişliği olan $2h$ mesafesine dayanır. Yani, $Re=U_c 2h/\nu$ 'dür. Breyer et al' ın (1993) deneysel çalışmalarında ölçülen referans hızı $U_c=0.329166$ m/s, h ise 0.015 m.' dir. Şekil 4.28'de görüleceği üzere hesaplanan akış yönü hız profili Breyer et al' ın (1993) deneysel hız profili ile çok iyi bir uyum göstermektedir.

Şekil 4.29' da Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için U_c 'nin kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Burada; U_c kanalın simetri eksenindeki hız, U_b ortalama hız ile boyutsuzlaştırılmıştır.

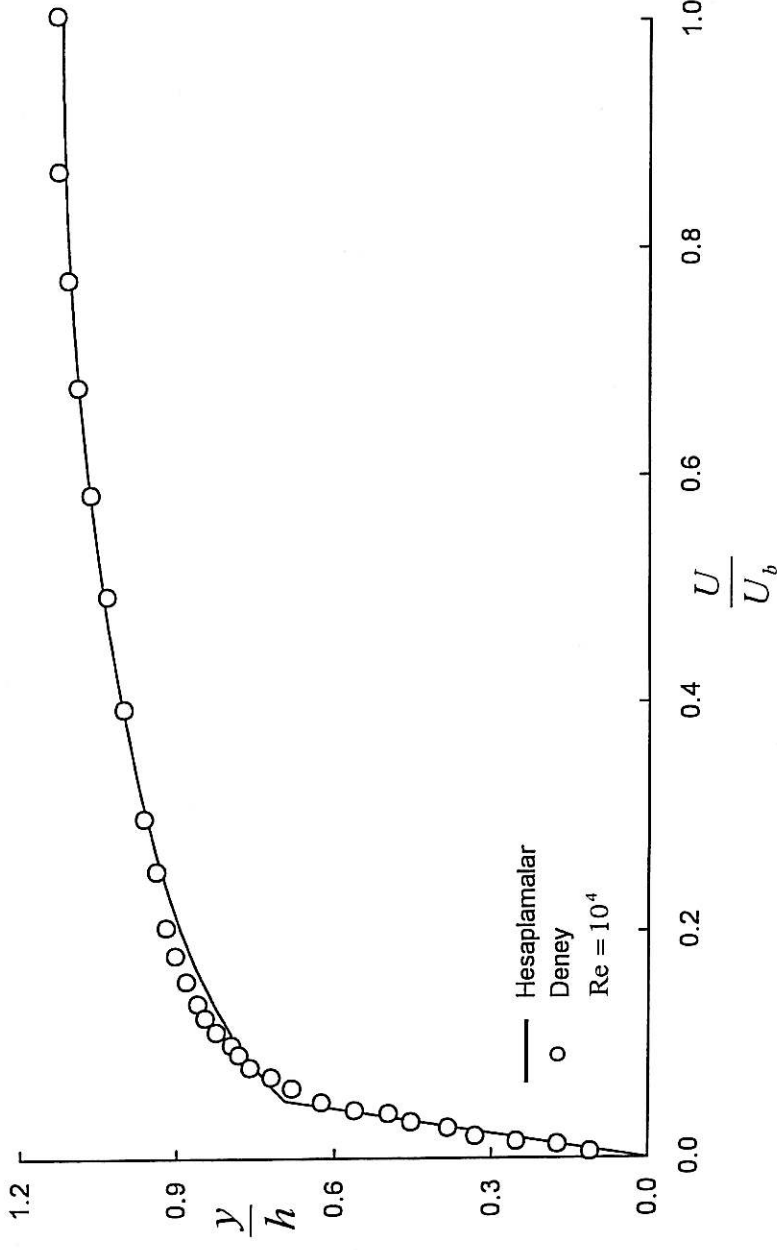
Şekil 4.30' da Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji profilleri U_b^2 ortalama hızın karesiyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekiller 8 farklı kesitte kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir.



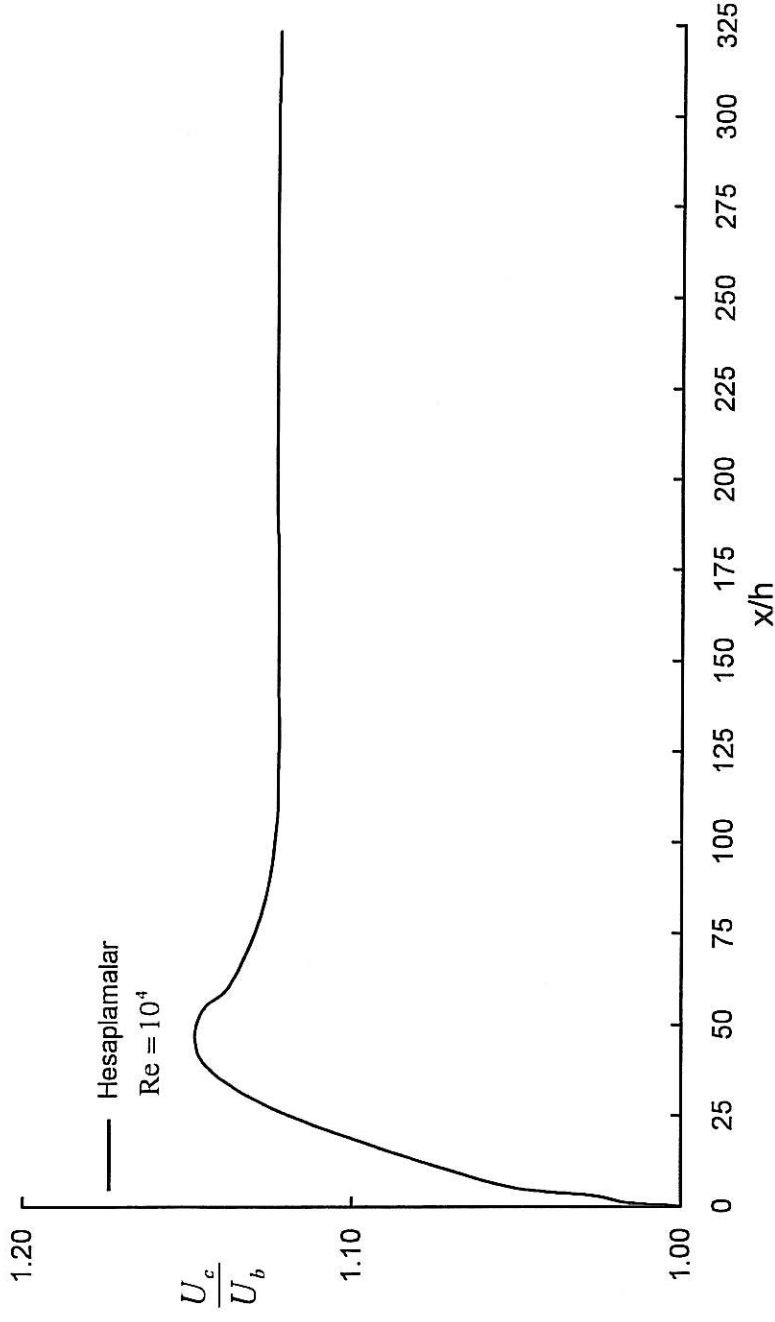
Şekil 4.26. Breyer et al' in (1993) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



