

# KAPALI TÜRBÜLANSLI ÇEVİRİTİLİ AKIŞLARIN MODELLEMESİ VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

*Numerical Investigation and Modelling of Confined Turbulent Recirculating Flows*

Tahir KARASU

## ÖZET

Bu orijinal araştırmada, dairesel kesitli ani genişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan ve eksenel simetrik kapalı türbülanslı çevrıntili akışların modellenmesi ve sayısal araştırılması için üç farklı Reynolds sayılarında kapsamlı hesaplamalar yapılmıştır. Hibrit yöntemiyle sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeli modellenmesiyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Dairesel kesitli ani genişlemeli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, simetri eksenine boyunca eksenel hızın değişimi, geri akışın geometrik yeri, üst cidar boyunca cidar statik-basınç katsayısının değişimi, üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı ile üst cidar sürtünme katsayısının değişimi için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Sayısal hesaplamaların sonuçları çeşitli deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Türbülanslı çevrıntili akışlar,  $k-\varepsilon$  türbülans modeli, Hesaplamalar.

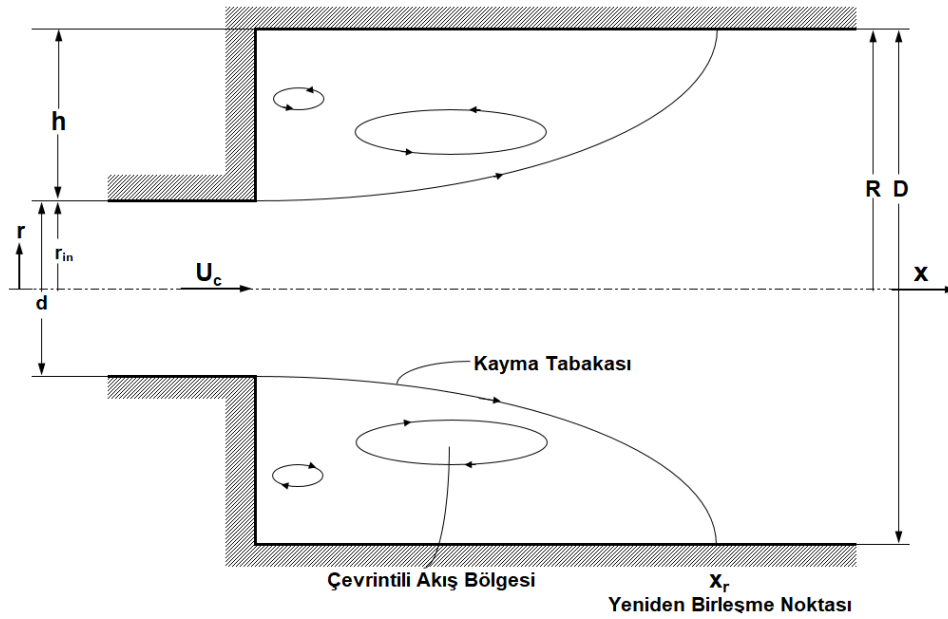
## ABSTRACT

This original research work presents the results of an extensive study of numerical investigation and modelling of steady, incompressible, and axisymmetric confined turbulent recirculating flows in circular-sectioned sudden expansion pipes at three different Reynolds numbers. Employing the 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 solution of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall-functions are employed. Numerical predictions for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, axial variation of centre-line velocity, locus of flow reversal, wall static-pressure coefficient, wall-shear stress and friction coefficient distributions along top wall of the axisymmetric sudden expansion pipe flow configuration are presented and compared with various experimental measurements. The results of numerical predictions show generally good agreement with various experimental data.

**Key Words:** Turbulent recirculating flows,  $k-\varepsilon$  turbulence model, Predictions.

## 1. GİRİŞ

Eksenel simetrik ani genişlemeli bir boruda aşağı akıştaki türbülanslı akış alanı ayrılmı, çevrıntili ve yeniden birleşmeli akış olarak tanımlanan çok karmaşık bir olaydır. Şekil 1’de gösterildiği üzere, böyle bir akış alanı ayırıcı bir kayma tabakası yüzeyi ile biri çevrıntili akış bölgesi, diğeri ise ana akış bölgesi olmak üzere iki akış bölgesine ayrılabilir. Ayırıcı kayma tabakası yüzeyinin ani genişlemeli boru cidarına çarptığı noktaya yeniden birleşme noktası adı verilir. Çevrıntili akış bölgesindeki yüksek ters basınç gradyanı türbülans seviyesi ile istikrarsızlığı arttırarak geri akışa neden olmaktadır. Akış yapışma noktası civarında ve çevrıntili akış bölgesinde yaratılan anaförler yüksek yoğunlukta bir türbülans kaynağı olarak algılanabilir. Müteakip taşınım, yayılım ve türbülanslı anaförlerin zayıflaması zaman ortalama akış özellikleri üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Dairesel kesitli ani genişlemeli borularda eksenel simetrik kapalı türbülanslı çevrıntili akış, ısı değıştiricileri, karışım teçhizatları, iklimlendirme kanalları, hidrolik ve fluidik düzenekler ile yanma odaları gibi pek çok sayıda önemli mühendislik uygulamalarıyla ilgilidir. Literatürde dairese kesitli ani genişlemeli borularda eksenel simetrik karmaşık kapalı türbülanslı çevrıntili akış üzerine pek çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. En çok ilgi çekici çalışmalar arasında olanlar [1-45] çalışmalarıdır. Bu araştırmanın ana amacı, dairese kesitli ani genişlemeli borularda, standart  $k-\epsilon$  türbülans modelini [46] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, sürekli, sıkıştırılmayan, eksenel simetrik karmaşık kapalı türbülanslı çevrıntili akışların sayısal hesaplamasını yapmak ve sayısal hesaplamaların sonuçlarını Durrett ve diğeri [3], Chaturvedi [4] ile Favalo ve diğeri [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırmak ve incelemektir.



Şekil 1. Eksenel simetrik silindirik koordinat sistemi ve ani genişlemeli boru akış geometrisi.

## 2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

### 2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1’e ilişkin olarak, dairese kesitli ani genişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan ve eksenel simetrik karmaşık kapalı türbülanslı çevrıntili akışın modellenmesi ve sayısal araştırılmasında kullanılan matematiksel ve fiziksel model, akışı yöneten hareket denklemlerinin türbülans modeli denklemleriyle beraber aynı anda çözümünü gerektirmektedir. Süreklilik, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı korunumunu gösteren taşınım denklemleri, sürekli durum ve eksenel simetrik silindirik koordinat sisteminde genel bir diferansiyel denklem halinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

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

Burada,  $\phi$ ;  $u$ ,  $v$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  bağımlı değişkenleri göstermektedir.  $u$  ve  $v$  değişkenleri aksel ve radyal hız bileşenleridir.  $k$  ve  $\varepsilon$  sırasıyla türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıdır.  $\Gamma_{\phi}$  ve  $S_{\phi}$  sırasıyla genel değişken  $\phi$  için türbülans yayılım katsayısı ve kaynak terimidir,  $\rho$  ise akışkanın yoğunluğudur. Eğer  $\phi$  birer,  $\Gamma_{\phi}$  ve  $S_{\phi}$  sıfıra eşitlenirse (1) denklemi süreklilik denkleminde indirgenir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli  $k$ - $\varepsilon$  modelidir [46]. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [47,48]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Hareket denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler.

$\phi$	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$
1	0	0
$u$	$\mu_e = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
$v$	$\mu_e$	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_e \frac{v}{r^2}$
$k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$
$\varepsilon$	$\frac{\mu_e}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)$

Not: 1.  $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$

2. Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir (Launder and Spalding, 1974):

$$C_{\mu} = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\varepsilon} = 1.3$$

$$3. G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

## 2.2. Sınır Koşulları

Şekil 1’e ilişkin olarak, incelenen dairesel kesitli ani genişlemeli borularda aksel simetrik karmaşık kapalı türbülanslı çevrilteli akış için sınır koşulları aşağıda takdim edilmiştir. Dört farklı sınır koşulu kullanılmıştır; giriş düzlemi, çıkış düzlemi, simetri eksen ve katı cidarlar. Ani genişlemeli boru girişinde deneysel ölçümlerden ya aksel radyal hız dağılımı ya da düzgün bir aksel hız dağılımı belirtilmiş, radyal hız ise sıfıra eşit kılınmıştır.  $k$  ve  $\varepsilon$  türbülans büyüklüklerine düzgün giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani,  $k = (0.002-0.005) u_b^2$  ve  $\varepsilon = (C_{\mu} k^{3/2} / 0.03R)$ , burada  $u_b$  büyük çaplı borunun girişinde küçük çaplı borudaki ortalama hızdır,  $R$  ise büyük çaplı borunun yarıçapıdır. Çıkış düzleminde tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, çıkış düzlemi çevrilteli akış bölgesinden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış

düzleminde radyal hız sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Ani genişlemeli boru ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani,  $(\partial\phi/\partial r) = v = 0$ ,  $\phi$  burada  $u$ ,  $k$  ya da  $\varepsilon$  olabilir. Üst ve yan (step) katı cidarlarda hız bileşenleri  $u$ ,  $v$  ile türbülans büyüklükleri  $k$  ve  $\varepsilon$  sıfıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında  $k$  ve  $\varepsilon$ 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [46] cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için başlangıç değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

### 2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal araştırmada, sonlu hacim yaklaşımı kullanarak, Patankar'ın [47] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) eşitliğiyle verilen kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemle bir kontrol hacme dayanan sonlu fark metoduyla ayrıklaştırılmıştır. Sınır koşullarıyla bağımlı olarak kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu hacim biçimleri, üç köşegenli matris formuyla birlikte, kolon-kolon çözüm yöntemini kullanarak iteratif olarak çözülmüştür, Spalding [49].

### 2.4. Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Araştırılan tüm eksenel simetrik ani genişlemeli boru akışları için kullanılan sayısal ağ dağılımları Şekil 2, 13 ve 24'te gösterilmiştir. Kullanılan tüm sayısal ağlar eksenel simetrik ani genişlemeli borunun cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla eşit olmayan aralıklarla oluşturulmuştur. Eksenel ve radyal hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Diğer tüm ilgili büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış bir çözüm elde etmek için kolon-kolon yöntemi iteratif olarak kullanılmıştır. Sayısal istikrar elde etmek için  $u$ ,  $v$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $P$  ve  $\mu_e$  için sırasıyla 0.3, 0.3, 0.8, 0.8, 0.5 ve 0.5 gevşetme faktörleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama ölçütü, tüm hesaplama alanında kalıcı kütlelerin mutlak değerlerinin toplamı önceden belirtilen  $10^{-5}$  değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesi ölçütüdür. Dairesel kesitli eksenel simetrik ani genişlemeli boru akışları için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ büyüklükleriyle ağ testleri yapılmıştır. Bu araştırmada sunulan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdır. Tablo 2 araştırılan tüm akış durumları için hesaplama gereksinimlerinin ayrıntılarını özetlemektedir. Bu tabloda  $Re$  Reynolds sayısıdır,  $N$  ise yakınsamış bir çözüm elde etmek için yapılmış olan iterasyonların sayısıdır.

