

GERİYE DOĞRU BASAMAKLAR ARKASINDA KOMPLEKS ÇEVİNTİLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL HESAPLANMASI

Tahir KARASU

ÖZET

Bu araştırma, geriye doğru basamaklar arkasında üç farklı Reynolds sayısı için sürekli, sıkıştırılmayan, iki-boyutlu, ayrımlı ve yeniden birleşmeli 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 $k-\epsilon$ türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Geriye doğru basamaklı akış geometrilerinin çeşitli kesitlerinde yerel akış yönü hız profilleri, türbülans kinetik enerji profilleri, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri, türbülans viskozite profilleri ve üst cidar boyunca cidar kayma gerilmesinin dağılımı için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel bulgularla ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama sonuçları çeşitli deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyumdadır.

1. GİRİŞ

Şekil 1'de gösterilen geriye doğru bir basamak arkasında, ayrımlı ve yeniden birleşmeli kompleks çevrıntili türbülanslı akış büyük pratiksel önem taşımaktadır. Bu akış, ayrışma ve yeniden birleşme gibi temel fiziksel olayları incelemek için çok iyi bir örnek oluşturmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, bu akışta üç temel akış rejimi mevcut olup bunlar; yeniden birleşmeli bir kayma tabakası, kompleks çevrıntili bir akış bölgesi ve durgun bir akış bölgesidir. Bu akış rejimleri türbülans modellerinin geçerliğini titizlikle test eder. Geriye doğru bir basamak arkasındaki kompleks çevrıntili türbülanslı akış, hem deneysel ve hem de teorik olarak pekçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar arasında Kasagi ve Matsunaga [1], Fessler ve Eaton [2], Ruck ve Makiola [3], Chun ve Sung [4], de Groot [5], Kim et al. [6], Vogel ve Eaton [7], ve Karasu et al. [8-13] sadece birkaçıdır. Bu çalışmada, Kasagi ve Matsunaga [1], Fessler ve Eaton [2], ve Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel ölçümleri sayısal hesaplamalarla karşılaştırmak için kullanılmıştır. Bu çalışmanın ana amacı, Launder ve Spalding'in [14] standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelini cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, geriye doğru basamaklar arkasında sürekli, iki-boyutlu, sıkıştırılmayan kompleks çevrıntili türbülanslı akışın sayısal hesaplamasını yapmak ve sayısal hesaplamaların geçerliğini kontrol etmek için deneysel ölçümlerle karşılaştırmaktır.

2. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1'e ilişkin olarak, geriye doğru basamaklar arkasında sürekli, iki-boyutlu, sıkıştırılmayan ayrımlı ve yeniden birleşmeli kompleks çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanmasında kullanılan matematiksel formülasyon, 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, kartezyen koordinatları sisteminde genel bir diferansiyel denklem halinde aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

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

burada ϕ ; u , v , k ve ε bağımlı değişkenleri göstermektedir. u , v sırasıyla yatay (x) ve dikey (y) yönlerindeki yerel zaman ortalaması alınmış hız bileşenleridir. k ve ε sırasıyla yerel türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma miktarıdır. Γ_{ϕ} ve S_{ϕ} sırasıyla genel değişken ϕ için türbülans yayılım katsayısı ve kaynak terimidir, ρ ise akışkanın yoğunluğudur. Eğer ϕ bire, Γ_{ϕ} ve S_{ϕ} sifıra eşitlenirse (1) denklemi süreklilik denklemine indirgenir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli Launder ve Spalding'in [14] standart k - ε modelidir. Basınç, Patankar'ın [15] basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır. Akışı yöneten hareket denklemleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Hareket denklemleri

