

EKSENEL SİMETRİK ANİGENİŞLEMELİ BORULARDA KOMPLEKS ÇEVİRİTLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL HESAPLANMASI

Tahir KARASU

ÖZET

Bu bildiri, 1.25×10^5 ile 2.8×10^5 gibi iki farklı Reynolds sayısı için eksenel simetrik anigenişlemeli borularda sürekli, sıkıştırılmayan, kompleks çevrıntili türbülanslı akışın kapsamlı bir çalışmasının sayısal hesaplama sonuçlarını sunmaktadır. Hibrit yöntemle geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle beraber, kütle 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, türbülans viskozite radyal profilleri, boru simetri eksenini boyunca eksenel hızın değişimi ve eksenel simetrik anigenişlemeli boruda üst cidar boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama sonuçları deneysel bulgularla iyi uyum göstermektedir.

1. GİRİŞ

Bir eksenel simetrik anigenişlemeli boruda aşağı akıştaki ayrımlı türbülanslı akış alanı her iki temel ve pratiksel görüş noktasından 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 çevrintisinden 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. Gould et al. [1], Durrett et al. [2], Stevenson et al. [3], Chaturvedi [4], Karasu [5-9], Moon ve Rudinger [10] ile Favalaro et al.'ın [11] çalışmaları ilgi çekici çalışmalar arasındadır. Bu çalışmada, Favalaro et al. [11] ile Moon ve Rudinger'in [10] deneysel ölçümleri standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modelinin geçerliğini kanıtlamada kullanılmıştır.

2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

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 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 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 [12] k - ϵ modelidir. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [13]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Hareket denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler

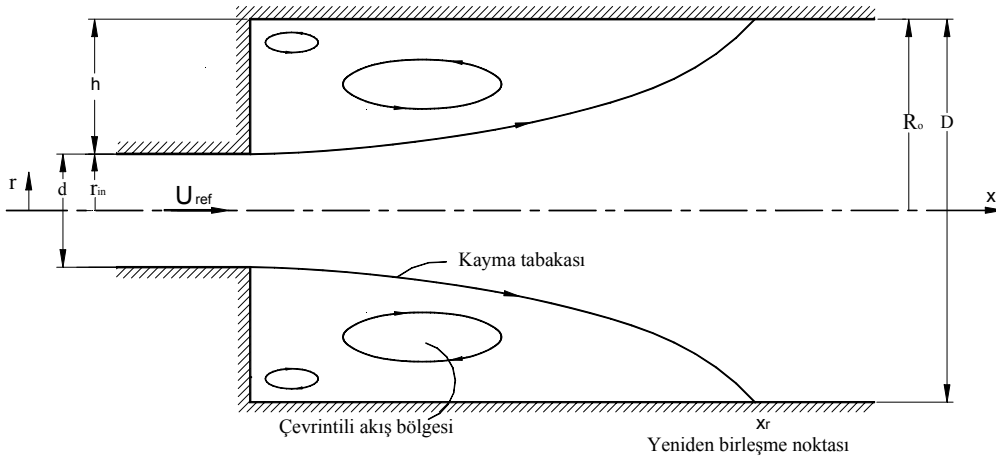
ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
1	0	0
u	$\mu_e = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
v	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_e \frac{v}{r^2}$
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 : 1. $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon$

2. Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir [12]:

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

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



Şekil 1. Koordinat sistemi ve anigenişlemeli boru akış geometrisi.

2.2. Sınır Koşulları

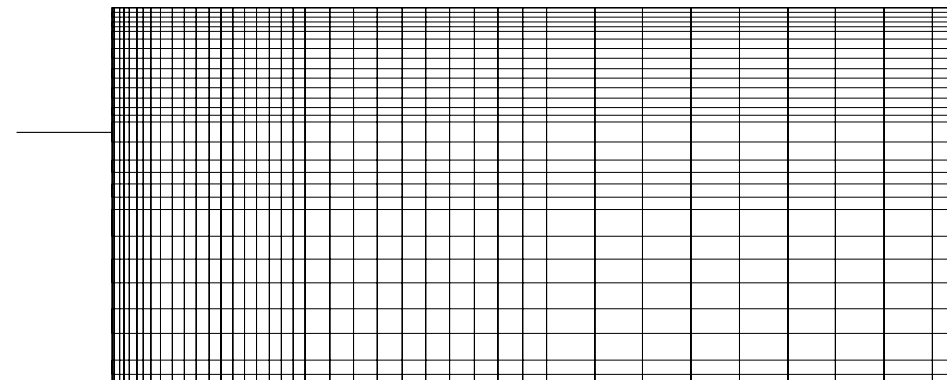
İncelenen aksenal simetrik anigenişlemeli borularda kompleks çevrintili türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıda sunulmuştur. Favaloro et al.'in [11] anigenişlemeli borusunun girişinde aksenal hızın radyal dağılımı deneysel ölçümlerden belirtilirken, Moon ve Rudinger'in [10] anigenişlemeli borusunun girişinde ise deneysel duruma karşılık olan düzgün bir aksenal hız dağılımı belirtilmiş, radyal hız ise sifıra eşit kılınmıştır. k ve ε türbülans büyüklüklerine giriş değerleri vermek için ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Yani, $k=0.005 u_{ref}^2$ (veya u_o^2) ve $\varepsilon=(C_\mu k^{3/2}/0.03R_o)$ 'dir. Burada u_{ref} büyük çaplı borunun girişinde küçük çaplı borudaki simetri eksenini üzerindeki hızdır, R_o ise büyük çaplı borunun yarıçapıdır. Çıkışta tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, çıkış düzlemi çevrintili 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 Favaloro et al.'in [11] anigenişlemeli borusu için 35 ve Moon ve Rudinger'in [10] anigenişlemeli borusu için ise 120 basamak yüksekliğindeki uzunlukta yerleştirilen çıkış düzlemine kadar yapılmıştır. Anigenişlemeli boru ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani, $(\partial\phi/\partial r) = v = 0$, ϕ burada u , k ya da ε olabilir. Üst ve basamak cidarlarında hız bileşenleri u , v ile türbülans büyüklükleri k ve ε sifıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ε 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [12] 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, geleneksel sonlu hacim yaklaşımı kullanarak, Patankar ve Spalding'in [13] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) numaralı 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.