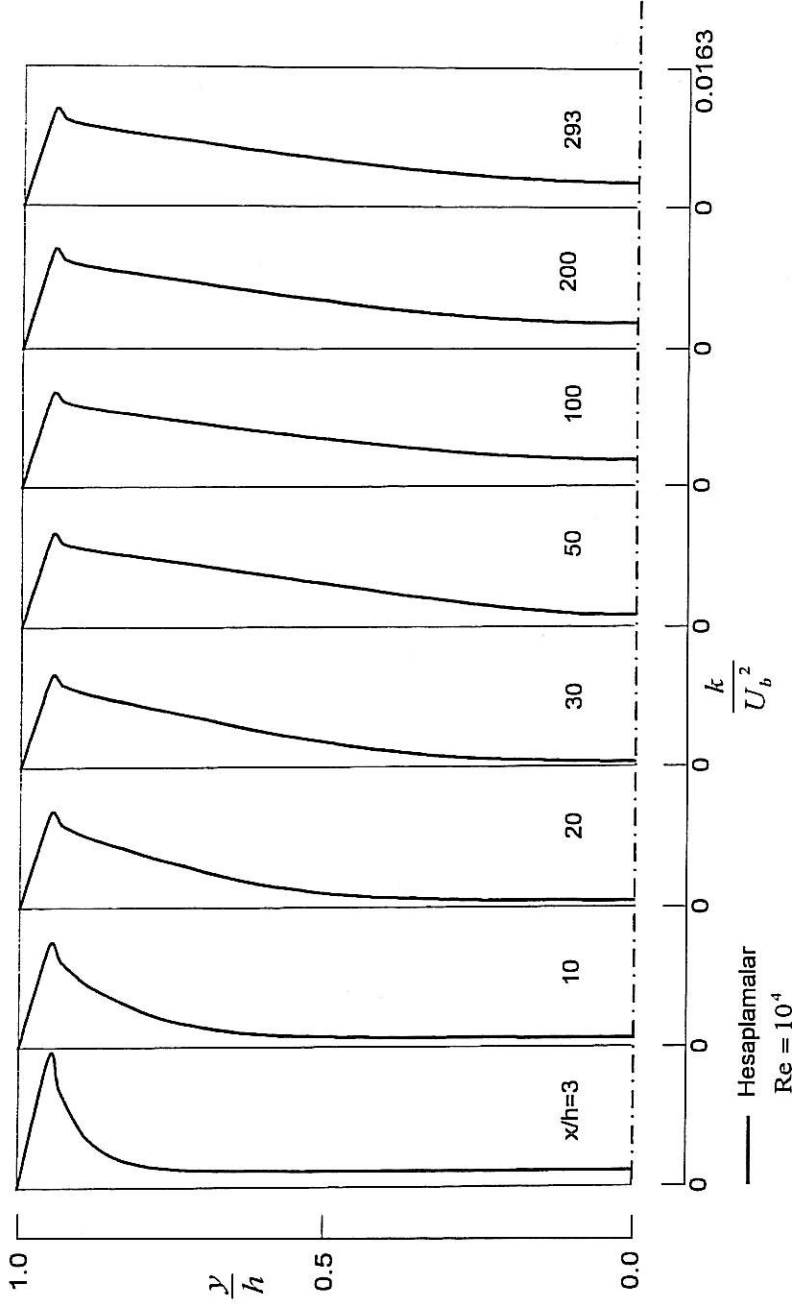
Şekil 4.27. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Breyer et al'ın (1993) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 4.28. Kanalda hesaplanan yatay hız profilinin $x/h=293$ kesitinde Breyer et al' in (1993) deneysel ölçümleriyile karşılaştırılması.



Şekil 4.29. Breyer et al' in (1993) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenli üzerindeki yatay hız değişimi



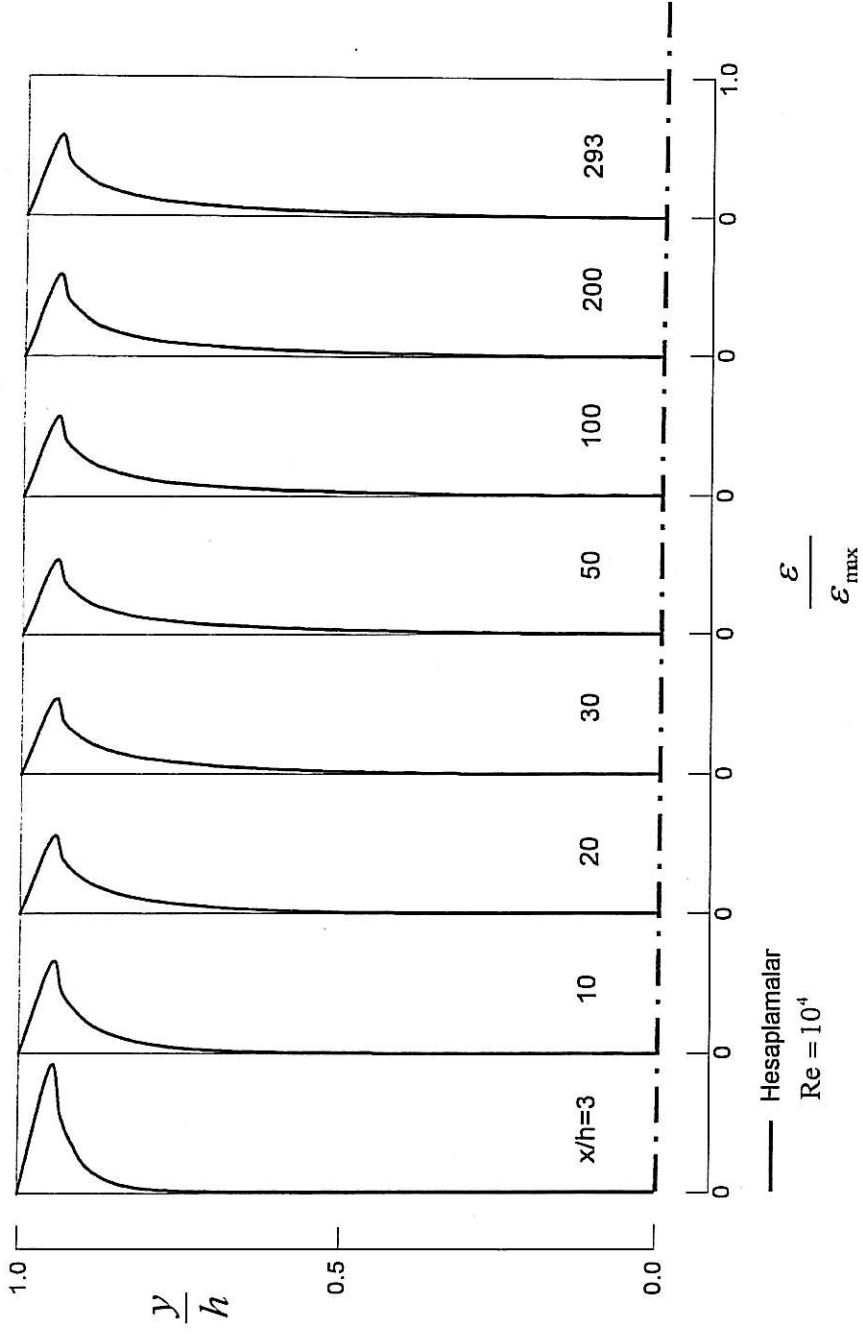
Şekil 4.30. Breyer et al' in (1993) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri.

Şekil 4.31 'de Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ , hesaplanan maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{\max} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin gelişimini göstermektedir. Görüldüğü üzere kanalda akış geliştikçe türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı azalmaktadır.

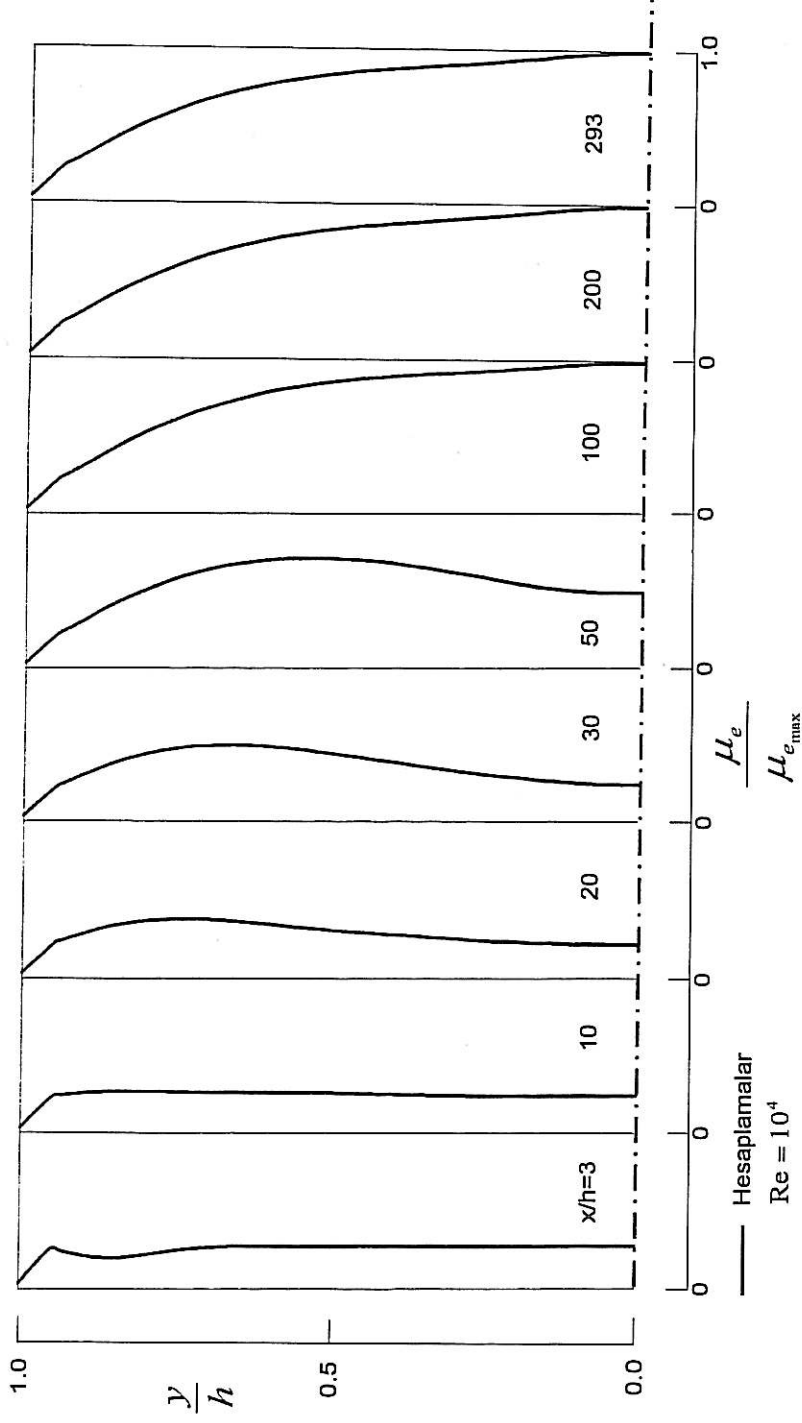
Şekil 4.32' de Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri $x/h=3$ 'den 293'e kadar 8 değişik akış yönü kesitlerinde gösterilmiştir. Şekilde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_e , hesaplanan maksimum efektif viskozite değeri $\mu_{e\max}$ ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan efektif viskozite profillerinin gelişimini göstermektedir. Akış iki boyutlu kanal boyunca geliştikçe, efektif viskozite değeri artmaktadır.