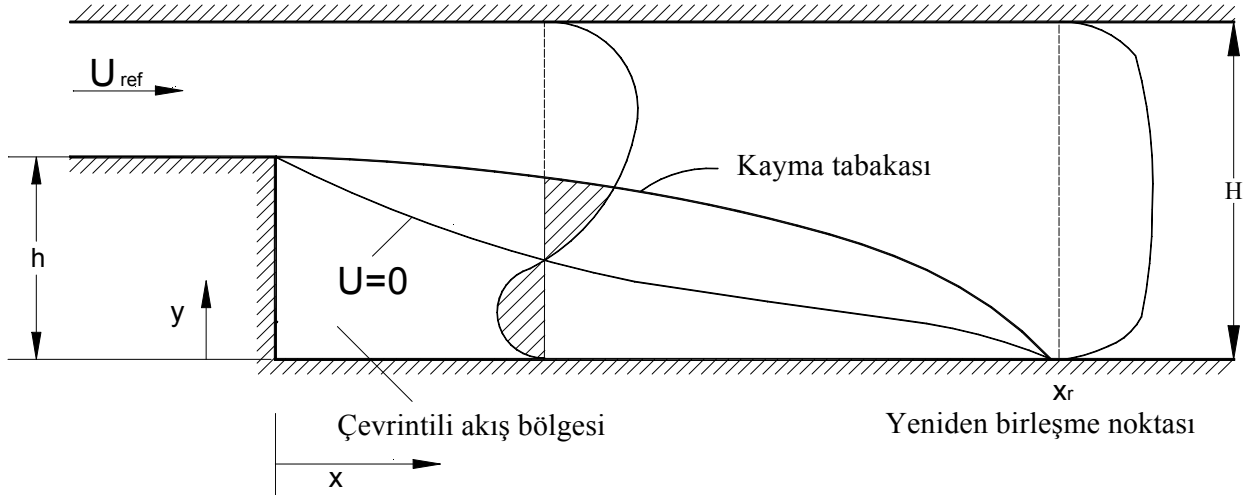
ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
1	0	0
u	$\mu_e = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
v	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right)$
k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$
ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)$

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

2. Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir [14]:

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

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



Şekil 1. Koordinat sistemi ve geriye doğru basamak akış geometrisi.

2.2. Sınır Koşulları

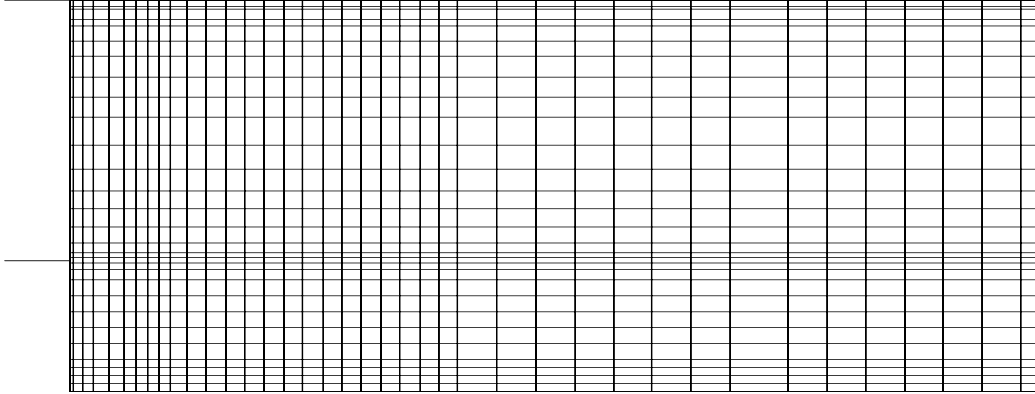
Gözönüne alınan geriye doğru basamaklar arkasında kompleks çevrintili türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıdaki gibidir. Basamağın giriş düzleminde akış yönü hız dağılımı deneysel ölçümlerden belirtilirken, dikey yönündeki hız ise sifıra eşit kılınmıştır. Türbülans büyüklükleri k ve ε 'na düzgün değerler verilmiştir; yani, $k=(0.005-0.015) u_o^2$ (veya u_{ref}^2) ve $\varepsilon=(C_\mu k^{3/2} / 0.03H)$, burada u_o (veya u_{ref}) girişteki ortalama hız olup H ise kanalın yüksekliğidir. Çıkışta tamamiyle gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, kanalın çıkış düzlemi çevrintili akış bölgesinden yeteri kadar uzaklıkta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde dikey hız sifır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sifır olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar, çıkış düzleminin giriş düzleminin 25 basamak yüksekliğinde alındığı aşağı akışa kadar sürdürülmüştür. Üst, alt ve basamak cidarlarında hız bileşenleri u , v ile türbülans büyüklükleri k ve ε sifıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ε 'nın değerleri Launder ve Spalding'in [14] cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal ıraksamaya neden olmamak için, ilk sayısal hesaplama alanı değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal çalışmada, geleneksel sonlu hacim yaklaşımı kullanarak, Patankar ve Spalding'in [15] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) numaralı kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemiyle 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. Sayısal ağ dağılımı, Şekil 2'de gösterildiği gibi, geriye doğru basamak kanalının cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonu düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. İncelenen her bir akış durumu için ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek amacıyla farklı ağ büyüklükleriyle ağ testleri yapılmıştır. Burada sunulan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdır. Tablo 2 gözönüne alınan her bir 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. Kasagi ve Matsunaga'nın [1] geriye doğru basamaklı akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.