2.4. Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar IBM ES / 9121 bilgisayarında yapılmıştır. Bir örnek olarak, Favaloro et al.'in [11] akış durumu için kullanılan sayısal ağ Şekil 2'de gösterilmiştir. Ağ, aksenal simetrik anigenişlemeli borunun cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonu düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Heriki 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 heriki 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.



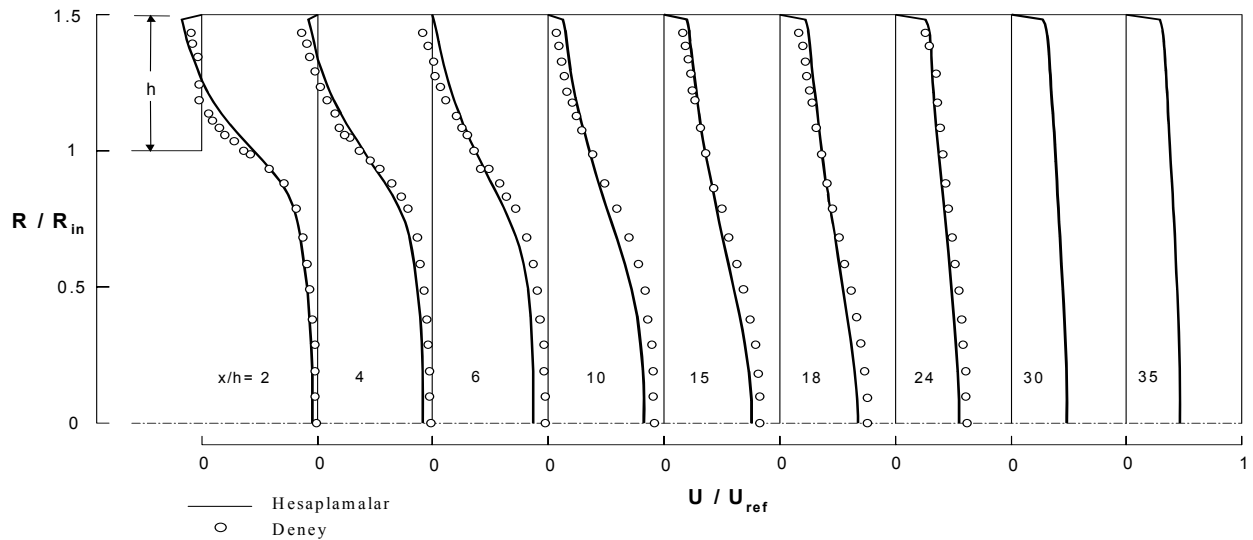
Şekil 2. Favaloro et al.'in [11] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

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

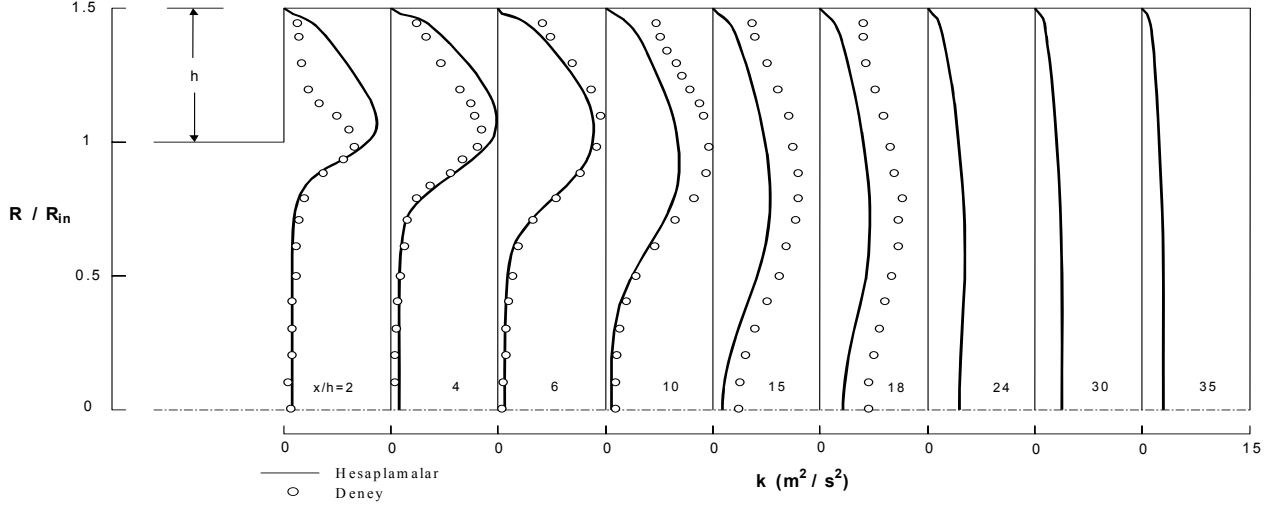
Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü (x) × (r)	T cpu zamanı (saniye)	N	T / N
Favaloro et al. [11]	1.25×10^5	40 × 30	249.11	1500	0.16607
Moon ve Rudinger [10]	2.8×10^5	40 × 30	249.81	1500	0.16654