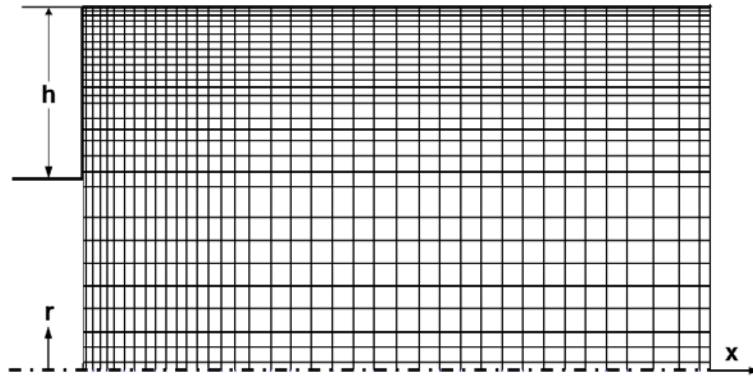
**Tablo 2.** Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü ve iterasyon sayısı.

Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü ( $x$ ) $\times$ ( $r$ )	N İterasyon Sayısı
Durrett ve diğerleri [3]	<b>84 000</b>	40 $\times$ 30	438
Favaloro ve diğerleri [6]	<b>125 000</b>	40 $\times$ 30	450
Chaturvedi [4]	<b>220 000</b>	40 $\times$ 30	522

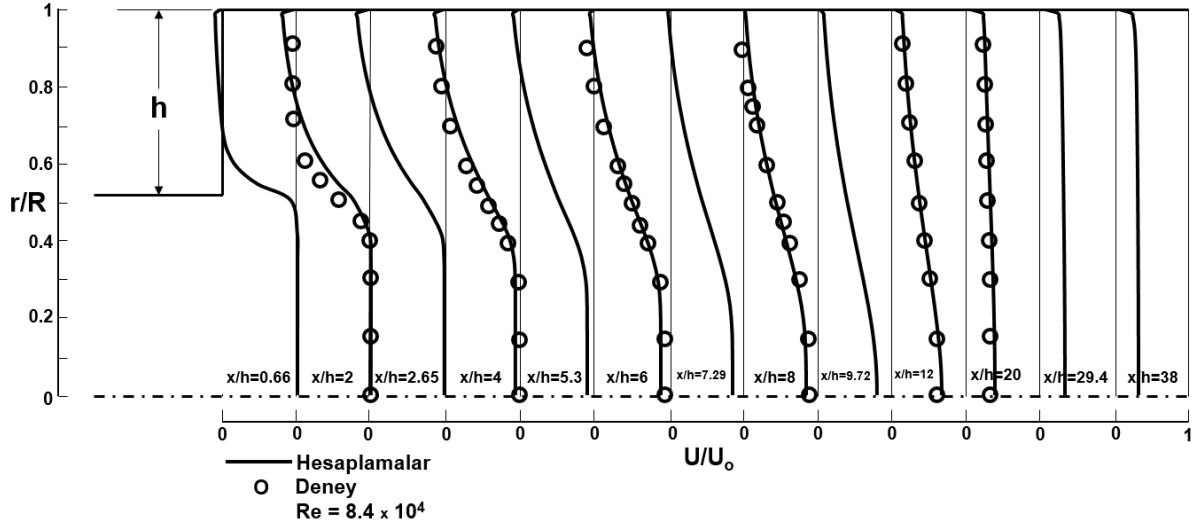
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu sayısal orijinal araştırmada, dairesel kesitli ani genişlemeli borularda karmaşık kapalı türbülanslı çevrintili akış için üç farklı Reynolds sayılarında kapsamlı hesaplamalar yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Durrett ve diğerleri [3], Chaturvedi [4] ile Favaloro ve diğerlerinin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılan eksenel simetrik ani genişlemeli boruda, Durrett ve diğerlerinin [3] deneysel ölçümleri hesaplamalarla karşılaştırılmaya temel esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik ani genişlemeli boru  $D/d=1.905$  gibi bir genişleme oranına sahiptir. Girişteki boru çapına ve simetri eksenini üzerindeki hız

bağlı olan Reynolds sayısı  $Re = 8.4 \times 10^4$  'tür ( $Re = u_o d / \nu$ ). Bu akış durumu için sayısal hesaplama alanı ani genişlemeli borunun giriş düzleminde aşağı akışta 40 basamak (step) yüksekliğinde ( $h$ ) bir aksel mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 2'de Durrett ve diğerlerinin [3] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Hesaplanan aksel hız radyal profilleri ve bunların Durrett ve diğerlerinin [3] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması, ani genişlemeli boru boyunca boyutsuz olarak  $u/u_o$  ve radyal uzunluk  $r/R$  cinsinden,  $x/h=0.66$ 'dan 38'e kadar değişen aksel kesitlerde Şekil 3'te takdim edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan aksel hız radyal profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum gözlenmektedir. Bu şekil aynı zamanda, hesaplanan aksel hız radyal profillerinin ani genişlemeli akış borusu boyunca kesit karşısında nasıl gelişmelerini de göz önüne sermektedir. Şekil 4'te ani genişlemeli akış borusu simetri ekseni boyunca hesaplanan simetri ekseni üzerindeki boyutsuz aksel hızın ( $u_c/u_o$ ) değişimi, aşağı akış mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan boyutsuz simetri ekseni hızı, simetri ekseni boyunca aşağı akışta takriben  $x/h=38$  kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşmaya kadar azalmaktadır. Ani genişlemeli akış borusu simetri ekseni boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin  $k^{0.5}/u_o$  aksel dağılımı Şekil 5'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, türbülans kinetik enerji  $x/h=7.29$  kesitinde minimum değerine ulaşmaya kadar azalmakta, ondan sonrada  $x/h=14.58$  kesitinde maksimum değerine ulaşmaya kadar ani genişlemeli boru simetri ekseni boyunca hızlı olarak artmakta ve daha sonrada  $x/h=40$  kesitine kadar tekrar azalmaktadır. Aksel simetrik ani genişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 6'da verilmiştir. Üst cidardan ölçülen dikey uzunluk  $y$ , basamak (step) yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuz hale getirilen aşağı akış mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Bu şekilde gösterilen içi boş dairelerde aksel hız sıfır ( $u=0$ ) olup, bu dairelerin üstünde kalan bölgede hız ( $u$ ) pozitifdir, altında kalan bölgede ise hız negatifdir. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminde aşağı akış yönünde takriben  $x_r/h=7.65$  kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise takriben  $x_r/h=8.3$  kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve bunların Durrett ve diğerlerinin [3] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak  $k/u_o^2$  ve radyal uzunluk  $r/R$  cinsinden,  $x/h=0.66$ 'dan 38'e kadar olan ve basamak (step) yüksekliğine dayanan boyutsuz aksel uzunluklarda belirlenen 13 aksel kesitte Şekil 7'de sergilenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında elde edilen uyum oldukça iyi olmasına rağmen, çevrintili akış bölgesinin girişinde hesaplanan profiller deneysellerin azıcık üstünde kalmaktadır. Şekil 7 tekrar gözden geçirildiğinde görülmüyor ki, akış ani genişlemeli boru boyunca geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu olay aynı zamanda hesaplamalar tarafından da doğrulanmaktadır.

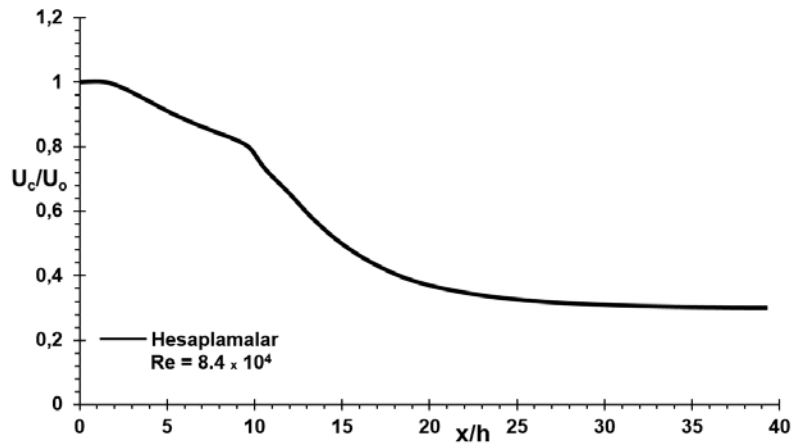


**Şekil 2.** Durrett ve diğerlerinin [3] aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

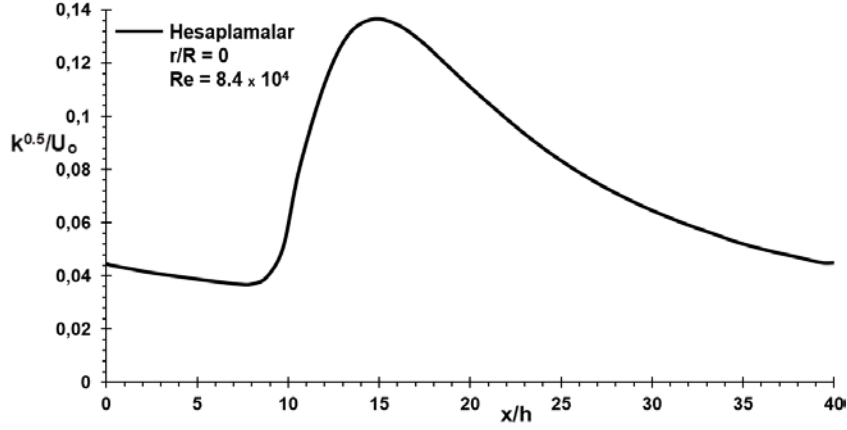


**Şekil 3.** Hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Durrett ve diğerlerinin [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

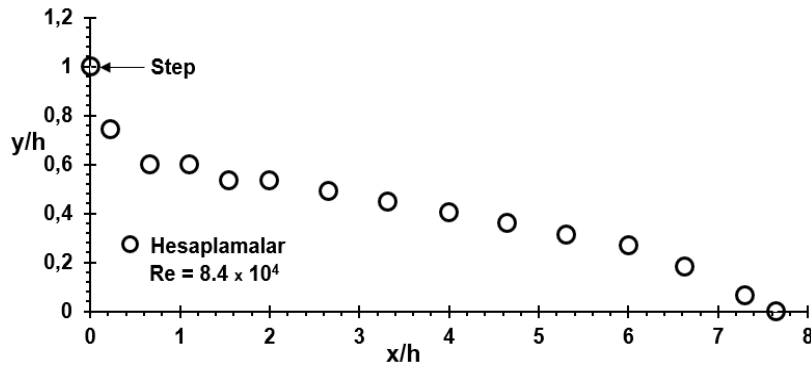
Şekil 8 ve 9, Durrett ve diğerlerinin [3] aksenal simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca, sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 3 ve 7'deki gibi aynı aşağı akış yönü aksenal kesitlerinde göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı  $\epsilon_{\max}$  ve maksimum efektif viskozite  $\mu_{e \max}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin ani genişlemeli akış borusu boyunca nasıl geliştiğini göz önüne sermektedir.