Cidar sürtünme katsayısının ($C_f=2\tau_w/\rho U_b^2$) kanal cidarı boyunca değişimi Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için Şekil 4.33'de gösterilmektedir. Hesaplamalar, cidar sürtünme katsayısının tamamıyla gelişmiş değerine, ilk olarak $x/h=20$ aksenal kesitinde ulaştığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra, tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=100$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değeri sabit kalmaktadır.

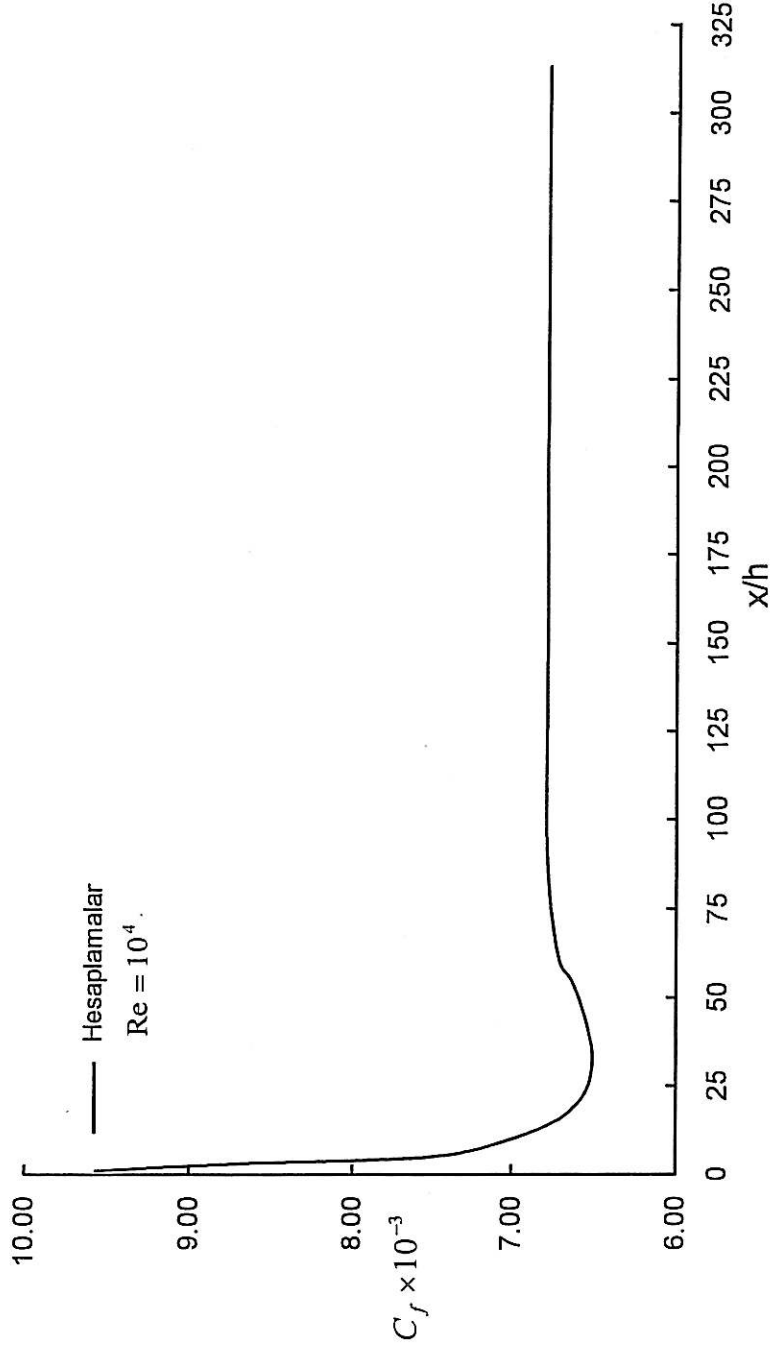
Şekil 4.34' de Breyer et al' ın (1993) kanal akışı için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} oranı cinsinden gösterilmektedir. Burada yerel cidar kayma gerilmesi τ_w , tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi τ_{wd} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Cidar kayma gerilmesi, tamamıyla gelişmiş değerine ilk olarak $x/h=20$ aksenal kesitinde ulaşıldığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=100$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra cidar kayma gerilmesinin değeri pratik olarak sabit kalmaktadır.



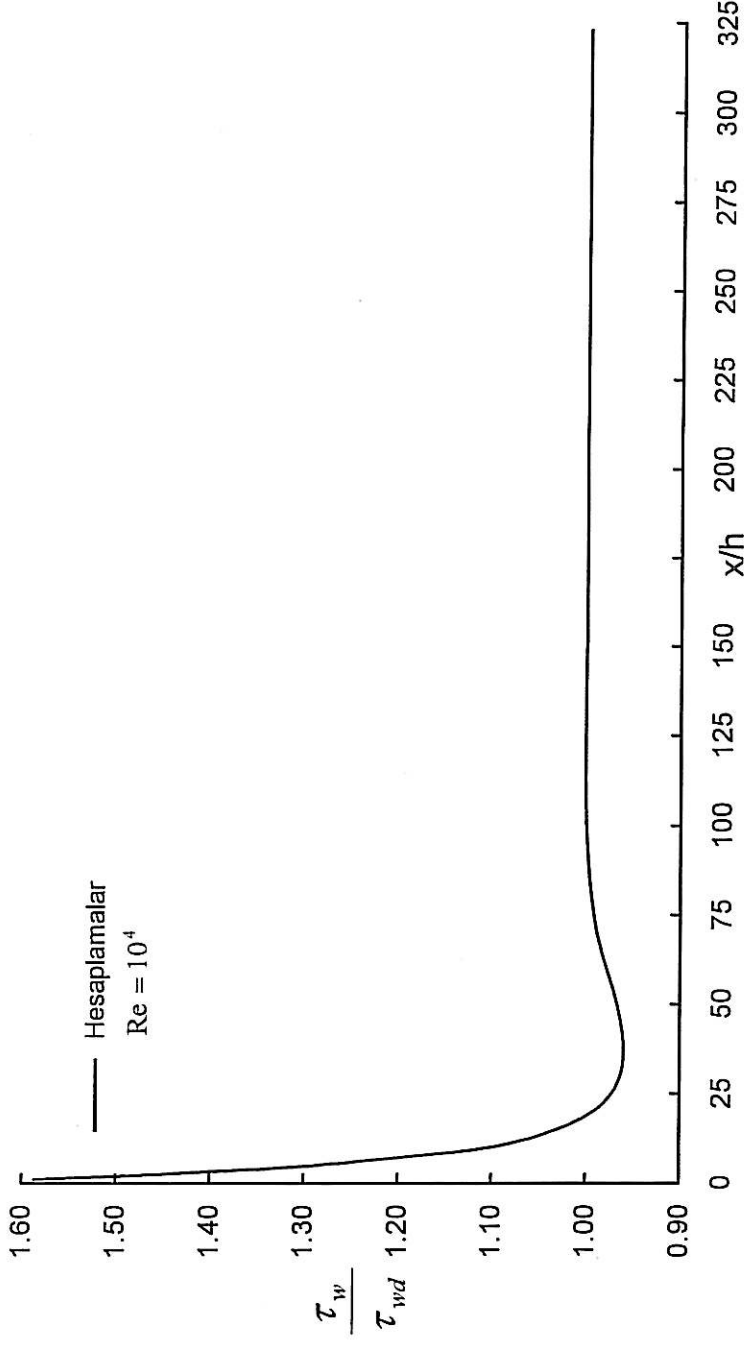
Şekil 4.31. Breyer et al' in (1993) kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



Şekil 4.32. Breyer et al' ın (1993) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



Şekil 4.33. Breyer et al' in (1993) kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 4.34. Breyer et al' in (1993) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.