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Eksenel simetrik anigenişlemeli borularda kompleks çevrıntili türbülanslı akış için iki farklı Reynolds sayısında bilgisayar hesaplamaları yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Favaloro et al. [11] ile Moon ve Rudinger'in [10] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Favaloro et al.'in [11] deneysel ölçümleri bu araştırmaya esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Eksenel simetrik anigenişlemeli boru $D/d=1.5$ genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı 1.25×10^5 'tir ($Re = u_{ref} d / \nu$, burada u_{ref} girişte simetri eksenini üzerindeki hızdır ve d girişteki boru çapıdır). Anigenişlemeli boruda hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akışta 35 basamak yüksekliğinde (h) bir eksenel mesafeye kadar uzatılmıştır. Hesaplanan eksenel hız ile türbülans kinetik enerji radyal profilleri ve bunların Favaloro et al.'in [11] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması $x/h=2$ 'den 35'e kadar olan basamak yüksekliğine dayanan boyutsuz eksenel mesafelerde belirtilen dokuz eksenel kesitte sırasıyla Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, hesaplanan eksenel hız profilleri ile karşılıklı olan deneyseller arasında çok iyi bir uyum vardır. $x/h=35$ kesitindeki hesaplanan eksenel hız profili, hız dağılımının tamamıyla gelişmiş bir türbülanslı akış biçimine yaklaştığını göstermektedir. Hesaplanan akış tutunma uzunluğunun takribi olarak $x/h=6$ kesitinde olduğu bulunmuştur. Oysa, deneysel akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak $x/h=8$ kesitinde olduğu bildirilmiştir. Şekil 4'te gösterilen hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri ile ölçülenler arasında elde edilen uyum oldukça iyidir. Çevrıntili akış bölgesinde hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri önce ölçülenlerin üstünde kalıyorken daha sonra $x/h=10$ 'dan sonraki aşağı akış eksenel kesitlerinde ölçülenlerin altında kalmaktadır.

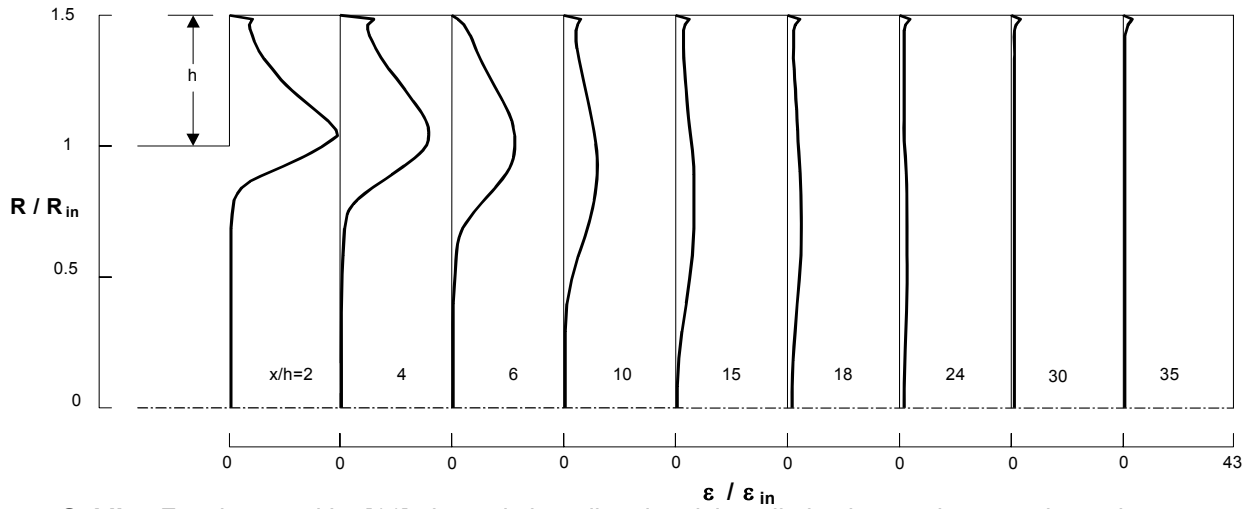


Şekil 3. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz eksenel hız radyal profillerinin Favaloro et al.'in [11] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

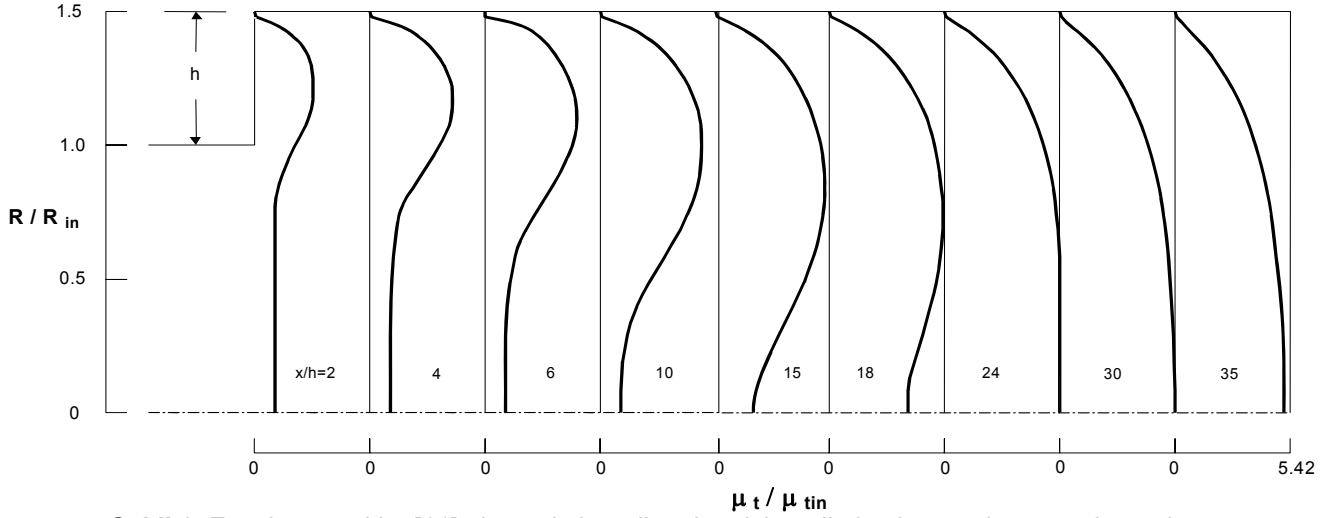


Şekil 4. Eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profillerinin Favaloro et al.'in [11] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

