



Bu bir MMO yayınıdır

# DAİRESEL KESİTLİ ANİ GENİŞLEMELİ BORULARDA ÇEVİRİNTİLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN BİLGİSAYARLI SİMÜLASYONU

Tahir KARASU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi



# DAİRESEL KESİTLİ ANİ GENİŞLEMELİ BORULARDA ÇEVİNTİLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN BİLGİSAYARLI SİMÜLASYONU

Tahir KARASU

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Meşelik,  
26480 Eskişehir, Türkiye. Tel: 0222 239 37 50 / (3355); Gsm: 0536 663 59 22; E-posta: tkarasu@ogu.edu.tr

## ÖZET

Bu araştırma, üç farklı Reynolds sayısı için dairesel kesitli aksenal simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrintili türbülanslı akışın kapsamlı bir çalışmasının bilgisayarlı simülasyon sonuçlarını takdim etmektedir. Hibrit yöntemiyle sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Aksenal simetrik anigenişlemeli borularda çeşitli aksenal kesitlerde, aksenal hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri, geri akışın geometrik yeri, boru simetri ekseni boyunca simetri ekseni üzerindeki aksenal hızın değişimi, üst cidar kayma gerilmesi dağılımı ile üst cidar statik-basınç katsayısının değişimi için bilgisayarlı simülasyonlar sunulmuş ve deneysel ölçümlerle ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Bilgisayarlı simülasyonların sonuçları deneysel ölçümlerle çok iyi uyum göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Anigenişlemeli borularda akış,  $k-\epsilon$  türbülans modeli, Simülasyonlar.

## ABSTRACT

This paper presents the results of an extensive study of computer simulation of steady, incompressible, complex turbulent recirculating flow through circular-sectioned sudden expansion pipes for 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. Computer solutions of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard high-Reynolds-number  $k-\epsilon$  turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall-functions are employed. Computer simulations for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, axial variation of centre-line velocity, wall static-pressure coefficient and wall-shear stress distributions along axisymmetric sudden expansion pipe flow geometry are presented and compared with experimental measurements. The results of computer simulations show very good agreement with experimental data.

**Key Words:** Flow through sudden expansion pipes,  $k-\epsilon$  turbulence model, Simulations.

## 1. GİRİŞ

Eksenel simetrik anigenişlemeli bir boruda aşağı akıştaki türbülanslı akış alanı ayrımlı, 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 boru cidarına çarptığı noktaya yeniden birleşme noktası adı verilir. Çevrıntili akış bölgesindeki yüksek ters basınç gradyanı türbülans seviyesi ile istikrarsızlığı artırarak geri akışa neden olmaktadır. Akış yapışma noktası civarında ve çevrıntili akış bölgesinde yaratılan anaförler yüksek yoğunlukta bir türbülans kaynağı olarak algılanabilir. Müteakip taşınım, yayınım ve türbülanslı anaförlerin zayıflaması zaman ortalama akış özellikleri üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Literatürde dairesel kesitli eksenel simetrik anigenişlemeli borularda karmaşık çevrıntili türbülanslı akış üzerine pek çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. En çok ilgi çekici çalışmalar arasında olanlar [1]-[31] çalışmalarıdır. Bu araştırmanın ana amacı, dairesel kesitli anigenişlemeli borularda, standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelini [32] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, sürekli, sıkıştırılmayan, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın bilgisayarlı simülasyonunu yapmak ve bilgisayarlı simülasyonların sonuçlarını Poole ve Escudier [17], Ahmed ve Abidogun [12,13] ile Escudier ve Smith’in [31] deneysel ölçümleriyle karşılaştırmaktır.

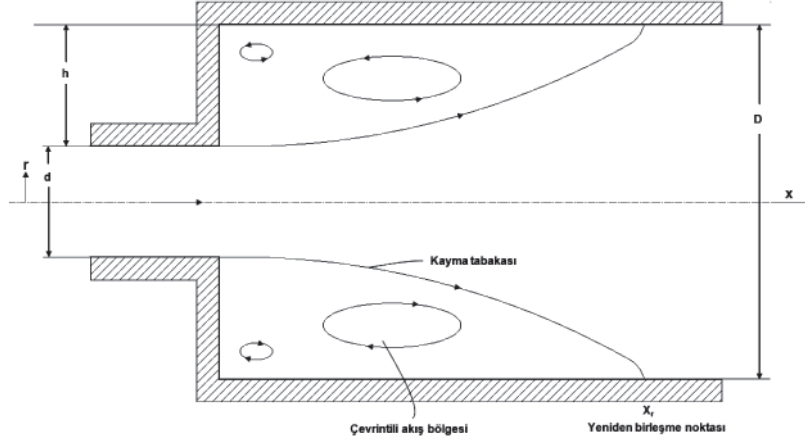
## 2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

### 2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1’e ilişkin olarak, dairesel kesitli eksenel simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın hesaplanmasında kullanılan matematiksel ve fiziksel model, akışı yöneten hareket denklemlerinin türbülans modeli denklemleriyle beraber aynı anda çözümlenmesini gerektirmektedir. Süreklilik, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı korunumunu gösteren taşınım denklemleri, sürekli durum ve eksenel simetrik silindirik koordinatlarda 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  $\phi$  genel bir bağımlı değişkendir.  $u$  ve  $v$  değişkenleri aksel ve radyal hız bileşenleridir,  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $\Gamma_\phi$  taşınım katsayısı,  $S_\phi$  ise kaynak terimidir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli  $k-\varepsilon$  modelidir [32]. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [33,34]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Silindiriksel koordinat sistemi ve anigenişlemeli boru akış geometrisi.

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 :

- $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$
- Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir (Launder and Spalding, 1974):  
 $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$
- $G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$

## 2.2. Sınır Koşulları

Şekil 1'e ilişkin olarak, incelenen dairesel kesitli aksenal simetrik anigenişlemeli borularda karmaşık çevrıntili türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıda sunulmuştur. Anigenişlemeli boru girişinde deneysel duruma karşılık olan düzgün bir aksenal hız dağılımı belirtilmiş, radyal hız ise sifıra eşit kılınmıştır.  $k$  ve  $\varepsilon$  türbülans büyüklüklerine düzgün giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani,  $k = (0.002-0.003) u_c^2$  ve  $\varepsilon = (C_\mu k^{3/2} / 0.03R)$ , burada  $u_c$  büyük çaplı borunun girişinde küçük çaplı borudaki simetri eksenini üzerindeki hızdır,  $R$  ise büyük çaplı borunun yarıçapıdır. Çıkışta tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, çıkış düzlemi çevrıntili akış bölgesinden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde radyal hız sifır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sifır olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar giriş düzleminde aşağı akışta 60 basamak yüksekliğindeki ( $h$ ) uzunlukta yerleştirilen çıkış düzleminine kadar yapılmıştır. Anigenişlemeli boru ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani,  $(\partial\phi/\partial r) = v = 0$ ,  $\phi$  burada  $u$ ,  $k$  ya da  $\varepsilon$  olabilir. Üst ve basamak cidarlarında hız bileşenleri  $u$ ,  $v$  ile türbülans büyüklükleri  $k$  ve  $\varepsilon$  sifıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında  $k$  ve  $\varepsilon$ 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [32] 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 [33] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) eşitliğiyle verilen kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemiyle bir kontrol hacme dayanan sonlu fark metoduyla ayrılaştırılmıştır. Sınır koşullarıyla bağımlı olarak kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu hacim biçimleri, üç köşegenli matris formuyla birlikte, kolon-kolon çözüm yöntemini kullanarak iteratif olarak çözülmüştür, Spalding [35].

## 2.4. Hesaplama Ayrıntıları

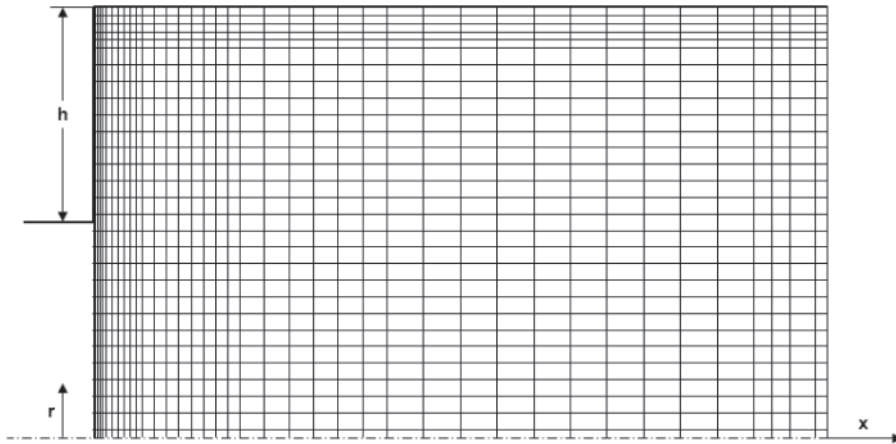
Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Poole ve Escudier'in [17] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan sayısal ağ aksenal simetrik anigenişlemeli borunun cidarları yakınında ve çevrıntili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Aksenal ve radyal hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Diğer tüm ilgili büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış 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<sup>-5</sup> değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesi ölçütüdür. Dairesel kesitli aksenal simetrik anigenişlemeli 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 incelenen tüm akış durumları için hesaplama gereksinimlerinin ayrıntılarını özetlemektedir. Bu tabloda  $N$  yakınsamış bir çözüm elde etmek için yapılmış olan iterasyonların sayısıdır,  $T$  ise cpu saniye cinsinden zaman ve  $T/N$ 'de iterasyon sayısı başına zamandır.