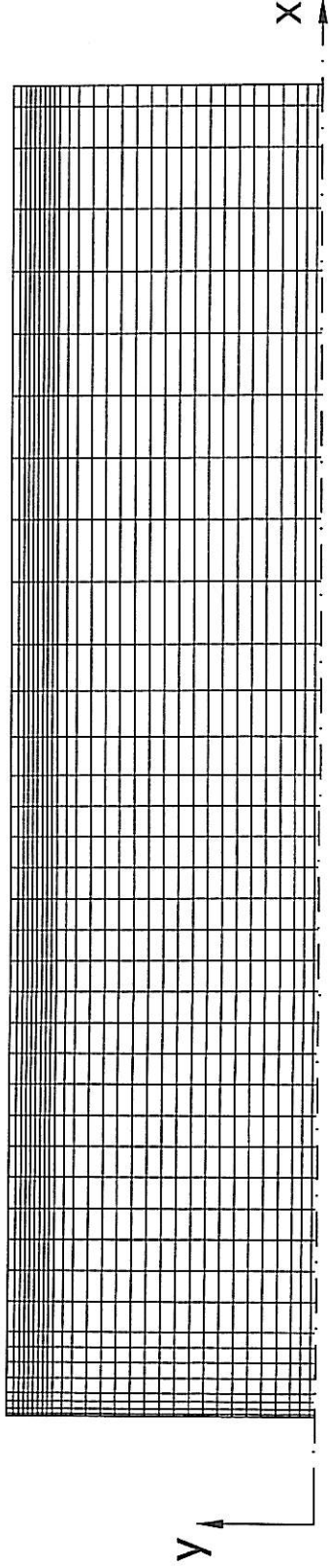
Laufer' ın (1951) deneysel ölçümleri bu çalışma için karşılaştırmaya esas teşkil etmek üzere beşinci olarak kabul edilmiştir.

Laufer' ın (1951) kanal geometrisi; kanal uzunluğu $L=5.461$ m., kanalın genişliği $2h=0.127$ m' dir. Kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Ağ x- ve y- yönlerinde sırasıyla 40×30 ağ noktalarından meydana gelmiştir. Başlangıçtaki bölgede ve kanal cidarına yakın kısımda ağ daha kesafetli oluşturulmuştur.

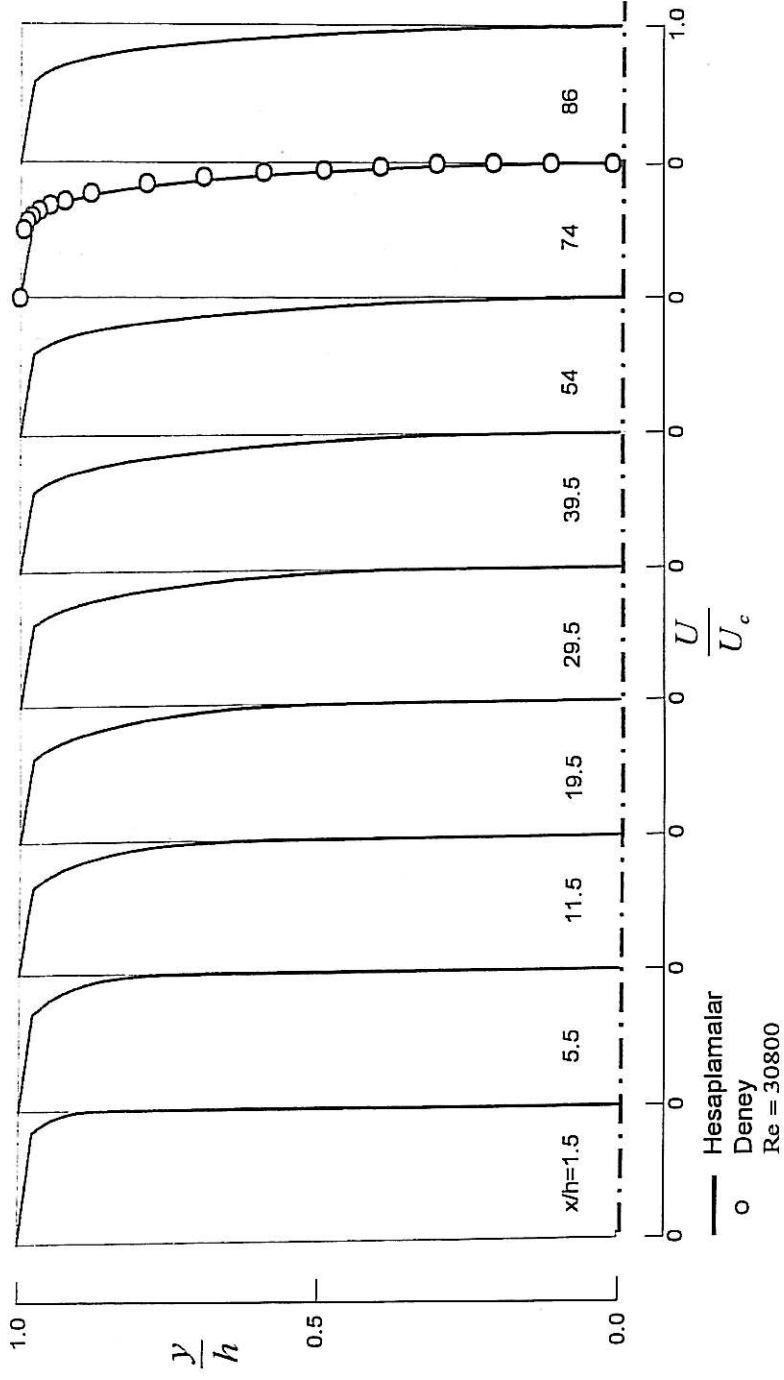
Şekil 4.36'da akış yönü hız profilleri kanalın girişinden çıkışına $x/h=1.5$ 'den 86 'ya kadar değişen 9 farklı akış yönü kesitinde $Re=30800$ için hesaplanmış ve $x/h=74$ kesitinde Laufer' ın (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı kanalın simetri eksenindeki hız U_c referans hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanalın simetri ekseninden ölçülen mesafedir. Reynolds sayısı U_c referans hızına ve kanalın yarı genişliği olan h mesafesine dayanır. Yani, $Re=U_c h/v$ 'dür. Laufer' ın (1951) deneysel çalışmalarında ölçülen referans hızı $U_c=7.07$ m/s, h ise 0.0635 m.' dir. Şekil 4.37'de görüleceği üzere hesaplanan akış yönü hız profili Laufer' ın (1951) deneysel hız profili ile mükemmel uyumdadır.

Şekil 4.38' de Laufer' ın (1951) kanal akışı için U_c 'nin kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Burada; U_c kanalın simetri eksenindeki hız, U_b ortalama hız ile boyutsuzlaştırılmıştır.

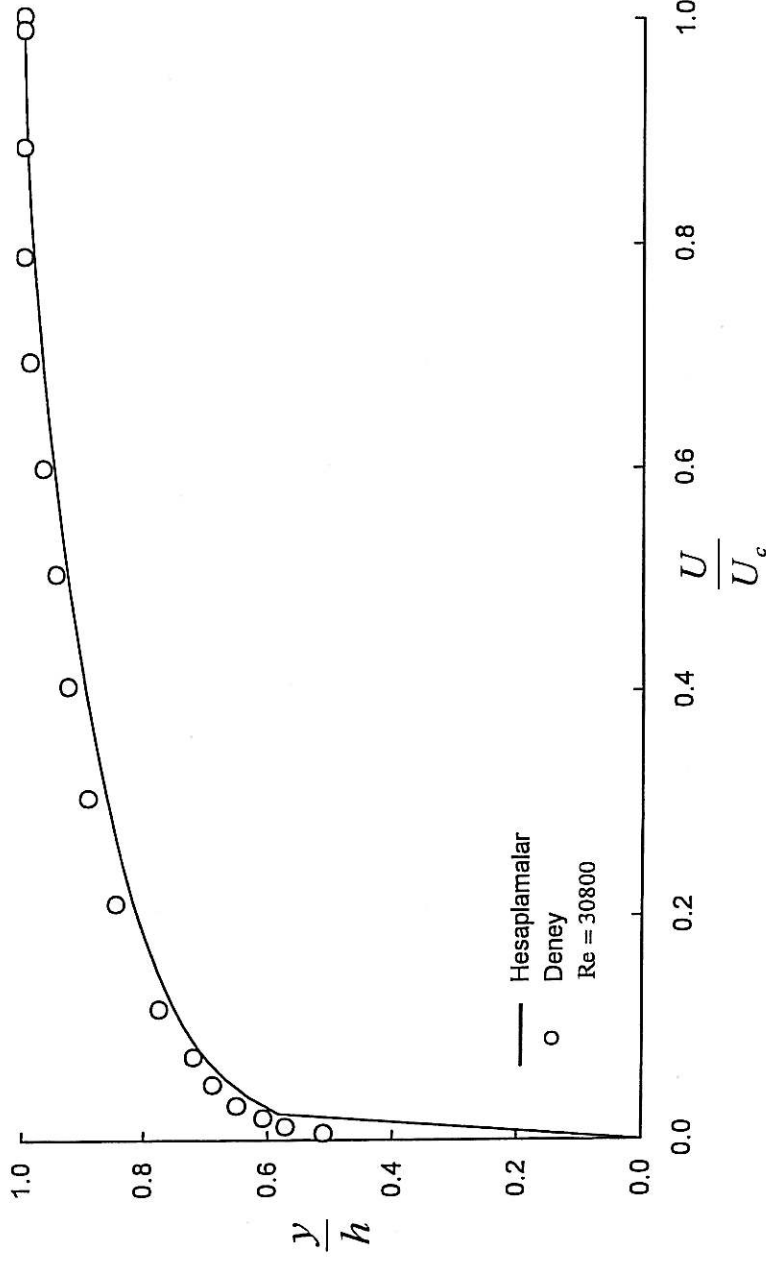
Şekil 4.39' da Laufer' ın (1951) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji profilleri, k_{max} hesaplanan maksimum türbülans kinetik enerji değeri ile boyutsuzlaştırılmış ve $x/h=74$ kesitinde Laufer' ın (1951) deneysel bulgularıyla mukayese edilmiştir. Bu şekil 9 farklı kesitte kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir. Şekil 4.40' ta görüldüğü üzere $x/h=74$ kesiti için hesaplanan türbülans kinetik enerji profili ile Laufer' ın (1951) deneysel türbülans kinetik enerji profili aynı trendi göstermektedir.