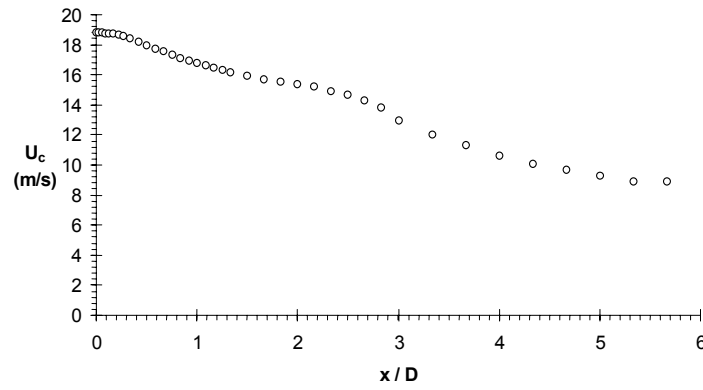
Bunun nedeni kayma tabakasında üretilen türbülans kinetik enerjinin hesaplanan akış alanında radyal olarak simetri eksenine doğru yayılmamasıdır. Şekil 4 tekrar gözden geçirildiğinde görülüyor ki, akış anigenişlemeli boru boyunca geliştikçe türbülans kinetik enerji radyal dağılımı azalmaktadır. Bu olay aynı zamanda hesaplamalar tarafında gösterilmiştir. Şekil 5 ve 6, sırasıyla, Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemeli borusu için hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans 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 türbülans viskozite μ_{in} ile boyutsuz hale getirilmiştir. Bu şekiller, anigenişlemeli boru boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans viskozite profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir. Şekil 7, büyük boru çapıyla boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilen anigenişlemeli boru eksenini boyunca azalan hesaplanan simetri eksenindeki hızı göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, anigenişlemeli boru akışının giriş bölgesinde simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın azalışı daha çabuk, aşağı akış bölgesinde ise daha yavaş olmaktadır. Şekil 8'de eksenel simetrik anigenişlemeli boru akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) gösterilmiştir. Cidardan ölçülen dikey mesafe y büyük boru çapıyla boyutsuzlaştırılmış ve büyük boru çapıyla boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere hesaplanan akış tutunma uzunluğu takribi



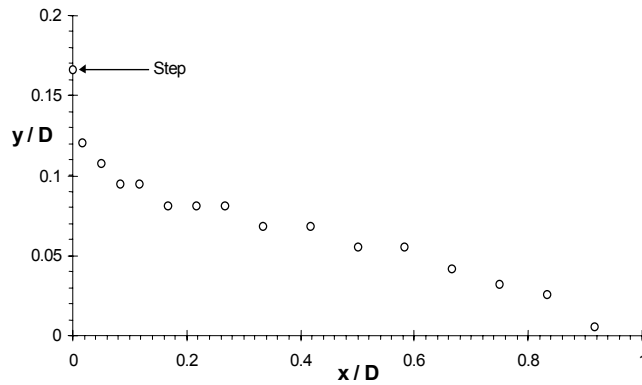
Şekil 5. Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 6. Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans viskozite radyal profilleri.

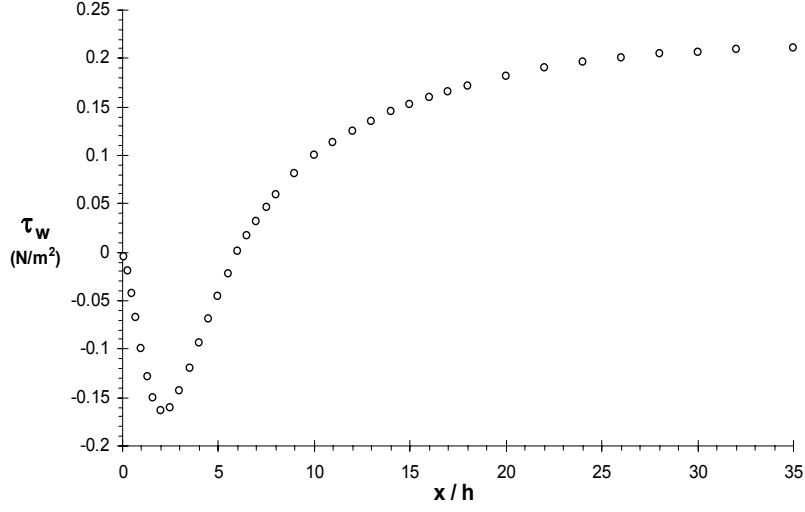


Şekil 7. Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan simetri eksenindeki eksenel hızın değişimi.