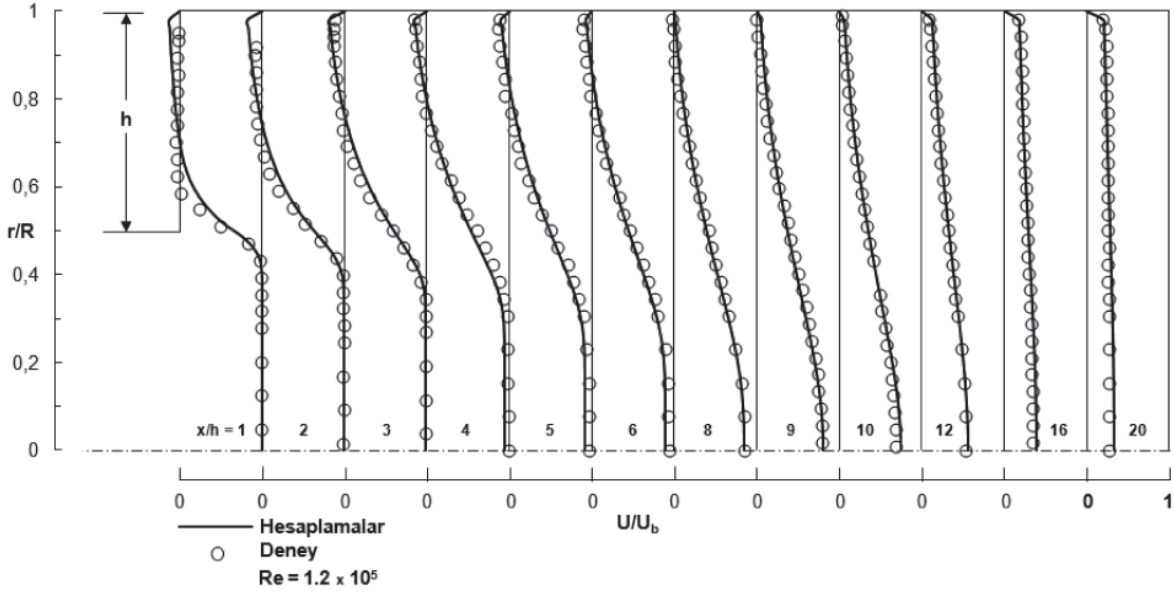
**Tablo 2.** Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı.

Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü ( $x$ ) $\times$ ( $r$ )	T cpu zamanı ( saniye)	N İterasyon Sayısı	T / N
Poole ve Escudier [17]	<b>120 000</b>	40 $\times$ 30	6.875	524	0.01312
Ahmed ve Abidogun [12,13]	<b>115 000</b>	40 $\times$ 30	5.0625	362	0.01398
Escudier ve Smith [31]	<b>26 000</b>	40 $\times$ 30	4.984	348	0.01432

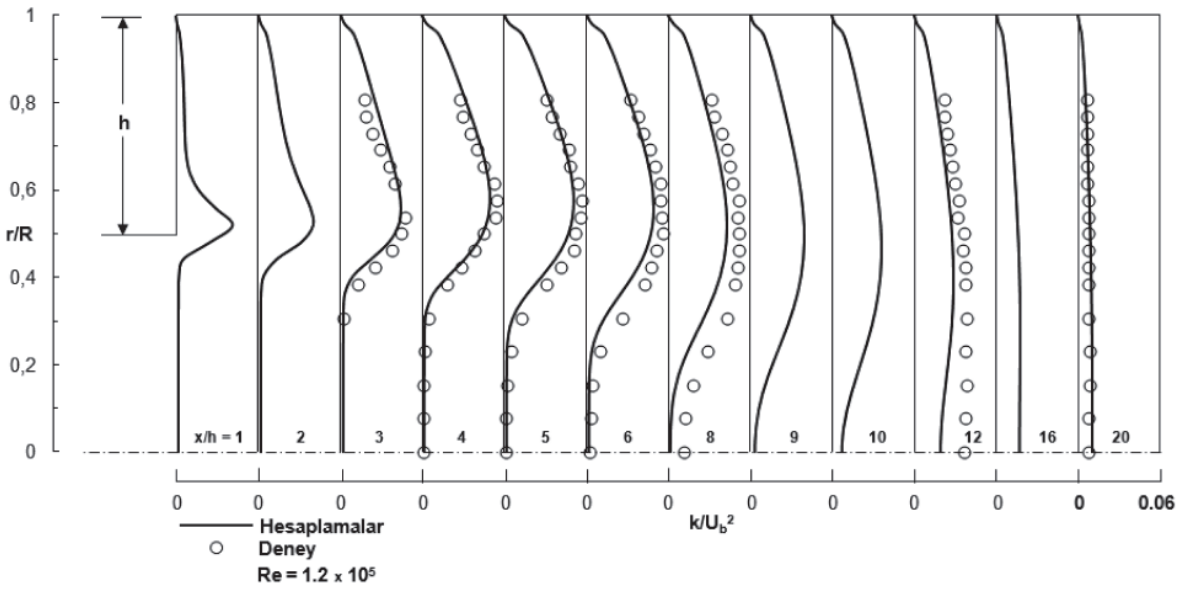
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Buradaki sayısal araştırmada, çalışma akışkanı olarak su kullanılan eksenel simetrik anigenişlemeli boruda, Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçümleri hesaplamalarla karşılaştırılmaya temel esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru geometrisi  $D/d=2$  gibi bir genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı  $Re = 1.2 \times 10^5$ 'dir ( $Re = \rho u_b h/\mu$ , burada  $u_b$  anigenişlemenin girişinde akışın ortalama hızıdır,  $h$  ise basamak yüksekliğidir). Anigenişlemeli boruda sayısal hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akışta 60 basamak yüksekliğinde ( $h$ ) bir eksenel mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 2'de Poole ve Escudier'in [17] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve bunların Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak  $u/u_b$ ,  $k/u_b^2$  ve radyal uzunluk  $r/R$  cinsinden,  $x/h=1$ 'den 20'ye kadar olan ve basamak yüksekliğine dayanan boyutsuz eksenel uzunluklarda belirlenen 12 eksenel kesitte sırasıyla Şekil 3 ve 4'te sergilenmiştir.

**Şekil 2.** Poole ve Escudier'in [17] anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.



**Şekil 3.** Hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

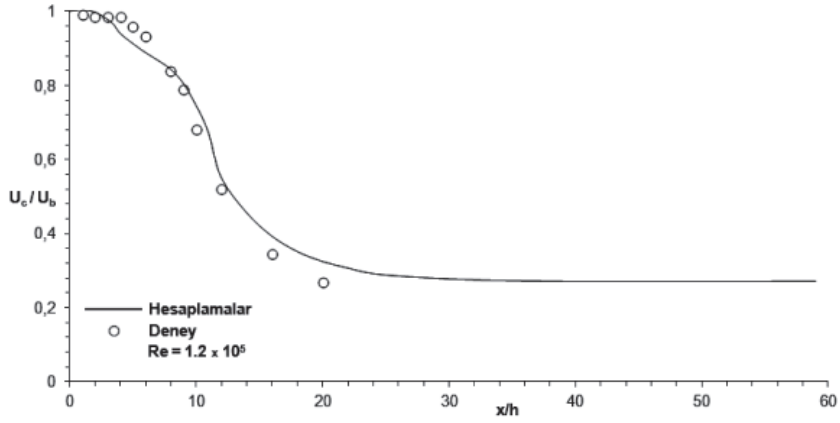


**Şekil 4.** Hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

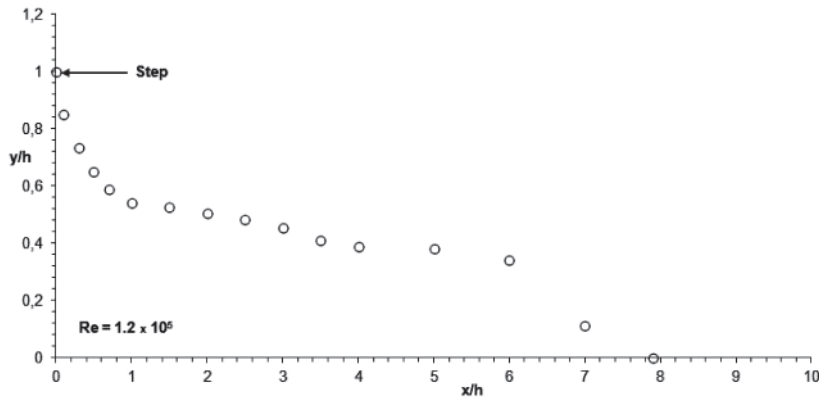
Şekil 3'ten görüldüğü üzere, hesaplanan aksel hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum vardır. Şekil 3 aynı zamanda, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe,  $x/h=20$  aksel kesitinde görüldüğü gibi, aksel hızın radyal dağılımının kesit karşısında düzleştiğini de göstermektedir. Çevrimsel akış bölgesinin girişinde,  $k-\epsilon$  türbülans modeli deneysel ölçümlerin gösterdiğinden biraz daha yüksek negatif aksel hızlar hesaplanmaktadır. Kayma tabakasının hesapla-