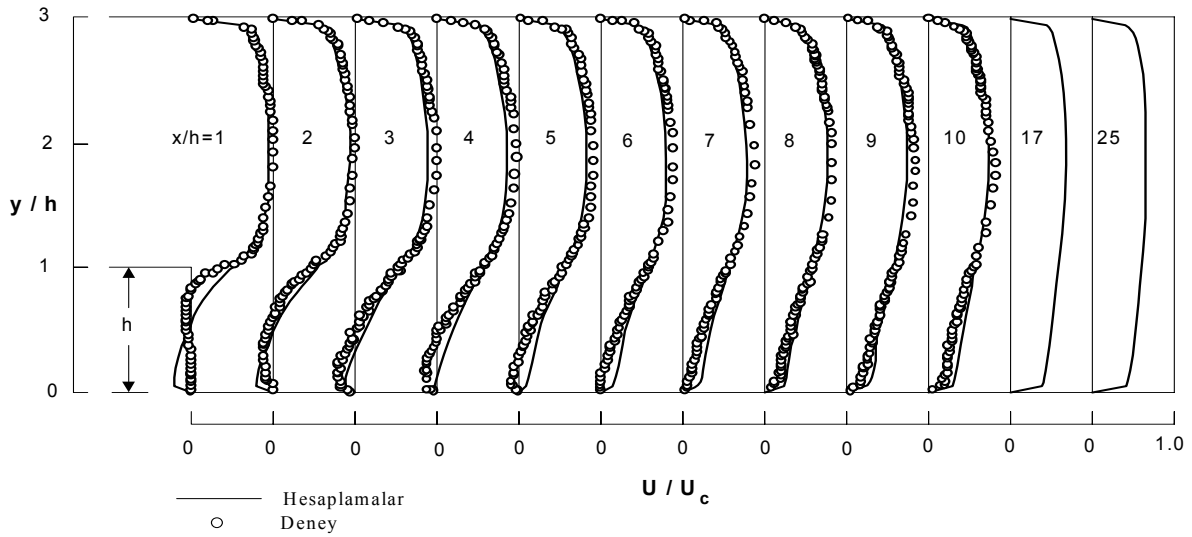
Tablo 2. Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı.

Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü (x) x (y)	T, cpu zamanı (saniye)	N	T/N
Kasagi ve Matsunaga [1]	5540	40 x 30	106.26	651	0.16322
Fessler ve Eaton [2]	18400	40 x 28	227.15	1500	0.15143
Ruck ve Makiola [3]	64000	40 x 30	244.14	1500	0.16276