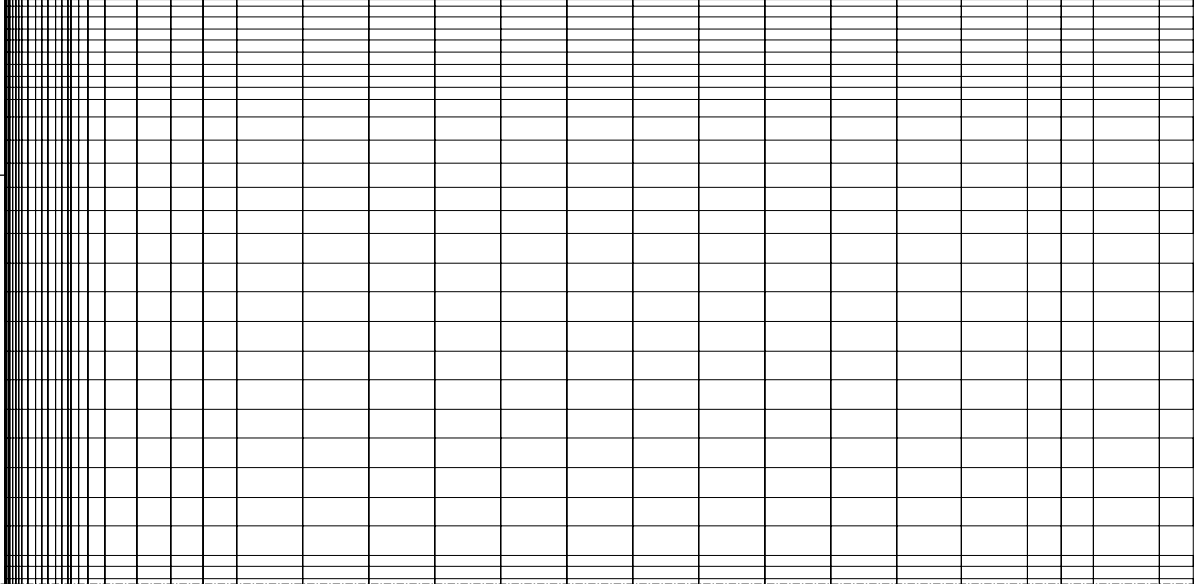
Şekil 8. Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemesi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).

olarak $x/D=0.92$ kesitinde olduğu bulunmuştur. Son olarak, Şekil 9'da Favaloro et al.'in [11] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeri takriben $x/h=32$ kesitinde elde edilmiştir.



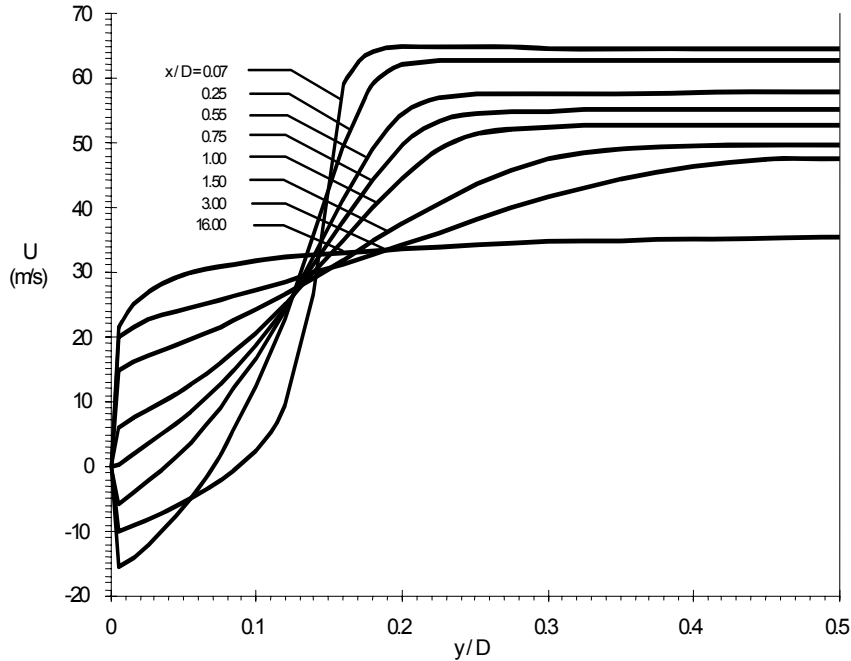
Şekil 9. Favaloro et al.'in [11] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Moon ve Rudinger [10] tarafından yapılan bir aksenal simetrik anigenişlemeli boru akışının deneysel incelenmesi çalışması, buradaki sayısal çalışma için ikinci deney örneği olarak seçilmiştir. Aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu $D/d=1.428$ genişleme oranına sahiptir. Girişte akışın Reynolds sayısı takriben 2.8×10^5 'tir ($Re=u_0 d / \nu$, burada u_0 büyük borunun girişinde küçük borudaki tamamıyla gelişmiş türbülanslı hız profilinin simetri eksenini üzerindeki hızıdır ve d küçük borunun çapıdır). Şekil 10'da Moon ve Rudinger'in [10] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı gösterilmiştir. Anigenişlemeli akış borusunda hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akışta 120 basamak yüksekliğinde bir aksenal mesafeye kadar uzatılmıştır.

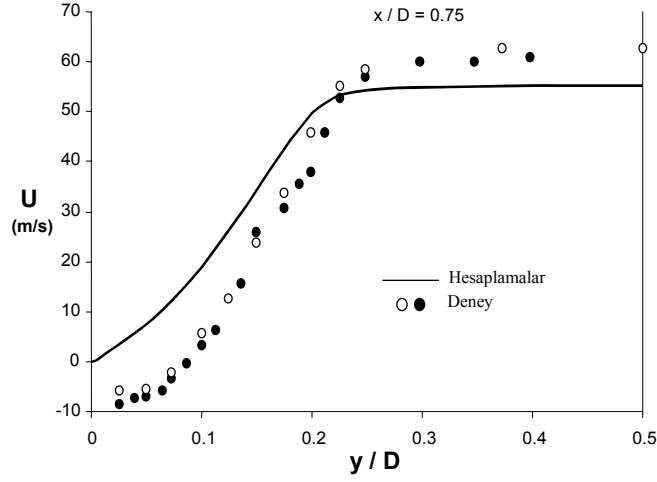


Şekil 10. Moon ve Rudinger'in [10] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu için sayısal ağ dağılımı.