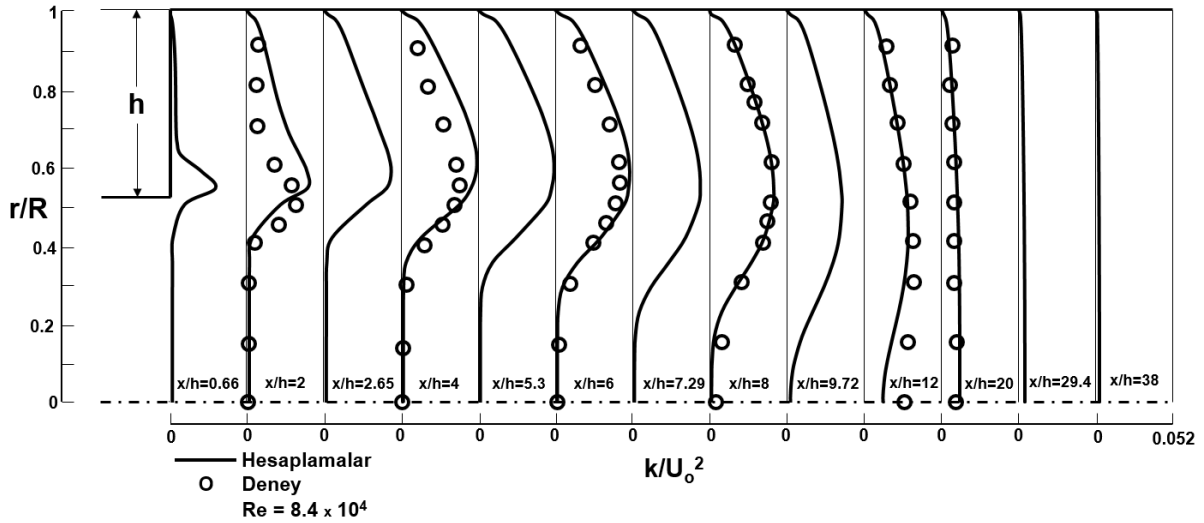
**Şekil 4.** Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki boyutsuz aksenal hızın değişimi.



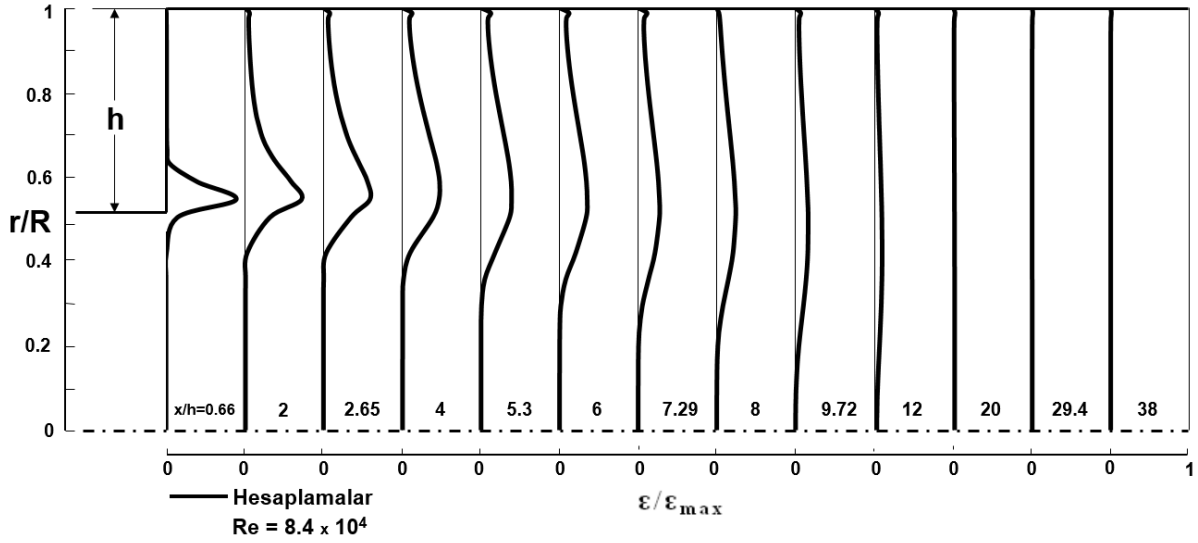
Şekil 5. Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin dağılımı.



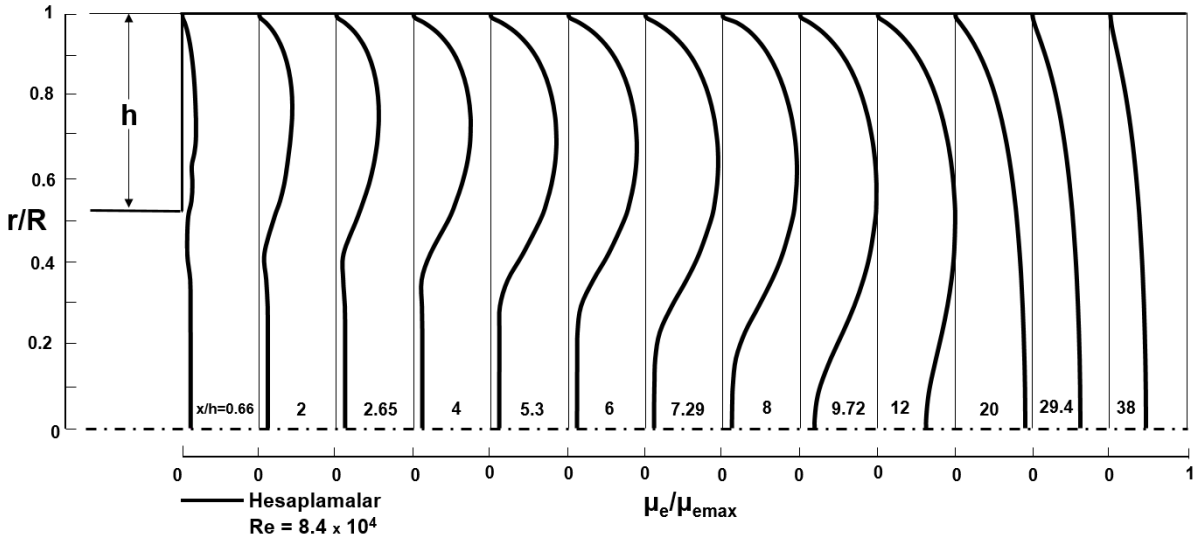
Şekil 6. Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 7. Hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Durrett ve diğerlerinin [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 8. Hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.

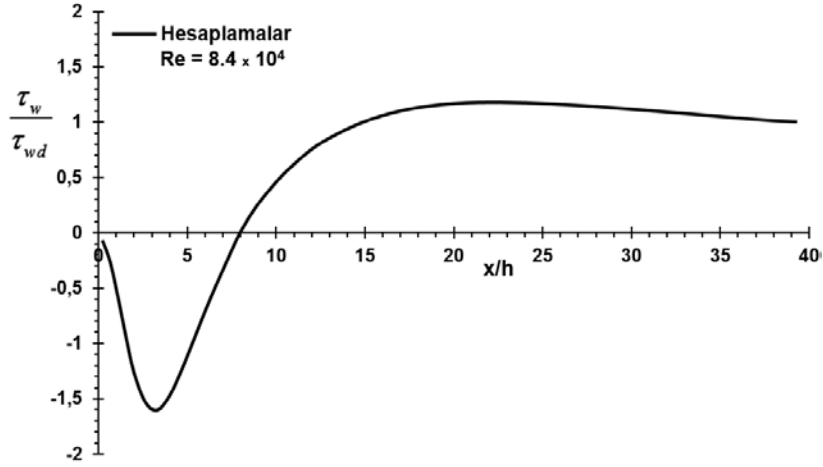


Şekil 9. Hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.

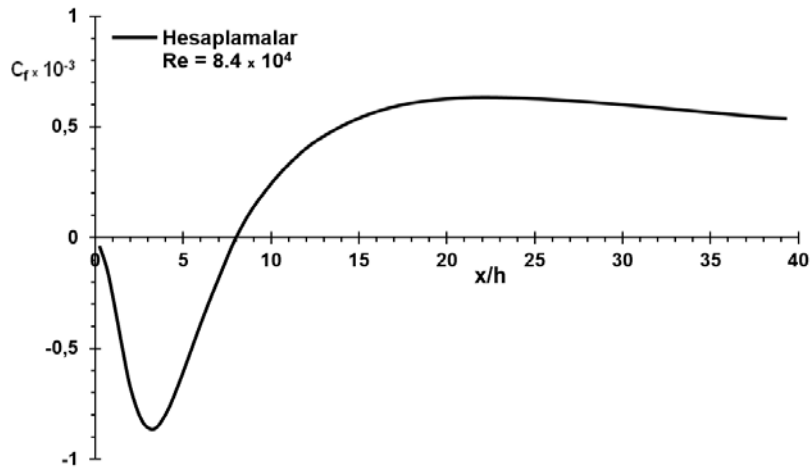
Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı boyutsuz olarak  $\tau_w/\tau_{wd}$  ve aşağı akış mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada cidar kayma gerilmesi çıkış düzlemindeki değeri olan  $\tau_{wd}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, ani genişlemeli boru giriş düzleminde yaklaşık  $x/h=8$  kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan ( $-u$ ) kaynaklanmaktadır. Üst cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum negatif değerine ulaştıktan sonra, negatif yönde hızla azalarak yaklaşık  $x/h=23$  kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler alarak artmakta ve yaklaşık  $x/h=39$  kesitine kadar çok yavaş olarak azalmaktadır. Ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f = 2\tau_w / \rho u_o^2$ ) değişimi,  $x/h$  cinsinden Şekil 11'de çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üst cidar sürtünme katsayısı, Şekil 10'daki cidar kayma gerilmesi ile aynı değişimi göstermektedir. Son olarak, Şekil 12'de ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [ $C_p = (P-P_{ref}) / 0.5 \rho u_o^2$ ] aksenal değişim biçimi aşağı akış mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak takdim edilmiştir. Görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, ani genişlemeli boru girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrintili akıştan dolayı,  $x/h=23$



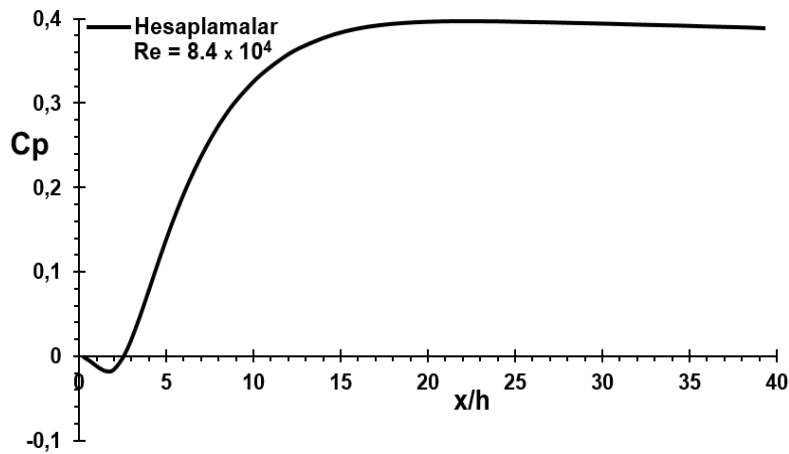
kesitine kadar devamlı yükseliş göstermektedir. Bu kesitten sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 10. Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

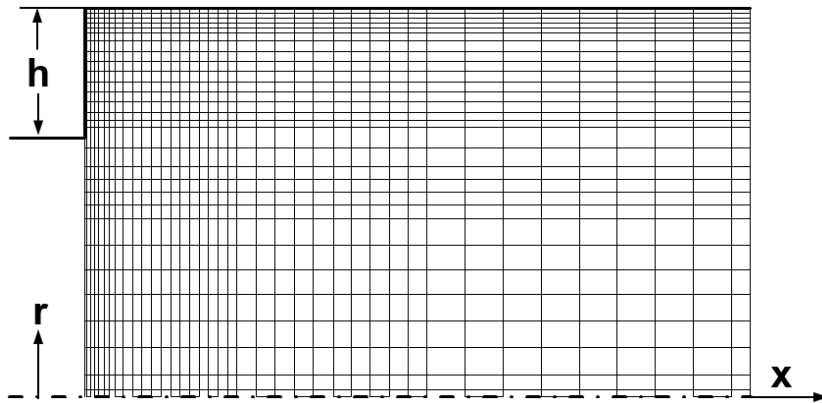


Şekil 11. Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar sürtünme katsayısının ( $C_f$ ) değişimi.