nan akış yapışma uzunluğu takriben  $x/h=7.9$  kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise  $x/h = 9.6$  kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 4'te gösterilen hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında elde edilen uyum oldukça iyi olmasına rağmen, çevrintili akış bölgesinin girişinde hesaplanan profiller başlangıçta deneysellerin biraz üstünde kalırken, daha sonra  $x/h=8$ 'den 12'ye kadar olan akış yönü ekstenel kesitlerinde ise deneysellerin altında kalmaktadır. Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılmamasıdır. Şekil 4 tekrar gözden geçirildiğinde görülüyor ki, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu olay aynı zamanda hesaplamalar tarafından da teyit edilmektedir. Şekil 5 anigenişlemeli boru simetri eksenini boyunca, hesaplanan ve ölçülen simetri eksenindeki hızın ( $u_c$ ) değişiminin bir karşılaştırmasını sergilemektedir. Simetri eksenindeki hız ( $u_c$ ), girişteki ortalama hız ( $u_b$ ) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınan akış yönü uzunluğunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan simetri eksenindeki hızının ekstenel değişimi, anigenişlemeli akış borusunun giriş bölgesinde daha hızlı, aşağı akış bölgesinde ise biraz daha yavaş olmaktadır. Bununla beraber, genel olarak, hesaplanan ekstenel değişim ile deneysel değişim arasında iyi bir uyum vardır. Ekstenel simetrik anigenişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 6'da sunulmuştur. Cidardan ölçülen dikey uzunluk  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuz hale getirilen aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminden aşağı akış yönünde takriben  $x/h=7.9$  kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise  $x/h=9.6$  kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 7 ve 8 Poole ve Escudier'in [17] ekstenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca, sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 3 ve 4'teki gibi aynı aşağı akış yönü ekstenel kesitlerinde göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı  $\varepsilon_{max}$  ve maksimum efektif viskozite  $\mu_{max}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin anigenişlemeli akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini gözönüne sermektedir. Hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısı ( $C_p = \Delta P / 0.5 \rho U_b^2$ ) Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 9'da gözler önüne serilmiştir. Görüldüğü üzere, hesaplanan basınç katsayısının ekstenel değişiminin biçimi deneysel ölçümlerle neredeyse aynıdır. Pozitif sayısal statik-basınç gradyanlı akış yapışma uzunluğunun çok aşağısında yaklaşık olarak  $x/h=22$  kesitinde meydana gelmektedir. Son olarak, Şekil 10'da, Poole ve Escudier'in [17] ekstenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı ( $\tau_w$ ), basamak yüksekliğiyle boyutsuz kılınan aşağı akış uzunluğunun bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değerine yaklaşık olarak  $x/h = 54$  kesitinde ulaşılmıştır.

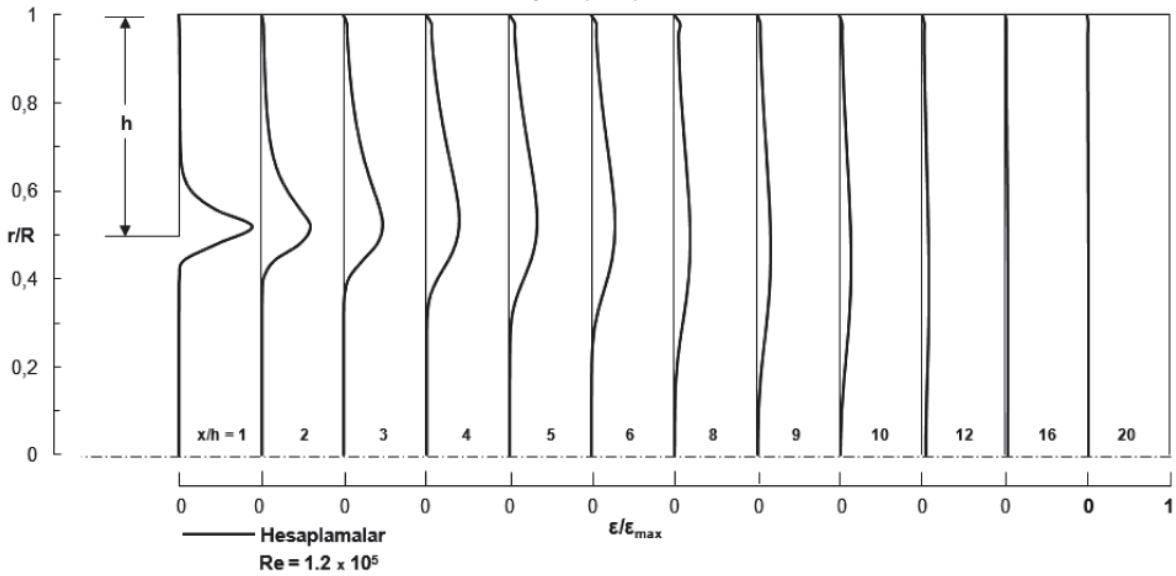




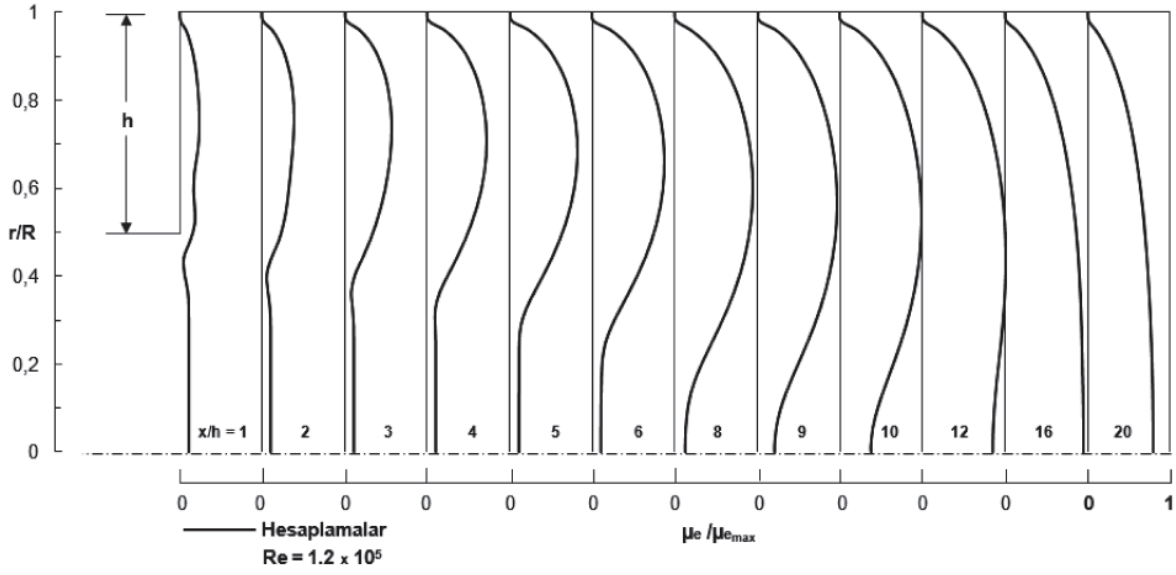
Şekil 5. Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenini üzerindeki aksel hızın değişiminin Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



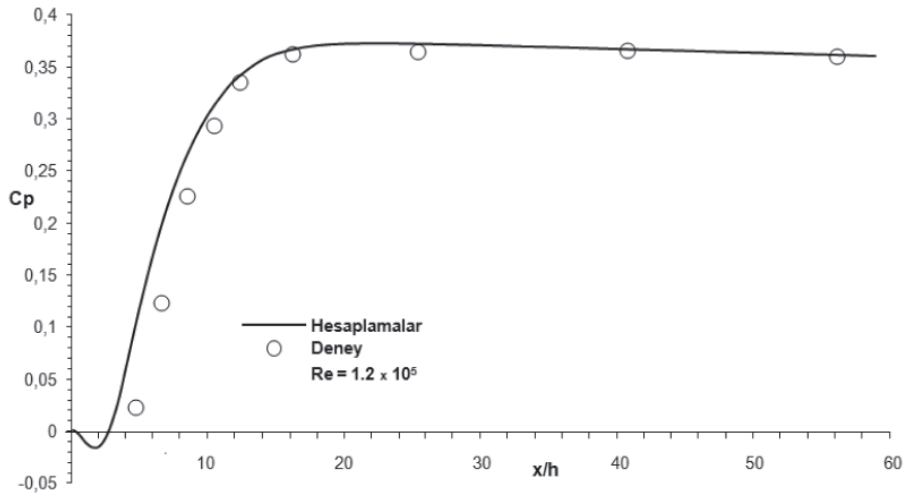
Şekil 6. Poole ve Escudier'in [17] anigenişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



