

ANİGENİŞLEMELİ BORULARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL HESAPLANMASI *

Prof.Dr. Tahir KARASU
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,
Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Meşelik, Eskişehir
tkarasu@ogu.edu.tr

ÖZET

Bu makale, 1.11×10^5 ile 3.59×10^4 gibi iki farklı Reynolds sayısı için eksenel simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, kompleks çevrıntili türbülanslı akışın kapsamlı bir çalışmasının sayısal hesaplama sonuçlarını sunmaktadır. Hibrit yöntemiyle geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda çeşitli eksenel kesitlerde, eksenel hız, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite radyal profilleri ve boru simetri eksenini boyunca eksenel hızın değişimi için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplamaların sonuçları deneysel bulgularla iyi uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anigenişlemeli borular, k-ε türbülans modeli, hesaplamalar

Numerical Computation of Turbulent Flow in Sudden Expansion Pipes

ABSTRACT

This paper presents the results of an extensive study of numerical computation of steady, incompressible, complex turbulent recirculating flow in axisymmetric sudden expansions in pipes for two different Reynolds numbers of 1.11×10^5 and 3.59×10^4 . Employing the conventional finite-volume method with a hybrid scheme, a computer program based on the SIMPLE algorithm has been developed. Numerical solutions of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard high-Reynolds-number k-ε turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall-functions are employed. Numerical computations for radial profiles of axial velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity and axial variation of centre-line velocity along axisymmetric sudden expansion flow geometry are presented and compared with experimental measurements. The results of numerical computations show good agreement with experimental data.

Keywords : Sudden expansion pipes, k-ε turbulence model, computations

* Bu makale, 16-17 Ekim 2009 tarihlerinde TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından Kayseri’de düzenlenen V. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu’nda bildiri olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Bir eksenel simetrik anigenişlemeli boruda aşağı akıştaki ayrılmı türbülanslı akış alanı her iki temel ve pratiksel görüş noktalarından dolayı büyük öneme sahiptir. Şekil 1'de gösterildiği üzere, bu akış alanı çok karmaşık olup bir potansiyel göbek, türbülans seviyeleri yüksek eğri bir serbest kayma tabakası, birincil bir çevrıntili akış bölgesi ve basamağın çok yakınında, ikincil bir çevrıntili akış bölgesi veya köşe çevrıntisinden oluşmuştur. Cidarda kayma tabakasının birleşmesinden sonra, akış eksenel simetrik anigenişlemeli boru boyunca ilerleyerek gelişmektedir. Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda kompleks çevrıntili türbülanslı akış üzerine pekçok çalışmalar yapılmıştır. İlgili çekici çalışmalar arasında olanlar [1-23] çalışmalarıdır. Bu araştırmanın ana amacı, eksenel simetrik anigenişlemeli borularda, standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modelini [24] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, sıkıştırılmayan kompleks çevrıntili türbülanslı akışın sayısal hesaplamasını yapmak ve sayısal hesaplamaların sonuçlarını Gould vd. [1] ile Stevenson vd. [2]nin deneysel ölçümleriyle karşılaştırmaktır.

MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1'e ilişkin olarak, eksenel simetrik anigenişlemeli borularda sıkıştırılmayan, kompleks çevrıntili türbülanslı akışın hesaplanmasında 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 silindiriksel 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 ϕ genel bir bağımlı değişkendir. u ve v değişkenleri eksenel ve radyal hız bileşenleridir, ρ akışkanın yoğunluğu, Γ_{ϕ} taşınım katsayısı, S_{ϕ} ise kaynak terimidir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli Launder ve Spalding'in [24] k-ε modelidir. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [25]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Hareket Denklemleri, Katsayılar ve Kaynak Terimler

ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
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	μ_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	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

Not :

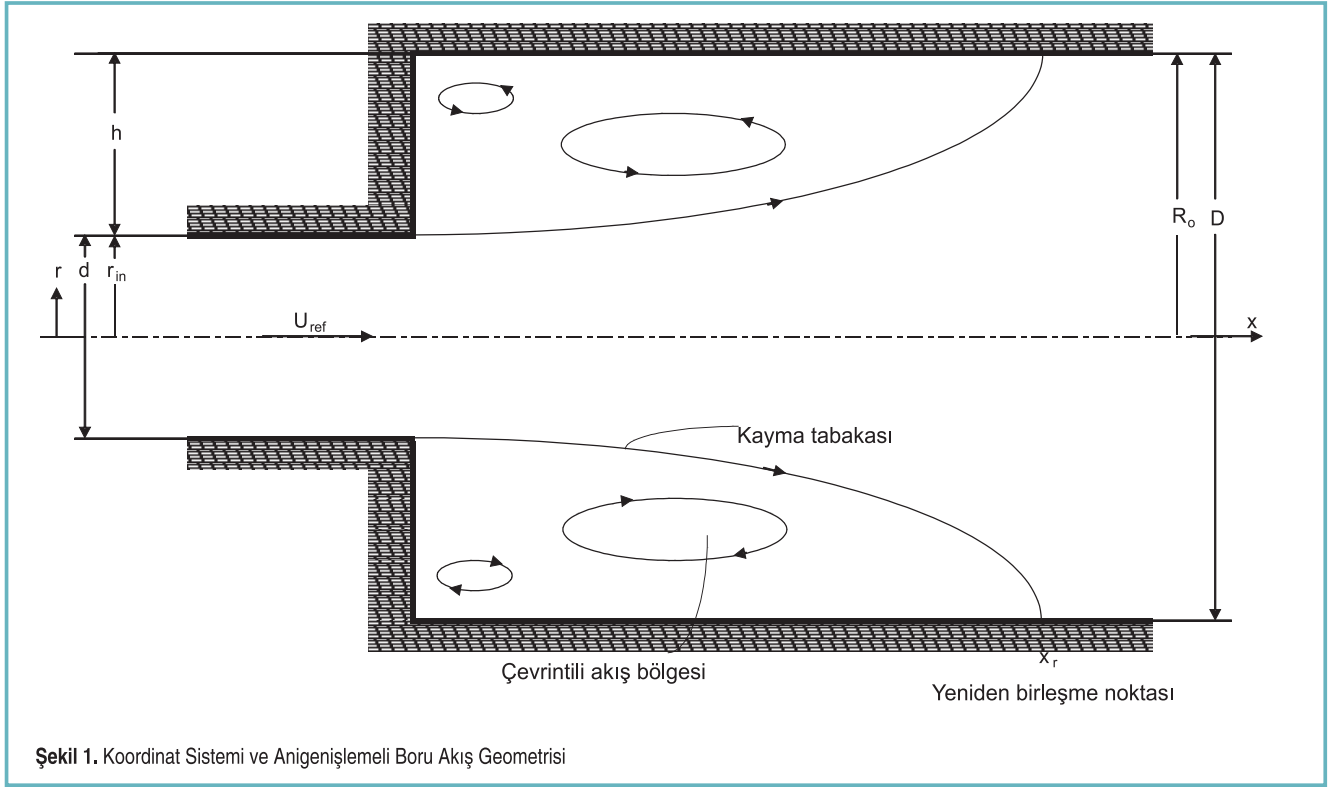
- $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon$
- Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir [24]:

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

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

Sınır Koşulları

Şekil 1'e ilişkin olarak, incelenen eksenel simetrik anigenişlemeli borularda kompleks çevrıntili türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıda sunulmuştur. Anigenişlemeli boru girişinde deneysel duruma karşılık olan düzgün bir eksenel hız dağılımı belirtilmiş, radyal hız ise sıfıra eşit kılınmıştır. k ve ϵ türbülans büyüklüklerine düzgün giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani, $k = (0.005-0.006) u_0^2$ (veya u_{ref}^2) ve $\epsilon = C_{\mu} k^{3/2} / 0.03R$, burada u_0 (veya u_{ref}) büyük çaplı borunun girişinde küçük çaplı borudaki simetri eksenindeki 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 sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar giriş düzleminde aşağı akışta 40 basamak yüksekliğindeki (h) uzunlukta yerleştirilen çıkış düzlemine kadar yapılmıştır. Anigenişlemeli boru ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani, $(\partial \phi / \partial r) = v = 0, \phi$ burada u, k ya da ϵ olabilir. Üst ve basamak cidarlarında hız bileşenleri u, v ile türbülans büyüklükleri k ve ϵ sıfıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ϵ 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [24] cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için başlangıç değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.



Şekil 1. Koordinat Sistemi ve Anigenişlemeli Boru Akış Geometrisi

Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal araştırmada, geleneksel sonlu hacim yaklaşımı kullanılarak, Patankar ve Spalding'in [25] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) numaralı kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemiyle bir kontrol hacme dayanan sonlu fark metoduyla ayrıştırılmıştır. Sınır koşullarıyla bağımlı olarak kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu hacim biçimleri, üç köşegenli matris formuyla birlikte, kolon-kolon çözüm yöntemini kullanarak iteratif olarak çözülmüştür.

Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Gould vd.[1]'nin akış durumu için kullanılan sayısal ağ Şekil 2'de, Stevenson vd.[2]'nin akış durumu için kullanılan sayısal ağ ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Kullanılan her iki sayısal ağ aksel simetrik anigenişlemeli borunun cidarları yakınında ve çevrıntili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla düzgün olmayan bir

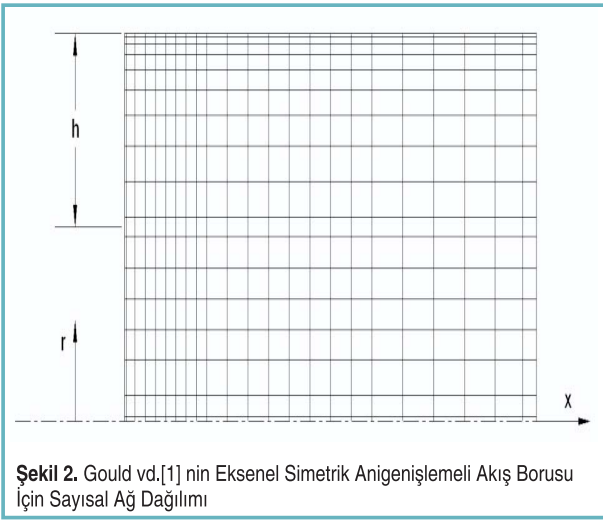
şekilde oluşturulmuştur. Aksel ve radyal hız bileşenleri için kaydırılmış kontrol hacimler kullanılmıştır. Diğer tüm ilgili büyüklükler ağ noktalarında hesaplanmıştır. Yakınsamış bir çözüm elde etmek için kolon-kolon yöntemi iteratif olarak kullanılmıştır. Sayısal istikrar elde etmek için u, v, k, ϵ, P ve μ_c için sırasıyla 0.4, 0.4, 0.6, 0.6, 0.5 ve 0.5 gevşetme faktörleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama ölçütü, tüm hesaplama alanında kalıcı kütlelerin mutlak değerlerinin toplamı, önceden belirtilen 0.001 değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesi ölçütüdür. Her iki akış durumu için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ büyüklükleriyle ağ testleri yapılmıştır. Bu araştırmada sunulan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdır. Tablo 2 her iki akış durumu 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 İterasyon Sayısı

Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü (\times) \times (r)	T cpu zamanı (saniye)	N	T / N
Gould ve diğerleri [1]	111 019	24 \times 18	0.71875	165	0.0043560
Stevenson ve diğerleri [2]	35 900	40 \times 22	2.60937	280	0.0093191