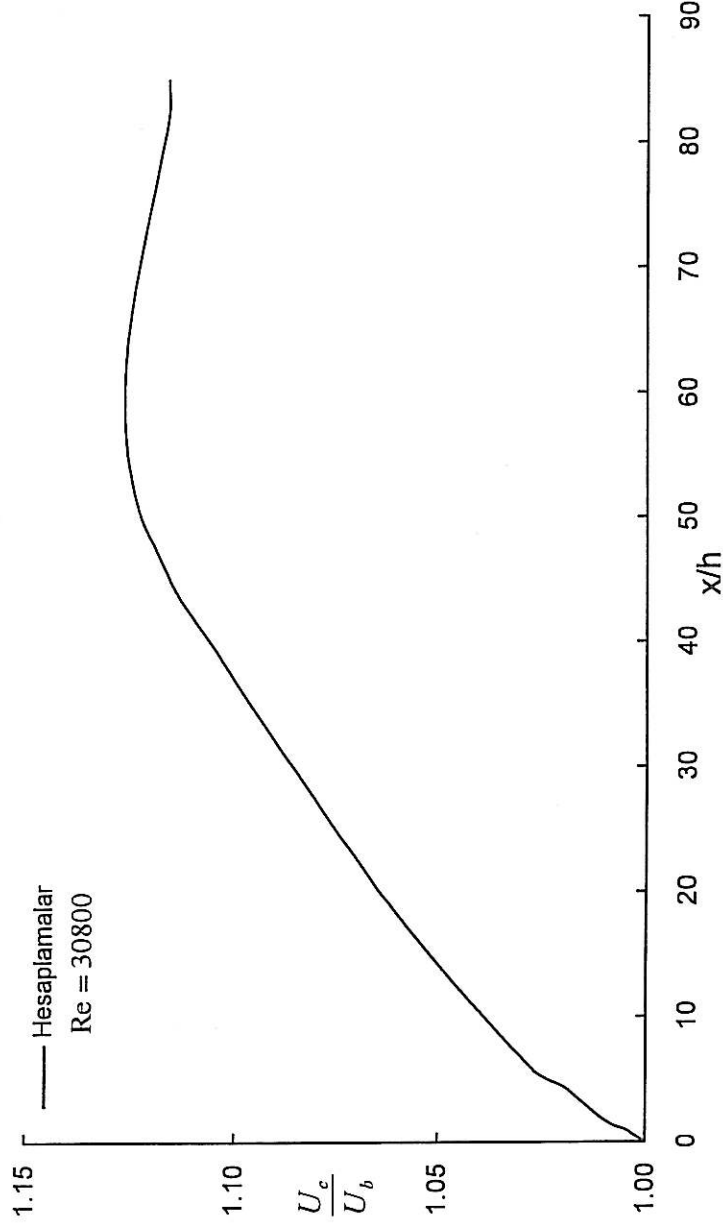
Şekil 4.35. Laufer' in (1951) kanal geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



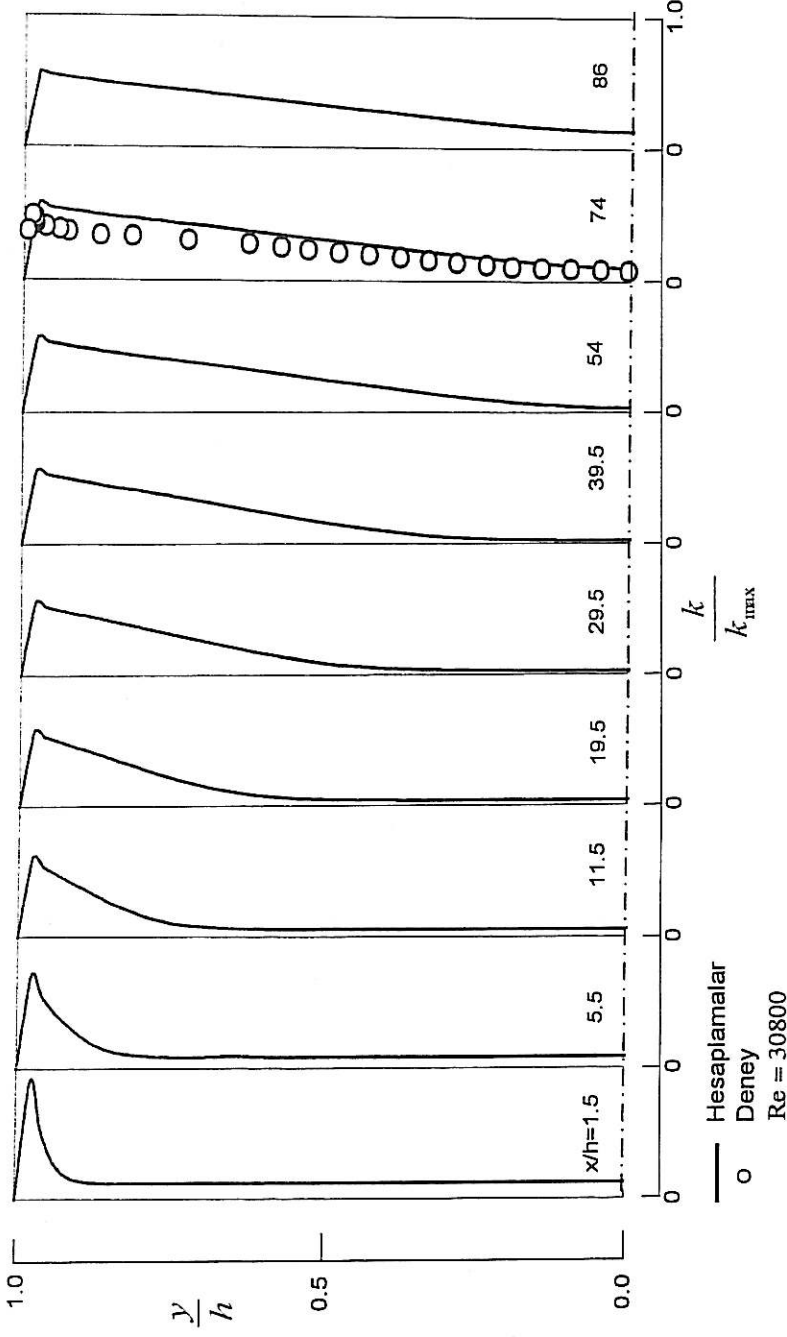
Şekil 4.36. Kanal boyunca hesaplanan akış yönü hız profillerinin Laufer' in (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