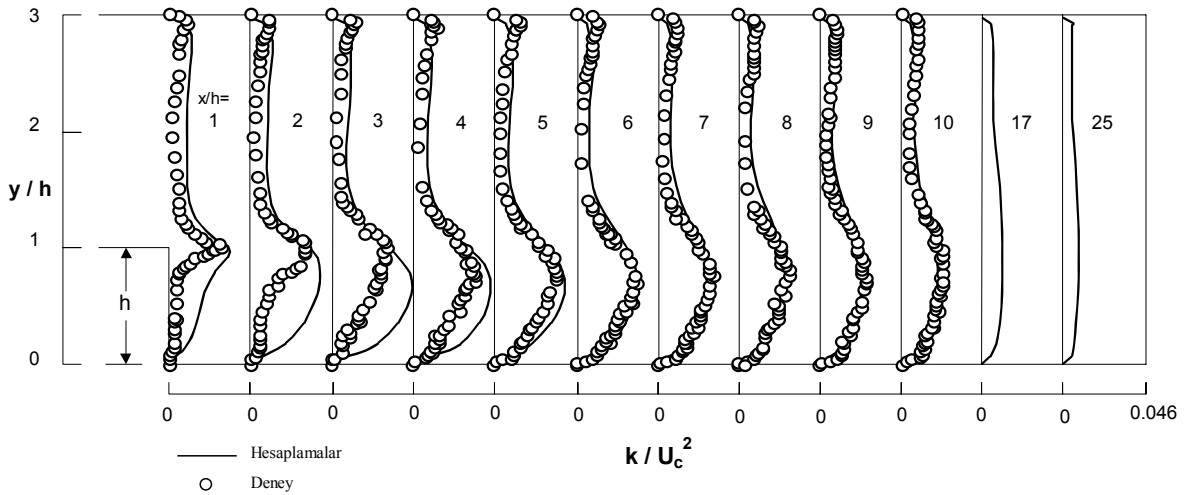
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Geriye doğru basamaklar arkasında ayrımlı ve yeniden birleşmeli kompleks çevrintili türbülanslı akış için üç farklı Reynolds sayısında sayısal hesaplamalar yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Kasagi ve Matsunaga [1], Fessler ve Eaton [2], ve Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri geriye doğru basamak kanalının bir yanından öbür yanına $x/h=1$ 'den 25'e kadar olan akış yönü kesitlerinde $Re=5540$ için Şekil 3'te Kasagi ve Matsunaga'nın [1] deneysel bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı u kanalın merkezinde üst akışta maksimum hız u_c ile boyutsuz kılınmıştır. Reynolds sayısı üst akışta kanalın orta çizgisi üzerindeki hız u ve basamak yüksekliğine dayanır. Yani, $Re=u_c h / \nu$. İki-boyutlu kanalda, sayısal hesaplama alanı basamaktan 25 basamak yüksekliğinde aşağı akışta bir akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, iki-boyutlu kanal boyunca akış yönü hız profili gelişmekte, ve hesaplanan akış yönü hız profilleri karşılıkları olan deneysellerle iyi uyum içindedir. Buna rağmen, hesaplanan kompleks çevrintili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha incedir. Hesaplanan akış tutunma uzunluğunun takriben $x/h=4$ kesitinde olduğu bulunmuştur. Oysa, deneysel akış tutunma uzunluğunun $x/h=6.51$ kesitinde olduğu bildirilmiştir. Bu problemin kaynağı standart $k-\epsilon$ türbülans modelinin bir sınırlamasıdır. Model, sağlanan extra türbülans enerji ile etkisinin hissedildiği yutulma hareketleri arasında geçen zamanı dikkate almamaktadır. Hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri ve bunların Kasagi ve Matsunaga'nın [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması, boyutsuz olarak k / u_c^2 cinsinden, Şekil 3'teki gibi aynı aşağı akış kesitleri için, Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, akış geriye doğru basamak kanalı boyunca geliştikçe, deneysel türbülans kinetik enerji dağılımı azalmaktadır. Bu özellik aynı zamanda hesaplamalar tarafından da gösterilmiştir. Ayrımlı ve yeniden birleşmeli kompleks çevrintili akış bölgesinde deneysel türbülans kinetik enerji profillerinin aşırı hesaplanmasına rağmen, hesaplanan profiller karşılıkları olan deneysellerle aynı trendi göstermektedir. Sonuç olarak, sayısal hesaplamalar ile deneysel ölçümler arasında ulaşılan uyum genel olarak oldukça iyidir. Şekil 5 ve 6, sırasıyla,