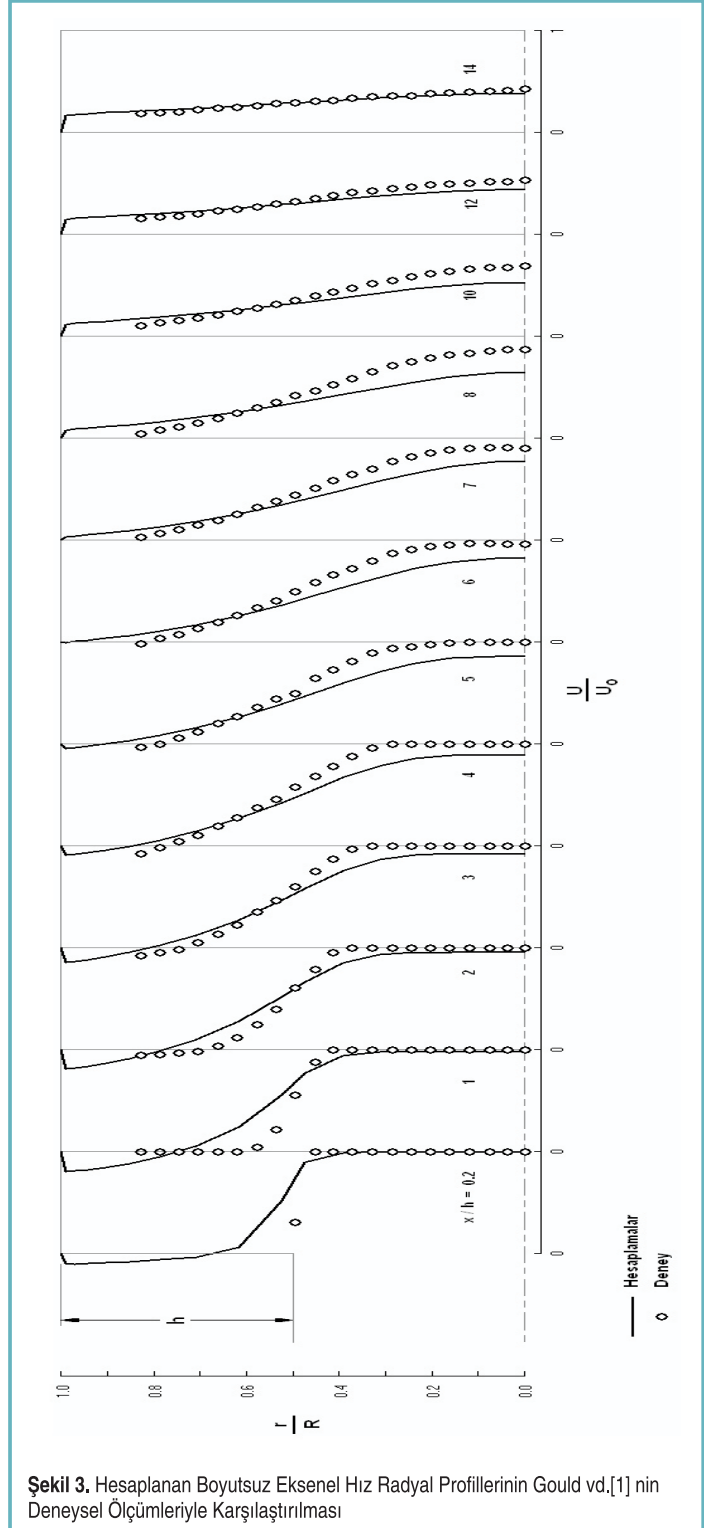
BULGULAR VE TARTIŞMA

Buradaki sayısal araştırmada, Gould vd.[1]'nin deneysel ölçümleri, hesaplamalarla karşılaştırılmaya esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru $D/d=2$ gibi bir genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı yaklaşık olarak 1.11×10^5 'tir ($Re=u_0 d/\nu$, burada u_0 girişteki simetri eksenidir ve d giriş çapıdır). Anigenişlemeli boruda hesaplama alanı giriş düzleminde aşağı akışta 40 basamak yüksekliğinde (h) bir eksenel mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 2'de Gould vd.[1] nin akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2. Gould vd.[1] nin Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Akış Borusu İçin Sayısal Ağ Dağılımı