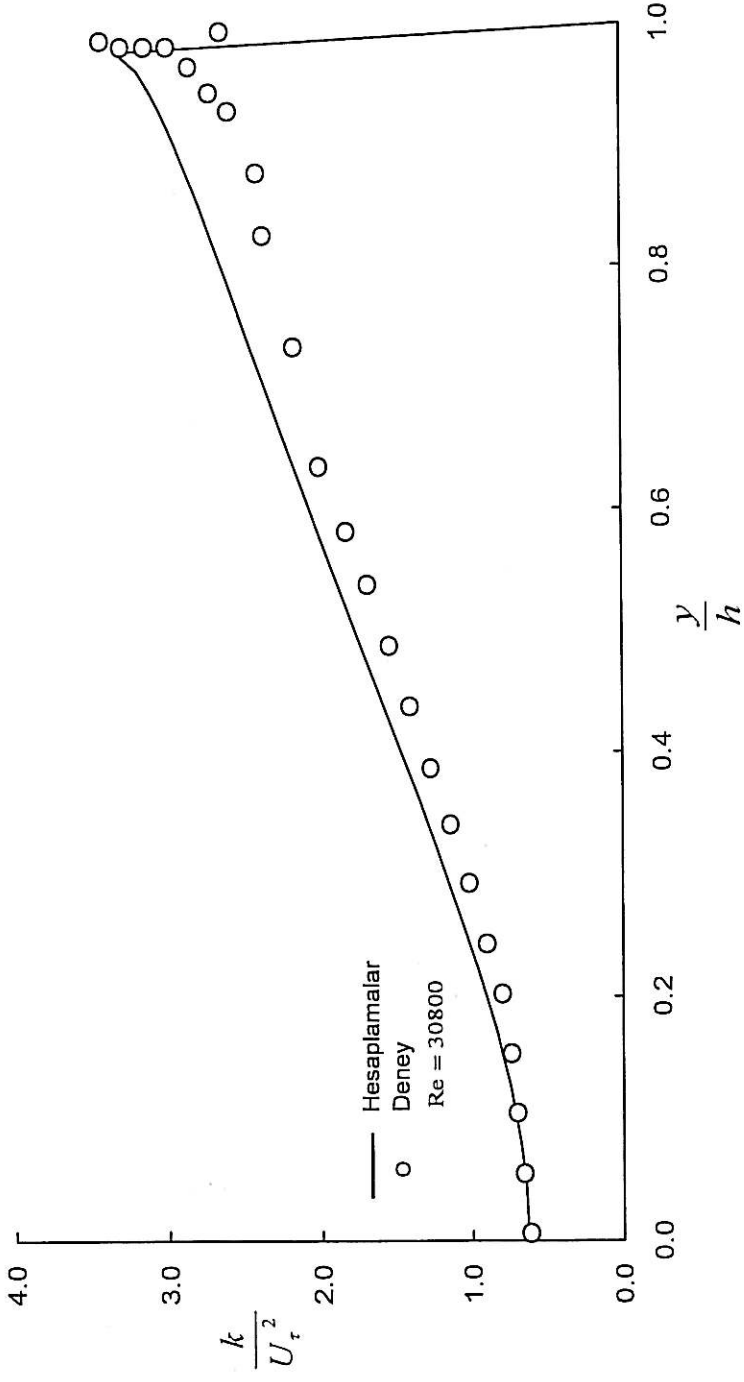
Şekil 4.37. Re=30800 için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan yatay hız profilinin Laufer' in (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 4.38. Laufer' in (1951) kanalı boyunca hesaplanan kanal simetri eksenini üzerindeki yatay hız değişimi.



Şekil 4.39. Kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin Laufer' in (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması .



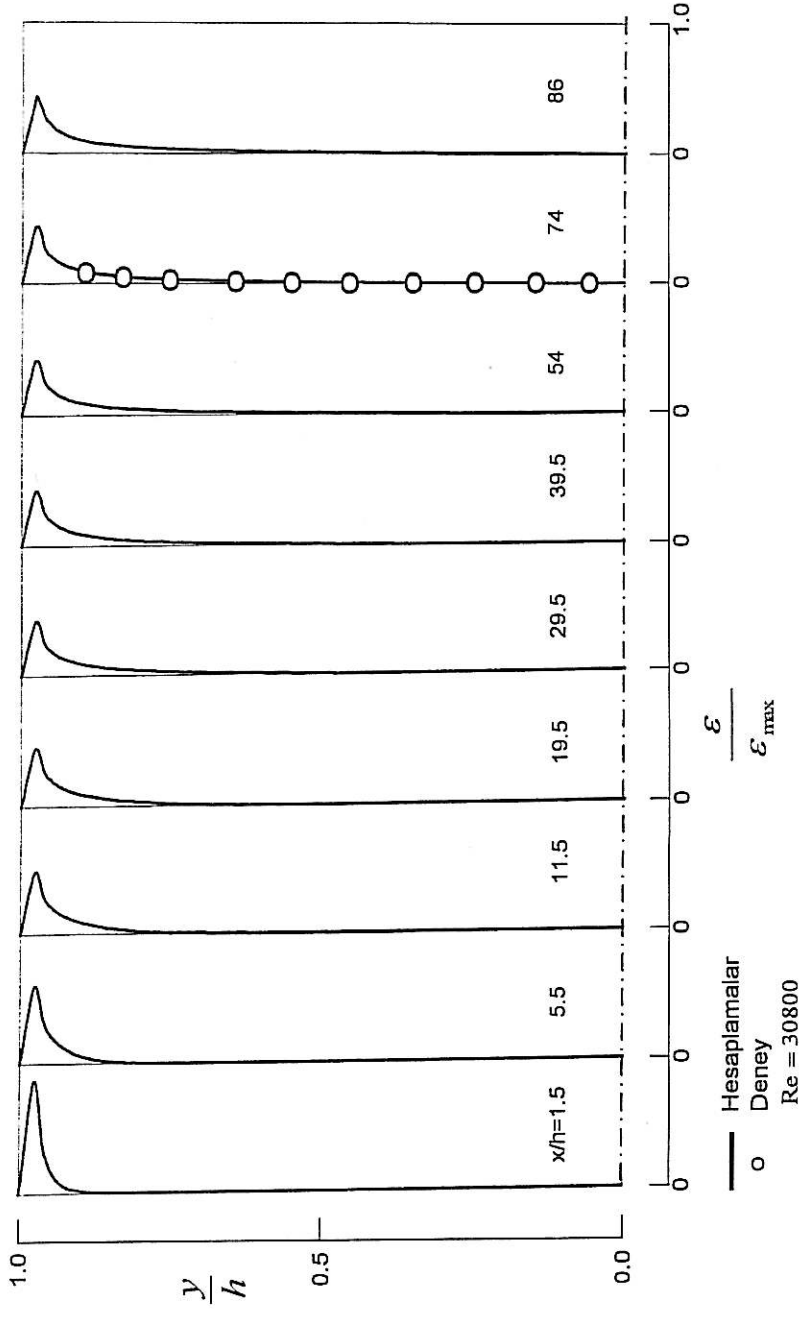
Şekil 4.40. $Re=30800$ için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profiline Laufer' in (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

Laufer' ın (1951) kanal akışı için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri Şekil 4.41'de gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ , hesaplanan maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{max} ile boyutsuzlaştırılmış ve $x/h=74$ kesitinde Laufer' ın (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılmaktadır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin gelişimini göstermektedir. Şekil 4.42'de görüldüğü üzere $x/h=74$ kesitinde hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profili ile Laufer' ın (1951) deneysel türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profili arasında çok iyi bir uyum gözlenmektedir.