Kasagi ve Matsunaga'nın [1] geriye doğru basamaklı akış geometrisinin bir tarafından öbür tarafına hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans viskozite profillerini Şekil 3 ve 4'teki gibi aynı aşağı akış kesitleri için sergilemektedir. Hesaplanan profiller sırasıyla girişteki türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ε_{in} ve türbülans viskozite μ_{in} ile boyutsuz hale getirilmiştir. Bu şekiller, geriye doğru basamak kanalı boyunca hesaplanan türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile türbülans viskozite profillerinin nasıl geliştiklerini göstermektedir. Şekil 7'de geriye doğru basamak akış geometrisi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) gösterilmiştir. Alt cidardan ölçülen dikey mesafe y basamak yüksekliği h ile boyutsuzlaştırılmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan akış yapışma uzunluğu takribi olarak $x/h=4$ kesitinde oluştuğu bulunmuştur.



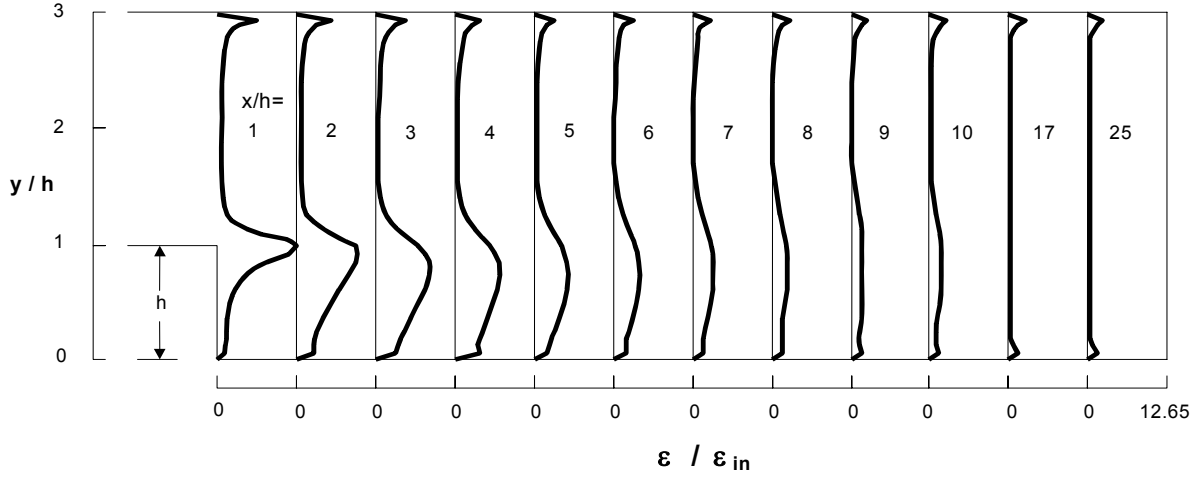
Şekil 3. Geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Kasagi ve Matsunaga'nın [1] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.



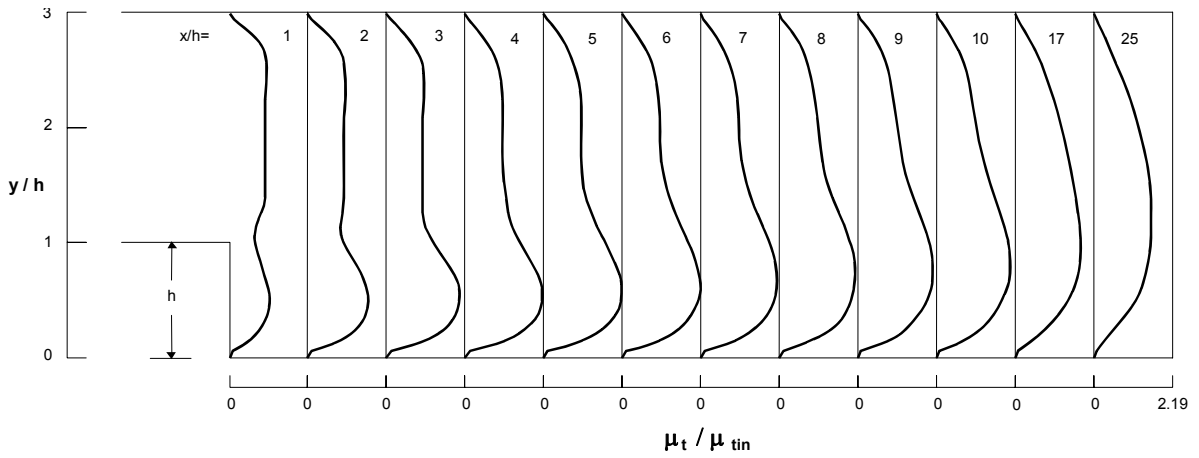
Şekil 4. Geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin Kasagi ve Matsunaga'nın [1] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.