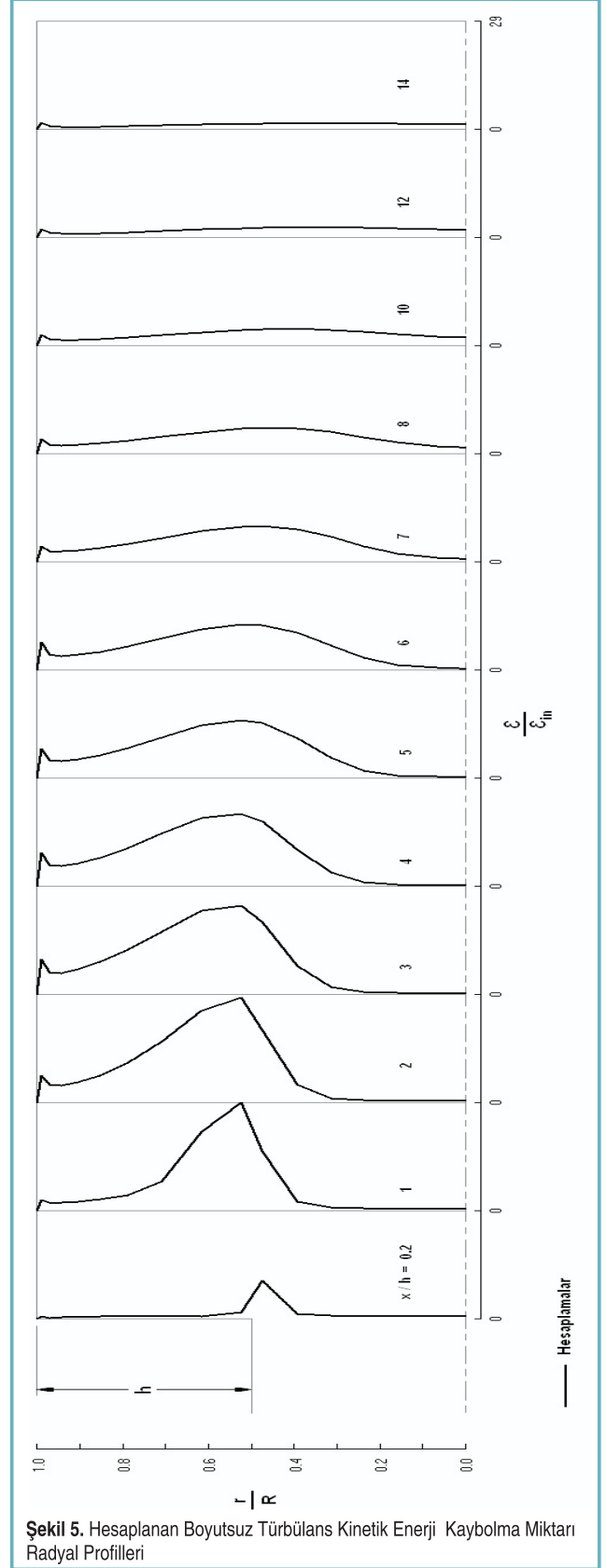
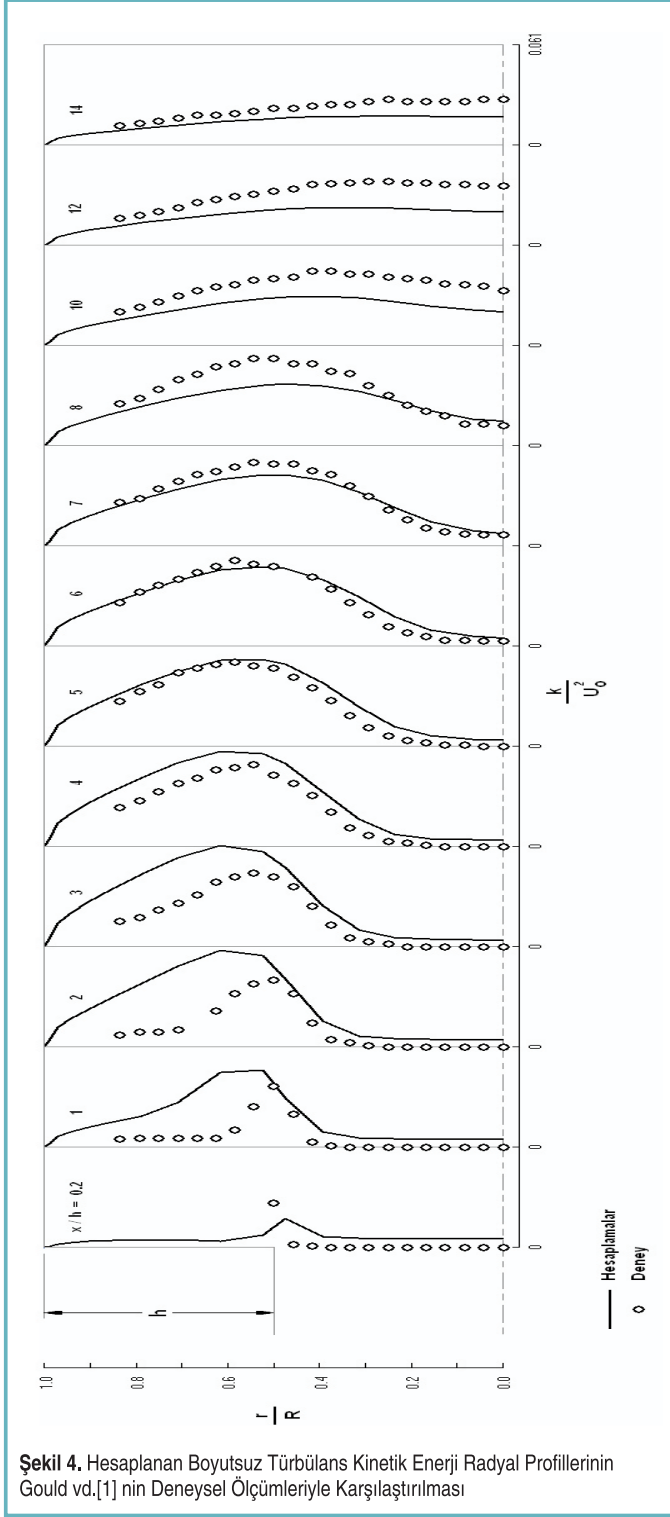
Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve onların Gould vd.[1] nin deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmaları, boyutsuz bir şekilde u/u_0 , k/u_0^2 ve radyal mesafe r/R cinsinden, $x/h=0.2$ 'den 14'e kadar olan ve basamak yüksekliğine dayanan boyutsuz eksenel mesafelerde belirlenen 12 eksenel kesitte sırasıyla Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, eksenel simetrik anigenişlemeli boruda aşağı akışta borunun göbek bölgesinde hesaplamalar deneysel ölçümlerin altında kalmasına rağmen, hesaplanan eksenel hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında genel olarak iyi bir uyum vardır. Çevrıntili akış bölgesinde k-e türbülans modeli aynı zamanda deneysel ölçümlerin gösterdiğinden daha yüksek negatif eksenel hızlar hesaplamaktadır. Hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminde aşağı akışta altı ile yedi basamak yükseklikleri arasında oluşmaktadır. Oysa ölçülen akış yapışma uzunluğu yaklaşık olarak sekiz basamak yüksekliğinde aşağı akışta oluşmaktadır. Şekil 4'te gösterilen hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleriyle ölçülenler arasında elde edilen uyum oldukça iyidir. Çevrıntili akış bölgesinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri önce ölçülenlerin üstünde kalırken, daha sonra $x/h=8$ 'den sonraki aşağı akış eksenel kesitlerinde ölçülenlerin