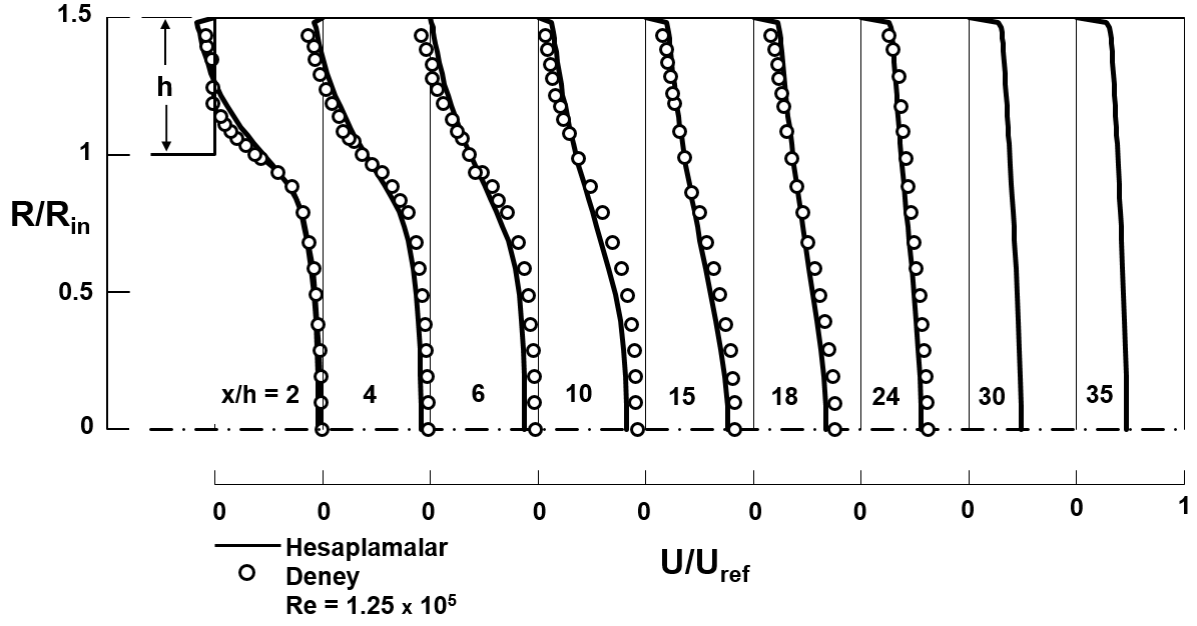


Şekil 12. Durrett ve diğerlerinin [3] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının ( $C_p$ ) değişimi.

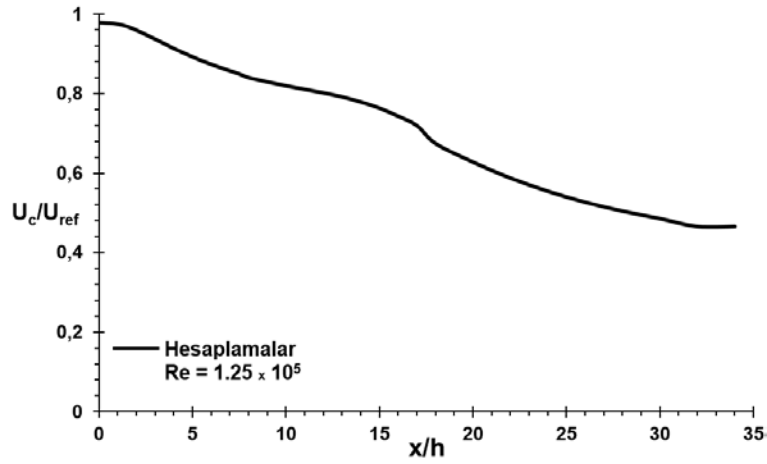
İkinci akış geometrisi  $D/d=1.5$  genişleme oranıyla, çalışma akışkanı olarak hava kullanılan Favalaro ve diğerlerinin [6] aksenal simetrik ani genişlemeli kapalı türbülanslı çevrıntili karmaşık boru akışı deneyine karşılık olmaktadır. Girişte akışın Reynolds sayısı  $Re=1.25 \times 10^5$ 'tir ( $Re = u_{ref} d/V$ , burada  $u_{ref}$  girişte simetri eksenini üzerindeki hızdır,  $d$  ise girişteki boru çapıdır). Bu akış durumu için sayısal hesaplama alanı ani genişlemeli borunun giriş düzleminden aşağı akışta  $x=35h$  basamak (step) yüksekliğinde ( $h$ ) bir aksenal mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 13'te Favalaro ve diğerlerinin [6] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımını gösterilmiştir. Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri ve bunların Favalaro ve diğerlerinin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, ani genişlemeli boru boyunca boyutsuz olarak  $u/u_{ref}$  ve radyal uzunluk  $R/R_{in}$  cinsinden,  $x/h=2$ 'den  $35$ 'e kadar değişen aksenal kesitlerde Şekil 14'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan aksenal hız radyal profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum vardır. Bu şekil aynı zamanda, hesaplanan aksenal hız radyal profillerinin ani genişlemeli akış borusu boyunca kesit karşısında nasıl gelişmelerini de göstermektedir. Şekil 15, ani genişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca hesaplanan simetri eksenini üzerindeki aksenal hızın ( $u_c$ ) değişimini takdim etmektedir. Simetri eksenini üzerindeki aksenal hız ( $u_c$ ), giriş borusundaki simetri eksenini hızıyla ( $u_{ref}$ ) boyutsuz kılınmış ve basamak (step) yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınan aşağı akış yönü uzunluğunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, simetri eksenini üzerindeki boyutsuz aksenal hız ( $u_c/u_{ref}$ ), ani genişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca azalmaktadır. Ani genişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin  $k^{0.5}/u_{ref}$  aksenal dağılımını Şekil 16'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, türbülans kinetik enerji  $x/h=11$  kesitinde minimum değerine ulaşınca kadar azalmakta, ondan sonrada  $x/h=24$  kesitinde maksimum değerine ulaşınca kadar ani genişlemeli boru simetri eksenini boyunca hızlı olarak artmakta ve daha sonrada  $x/h=35$  kesitine kadar tekrar azalmaktadır. Aksenal simetrik ani genişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 17'de sunulmuştur. Bu şekilde gösterilen içi boş dairelerde aksenal hız sıfır ( $u=0$ ) olup, bu dairelerin üstünde kalan bölgede hız ( $u$ ) pozitifdir, altında kalan bölgede ise hız negatifdir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminden aşağı akış yönünde yaklaşık olarak  $x_r/h=5.75$  kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise yaklaşık olarak  $x_r/h=8$  kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve bunların Favalaro ve diğerlerinin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması,  $x/h=2$ 'den  $35$ 'e kadar olan ve basamak (step) yüksekliğine dayanan boyutsuz aksenal uzunluklarda belirlenen 9 aksenal kesitte Şekil 18'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında elde edilen uyum oldukça iyi olmasına rağmen, çevrıntili akış bölgesinin girişinde hesaplanan profiller ilk önce deneysellerin biraz üstünde kalırken, daha sonra  $x/h=10$ 'dan  $18$ 'e kadar olan aşağı akış yönü aksenal kesitlerinde ise deneysellerin biraz altında kalmaktadır. Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılamamasıdır. Şekil 18 tekrar gözden geçirildiğinde görülüyor ki, akış ani genişlemeli boru boyunca geliştiğçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımını azalmaktadır. Bu durum aynı zamanda hesaplamalar tarafından da teyit edilmektedir.



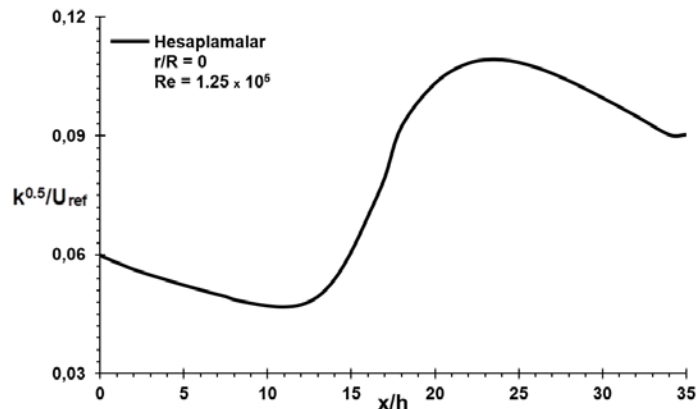
Şekil 13. Favalaro ve diğerlerinin [6] aksenal simetrik ani genişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımını.



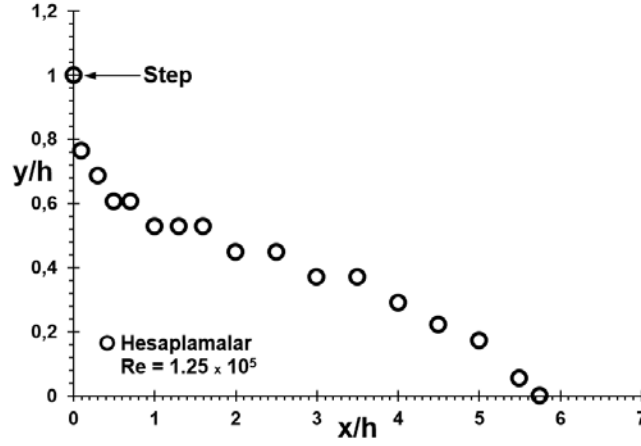
Şekil 14. Hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Favalaro ve diğerlerinin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



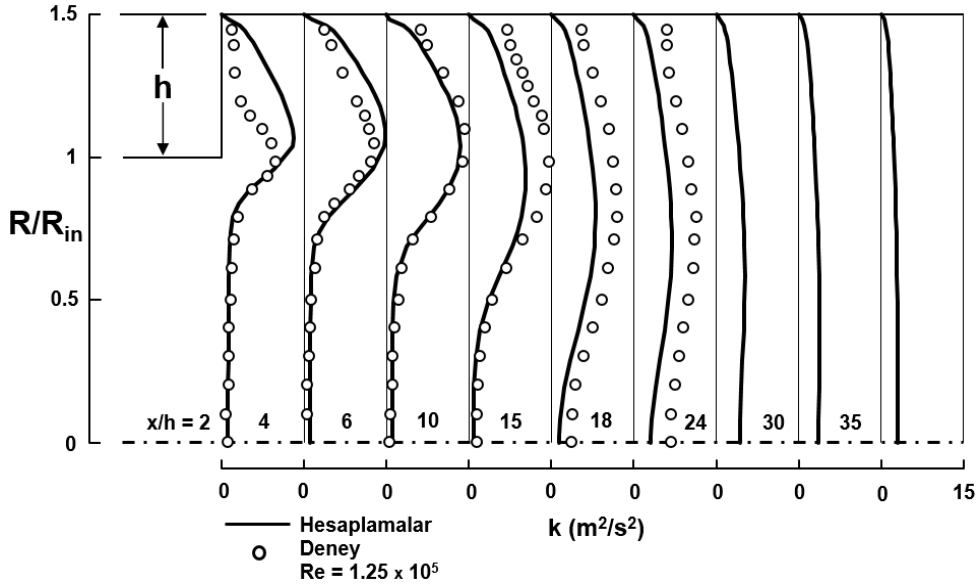
Şekil 15. Favalaro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki boyutsuz aksenal hızın değişimi.