Hesaplanan akış yönü hız profilleri ve bunların Fessler ve Eaton'un [2] deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması, boyutsuz şekilde u/u_0 cinsinden, $x/h=1$ 'den 25'e kadar değişen akış yönü kesitlerinde $Re=18400$ için Şekil 8'de gösterilmiştir. Burada Reynolds sayısı girişte kanal orta çizgisi üzerinde

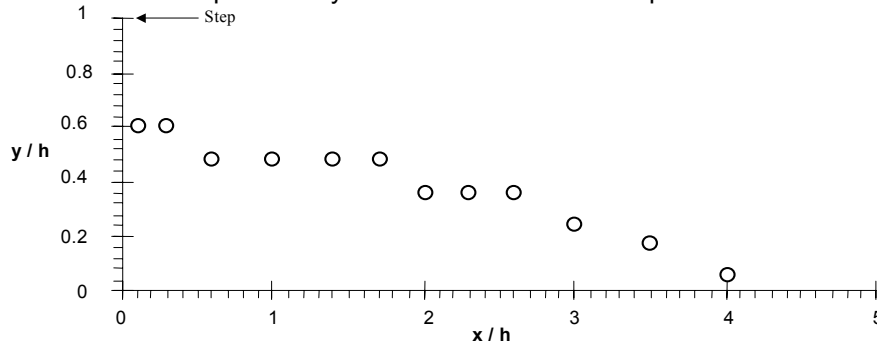
ölçülen u_0 referans hızına ve h basamak yüksekliğine dayanır. Yani, $Re = u_0 h / \nu$. Bu akış durumu için, sayısal hesaplama alanı geri basamaktan 25 basamak yüksekliğinde aşağı akışta bir akış yönü mesafesine kadar uzatılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan akış yönü hız profilleri ile karşılıkları olan deneyseller arasında genel olarak oldukça iyi uyum varolmasına rağmen, Şekil 3'te gözlemlendiği gibi, hesaplanan kompleks çevrintili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha incedir. Hesaplanan akış yapışma uzunluğu takribi olarak $x/h=5$ noktasında oluşurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise $x/h=7.4$ noktasında oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 9'da



Şekil 5. Kasagi ve Matsunaga'nın [1] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.