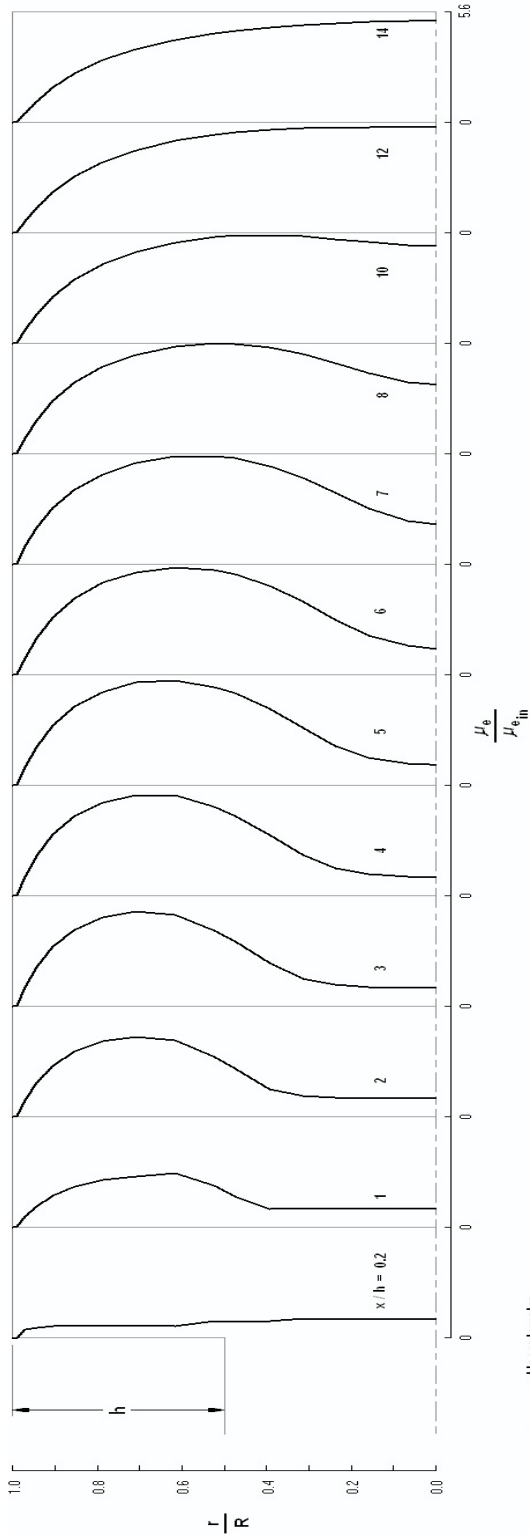


Şekil 3. Hesaplanan Boyutsuz Eksenel Hız Radyal Profillerinin Gould vd.[1] nin Deneysel Ölçümleriyle Karşılaştırılması

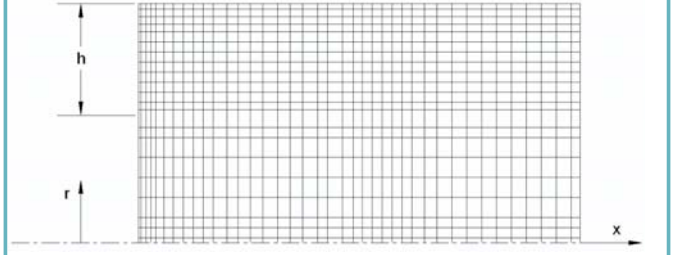
altında kalıyor. Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılmamasıdır. Şekil 4 tekrar gözden geçirildiğinde görülüyor ki, akış anigenişlemeli boru

boyunca geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu olay aynı zamanda hesaplamalar tarafından da gösterilmektedir. Şekil 5 ve 6, sırasıyla; Gould vd.[1] nin aksenal simetrik anigenişlemeli borusu için, hesaplanan





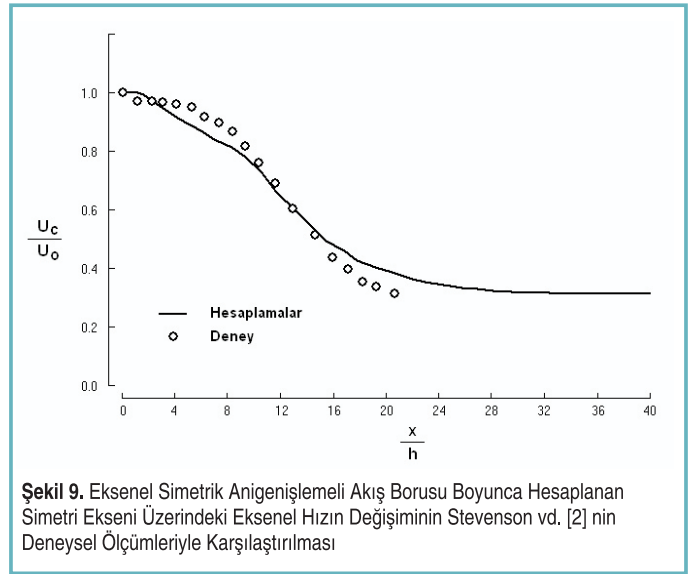
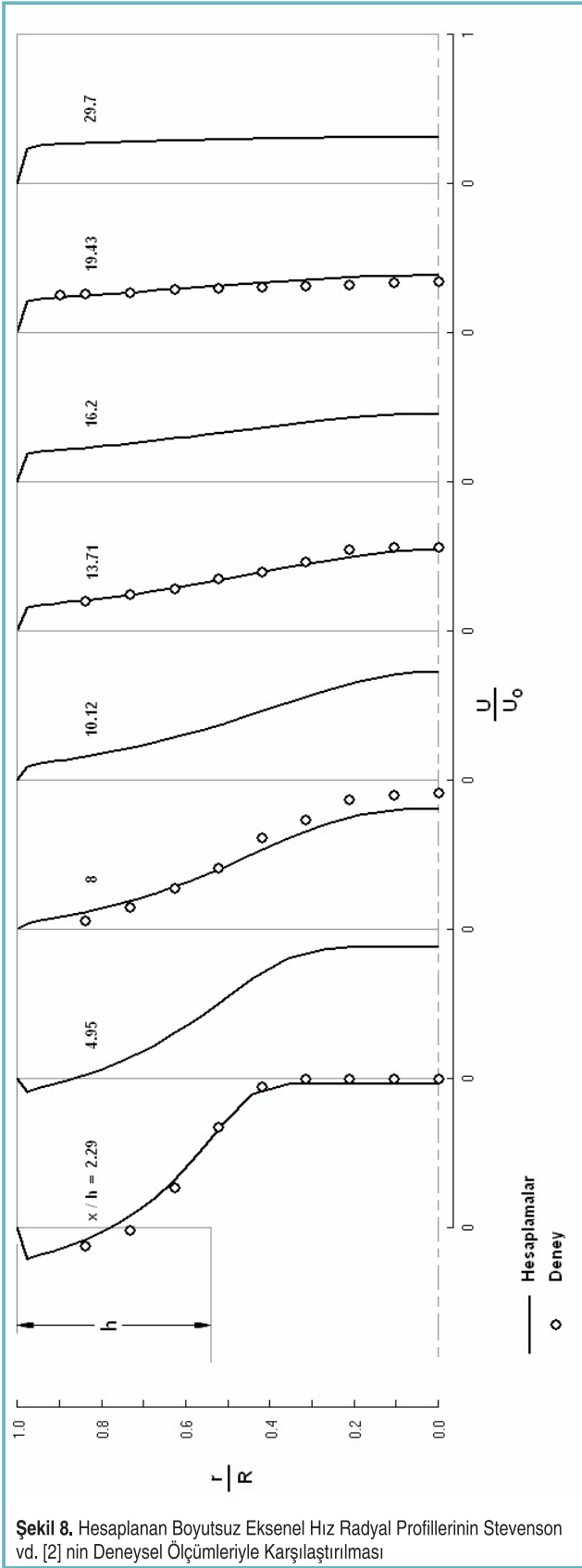
Şekil 6. Hesaplanan Boyutsuz Efektif Viskozite Radyal Profilleri