Şekil 16. Favalaro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin dağılımı.



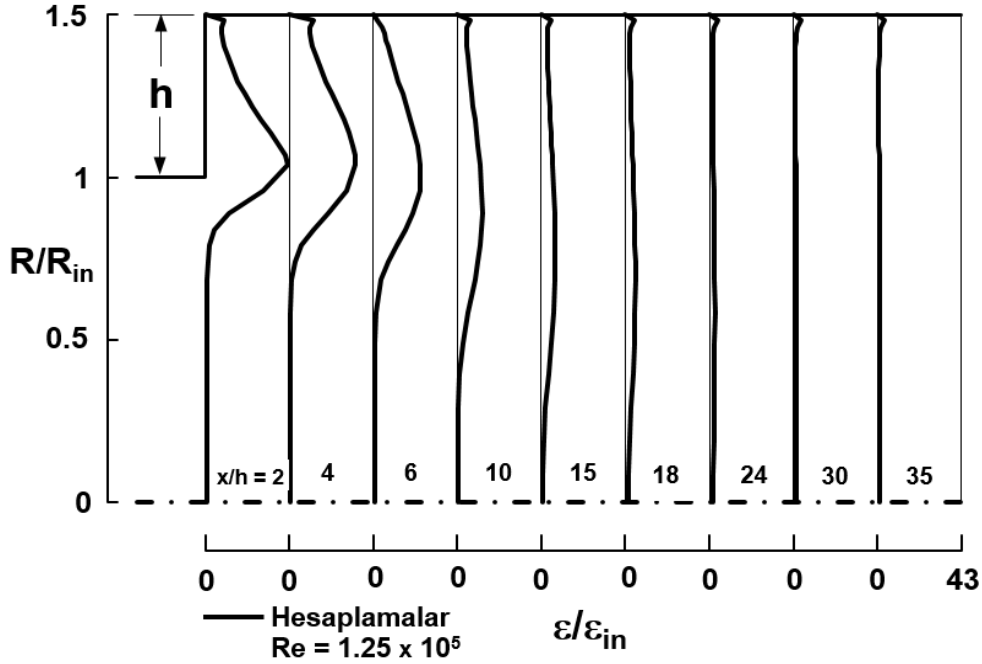
Şekil 17. Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



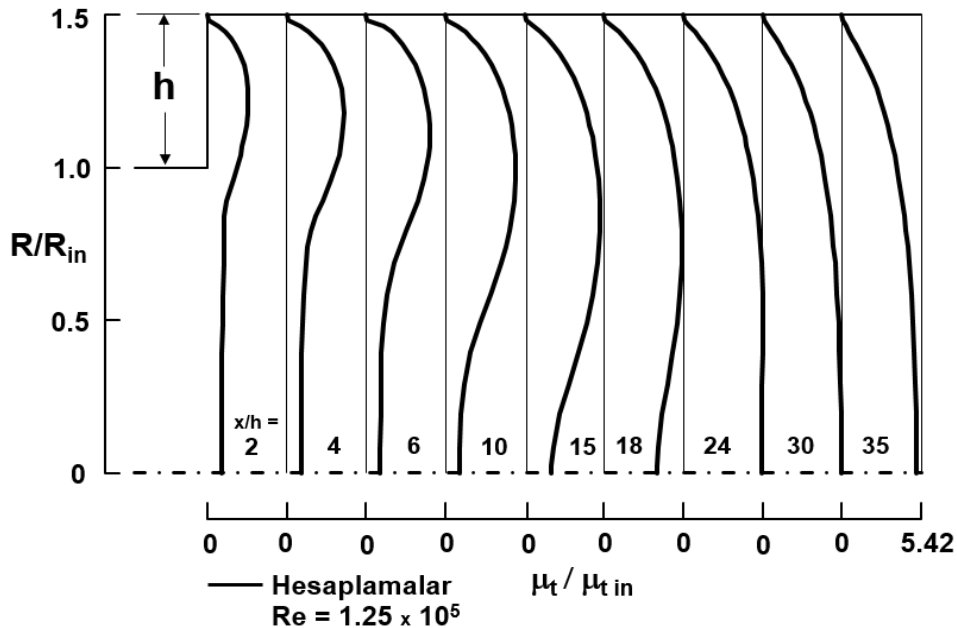
Şekil 18. Hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Favaloro ve diğerlerinin [6] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

Şekil 19 ve 20, Favaloro ve diğerlerinin [6] aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca, sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans viskozite radyal profillerini, Şekil 14 ve 18'deki gibi aynı aşağı akış yönü aksel kesitlerinde takdim etmektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, girişteki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı  $\epsilon_{in}$  ve türbülans viskozitesi  $\mu_{t, in}$  ile boyutsuz hale getirilmiştir. Bu şekiller, ani genişlemeli akış borusu boyunca, hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans viskozite radyal profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir. Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı, boyutsuz olarak  $\tau_w/\tau_{wd}$  ve aşağı akış yönü mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak, Şekil 21'de göz önüne serilmiştir. Burada cidar kayma gerilmesi çıkış düzlemindeki değeri olan  $\tau_{wd}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, ani genişlemeli boru giriş düzleminde takriben  $x/h=6$  kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Üst cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum negatif değerine ulaştıktan sonra, negatif yönde hızla azalarak takriben  $x/h=6$  kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler alarak takriben  $x/h=32$  kesitinde tamamiyle gelişmiş değerine ulaşıncaya kadar sürekli olarak artmaktadır. Ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme

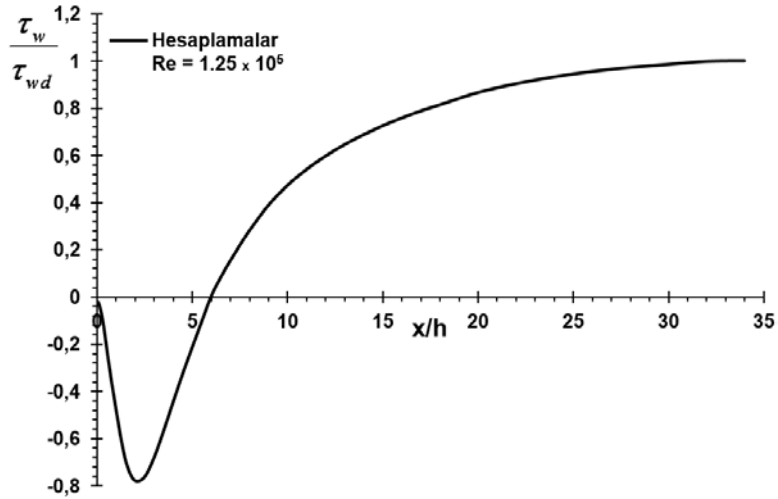
katsayısının ( $C_f = 2 \tau_w / \rho u_{ref}^2$ ) değişimi,  $x/h$  cinsinden Şekil 22’de çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, üst cidar sürtünme katsayısı, Şekil 21’deki cidar kayma gerilmesi ile aynı değişimi göstermektedir. Son olarak, Şekil 23’te ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [ $C_p = (P - P_{ref}) / 0.5 \rho u_{ref}^2$ ] aksenal değişim biçimi aşağı akış yönü mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, ani genişlemeli boru girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrıntili akıştan dolayı,  $x/h=28$  kesitine kadar sürekli yükseliş göstermektedir. Bu kesitten sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



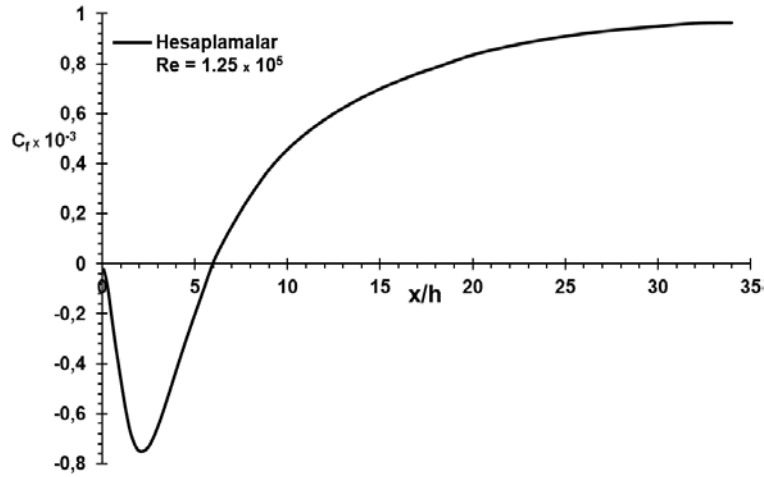
Şekil 19. Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



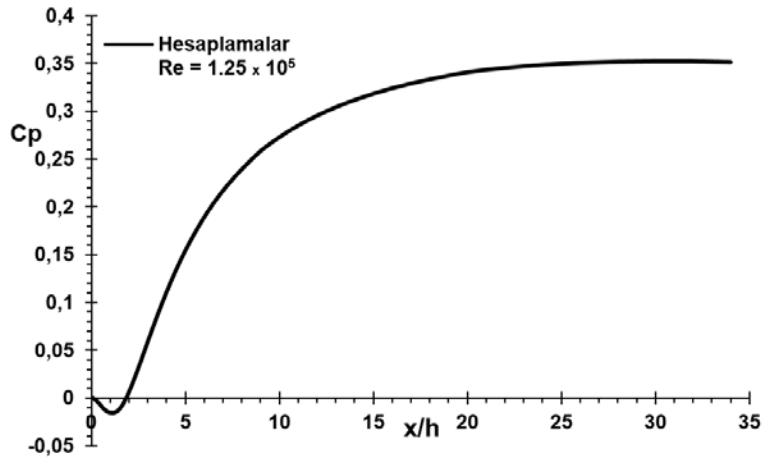
Şekil 20. Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans viskozite radyal profilleri.