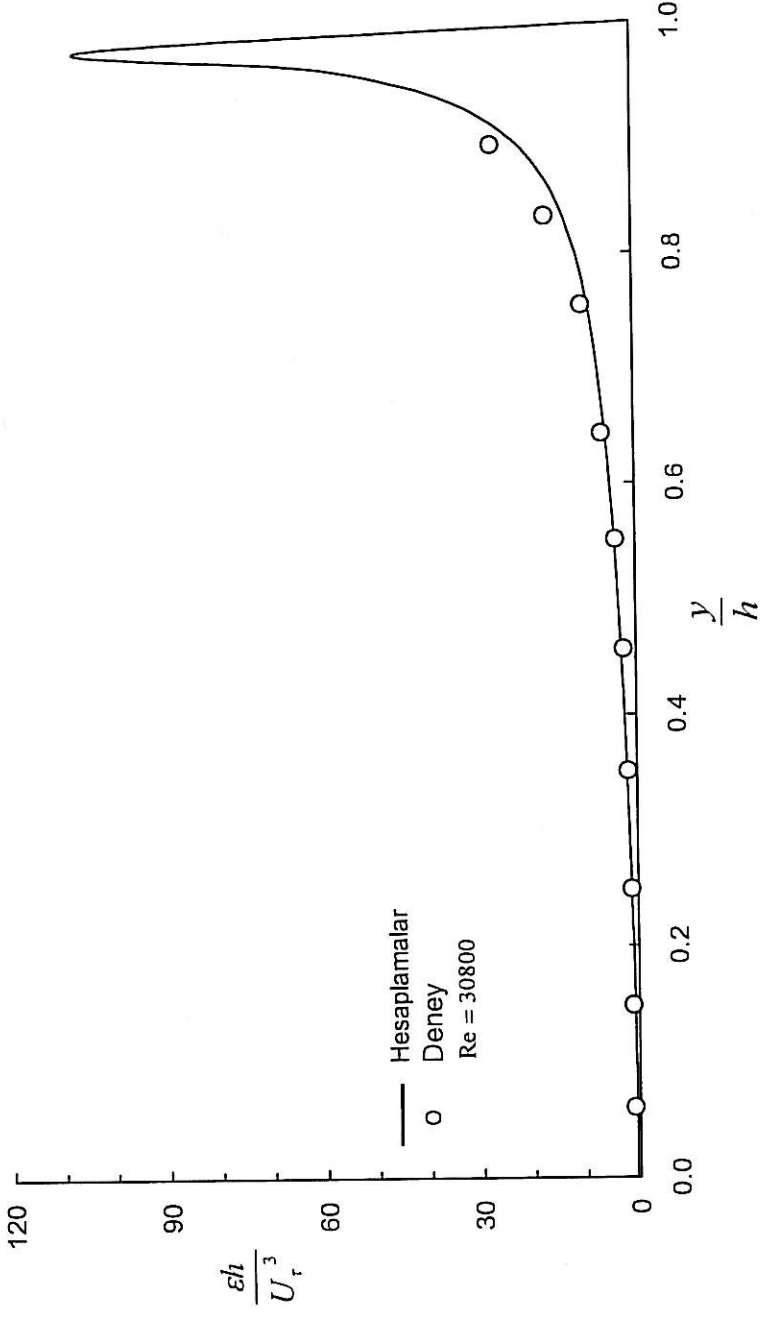
Şekil 4.43' de Laufer' ın (1951) kanal akışı için hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri $x/h=1.5$ 'den 86'ya kadar 9 değişik akış yönü kesitlerinde gösterilmiştir. Şekilde hesaplanan efektif viskozite değeri μ_e , kanal için hesaplanan maksimum efektif viskozite değeri μ_{emax} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekil kanal boyunca hesaplanan efektif viskozite profillerinin gelişimini göstermektedir. Akış iki boyutlu kanal boyunca geliştikçe, efektif viskozite değeri artmaktadır.

Şekil 4.44' te Laufer' ın (1951) kanal akışı için hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f=2\tau_w/\rho U_b^2$) kanal cidarı boyunca değişimi gösterilmiştir. Burada; τ_w cidar kayma gerilmesi, ρ akışkanın yoğunluğu, U_b ortalama hızı göstermektedir. Hesaplamalar, cidar sürtünme katsayısının tamamıyla gelişmiş değerine, ilk olarak $x/h=27.5$ aksenal kesitinde ulaştığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra, tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=66$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra, hesaplanan cidar sürtünme katsayısının değeri sabit kalmaktadır.

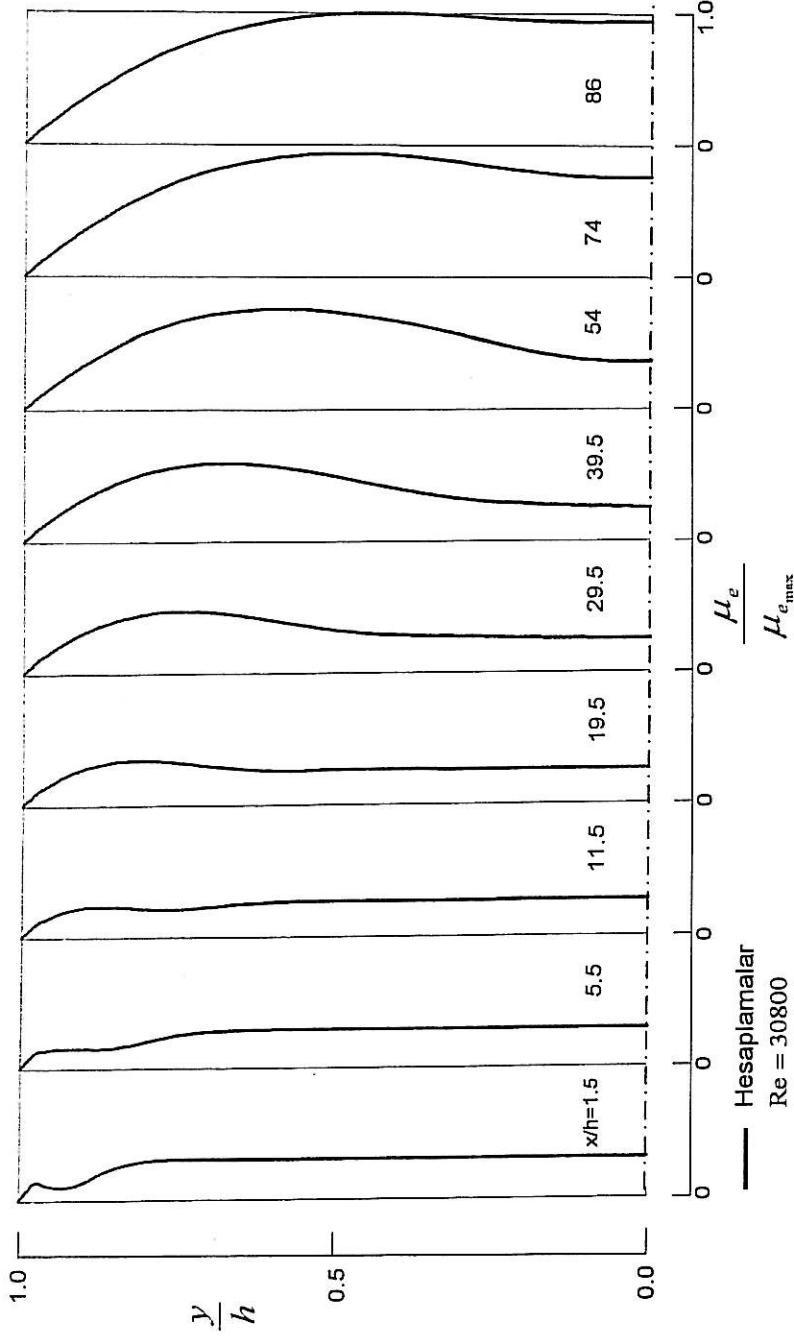
Şekil 4.45' de Laufer' ın (1951) kanal akışı için hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} oranı cinsinden gösterilmektedir. Burada yerel cidar kayma gerilmesi τ_w , tamamıyla gelişmiş cidar kayma gerilmesi τ_{wd} ile boyutsuzlaştırılmıştır. Cidar kayma gerilmesi, tamamıyla gelişmiş değerine ilk olarak $x/h=27.5$ aksenal kesitinde ulaşıldığını göstermektedir. Küçük bir düşmeden sonra tamamıyla gelişmiş değere takriben $x/h=66$ kesitinde tekrar erişilmiştir. Bu kesitten sonra cidar kayma gerilmesinin değeri pratik olarak sabit kalmaktadır.



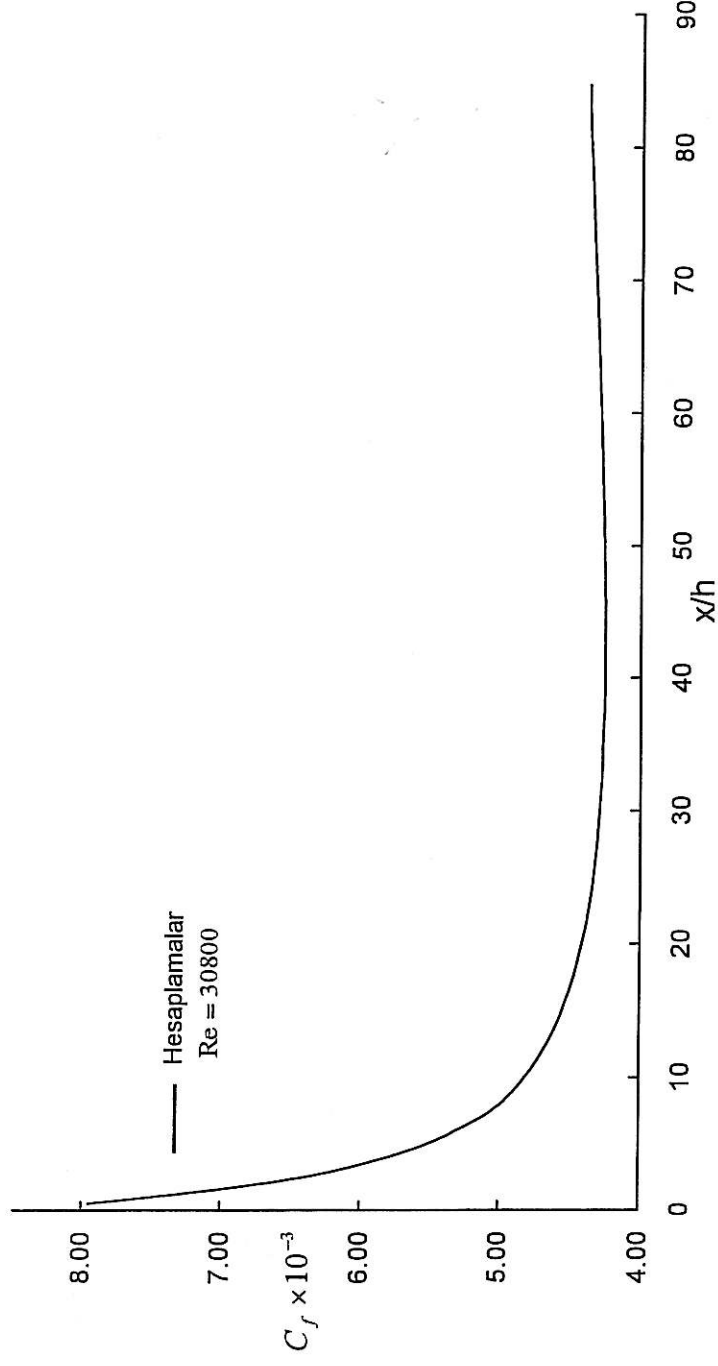
Şekil 4.41. Kanal boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profillerinin Laufer' in (1951) deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