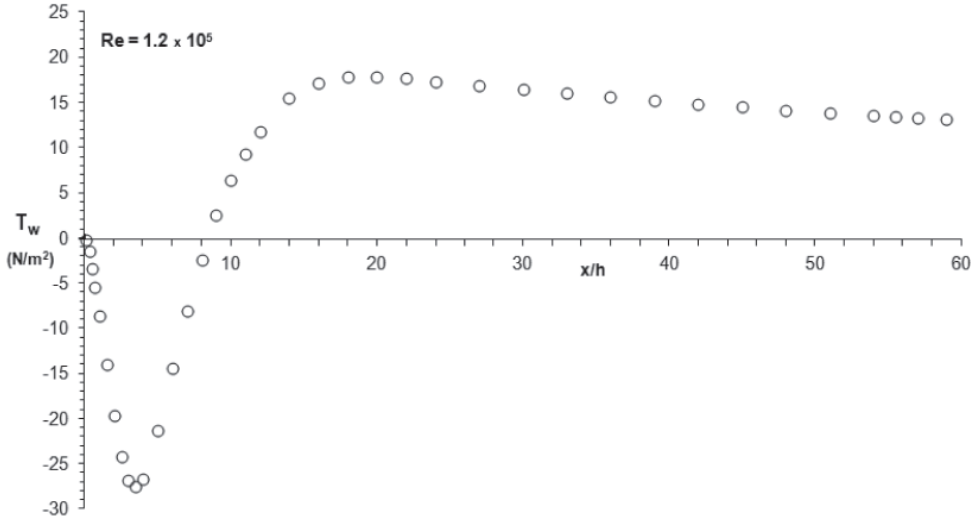
Şekil 7. Poole ve Escudier'in [17] aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 8. Poole ve Escudier'in [17] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



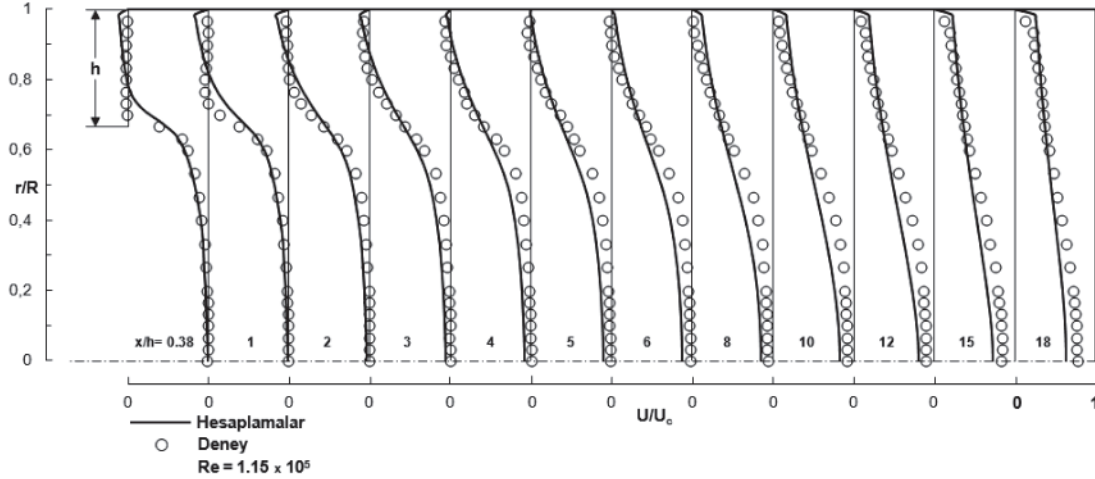
Şekil 9. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının ( $C_p$ ) Poole ve Escudier'in [17] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



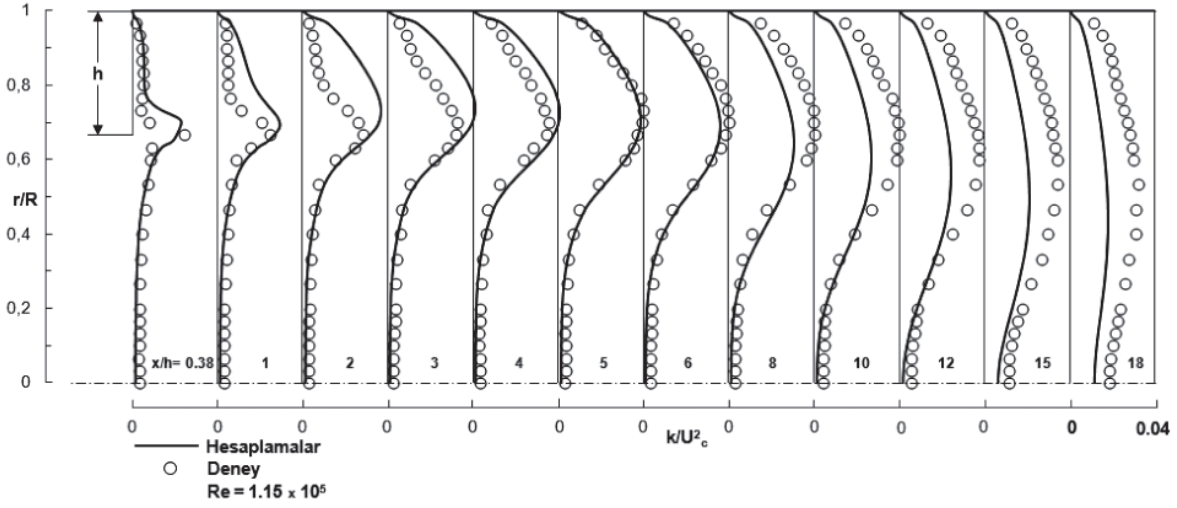
**Şekil 10.** Poole ve Escudier'in [17] anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

İkinci akış geometrisi  $D/d=1.5$  genişleme oranıyla çalışma akışkanı olarak hava kullanılan Ahmed ve Abidogun'un [13] aksel simetrik anigenişlemeli boru akışı deneyine karşılık olmaktadır. Girişte akışın Reynolds sayısı  $Re=1.15 \times 10^5$ 'dir ( $Re=U_c d/v$ , burada  $U_c$  girişte üstakım simetri eksenini hızıdır,  $d$  ise girişteki boru çapıdır). Bu akış durumu için hesaplama alanı anigenişlemeden aşağı akışta 35 basamak yüksekliğinde ( $h$ ) bir aksel mesafeye kadar uzatılmıştır. Hesaplanan aksel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve bunların Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak  $U/U_c$ ,  $k/U_c^2$  ve radyal uzunluk  $r/R$  cinsinden,  $x/h=0.38$ 'den 18'e kadar olan ve basamak yüksekliğine dayanan boyutsuz aksel uzunluklarda belirtilen 12 aksel kesitte sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gözönüne serilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü üzere, hesaplanan aksel hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum vardır. Çevrintili akış bölgesinin girişinde,  $k-\varepsilon$  türbülans modeli deneysel ölçümlerin gösterdiğinden biraz daha yüksek negatif aksel hızlar hesaplanmaktadır. Kayma tabakasının hesaplanan akış yapışma uzunluğu yaklaşık olarak  $x/h=5.15$  kesitinde olduğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise yaklaşık olarak  $x/h=8.1$  kesitinde olduğu bildirilmiştir. Şekil 12'de gösterilen hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri ile karşılıkları olan ölçülenler arasında elde edilen uyum oldukça iyi olmasına rağmen, çevrintili akış bölgesinde hesaplanan profiller önce ölçülenlerin biraz üstünde kalırken, daha sonra  $x/h=8$ 'den 18'e kadar olan akış yönü aksel kesitlerinde ise ölçülenlerin biraz altında kalmaktadır. Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılamamasıdır. Şekil 12 tekrar gözden geçirildiğinde görülüyor ki, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu olay aynı zamanda hesaplamalar tarafından da gösterilmiştir. Şekil 13 anigenişlemeli boru simetri eksenini boyunca, hesaplanan ve ölçülen simetri eksenini üzerindeki hızın ( $U_c$ ) değişiminin bir karşılaştırmasını takdim etmektedir. Simetri eksenini üzerindeki hız ( $U_c$ ), girişteki simetri eksenini hızıyla ( $U_{cin}$ ) boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınan akış yönü uzunluğunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan simetri eksenini hızının aksel değişimi, anigenişlemeli akış borusunun giriş bölgesinde daha hızlı, aşağı akış bölgesinde ise biraz daha yavaş olmaktadır. Bununla beraber, genel olarak, hesaplanan aksel değişim ile deneysel aksel