**Şekil 21.** Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

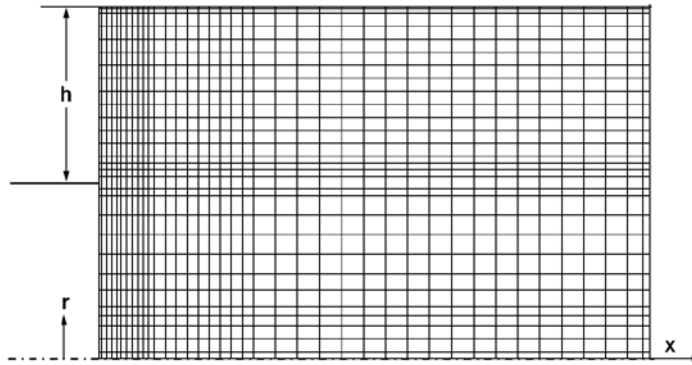


**Şekil 22.** Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar sürtünme katsayısının ( $C_f$ ) değişimi.

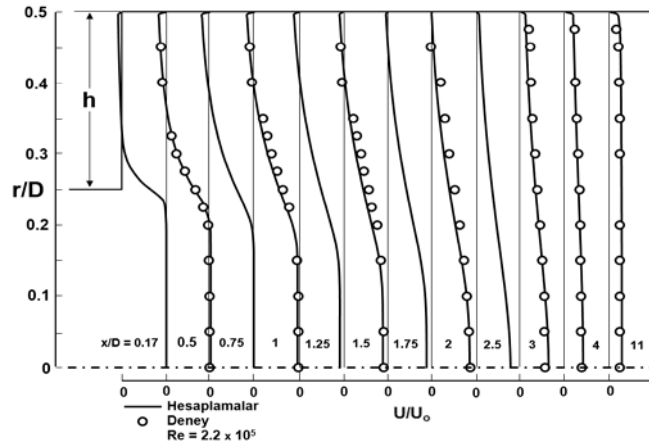


**Şekil 23.** Favaloro ve diğerlerinin [6] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının ( $C_p$ ) değişimi.

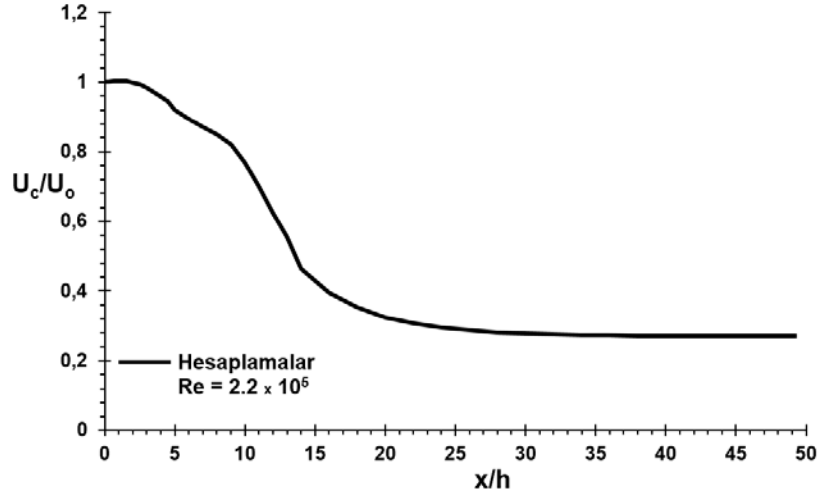
Çalışma akışkanı olarak hava kullanılan kapalı eksenel simetrik ani genişlemeli boruda, türbülanslı çevrıntili akış için Chaturvedi'nin [4] deneysel çalışması, buradaki sayısal çalışma için hesaplamalarla karşılaştırılmaya temel esas teşkil etmek üzere üçüncü olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik ani genişlemeli boru  $D/d=2$  gibi bir genişleme oranına sahiptir Girişte ortalama akışın Reynolds sayısı  $Re=2.2 \times 10^5$ 'e eşittir ( $Re = u_o d / \nu$ , burada  $u_o$  girişte küçük çaplı boruda ortalama eksenel hızdır,  $d$  ise girişteki küçük borunun çapıdır). Bu akış durumu için sayısal hesaplama alanı ani genişlemeden aşağı akışta 50 basamak (step) yüksekliğinde ( $h$ ) bir eksenel mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 24'te Chaturvedi'nin [4] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız radyal profilleri ve bunların Chaturvedi'nin [4] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, ani genişlemeli boru boyunca boyutsuz olarak  $u/u_o$  ve radyal uzunluk  $r/D$  cinsinden,  $x/D=0.17$ 'den 11'e kadar değişen eksenel kesitlerde Şekil 25'te takdim edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan profiller karşılıkları olan deneysellerle iyi kalitatif uyum göstermektedir. Bundan başka, bu şekil hesaplanan eksenel hız radyal profillerinin ani genişlemeli akış borusu boyunca kesit karşısında nasıl geliştiklerini de göz önüne sermektedir. Şekil 26'da ani genişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca hesaplanan simetri eksenini üzerindeki boyutsuz eksenel hızın ( $u_c/u_o$ ) değişimi, aşağı akış yönü mesafesinin ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan boyutsuz simetri eksenini hızı, simetri eksenini boyunca aşağı akışta takriben  $x/h=40$  kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşınca kadar azalmaktadır. Bu kesitten sonra ise sabit kalmaktadır. Ani genişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin  $k^{0.5}/u_o$  eksenel dağılımı Şekil 27'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, türbülans kinetik enerji  $x/h=7$  kesitinde minimum değerine ulaşınca kadar azalmakta, ondan sonrada  $x/h=14$  kesitinde maksimum değerine ulaşınca kadar hızlı olarak artmakta ve daha sonrada  $x/h=50$  kesitine kadar tekrar azalmaktadır. Eksenel simetrik ani genişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 28'de verilmiştir. Bu şekilde gösterilen içi boş dairelerde eksenel hız sıfır ( $u=0$ ) olup, bu dairelerin üstünde kalan bölgede hız ( $u$ ) pozitifdir, altında kalan bölgede ise hız negatiftir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminde aşağı akış yönünde takriben  $x_r/h=8.5$  kesitinde oluşmaktadır.



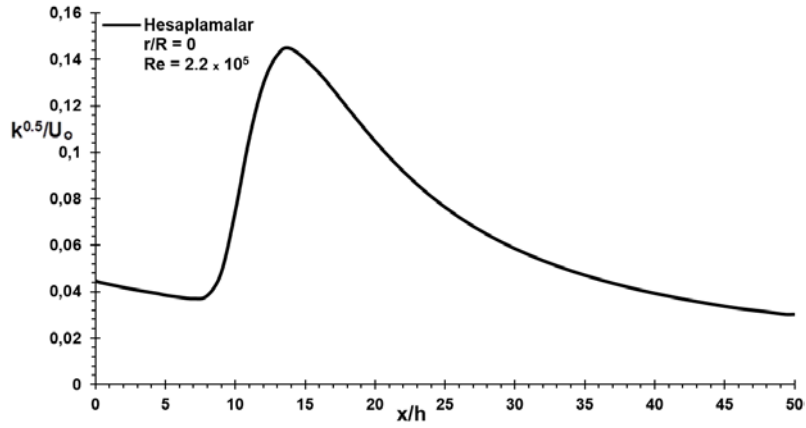
Şekil 24. Chaturvedi'nin [4] eksenel simetrik ani genişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



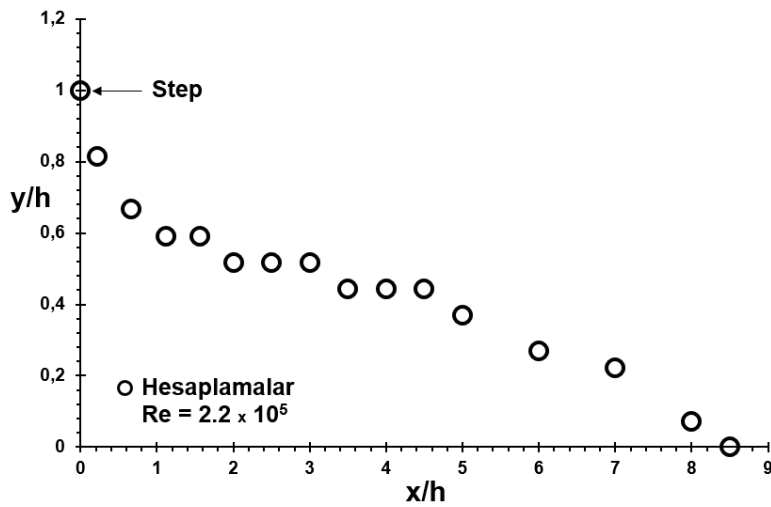
Şekil 25. Hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Chaturvedi'nin [4] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 26. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenini üzerindeki boyutsuz aksenal hızın değişimi.



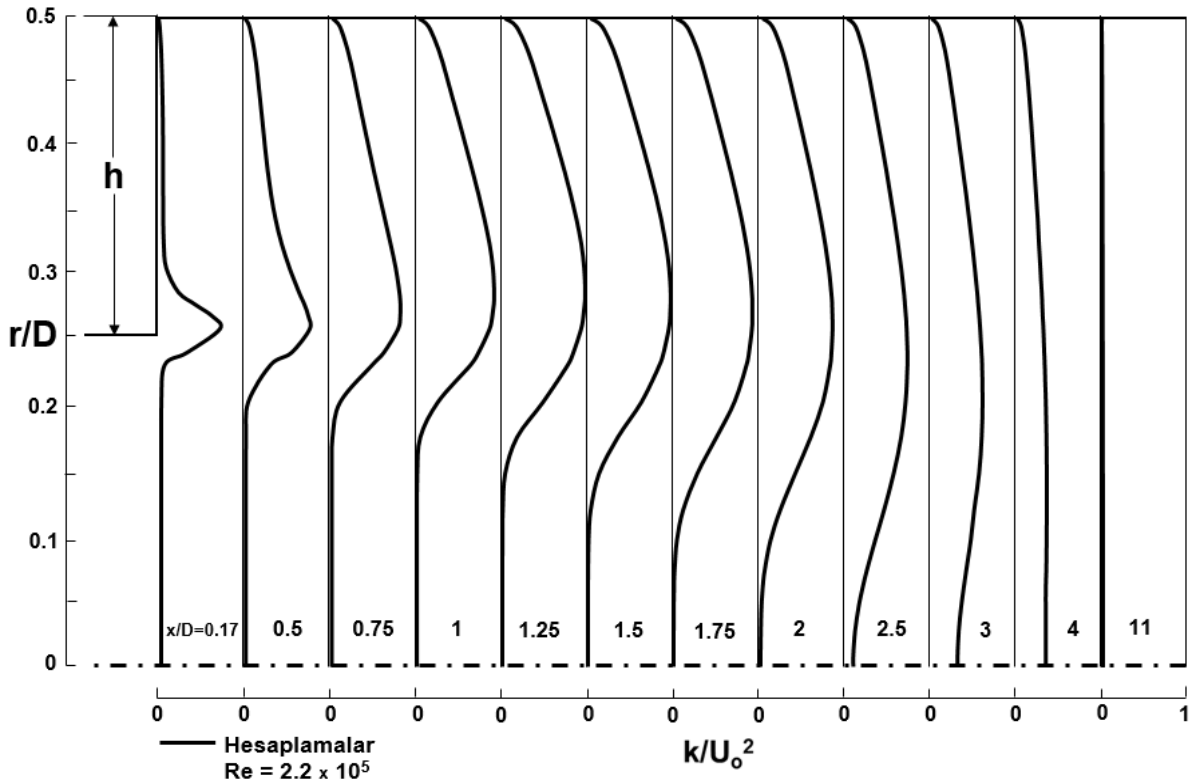
Şekil 27. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin dağılımı.