Şekil 7. Stevenson vd. [2] nin Eksenel Simetrik Anisotropik Akış Borusu İçin Sayısal Ağ Dağılımı.

türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıyla efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 3 ve 4'teki gibi, aynı aşağı akış kesitleri için göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller sırasıyla girişteki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{in} ve efektif viskozite $\mu_{e, in}$ ile boyutsuz hâle getirilmiştir. Bu şekiller, anisotropik boru boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıyla efektif viskozite radyal profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir.

İkinci akış geometrisi $D/d=1.874$ genişleme oranıyla Stevenson vd. [2] nin eksenel simetrik anisotropik boru akışı deneyine karşılık olmaktadır. Girişteki simetri eksen hızı u_0 ve h basamak yüksekliğine bağlı olan Reynolds sayısı 3.59×10^4 tür. Önceki akış durumunda olduğu gibi, bu akış durumu için de hesaplama alanı anisotropikmeden aşağı akışta 40 basamak yüksekliğinde bir eksenel mesafeye kadar uzatılmıştır. Şekil 7'de Stevenson vd. [2] nin akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Şekil 8, $x/h=2.29$ ile 29.7 arasında değişen eksenel kesitlerde, hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerini Stevenson vd. [2] nin deneysel ölçümleriyle karşılaştırmaktadır. Simetri eksen hızının önce deneysel değerinin altında daha sonrada üstünde hesaplanmasına rağmen, hesaplamalarla karşılıklı ölçülen değerler arasında oldukça iyi bir uyum vardır. Bu olay aynı zamanda Gould vd. [1] nin önceki akış durumunda da bulunmuştu. Kayma tabakasının hesaplanan yapışma uzunluğu $x/h=7$ civarında oluştuğu bulunmuştur. Oysa ölçülenin $x/h=8$ yakınında oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 9 anisotropik boru simetri eksen boyunca, hesaplanan ve ölçülen simetri eksen üzerindeki hızın (u_x) değişiminin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Simetri eksen üzerindeki hız (u_x), girişteki simetri eksen hızıyla (u_0) boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliğiyle boyutsuzlaştırılmış olan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, anisotropik boru akışının giriş bölgesinde simetri eksen üzerinde hesaplanan eksenel hızın azalışı daha çabuk, aşağı akış bölgesinde ise daha yavaş olmaktadır. Bununla beraber genel olarak hesaplanan azalışla, deneysel azalış arasında kalitatif bir uyum vardır. Hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri, boyutsuz olarak k/u_0^2 ve radyal mesafe r/R cinsinden, Şekil 8'deki gibi aynı aşağı akış kesitleri için, Şekil 10'da sunulmuştur. Şekilden

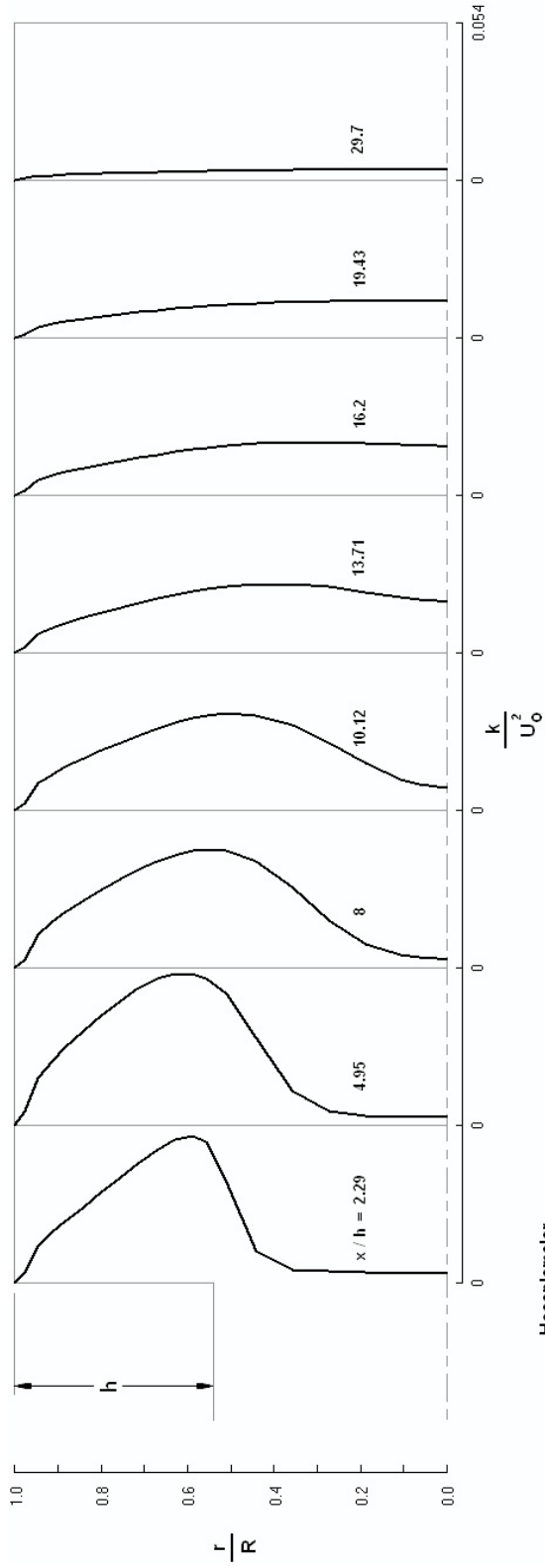


görüldüğü üzere, anigenişlemeli boru boyunca akış geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır.