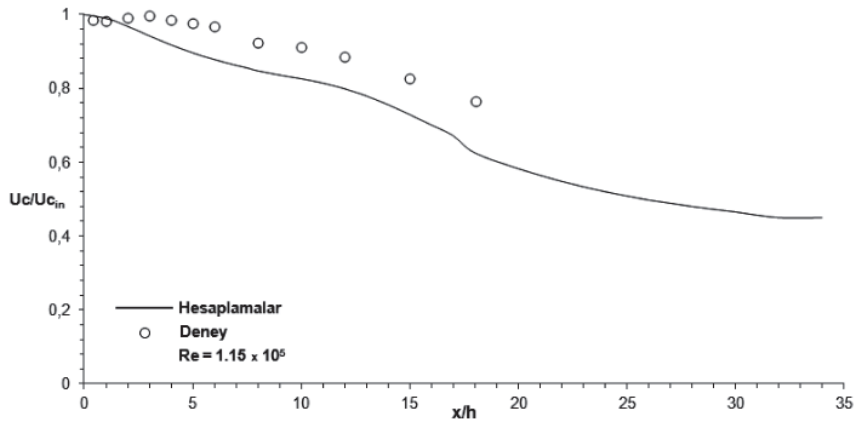
değişim arasında makul bir uyum vardır. Anigenişlemeli akış borusu simetri eksenini boyunca ( $r/R=0$ ) hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerjinin ( $k^{0.5}/U_{cin}$ ) aksenal değişimi, Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 14'te karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasındaki trend aynı olup iyi bir uyum gözlenmektedir. Aksenal simetrik anigenişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 15'te verilmiştir. Cidardan ölçülen dikey uzunluk  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuz hale getirilen aşağı akış uzunluğunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminden aşağı akış yönünde takriben  $x/h=5.15$  kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise takriben  $x/h=8.1$  kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Yine şekilde gösterilen içi boş daire sembollerinde hız sıfır ( $u=0$ ) olup, bu daire sembollerin üstünde kalan bölgede hız ( $u$ ) pozitifdir (akış yönünde), altında kalan bölgede ise hız negatiftir (akışa zıt yönde). Şekil 16 ve 17 Ahmed ve Abidogun'un [13] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca, sırasıyla, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 11 ve 12'deki gibi aynı aşağı akış yönü aksenal kesitlerinde göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı  $\varepsilon_{max}$  ve maksimum efektif viskozite  $\mu_{emax}$  ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite radyal profillerinin anigenişlemeli akış borusu boyunca nasıl geliştiklerini gözönüne sermektedir. Son olarak, Şekil 18'de, Ahmed ve Abidogun'un [13] anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı ( $\tau_w$ ), basamak yüksekliği ile boyutsuz kılınan aşağı akış uzunluğunun bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, anigenişlemenin başlangıcından takriben  $x/h=5$  kesitine kadar kayma gerilmesi ( $\tau_w$ ) negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlardan ( $-u$ ) kaynaklanmaktadır. Cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler olarak hızla bir maksimum değere ulaştıktan sonra, negatif yönde azalarak takriben  $x/h=5$  kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler olarak artmakta ve yaklaşık olarak  $x/h=30$  kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşmaktadır.



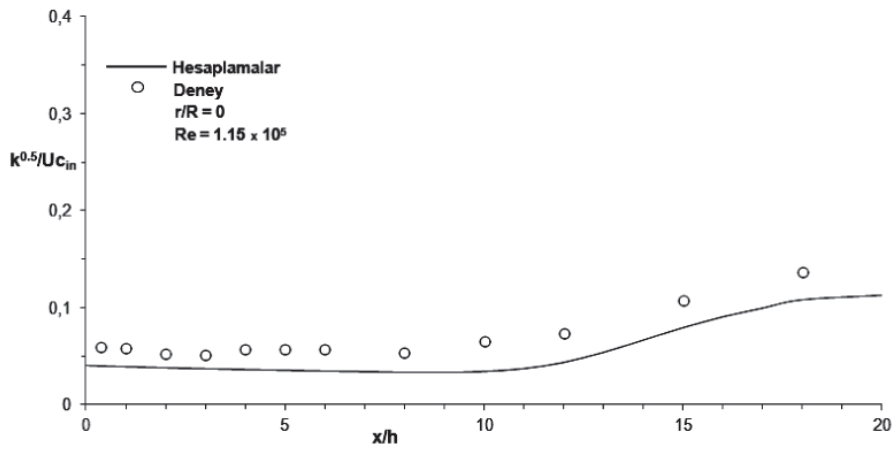
Şekil 11. Hesaplanan boyutsuz aksenal hız radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



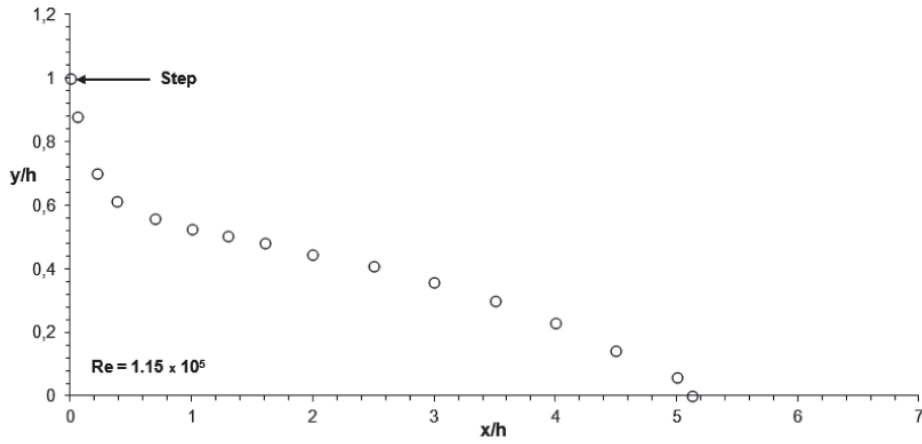
Şekil 12. Hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



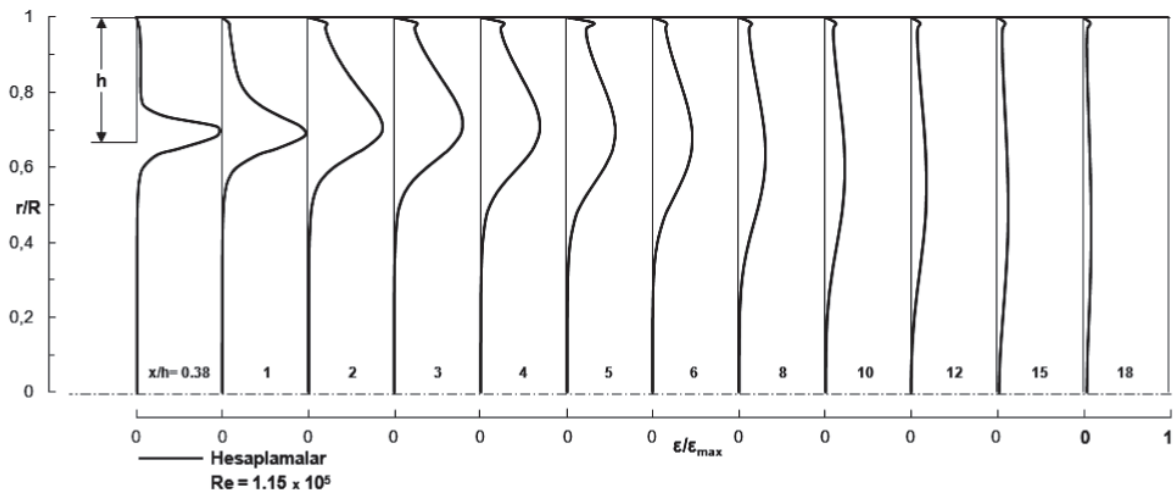
Şekil 13. Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan simetri eksenindeki aksel hızın değişiminin Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