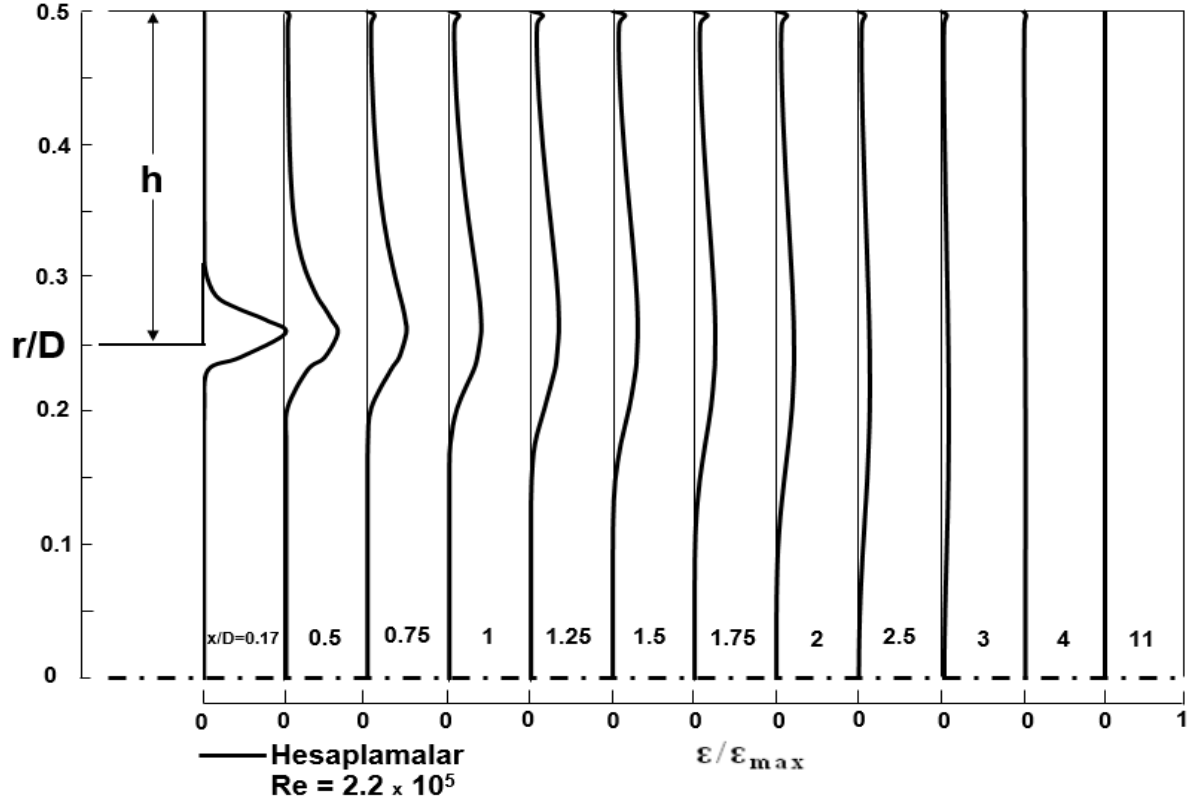
Şekil 28. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



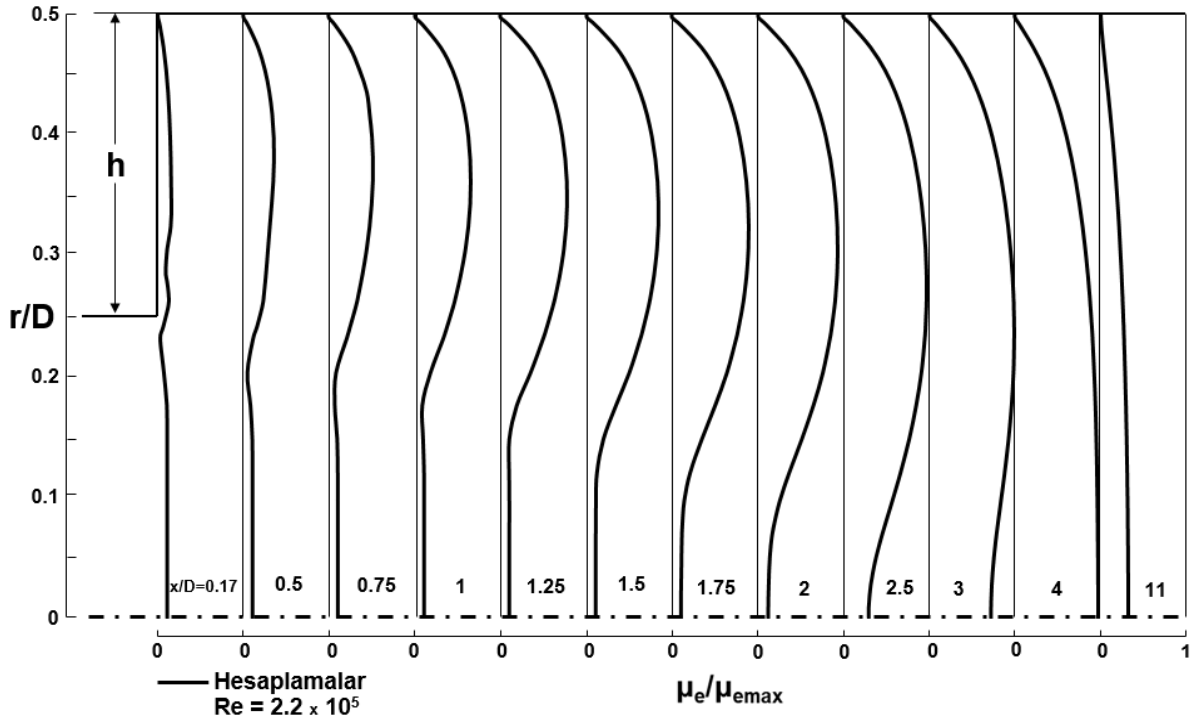
Şekil 29, 30 ve 31, sırasıyla, Chaturvedi'nin [4] aksel simetrik ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 25'teki gibi  $x/D=0.17$ 'den 11'e kadar değişen aksel kesitlerde takdim etmektedir. Burada hesaplanan profiller, sırasıyla, girişteki küçük çaplı boruda ortalama aksel hızın karesi  $u_0^2$ , akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı  $\epsilon_{max}$  ve maksimum efektif viskozite  $\mu_{e,max}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin ani genişlemeli akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı boyutsuz olarak  $\tau_w/\tau_{wd}$  ve aşağı akış yönü uzunluğunun ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak Şekil 32'de verilmiştir. Burada cidar kayma gerilmesi çıkış düzlemindeki değeri olan  $\tau_{wd}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, ani genişlemeli boru giriş düzleminde takriben  $x/h=8.5$  kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Üst cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum negatif değerine ulaştıktan sonra, negatif yönde hızla azalarak takriben  $x/h=8.5$  kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonrada pozitif değerler alarak artmakta ve takriben  $x/h=20$  kesitinde maksimum pozitif değerine ulaştıktan sonrada  $x/h=49.32$  kesitine kadar çok yavaş olarak azalmaktadır. Ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ( $C_f = 2\tau_w / \rho u_0^2$ ) değişimi,  $x/h$  cinsinden Şekil 33'te çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üst cidar sürtünme katsayısı, Şekil 32'deki cidar kayma gerilmesi ile aynı trendi göstermektedir. Son olarak, Şekil 34'te ani genişlemeli boru üst cidarı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [ $C_p = (P-P_{ref}) / 0.5 \rho u_0^2$ ] aksel değişim biçimi aşağı akış yönü uzunluğunun ( $x/h$ ) bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, ani genişlemeli boru girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrintili akıştan dolayı,  $x/h=22$  kesitine kadar sürekli olarak artmaktadır. Bu kesitten sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



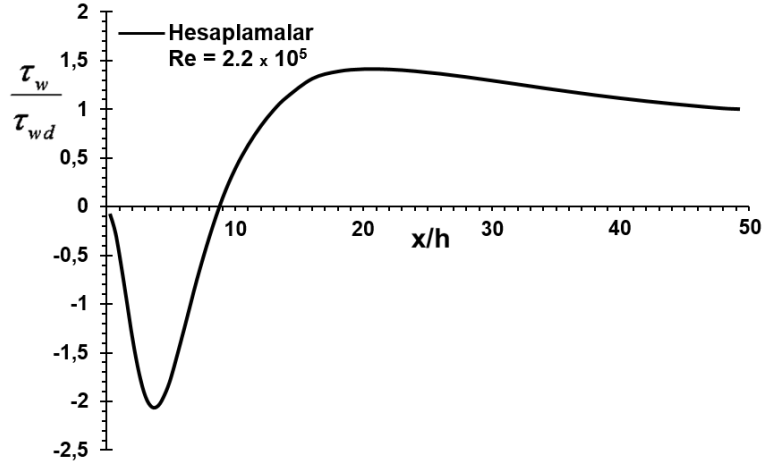
Şekil 29. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



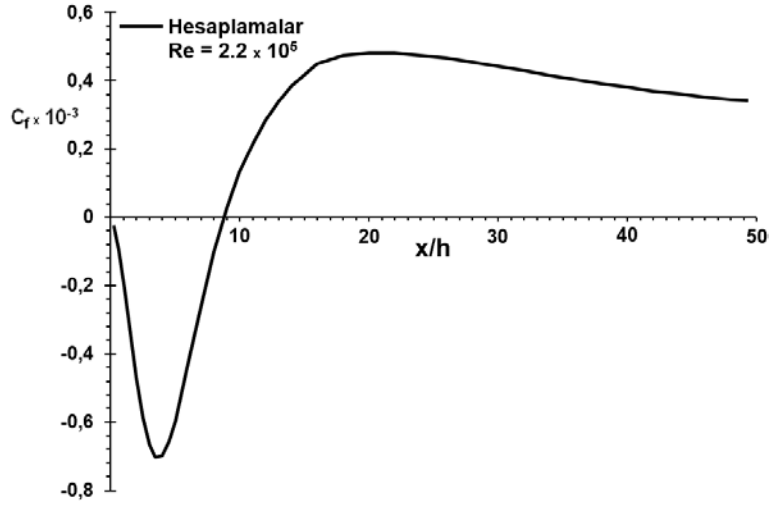
Şekil 30. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



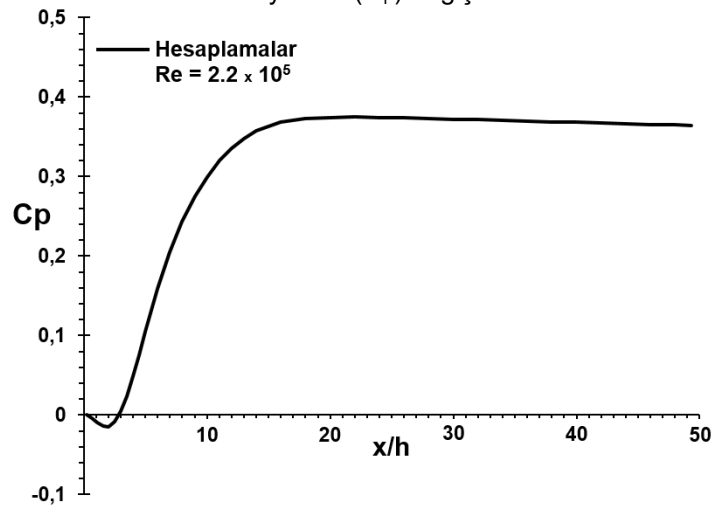
Şekil 31. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



Şekil 32. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 33. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar sürtünme katsayısının ( $C_f$ ) değişimi.



Şekil 34. Chaturvedi'nin [4] ani genişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının ( $C_p$ ) değişimi.