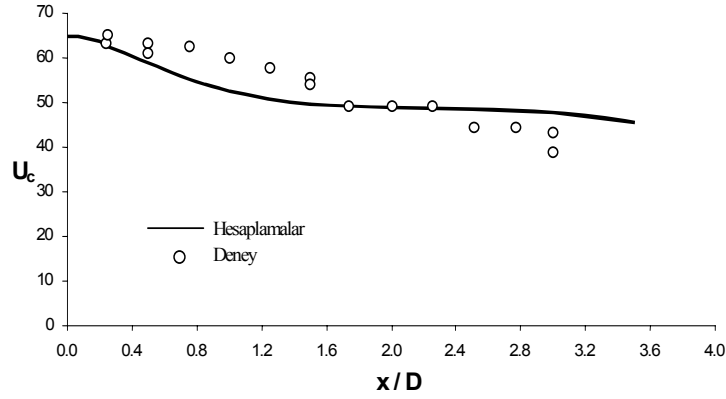
Hesaplanan aksenal hız radyal profilleri üst cidardan ölçülen y/D boyutsuz mesafenin bir fonksiyonu olarak $x/D=0.07$ 'den 16'ya kadar olan sekiz aksenal kesitte belirtilen büyük boru çapına dayanan boyutsuz aksenal mesafeler için Şekil 11'de sergilenmiştir. Bu şekil basamaktan ölçülen x/D boyutsuz mesafenin bir fonksiyonu olarak akış alanının gelişimini göstermek amacıyla çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, x/D 'nin 0.75'ten büyük değeri için geri akış yoktur. Bundan başka, simetri eksenindeki hızın basamaktan artan mesafe ile tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Böylece, küçük çaplı borudan büyük çaplı boruya olan akış, başlangıçta sanki serbest bir jetmiş gibi hareket eder. $x/D=3$ aksenal kesitinde simetri ekseninde hesaplanan hız 47.62 m/s'ye kadar düşmektedir. Oysa, Moon ve Rudinger [10] tarafından bildirilen deneysel değer 38 m/s'dir. Bu hesaplanan ile ölçülen değerler arasında 9.62 m/s bir fark göstermektedir. Buna rağmen, Moon ve Rudinger'in [10] deneysel noktalarının herbiri için tahmin edilen belirsizliğin 4 m/s'ye kadar yüksek olabileceği bildirilmiştir. $x/D=16$ kesitindeki hız profili, hız dağılımının tamamıyla gelişmiş bir türbülanslı akış biçimine yaklaştığını göstermektedir. $x/D=0.75$ kesitinde hesaplanan ile deneysel aksenal hız radyal profili arasında bir karşılaştırma veren Şekil 12, Moon ve Rudinger'in [10] deneysel profilinin dış bölgede yüksek olarak hesaplandığını, aksenal simetrik anigenişlemeli borunun göbek bölgesinde ise düşük olarak hesaplandığını göstermektedir. Buna rağmen, hesaplanan hız profili deneyselle aynı trendi göstermektedir. Hesaplanan akış tutunma uzunluğunun takriben $x/D=0.75$ kesitinde olduğu bulunmuştur. Oysa, deneysel akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak $x/D=1.32$ kesitinde olduğu bildirilmiştir. Şekil 13 simetri ekseninde hesaplanan aksenal hız ile deneysel aksenal hızın bir karşılaştırmasını vermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, başlangıç bölgesinde simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın azalışı daha çabuk, çevrintili akış bölgesinden aşağı akışta ise biraz daha yavaştır. Buna rağmen, genel olarak, simetri ekseninde hesaplanan aksenal hızın azalışı ile deneysel aksenal hızın azalışı arasındaki uyum kalitatifdir.



Şekil 11. Moon ve Rudinger'in [10] aksenal simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan aksenal hız radyal profilleri.

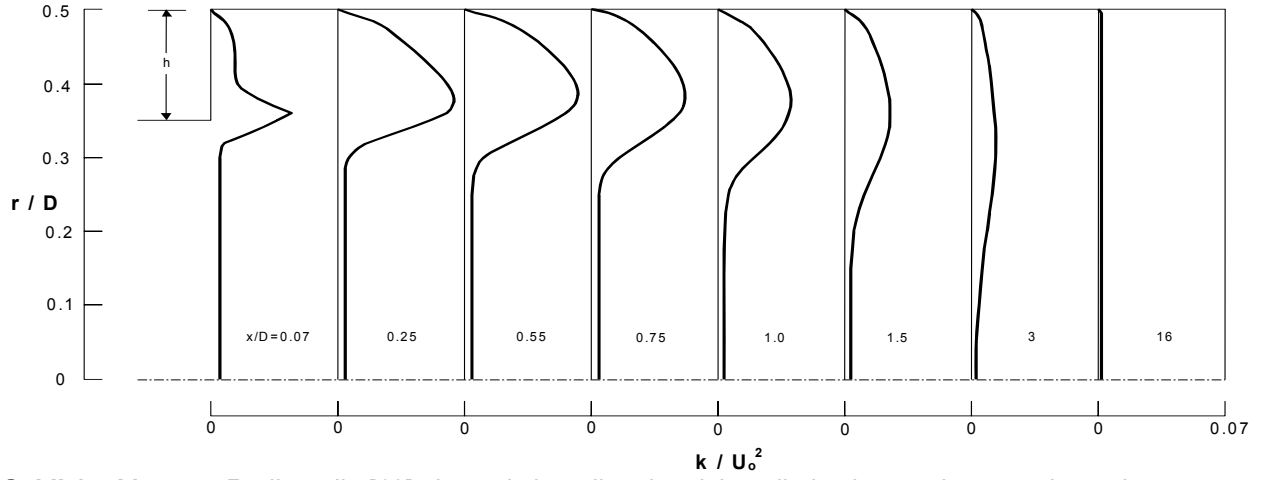


Şekil 12. Bir eksenel simetrik anigenişlemeli boru için hesaplanan eksenel hız radyal profilinin Moon ve Rudinger'in [10] deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