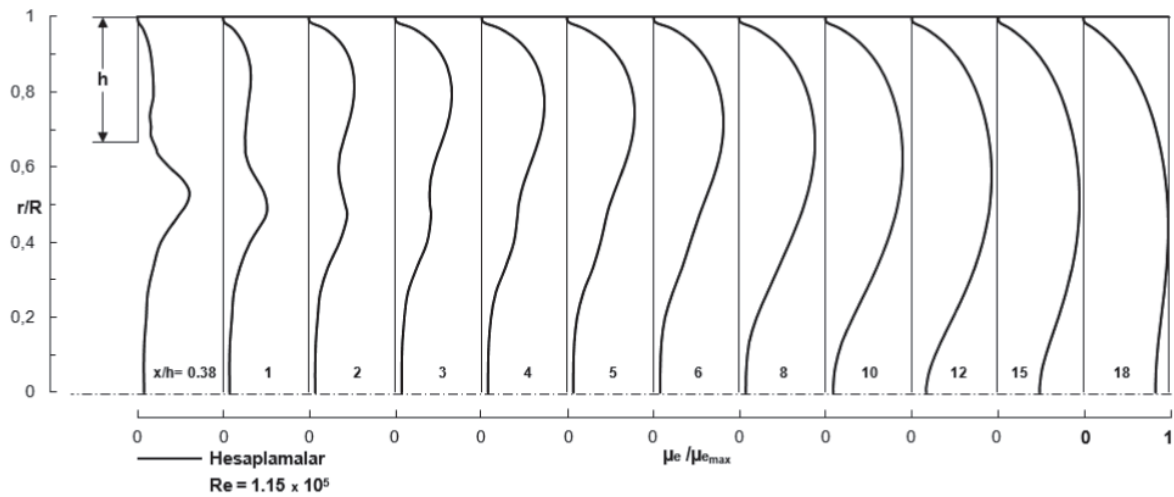
Şekil 14. Anigenişlemeli akış borusu boyunca simetri ekseninde hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji değişiminin Ahmed ve Abidogun'un [13] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



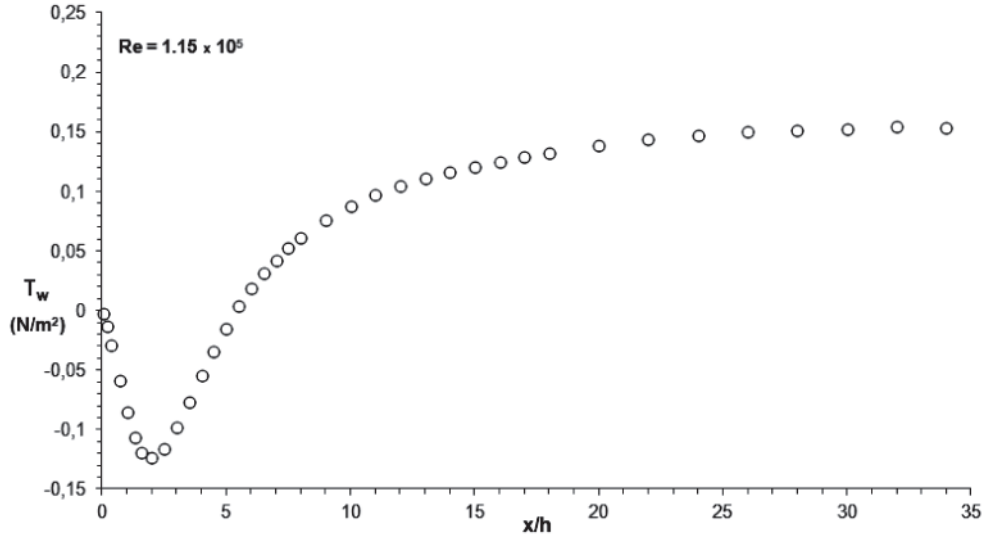
Şekil 15. Anigenişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 16. Hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



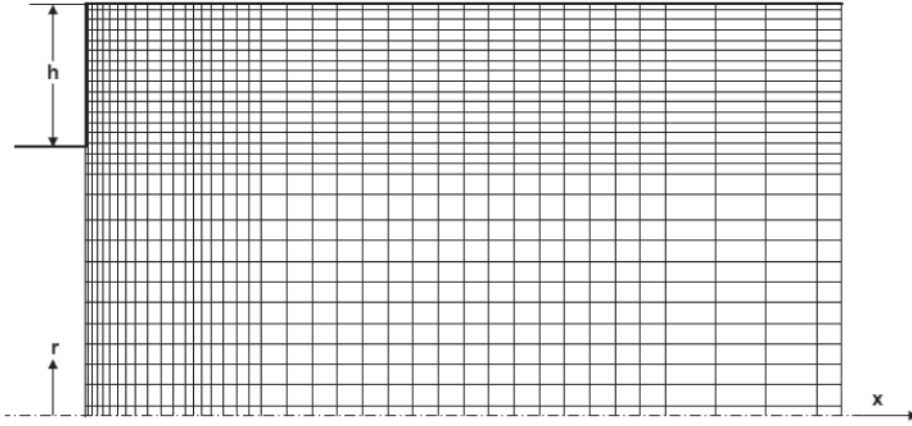
Şekil 17. Hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



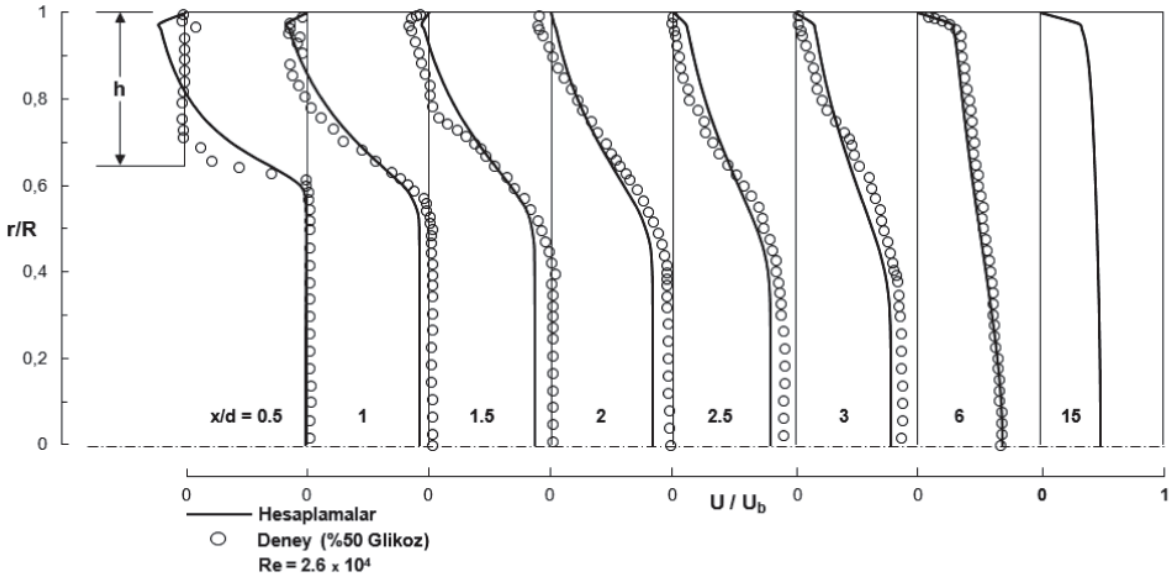
**Şekil 18.** Anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Çalışma akışkanı olarak ağırlıkça %50 konsantrasyona sahip glikoz-su sıvı çözeltisi kullanılan ekse- nel simetrik anigenişlemeli akış borusunda, Escudier ve Smith'in [31] deneysel çalışması, buradaki sayısal çalışma için üçüncü anigenişlemeli akış borusu geometrisi olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru geometrisi  $D/d=1.538$  gibi bir genişleme oranına sahiptir. Akışın girişte Reynolds sayısı  $Re = 2.6 \times 10^4$ 'tür ( $Re = \rho u_b d / \mu$ , burada  $u_b$  anigenişlemenin girişinde küçük çaplı boruda akışın ortalama hızıdır,  $d$  ise giriş borusunun çapıdır). Anigenişlemeli boruda sayısal hesaplama alanı giriş düzleminde aşağı akışta  $x=15d$  kadar bir eksenel mesafeye uzatılmıştır. Şekil 19'da Escudier ve Smith'in [31] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Hesaplanan eksenel hız radyal profilleri ve bunların Escudier ve Smith'in [31] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak  $U/U_b$  ve radyal uzunluk  $r/R$  cinsinden,  $x/d=0.5$ 'den 15'e kadar olan ve giriş borusunun çapına ( $d$ ) dayanan boyutsuz eksenel uzunluklarda belirlenen 8 eksenel kesitte Şekil 20'de takdim edilmiştir. Şekil 20'den görüldüğü üzere, hesaplanan eksenel hız radyal profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında iyi bir uyum vardır. Şekil 20 aynı zamanda, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe,  $x/d=15$  eksenel kesitinde görüldüğü gibi, eksenel hızın radyal dağılımının kesit karşısında düzleştiğini de göstermektedir. Çevrintili akış bölgesinin girişinde,  $k-\epsilon$  türbülans modeli deneysel ölçümlerin gösterdiğinden biraz daha yüksek negatif eksenel hızlar hesaplamaktadır. Kayma tabakasının hesaplanan akış yapışma uzunluğu takriben  $x_r/h=6.8$  kesitinde olduğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise  $x_r/h=9.7$  kesitinde olduğu bildirilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ) Şekil 21'de sunulmuştur. Cidardan ölçülen dikey uzunluk  $y$ , basamak yüksekliği ( $h$ ) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuz hale getirilen aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminde aşağı akış yönünde takriben  $x_r/h=6.8$  kesitinde olduğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise  $x_r/h=9.7$  kesitinde olduğu bildirilmiştir. Yine şekilde gösterilen içi boş daire sembollerinde hız sıfır ( $u=0$ ) olup, bu daire sembollerin üstünde kalan bölgede hız ( $u$ ) pozitifdir (akış yönünde), altında kalan bölgede ise hız negatifdir (akışa zıt yönde). Hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısı ( $C_p = \Delta P / 0.5 \rho U_b^2$ ) Escudier ve Smith'in [31] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 22'de sergilenmiştir. Görüldüğü üzere, hesap-