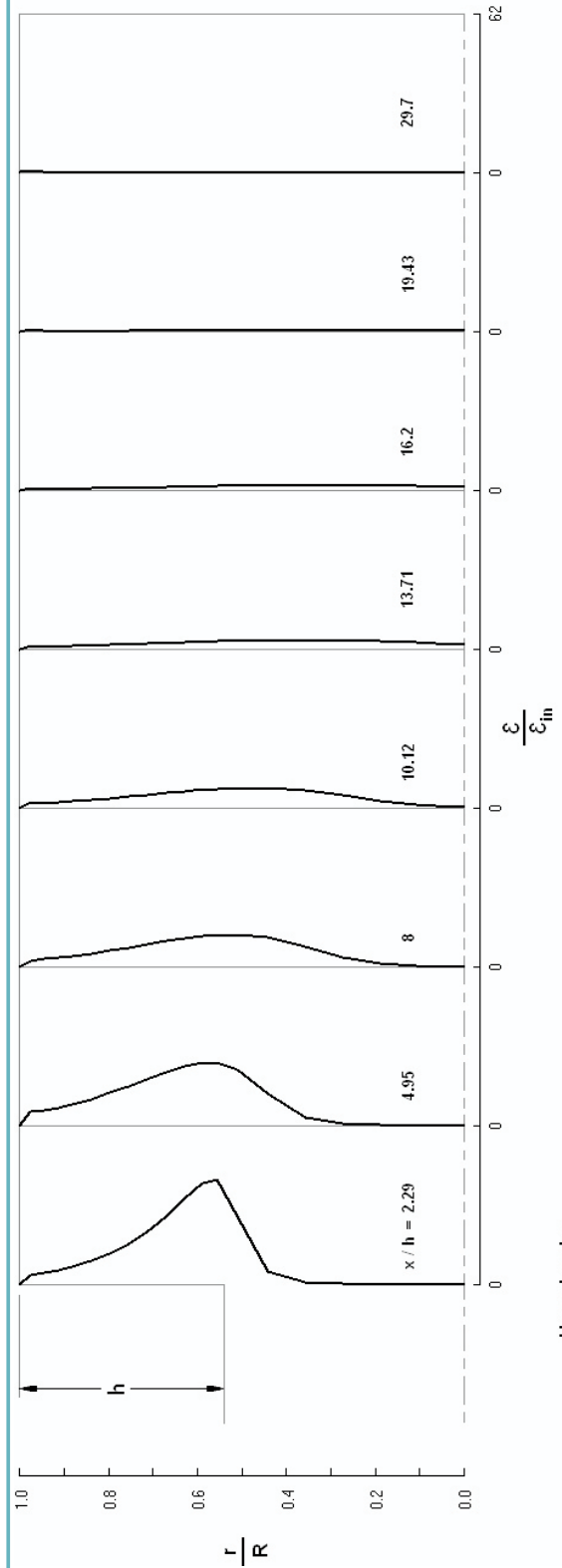
Son olarak Şekil 11 ve 12, sırasıyla; anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıyla efektif viskozite radyal profillerini, Şekil 8 ve 10'daki gibi, aynı aşağı akış kesitleri için sergilemektedir. Bu şekiller, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleriyle, efektif viskozite profillerinin anigenişlemeli boru boyunca nasıl geliştiklerini göstermektedir.

SONUÇLAR

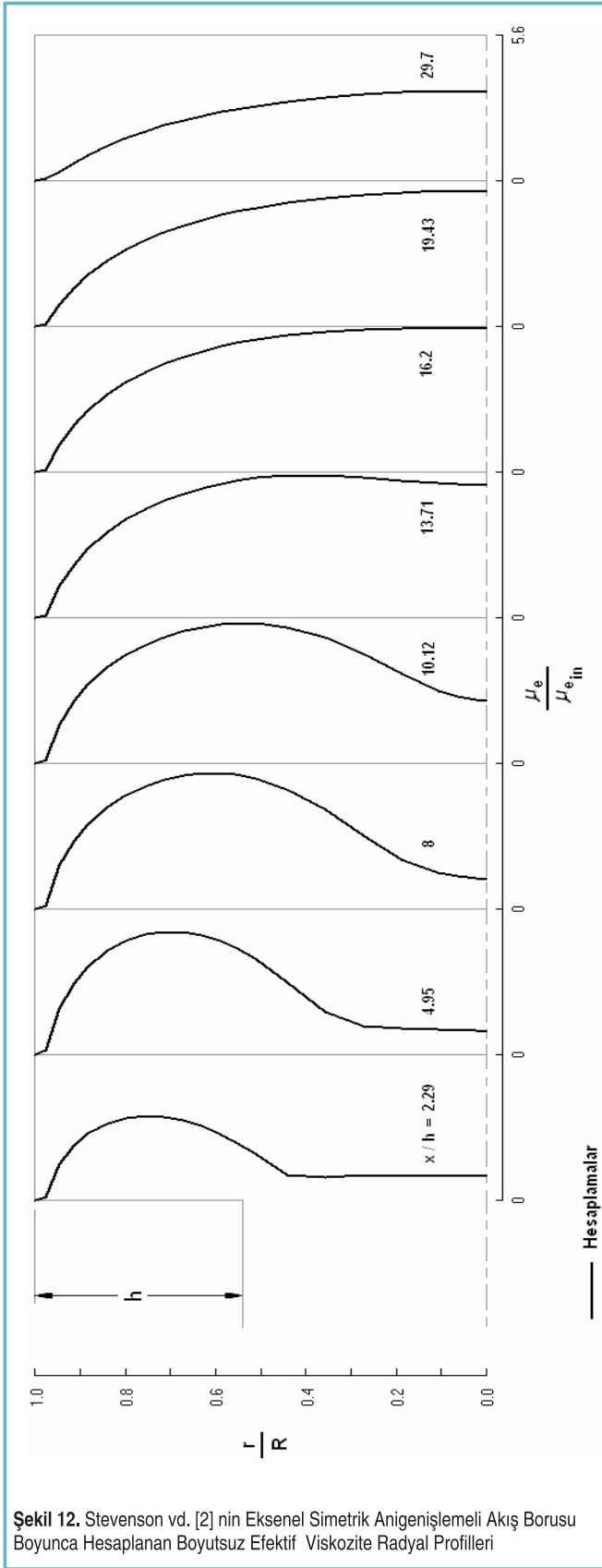
Bu araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda ayrımlı, kompleks çevrıntili türbülanslı akış, standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modelini kullanarak, 1.11×10^5 ve 3.59×10^4 gibi iki farklı Reynolds sayısı için sayısal olarak hesaplanmıştır. Geleneksel sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar ve Spalding'in [25] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. İki farklı eksenel simetrik anigenişlemeli borular için standart k-ε türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. k-ε türbülans modeline dayanan eksenel hızın, türbülans kinetik enerjinin ve simetri-ekseni hızı azalışının hesaplanmış değerleri, literatürde bildirilen deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Eksenel hızın hesaplanan ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılması genel olarak oldukça iyidir. Bununla beraber, çevrıntili akış bölgesinin yapışma uzunluğu ve genişliği k-ε türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanmıştır. Ayrımlı akışın kayma tabakasından anigenişlemeli borunun simetri eksenine doğru türbülans kinetik enerjinin radyal yayılımı, k-ε türbülans modeli