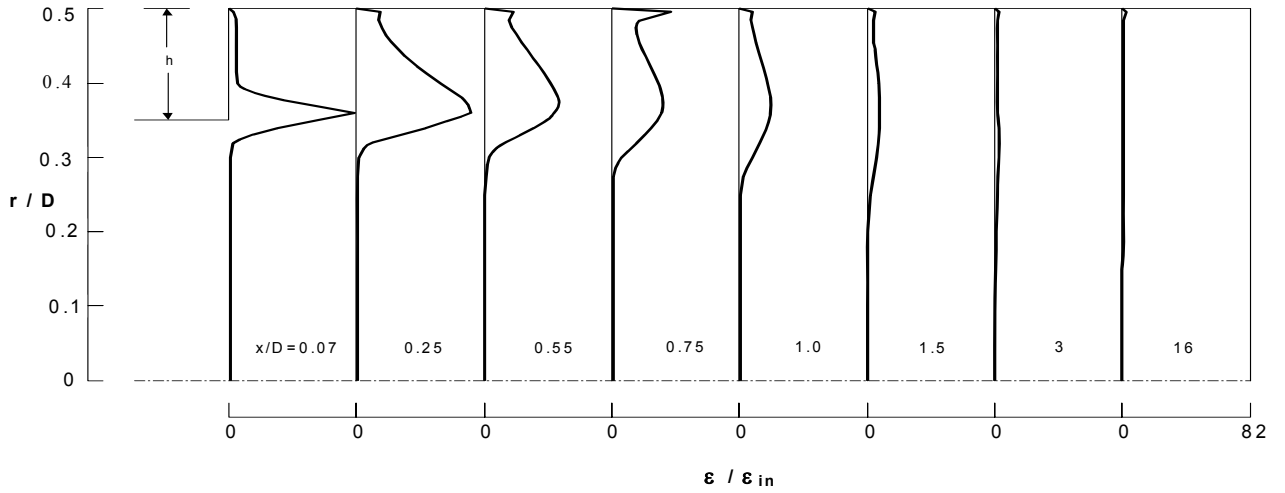


Şekil 13. Bir eksenel simetrik anigenişlemeli boru boyunca simetri ekseninde hesaplanan eksenel hızın Moon ve Rudinger'in [10] deneysel bulgularıyla karşılaştırılması.

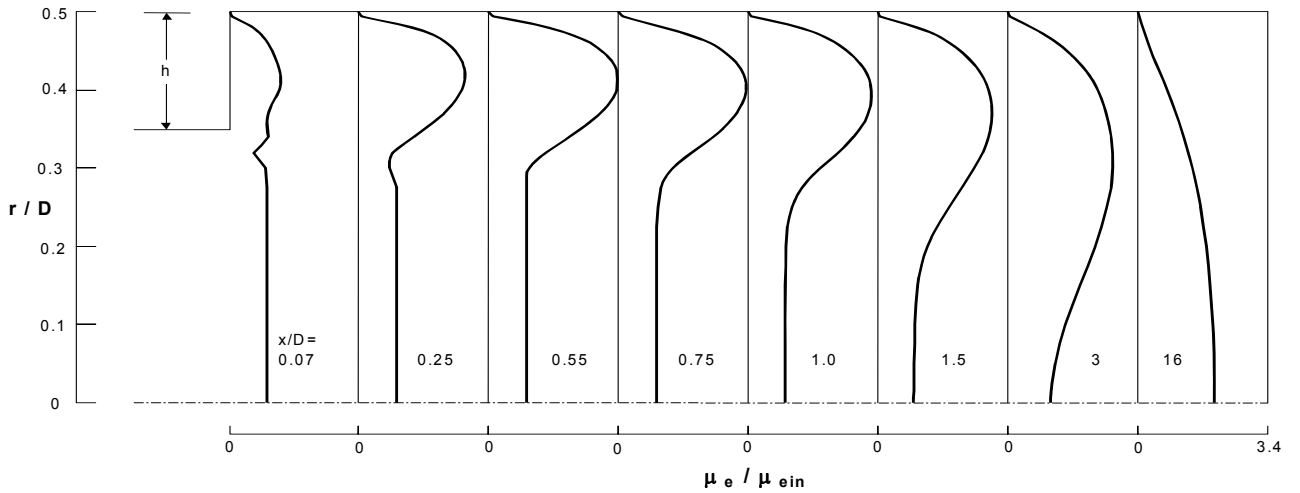
Hesaplanan türbülans kinetik enerji radyal profilleri, boyutsuz şekilde k/u_0^2 ve radyal mesafe r/D cinsinden, $x/D=0.07$ 'den 16'ya kadar büyük boru çapına dayanan boyutsuz eksenel mesafelerde tespit edilen sekiz eksenel kesitte Şekil 14'te sunulmuştur. Bu şekil, anigenişlemeli boru boyunca akış geliştikçe, türbülans kinetik enerji radyal dağılımının azaldığını göstermektedir. Şekil 15 ve 16, sırasıyla, Moon ve Rudinger'in [10] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu için, hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleriyle efektif viskozite profillerini, $x/D=0.07$ 'den 16'ya kadar tespit edilen boyutsuz eksenel mesafelerde sekiz eksenel kesitte göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller sırasıyla girişteki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ε_{in} ve efektif viskozite μ_{ein} ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, anigenişlemeli boru boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite profillerinin nasıl geliştiklerini sergilemektedir. Son olarak, Şekil 17'de Moon ve Rudinger'in [10] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusunun üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi, büyük boru çapıyla boyutsuz kılınan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeri takriben $x/D=16$ kesitinde elde edilmiştir.