lanan basınç katsayısının aksel değişiminin biçimi deneysel ölçümlerle neredeyse aynıdır. Pozitif sayısal statik-basınç gradyanı akış yapışma uzunluğunun çok aşağısında yaklaşık olarak  $x/h=31.57$  kesitinde meydana gelmektedir. Son olarak, Şekil 23'de, Escudier ve Smith'in [31] anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı ( $\tau_w$ ), basamak yüksekliği ile boyutsuz kılınan aşağı akış uzunluğunun bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, anigenişlemenin başlangıcından takriben  $x/h=6.9$  kesitine kadar kayma gerilmesi ( $\tau_w$ ) negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler olarak hızla bir maksimum değere ulaştıktan sonra, negatif yönde azalarak takriben  $x/h=6.9$  kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler olarak artmakta ve yaklaşık olarak  $x/h=35$  kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaşmaktadır.

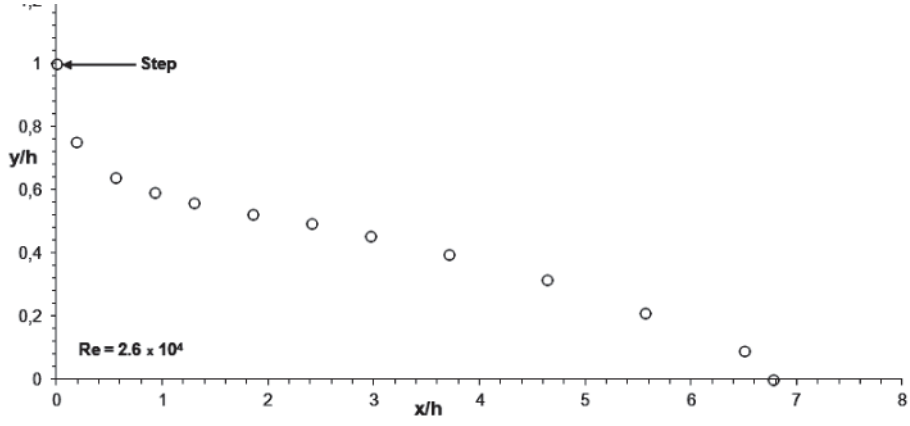


Şekil 19. Escudier ve Smith'in [31] anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

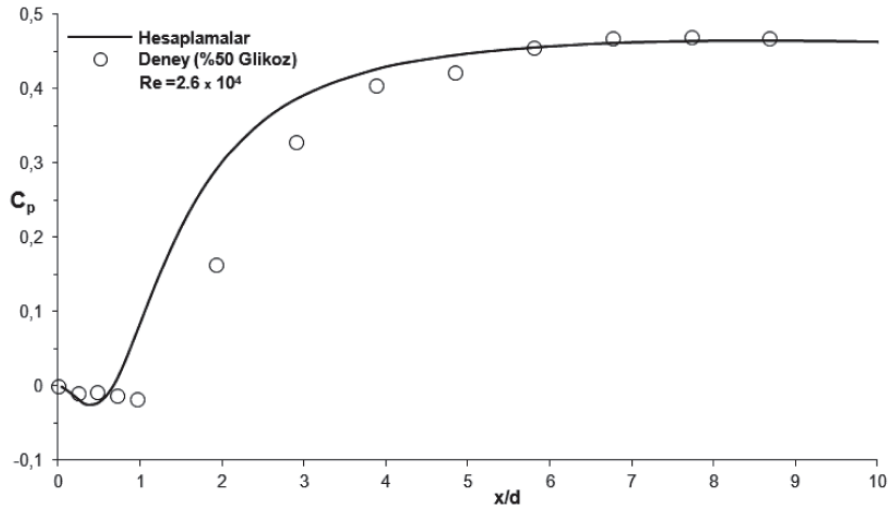


Şekil 20. Hesaplanan boyutsuz aksel hız radyal profillerinin Escudier ve Smith'in [31] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması (glikoz-su sıvı çözeltisi).

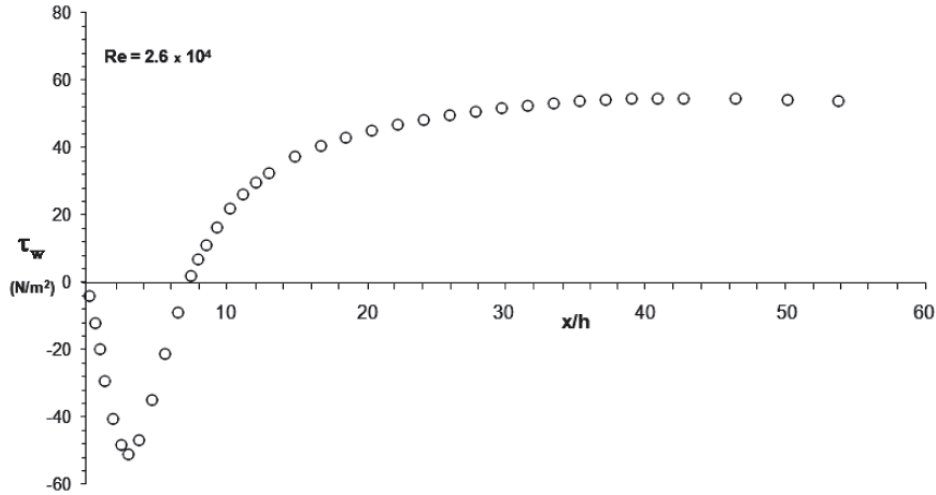




Şekil 21. Escudier ve Smith'in [31] anigenişlemeli akış borusu için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ( $u=0$ ).



Şekil 22. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının ( $C_p$ ) Escudier ve Smith'in [31] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması (glikoz-su sıvı çözeltisi).



Şekil 23. Escudier ve Smith'in [31] anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

#### 4. SONUÇLAR

Bu araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Dairesel kesitli aksenal simetrik anigenişlemeli borularda ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrıntili türbülanslı akış,  $Re = 1.2 \times 10^5$ ,  $Re = 1.15 \times 10^5$  ile  $Re = 2.6 \times 10^4$  Reynolds sayıları için standart yüksek Reynolds sayılı  $k-\epsilon$  türbülans modelini kullanarak, sayısal olarak hesaplanmıştır. Sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar'ın [33] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Aksenal simetrik anigenişlemeli borularda çevrıntili türbülanslı akış için standart  $k-\epsilon$  türbülans modelinin performansı araştırılmıştır.  $k-\epsilon$  türbülans modeline dayanan aksenal hız, türbülans kinetik enerji, üst cidar statik-basınç katsayısı ve simetri eksenine üzerindeki aksenal hızın değişimi, literatürde bildirilen deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Aksenal hız ile üst cidar statik-basınç katsayısının hesaplanan ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılması çok iyi uyum vermiştir. Buna rağmen, çevrıntili akış bölgesinin yapışma uzunluğu ve genişliği  $k-\epsilon$  türbülans modeli tarafından daha kısa olarak hesaplanmıştır. Ayrımlı ve yeniden birleşmeli akışın kayma tabakasından anigenişlemeli borunun simetri eksenine doğru türbülans kinetik enerjinin radyal yayılımı, standart  $k-\epsilon$  türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanması hariç olmak üzere, hesaplanan ile deneysel türbülans kinetik enerji değerleri arasındaki uyum oldukça iyi olmuştur.