Şekil 10. Stevenson vd. [2] nin Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Akış Borusu Boyunca Hesaplanan Boyutsuz Türbülans Kinetik Enerji Radyal Profilleri



Şekil 11. Stevenson vd. [2] nin Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Akış Borusu Boyunca Hesaplanan Boyutsuz Türbülans Kinetik Enerji Kaybolma Miktarı Radyal Profilleri



Şekil 12. Stevenson vd. [2] nin Eksenel Simetrik Anigenişlemeli Akış Borusu Boyunca Hesaplanan Boyutsuz Efektif Viskozite Radyal Profilleri

tarafından daha küçük olarak hesaplanması hariç olmak üzere, hesaplanan ile ölçülen türbülans kinetik enerji değerleri arasındaki uyum oldukça iyidir.

KAYNAKÇA

1. Gould, R. D., Stevenson, W. H., Thompson, H. D. 1990. "Investigation of Turbulent Transport in an Axisymmetric Sudden Expansion," AIAA Journal, 28, p. 276-283.
2. Stevenson, W. H., Thompson, H. D., Craig, R. R. 1984. "Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculating Flows," ASME J. Fluids Eng., 106, p. 173-180.
3. Durrett, R. P., Stevenson, W. H., 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, p. 367-372.
4. Chaturvedi, M. C. 1963. "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions," J. Hydraulics Div., Proc., ASCE, 89, Hy3, p. 61-92.
5. Moon, L. F., Rudinger, G. 1977. "Velocity Distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct," ASME J. Fluids Eng., 99, p. 226-230.
6. Favaloro, S. C., Nejad, A. S., Ahmed, S. A. 1991. "Experimental and Computational Investigation of Isothermal Swirling Flow in an Axisymmetric Dump Combustor," J. Propulsion, AIAA J., 7 (3), p. 348-356.
7. Nejad, A. S., Vanka, S. P., Favaloro, S. C., Samimy, M., Langenfeld, C. 1989. "Application of Laser Velocimetry for Characterization of Confined Swirling Flow," ASME J. Eng. For Gas Turbines and Power, 111, p. 36-45.
8. Ahmed, S. A. 1992. "ERCOFTAC Database: Isothermal Dump Combustor with Swirl Experiments, Retrieved," <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/ercofac/classif.html>.
9. Ahmed, S. A. 1998. "Velocity Measurements and Turbulence Statistics of a Confined Isothermal Swirling Flow," Exp. Ther. Fluid Science, 17, p. 256-264.
10. Ahmed, S. A., Nejad, A. S. 1992. "Velocity Measurements in a Research Combustor; Part 1: Isothermal Swirling Flow," Exp. Ther. Fluid Science, 5, p. 162-174.
11. Nejad, A. S., 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, No.4, p. 314-321.
12. Ahmed, S. A., Abidogun, K. B. 1998. "Measurements of Turbulence Statistics and Energy Budgets in a Model Combustor," Energy, 23, No.9, p. 741-752.
13. Ahmed, S. A., Abidogun, 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.
14. Cole, D. R., Glauser, M. N. 1998. "Flying Hot-Wire Measurements in an Axisymmetric Sudden Expansion," Experimental Thermal and Fluid Science, 18, p. 150-167.
15. Cole, D. R., Glauser, M. N. 1998. "Applications of Stochastic Estimation in the Axisymmetric Sudden Expansion," Physics of Fluids, 10, No.11, p. 2941-2949.
16. Tinney, C. E., Glauser, M. N., Eaton, E. L., Taylor, J. A. 2006. "Low-Dimensional Azimuthal Characteristics of Suddenly Expanding Axisymmetric Flows," J. Fluid Mech., 567, p. 141-155.
17. Poole, R. J., Escudier, M. P. 2004. "Turbulent Flow of Viscoelastic Liquids Through an Axisymmetric Sudden Expansion," J. Non-Newtonian Fluid Mech., 117, p. 25-46.
18. Devenport, W. J., Sutton, E. P. 1993. "An Experimental Study of Two Flows Through an Axisymmetric Sudden Expansion," Experiments in Fluids, 14, p. 423-432.
19. Furuichi, N., Takeda, Y., Kumada, M. 2003. "Spatial Structure of the Flow Through an Axisymmetric Sudden Expansion," Experiments in Fluids, 34, p. 643-650.
20. Mak, H., Balabani, S. 2007. "Near Field Characteristics of Swirling Flow Past a Sudden Expansion," Chemical Engineering Science, 62, p. 6726-6746.
21. Lee, D. H., Sung, H. J. 1994. "Experimental Study of Turbulent Axisymmetric Cavity Flow," Experiments in Fluids, 17, p. 272-281.
22. Karasu, T., Tezcan, S. 2009. "Numerical Prediction of Turbulent Flow in an Axisymmetric Sudden Expansion Pipe," 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Bildiriler Kitabı, Sivas.
23. Karasu, T. 2008. "Numerical Computation of Turbulent Flow in Axisymmetric Sudden Expansions," 10th International Combustion Symposium, Proceedings Book, Sakarya, p. 533-542.
24. Launder, B. E., Spalding, D. B. 1974. "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3, 269-289.
25. Patankar, S. V. 1980. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Chapters 5 and 6, 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, DC.