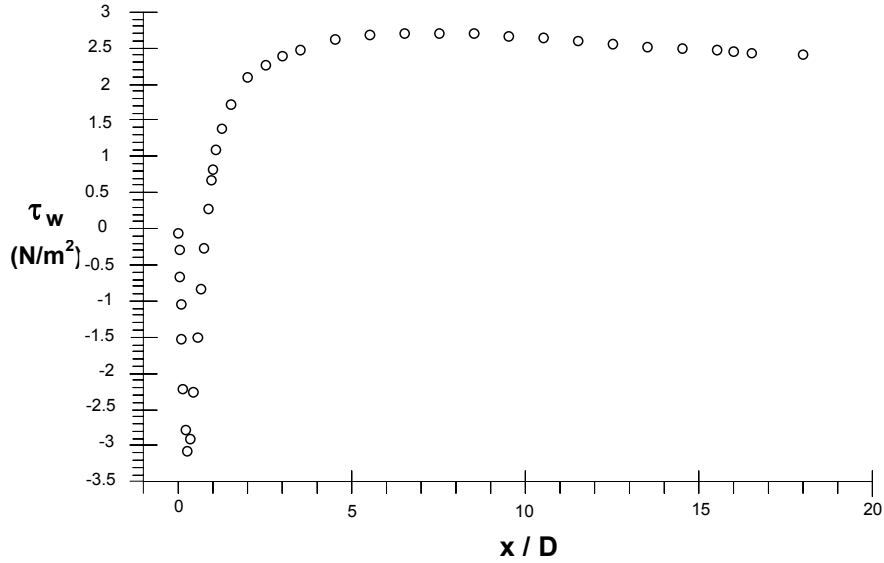
Şekil 14. Moon ve Rudinger'in [10] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji radyal profilleri.



Şekil 15. Moon ve Rudinger'in [10] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı radyal profilleri.



Şekil 16. Moon ve Rudinger'in [10] eksenel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite radyal profilleri.



Şekil 17. Moon ve Rudinger'in [10] aksel simetrik anigenişlemeli akış borusu boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin değişimi.

SONUÇ

Bu araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Aksel simetrik anigenişlemeli borularda ayrımlı, kompleks çevrintili türbülanslı akış, standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak, 1.25×10^5 ve 2.8×10^5 gibi iki farklı Reynolds sayısı için sayısal olarak hesaplanmıştır. Geleneksel sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar ve Spalding'in [13] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. İki farklı aksel simetrik anigenişlemeli borular için standart $k-\epsilon$ türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. $k-\epsilon$ türbülans modeline dayanan aksel hız, türbülans kinetik enerji ve simetri eksenine boyunca üzerindeki aksel hızın azalışının hesaplanmış değerleri, literatürde bildirilen deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Aksel hızın hesaplanan ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılması genel olarak oldukça iyidir. Buna rağmen, çevrintili akış bölgesinin tutunma uzunluğu deneyselden daha küçük olarak hesaplanmıştır. Ayrımlı akışın kayma tabakasından anigenişlemeli borunun simetri eksenine doğru türbülans kinetik enerjinin radyal yayılımı, $k-\epsilon$ türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanması istisna olmak üzere, hesaplanan ile ölçülen türbülans kinetik enerji değerleri arasındaki uyum oldukça iyidir.

KAYNAKLAR

- [1] Gould, R. D., Stevenson, W. H., and Thompson, H. D., "Investigation of Turbulent Transport in an Axisymmetric Sudden Expansion", AIAA Journal, 28, 276-283, 1990.
- [2] 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, 367-372, 1988.
- [3] Stevenson, W. H., Thompson, H. D., and Craig, R. R., "Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculating Flows", ASME J. Fluids Eng., 106, 173-180, 1984.

- [4] Chaturvedi, M. C., "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions", J. Hydraulics Div., Proc. ASCE, 89, HY3, 61-92, 1963.
- [5] Karasu, T., "Numerical Prediction of Turbulent Recirculating Flow Through Axisymmetric Sudden Expansions", 10 th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, 21st –25th July 1997, Swansea, U.K., Proc., 10, 357-368, 1997.
- [6] Karasu, T., "Geriye Doğru Basamaklar Arkasında Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması", 10. Ulusal Mekanik Kongresi, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 307-317, 1998.
- [7] Karasu, T., Choudhury, P. R., Gerstein, M., "Upwind ve Hybrid Diskritizasyon Metotları ile $k-\epsilon$ Türbülans Modelini Kullanarak Bazı Türbülanslı Akışların Hesaplanması", Doğa Bilim Dergisi, Cilt 9, Seri B, 218-234, 1985.
- [8] Karasu, T., Kural, O., "Eksenel Simetrik Anigenişlemelerde Türbülanslı Akışın Sayısal Hesaplanması", 2. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, Trabzon, Bildiri Kitabı, 245-254, 1996.
- [9] Karasu, T., "Numerical Computation of Turbulent Flow in Pipes", Doğa-Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, 17, 29-38, 1993.
- [10] Moon, L.F., and Rudinger, G., "Velocity Distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct", ASME J. Fluids Eng., 99, 226-230, 1977.
- [11] 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, 7, No.3, 348-356, 1991.
- [12] Launder, B. E., and Spalding, D. B. , "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3, 269-289, 1974.
- [13] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Chapters 5 and 6, 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, DC, 1980.

ÖZGEÇMİŞ

Tahir KARASU

1950 yılında Eskişehir’de doğdu. D.I.C. (Diploma of Imperial College), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, U.K.; M.Sc., The University of Birmingham, Birmingham, U.K.; ve Ph.D., The University of London, London, U.K.; derecelerini aldı. 1982-1983 yıllarında Amerika Birleşik Devletlerinde Kaliforniya’da Güney Kaliforniya Üniversitesi’nde postdoktoral araştırmacı olarak çalıştı. 1981-1986 yıllarında Uludağ Üniversitesi’nde, 1986-1988 yıllarında Çukurova Üniversitesi’nde, ve 1988-1993 yıllarında Anadolu Üniversitesi’nde çalıştı. 1984’te doçent, 1995’te profesör oldu. 1993 yılından bu yana Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde Termodinamik Anabilim Dalı Başkanlığını yapmakta olan Prof. Dr. Tahir Karasu İngilizce bilmekte ve ağırlıklı olarak Akışkanlar Mekaniği, Termodinamik, Isı Transferi, Sayısal Akışkanlar Dinamiği ve Isı Transferi alanlarında çalışmaktadır.