#### 5. SEMBOLLER

$C_1, C_2, C_\mu$	: Türbülans modeli sabitleri
$C_p$	: Statik-basınç katsayısı [ $C_p = \Delta P / 0.5\rho U_b^2$ ]
$d, D$	: Boru çapı
$E$	: Logaritmik yasa sabiti ( $E = 9.0$ )
$G$	: Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
$h$	: Basamak yüksekliği
$k$	: Türbülans kinetik enerji
$P$	: Basınç
$r$	: Akışa dik yönde ölçülen mesafe (radyal mesafe)
$R$	: Borunun yarıçapı
$Re$	: Reynolds sayısı
$S_\phi$	: Taşınım denklemlerinde kaynak terimi
$U$	: Akış yönü hızı (aksenal hız bileşeni)
$U_c$	: Simetri eksenindeki hız
$U_b$	: Debiden hesaplanan ortalama hız (bulk velocity)
$u_p$	: Cidar yakınında P düğüm noktasında cidara paralel ortalama hız
$u_\tau$	: Sürtünme hızı ( $= \sqrt{\tau_w / \rho}$ )
$u^+$	: Boyutsuz hız ( $= u_p / u_\tau$ )
$u', v', w'$	: Türbülans çalkantıları
$v$	: Radyal hız bileşeni
$x$	: Akış yönünde ölçülen mesafe (aksenal mesafe)
$y_p$	: Cidardan, cidar yakınındaki P ağ düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe
$y^+$	: Boyutsuz cidar mesafesi ( $= y_p u_\tau / \nu$ )

$\varepsilon$	: Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
$\phi$	: Genel değişken
$\kappa$	: von Karman sabiti (= 0.41)
$\mu$	: Laminar dinamik viskozite
$\mu_t$	: Türbülans dinamik viskozite
$\mu_e$	: Efektif viskozite (= $\mu + \mu_t$ )
$\nu$	: Laminar kinematik viskozite (= $\mu / \rho$ )
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu
$\Gamma_\phi$	: Yayınım mübadele katsayısı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	: $k$ ve $\varepsilon$ 'nun yayınımı için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
$\tau_w$	: Cidar kayma gerilmesi

## 6. KAYNAKLAR

- [1] GOULD, R. D., STEVENSON, W. H., and THOMPSON, H. D., "Investigation of Turbulent Transport in an Axisymmetric Sudden Expansion", AIAA Journal, 28, pp. 276-283, 1990.
- [2] STEVENSON, W. H., THOMPSON, H. D., and CRAIG, R. R., "Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculating Flows", ASME J. Fluids Eng., 106, pp. 173-180, 1984.
- [3] DURRETT, R. P., STEVENSON, W. H., and THOMPSON, H. D., "Radial and Axial Turbulent Flow Measurements with an LDV in an Axisymmetric Sudden Expansion Air Flow", ASME J. Fluids Eng., 110, pp. 367-372, 1988.
- [4] CHATURVEDI, M. C., "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions", J. Hydraulics Div., Proc., ASCE, 89, HY3, pp. 61-92, 1963.
- [5] MOON, L. F., and RUDINGER, G., "Velocity Distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct", ASME J. Fluids Eng., 99, pp. 226-230, 1977.
- [6] FAVALORO, S. C., NEJAD, A. S., and AHMED, S. A., "Experimental and Computational Investigation of Isothermal Swirling Flow in an Axisymmetric Dump Combustor", J. Propulsion, AIAA J., 7 (3), pp. 348-356, 1991.
- [7] NEJAD, A. S., VANKA, S. P., FAVALORO, S. C., SAMIMY, M., and LANGENFELD, C., "Application of Laser Velocimetry for Characterization of Confined Swirling Flow", ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power, 111, pp. 36-45, 1989.
- [8] AHMED, S. A., ERCOFTAC Database: "Isothermal Dump Combustor with Swirl Experiments", Retrieved, from the World Wide Web: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/classif.html>, 1992.
- [9] AHMED, S. A., "Velocity Measurements and Turbulence Statistics of a Confined Isothermal Swirling Flow", Exp. Ther. Fluid Science, 17, pp. 256-264, 1998.
- [10] AHMED, S. A., and NEJAD, A. S., "Velocity Measurements in a Research Combustor; Part 1: Isothermal Swirling Flow", Exp. Ther. Fluid Science, 5, pp. 162-174, 1992.
- [11] NEJAD, A. S., and AHMED, S. A., "Flow Field Characteristics of an Axisymmetric Sudden Expansion Pipe Flow with Different Initial Swirl Distribution", Int. J. Heat and Fluid Flow, 13, No.4, pp. 314-321, 1992.
- [12] AHMED, S. A., and ABIDOGUN, K. B., "Measurements of Turbulence Statistics and Energy Budgets in a Model Combustor", Energy, 23, No.9, pp. 741-752, 1998.



- [13] AHMED, S. A., and ABIDOGUN, K. B., "An Experimental Investigation of Turbulence Statistics in an Axisymmetric Sudden Expansion", HTD-Vol. 346, National Heat Transfer Conference, Vol. 8, pp. 101-110, ASME, 1997.
- [14] COLE, D. R., and GLAUSER, M. N., "Flying Hot-Wire Measurements in an Axisymmetric Sudden Expansion", Experimental Thermal and Fluid Science, 18, pp. 150-167, 1998.
- [15] COLE, D. R., and GLAUSER, M. N., "Applications of Stochastic Estimation in the Axisymmetric Sudden Expansion", Physics of Fluids, 10, No.11, pp. 2941-2949, 1998.
- [16] TINNEY, C. E., GLAUSER, M. N., EATON, E. L., and TAYLOR, J. A., "Low-Dimensional Azimuthal Characteristics of Suddenly Expanding Axisymmetric Flows", J. Fluid Mech., 567, pp. 141-155, 2006.
- [17] POOLE, R. J., and ESCUDIER, M. P., "Turbulent Flow of Viscoelastic Liquids Through an Axisymmetric Sudden Expansion", J. Non-Newtonian Fluid Mech., 117, pp. 25-46, 2004.
- [18] DEVENPORT, W. J., and SUTTON, E. P., "An Experimental Study of Two Flows Through an Axisymmetric Sudden Expansion", Experiments in Fluids, 14, pp. 423-432, 1993.
- [19] FURUICHI, N., TAKEDA, Y., and KUMADA, M., "Spatial Structure of the Flow Through an Axisymmetric Sudden Expansion", Experiments in Fluids, 34, pp. 643-650, 2003.
- [20] MAK, H., and BALABANI, S., "Near Field Characteristics of Swirling Flow Past a Sudden Expansion", Chemical Engineering Science, 62, pp. 6726-6746, 2007.
- [21] LEE, D. H., and SUNG, H. J., "Experimental Study of Turbulent Axisymmetric Cavity Flow", Experiments in Fluids, 17, pp. 272-281, 1994.
- [22] KARASU, T., "Numerical Prediction of Incompressible Turbulent Swirling Flows in Circular-Sectioned Ducts and Annuli", Ph.D. Thesis, University of London, 1981.
- [23] KARASU, T., CHOUDHURY, P. R., and GERSTEIN, M., "Upwind ve Hybrid Diskritizasyon Metotları ile k- $\epsilon$  Türbülans Modelini Kullanarak Bazı Türbülanslı Akışların Hesaplanması", Doğa Bilim Dergisi, 9 (B), ss. 218-234, 1985.
- [24] KARASU, T., and SPALDING, D. B., "Prediction of Turbulent Swirling Flows in Annuli", Journal of the Faculty of Engineering of Uludağ University, Vol.1, pp. 21-42, 1984.
- [25] KARASU, T., "Numerical Prediction of Turbulent Recirculating Flow Through Axisymmetric Sudden Expansions", 10th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, 21st –25th July 1997, Swansea, U.K., Proceedings Book, Vol. 10, pp. 357-368, 1997.
- [26] KARASU, T., "Çift Yanlı Düzlemsel Anigenişlemeli Kanallarda Çevrintili Türbülanslı Akışın Bilgisayarlı Simülasyonu", XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi, 26-30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Bildiriler Kitabı, ss. 358-370, 2013.
- [27] KARASU, T., "Numerical Solution of Turbulent Flow with Heat Transfer in an Annulus with Rotating Inner Cylinder", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol. 12, No. 3, pp. 250-272, 1988.
- [28] KARASU, T., "Numerical Investigation of Developing Turbulent Flow Between Two Parallel Plates", 7th International Advanced Technologies Symposium, 30th October-1st November 2013, Istanbul, Turkey, Proceedings Book, pp. 49-56, 2013.
- [29] KARASU, T., "Düzlemsel Simetrik Anigenişlemelerde Çevrintili Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması", 9.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 25-28 Aralık 2013, Konya, Bildiriler Kitabı, ss. 768-778, 2013.
- [30] KARASU, T., "Numerical Prediction of Turbulent Flow in Circular Pipes", 9th International Con-

- ference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Atlanta, Georgia, USA, Proceedings Book, Vol. 9, Part 2, pp. 1329-1339, 1995.
- [31] ESCUDIER, M. P., and SMITH, S., “Turbulent Flow of Newtonian and Shear-Thinning Liquids Through a Sudden Axisymmetric Expansion”, *Exp. Fluids*, 27, pp. 427-434, 1999.
- [32] LAUNDER, B. E., and SPALDING, D. B., “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng*, 3, pp. 269-289, 1974.
- [33] PATANKAR, S. V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Chapters 5 and 6, 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, DC, 1980.
- [34] PATANKAR, S. V., and SPALDING, D. B., “A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.
- [35] SPALDING, D. B., “A General-Purpose Computer Program for Multi-Dimensional One-and-Two Phase Flow”, *Math. Comput. Simulation*, XXIII, pp. 267-276, 1981.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Prof. Dr. Tahir KARASU**

1950 yılı Eskişehir doğumludur. D.I.C. (Diploma of Imperial College), 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’te 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 Enerji Anabilim Dalı Başkanlığı’nu 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.