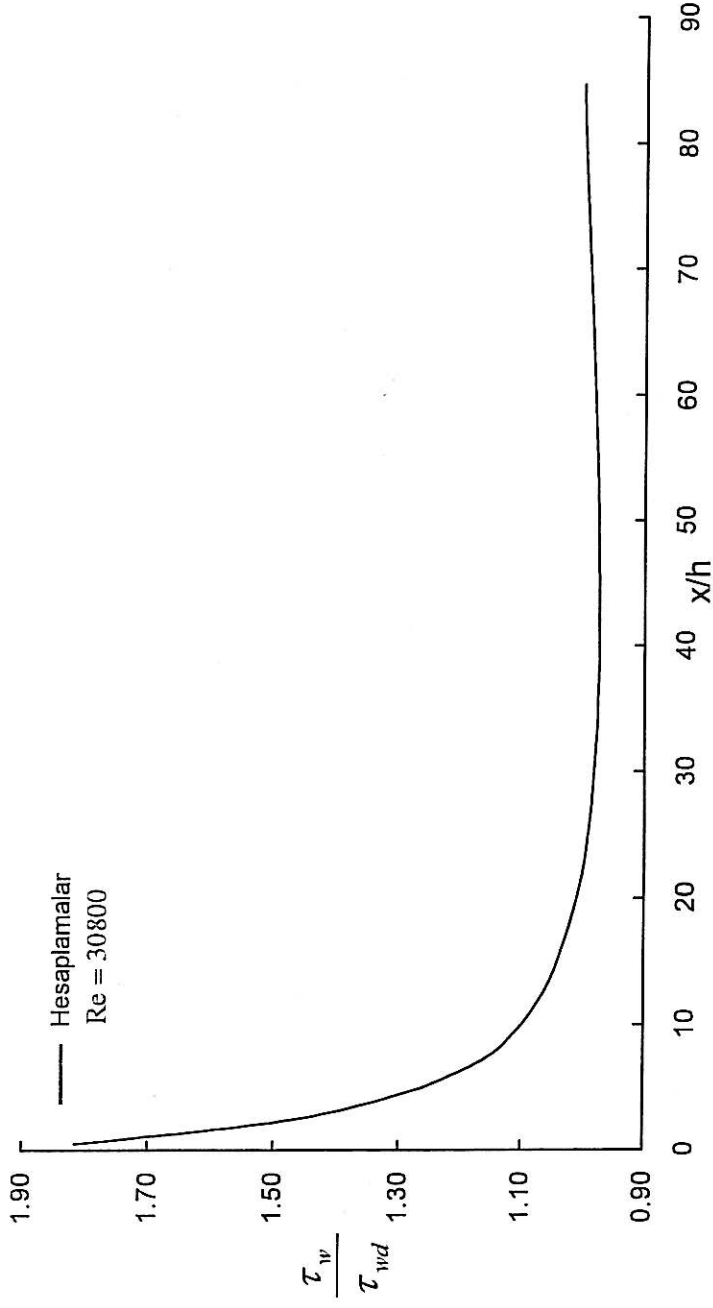
Şekil 4.42. Re=30800 için $x/h=74$ kesitinde hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilinin Laufer' in (1951) deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.



Şekil 4.43. Laufer' in (1951) kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



Şekil 4.44. Laufer' in (1951) kanal cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısı değişimi.



Şekil 4.45. Laufer' in (1951) kanalında hesaplanan boyutsuz cidar kayma gerilmesinin kanal boyunca değişimi.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılarak paralel iki levha arasında gelişen türbülanslı kanal akımları için çeşitli Reynolds sayılarında sayısal hesaplamalar sunulmuştur. Geleneksel sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar (1980) ve Spalding (1981)'in SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Beş farklı iki boyutlu kanal geometrisi için standart k- ϵ türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. k- ϵ türbülans modeli ile hesaplanan; yerel akış yönü hızı, cidar sürtünme katsayısı, türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri literatürde bildirilen çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Bundan başka kanal akışları için efektif viskozite profilleri ve cidar kayma gerilmesi dağılımı hesapları yapılmıştır.

Kanalın yarı genişliği boyunca hesaplanan yerel akış yönü hızı, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve cidar sürtünme katsayısı dağılımları, literatürde bildirilen deneysel bulgularla genel olarak oldukça iyi uyumdadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmadi, G., and Chowdhury, S.J., 1991, A Rate-dependent algebraic stress model for turbulence, *Appl. Math. Modelling*, 15, 516-524.
- Bradshaw, P., Dean, R.B., and McEligot, D.M., 1973, Calculation of interacting turbulent shear layers: Duct flow, *ASME J. Fluids Engng*, 95, 214-220.
- Breyer, H., Krieger, H., Schmidt, U., and Staude, W., 1993, The measurement of velocity gradients in fluid flow by laser light scattering, part 1: Mean gradients, *Experiments in Fluids*, 15, 200-208.
- Byrne, J., Hatton, A.P., and Marriot, P., 1969, 1970, Turbulent flow in the entrance region of a parallel wall passage, *Proc. Instn. Mech. Engng.*, 184, 697.
- Clark, J.A., 1968, A study of incompressible turbulent boundary layers in channel flow, 1968, *J. Basic Eng.*, 90, 455-468.
- Eckelmann, H., 1974, The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, 65, 439-459.
- Karasu, T., Choudhury, P.R., ve Gerstein, M., 1985, Upwind ve Hybrid diskritizasyon metodları ile $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak bazı türbülanslı akışların hesaplanması, *Doğa Bilim Dergisi, Seri B, Cilt 9*, 218-234.
- Karasu, T., Choudhury, P.R., and Gerstein, M., 1988, Prediction of some turbulent flows using upwind and hybrid discretisation schemes and the two-equation turbulence model, *proc. 4th Miami international symposium on multi-phase transport and particulate phenomena, Miami Beach, Florida, U.S.A.*, 5, 105-124.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karasu, T., 1993, Numerical computation of turbulent flow in pipes, Doğa-Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, Vol. 17, 29-38.
- Karasu, T., 1995, Numerical prediction of turbulent flow in circular pipes, 9th. International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Atlanta, Georgia, U.S.A., 9, 1329-1339.
- Kim, J., Moin, P., and Moser, R., 1987, Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, J. Fluid Mech., 177, 133-166.
- Kim, S.W., 1990, Near-Wall turbulence model and its application to fully developed turbulent channel and pipe flows, Numerical Heat Transfer, 17, Part B, 101-122.
- Kreplin, H.P., and Eckelmann, H., 1979, Behaviour of the three fluctuating velocity components in the wall region of a turbulent channel flow, Phys. Fluids, 22, 1233-1239.
- Laufer, J., 1951, Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel, NACA Report 1053.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., 3, 269-289.
- Moin, P., and Kim, J., 1982, Numerical investigation of turbulent channel flow, J. Fluid Mech., 118, 341-377.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Patankar, S.V., and Spalding, D.B., 1972, A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 1787-1806.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington DC, Chapters 5 and 6, 79-138.
- Patel, V.C., and Head, M.R., 1969, Some observations on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows, *J. Fluid Mechanics*, 38, 181-201.
- Spalding D.B., 1981, A general-purpose computer program for multi-dimensional one and two phase flow, *Math. Comput. Simulation*, XXIII, 267-276.
- Stephenson, P.L., 1976, A theoretical study of heat transfer in two-dimensional turbulent flow in a circular pipe and between parallel and diverging plates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19, 413-423.
- Wardana, I.N.G., Ueda, T., Mizomoto, M., 1992, Structure of turbulent two-dimensional channel flow with strongly heated wall, *Experiments in Fluids*, 13, 17-25.