#### 4. SONUÇLAR

Bu orijinal araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Dairesel kesitli ani genişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, eksenel simetrik, ayrımlı ve yeniden birleşmeli karmaşık kapalı türbülanslı çevrintili akışlar, üç farklı Reynolds sayılarında standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeli modellemesiyle sayısal olarak hesaplanmıştır. Sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar'ın [47] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Üç farklı dairesel kesitli ani genişlemeli borulardaki kapalı türbülanslı çevrintili akışlar için standart  $k-\varepsilon$  türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. Dairesel kesitli ani genişlemeli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, viskozite radyal profilleri, simetri eksenini boyunca eksenel hızın değişimi, geri akışın geometrik yeri, üst cidar kayma gerilmesi, üst cidar sürtünme katsayısı ile üst cidar statik-basınç katsayısı dağılımları için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve literatürde mevcut olan çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Kapalı türbülanslı çevrintili akışların modellemesi ve sayısal hesaplama sonuçları çeşitli deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum göstermiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] GOULD, R. D., STEVENSON, W. H., and THOMPSON, H. D. (1990). Investigation of turbulent transport in an axisymmetric sudden expansion. *AIAA Journal*, 28, 276-283.
- [2] STEVENSON, W. H., THOMPSON, H. D., and CRAIG, R. R. (1984). Laser velocimeter measurements in highly turbulent recirculating flows. *ASME J. Fluids Eng.*, 106, 173-180.
- [3] DURRETT, R. P., STEVENSON, W. H., and THOMPSON, H. D. (1988). Radial and axial turbulent flow measurements with an LDV in an axisymmetric sudden expansion air flow. *ASME J. Fluids Eng.*, 110, 367-372.
- [4] CHATURVEDI, M. C. (1963). Flow characteristics of axisymmetric expansions. *J. Hydraulics Div., Proc., ASCE*, 89, HY3, 61-92.
- [5] MOON, L. F., and RUDINGER, G. (1977). Velocity distribution in an abruptly expanding circular duct. *ASME J. Fluids Eng.*, 99, 226-230.
- [6] FAVALORO, S. C., NEJAD, A. S., and AHMED, S. A. (1991). Experimental and computational investigation of isothermal swirling flow in an axisymmetric dump combustor. *J. Propulsion, AIAA J.*, 7 (3), 348-356.
- [7] NEJAD, A. S., VANKA, S. P., FAVALORO, S. C., SAMIMY, M., and LANGENFELD, C. (1989). Application of laser velocimetry for characterization of confined swirling flow. *ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power*, 111, 36-45.
- [8] AHMED, S. A., and NEJAD, A. S. (1992). Premixed, turbulent combustion of axisymmetric sudden expansion flows. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 13(1), 15-21.
- [9] AHMED, S. A., and NEJAD, A. S. (1992). Velocity measurements in a research combustor; part 1: isothermal swirling flow. *Exp. Ther. Fluid Science*, 5, 162-174.
- [10] AHMED, S. A. (1992). ERCOFTAC Database: Isothermal dump combustor with swirl experiments. Retrieved from the World Wide Web. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/classif.html>.
- [11] AHMED, S. A. (1998). Velocity measurements and turbulence statistics of a confined isothermal swirling flow. *Exp. Ther. Fluid Science*, 17, 256-264.
- [12] NEJAD, A. S., and AHMED, S. A. (1992). Flow field characteristics of an axisymmetric sudden expansion pipe flow with different initial swirl distribution. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 13(4), 314-321.
- [13] AHMED, S. A., and ABİDOĞUN, K. B. (1998). Measurements of turbulence statistics and energy budgets in a model combustor. *Energy*, 23(9), 741-752.
- [14] AHMED, S. A., and ABİDOĞUN, K. B. (1997). An experimental investigation of turbulence statistics in an axisymmetric sudden expansion. *HTD-Vol. 346, National Heat Transfer Conference, Vol. 8, 101-110, ASME*.
- [15] POOLE, R. J., and ESCUDIER, M. P. (2004). Turbulent flow of viscoelastic liquids through an axisymmetric sudden expansion. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 117, 25-46.

- [16] ESCUDIER, M. P., and SMITH, S. (1999). Turbulent flow of Newtonian and shear-thinning liquids through a sudden axisymmetric expansion. *Experiments in Fluids*, 27, 427-434.
- [17] COLE, D. R., and GLAUSER, M. N. (1998). Flying hot-wire measurements in an axisymmetric sudden expansion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18, 150-167.
- [18] COLE, D. R., and GLAUSER, M. N. (1998). Applications of stochastic estimation in the axisymmetric sudden expansion. *Physics of Fluids*, 10(11), 2941-2949.
- [19] TĪNNEY, C. E., GLAUSER, M. N., EATON, E. L., and TAYLOR, J. A. (2006). Low dimensional azimuthal characteristics of suddenly expanding axisymmetric flows. *J. Fluid Mech*, 567, 141-155.
- [20] DEVENPORT, W. J., and SUTTON, E. P. (1993). An experimental study of two flows through an axisymmetric sudden expansion. *Experiments in Fluids*, 14, 423-432.
- [21] FURUICHI, N., TAKEDA, Y., and KUMADA, M. (2003). Spatial structure of the flow through an axisymmetric sudden expansion. *Experiments in Fluids*, 34, 643-650.
- [22] MAK, H., and BALABANI, S. (2007). Near field characteristics of swirling flow past a sudden expansion. *Chemical Engineering Science*, 62, 6726-6746.
- [23] LEE, D. H., and SUNG, H. J. (1994). Experimental study of turbulent axisymmetric cavity flow. *Experiments in Fluids*, 17, 272-281.
- [24] KARASU, T. (1980). Numerical prediction of incompressible turbulent swirling flows in circular-sectioned ducts and annuli. Ph.D. Thesis, University of London, London, U.K.
- [25] 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.
- [26] KARASU, T. (1989). Prediction of turbulent flow with heat transfer in an annulus with rotating inner cylinder. *Proc. 8<sup>th</sup> Miami international conference on alternative energy sources*, Miami Beach, Florida, U.S.A., vol. 2, 361-385.
- [27] KARASU, T. (1990). Numerical prediction of turbulent swirling flows in circular-sectioned annuli. *Proc. 5<sup>th</sup> Miami international symposium on multi-phase transport and particulate phenomena*, Miami Beach, Florida, U.S.A., vol. 1, 149-174.
- [28] KARASU, T. (1990). Numerical study of turbulent flow in pipes. *Proc. 6<sup>th</sup> Miami international symposium on heat and mass transfer*, Miami, Florida, U.S.A.
- [29] KARASU, T. (1997). Numerical prediction of turbulent recirculating flow through axisymmetric sudden expansions. *10<sup>th</sup> International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow*, 21<sup>st</sup>–25<sup>th</sup> July 1997, Swansea, U.K., *Proceedings Book*, Vol. 10, 357-368.
- [30] KARASU, T. (1993). Numerical computation of turbulent flow in pipes. *Doğa-Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences*, 17, 29-38.
- [31] KARASU, T. (1988). Numerical solution of turbulent flow with heat transfer in an annulus with rotating inner cylinder. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 12(3), 250-272.
- [32] KARASU, T. (1995). Numerical prediction of turbulent flow in circular pipes. *9<sup>th</sup> International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow*, Atlanta, Georgia, U.S.A., *Proceedings Book*, Vol. 9, Part 2, 1329-1339.
- [33] KARASU, T. (2017). Kapalı türbülanslı akışların modellenmesi ve bilgisayarlı simülasyonu. 20. Ulusal Mekanik Kongresi, 05-09 Eylül 2017, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye. *Bildiriler Kitabı*, 1-12. ISBN 978-975561491-5.
- [34] KARASU, T. (2018). Numerical investigation and modelling of confined turbulent recirculating flows. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)*, 26-28 October 2018, Selçuk University, Konya, Turkey, *Proceedings Book*, 419-433. E-ISBN: 978-605-68537-3-9.
- [35] KARASU, T. (2016). Computational investigation of turbulent flow in pipes. *3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Technology and Sciences (ICAT'16)*, 01-03 September 2016, Selçuk University, Konya, Turkey, *Proceedings Book*, 939-948.
- [36] KARASU, T. (2017). Numerical computation of developing turbulent flow between two parallel plates. 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'17), 13-16 Eylül 2017, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye, *Bildiri Kitabı*, 11-20.
- [37] KARASU, T. (2017). Numerical study of turbulent flow in circular-sectioned pipes. *8<sup>th</sup> Atmospheric Sciences Symposium (ATMOS'2017)*, 01-04 November 2017, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, *Proceedings Book*, 663-674. ISBN: 978-975-561-490-8.

- [38] KARASU, T. (2018). Numerical investigation of turbulent recirculating flow through plane symmetric sudden expansions. IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu (AES'2018), 18-20 Nisan 2018, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye, Bildiri Kitabı, 2044-2056.
- [39] KARASU, T. (2017). Numerical simulation of internal turbulent flows. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'17), 07-09 December 2017, Selçuk University, Konya, Turkey, Proceedings Book, 679-688.
- [40] KARASU, T. (2017). Computer simulation and modelling of confined turbulent flows. 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'17), 13-16 Eylül 2017, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye, Bildiri Kitabı, 1-10.
- [41] KARASU, T. (2017). Borularda türbülanslı akışların sayısal simülasyonu. VIII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, 22-25 Kasım 2017, İzmir. Bildiriler Kitabı, 69-83. MMO Yayın No: E/MMO/678. ISBN 978-605-01-1088-3.
- [42] KARASU, T. (2017).. Paralel iki plaka arasında gelişen türbülanslı akışın sayısal araştırılması. 20. Ulusal Mekanik Kongresi, 05-09 Eylül 2017, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye. Bildiriler Kitabı, 13-24. ISBN 978-975561491-5.
- [43] KARASU, T. (2018). Computer simulation of turbulent recirculating flow through circular-sectioned sudden expansion pipes. 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Technologies (ICAT'18), April 28-May 1, 2018, Antalya, Turkey, Proceedings Book, 752-763. E-ISBN: 978-605-68537-1-5.
- [44] KARASU, T. (2018). Numerical investigation of turbulent recirculating flow in double-sided planar sudden expansions in channels. 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Technologies (ICAT'18), April 28-May 1, 2018, Antalya, Turkey, Proceedings Book, 764-773. E-ISBN: 978-605-68537-1-5.
- [45] KARASU, T. (2018). Computer analysis and modelling of confined turbulent recirculating flows. 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME'2018), 19-21 December 2018, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, Proceedings Book, 363-382. ISBN 978-605-9546-13-3.
- [46] LAUNDER, B. E., and SPALDING, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Comp. Meth. Appl. Mech. Engng, 3, 269-289.
- [47] PATANKAR, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, D.C., Chapters 5 and 6, 79-138.
- [48] 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.
- [49] SPALDING, D. B. (1981). A general-purpose computer program for multi-dimensional one-and-two phase flow. Math. Comput. Simulation, XXIII, 267-276.

## ÖZGEÇMİŞ

### Tahir KARASU

1950 yılı Eskişehir doğumludur. **D.I.C.** (**D**iploma of **I**mperial **C**ollege), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, İngiltere; **M.Sc.**, The University of Birmingham, Birmingham, İngiltere; ve **Ph.D.**, The University of London, London, İngiltere, derecelerini almıştır. 1982-1983 yıllarında Amerika Birleşik Devletlerinde Kaliforniya'da Los Angeles'ta University of Southern California'da postdoktoral araştırmacı olarak çalışmıştır. 1981-1986 yıllarında Uludağ Üniversitesi'nde, 1986-1988 yıllarında Çukurova Üniversitesi'nde ve 1988-1993 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde çalışmıştır. 1984'te doçent, 1995'te profesör oldu. 1993 yılından beri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Termodinamik Anabilim Dalı Başkanlığını yapmakta olan Prof. Dr. Tahir Karasu İngilizce bilmekte ve ağırlıklı olarak Akışkanlar Mekaniği, Termodinamik, Isı Transferi, Türbülans, Sayısal Akışkanlar Dinamiği ve Sayısal Isı Transferi alanlarında çalışmaktadır. Prof. Dr. Tahir Karasu'nun ulusal ve uluslararası dergilerde ve kongrelerde yayınlanmış toplam 98 adet orijinal araştırma makalesi vardır.