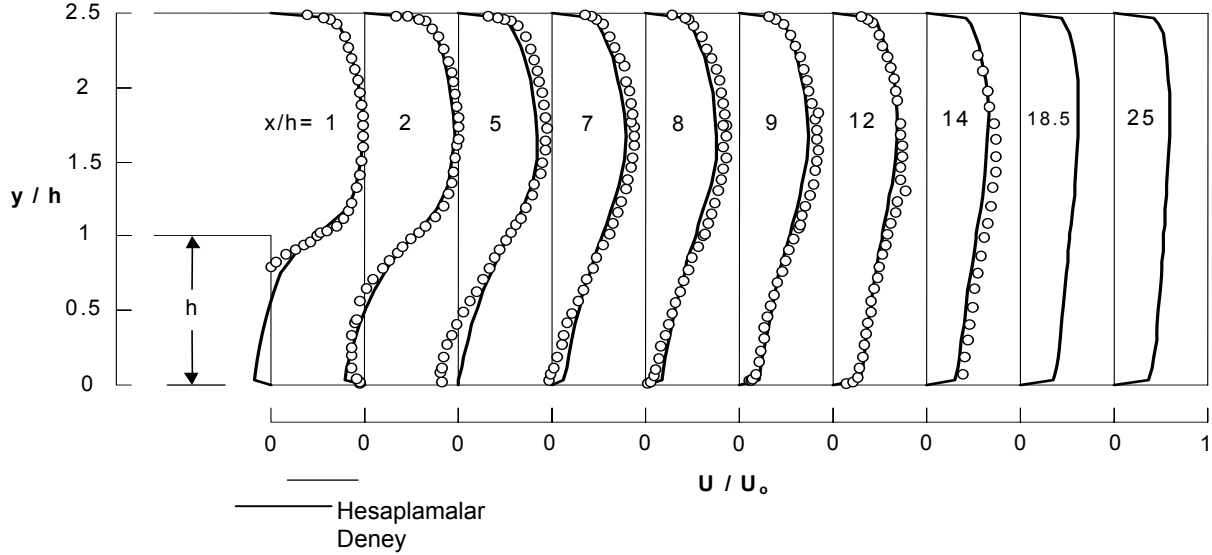


Şekil 6. Kasagi ve Matsunaga'nın [1] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans viskozite profilleri

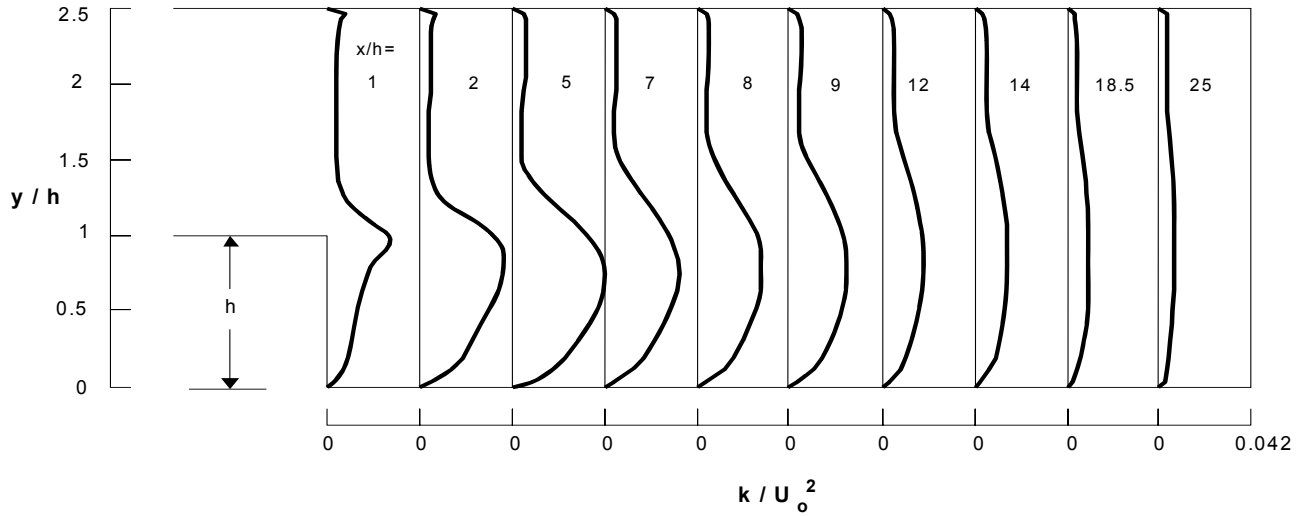


Şekil 7. Kasagi ve Matsunaga'nın [1] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış geometrisi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$)

Fessler ve Eaton'un [2] geriye doğru basamaklı akış geometrisinin bir yanından öbür yanına hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri, Şekil 8'deki gibi aynı aşağı akış kesitleri için, boyutsuz olarak k/u_0^2 cinsinden çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, akış iki-boyutlu kanal boyunca geliştiğçe, hesaplanan türbülans kinetik enerji dağılımı azalmaktadır.



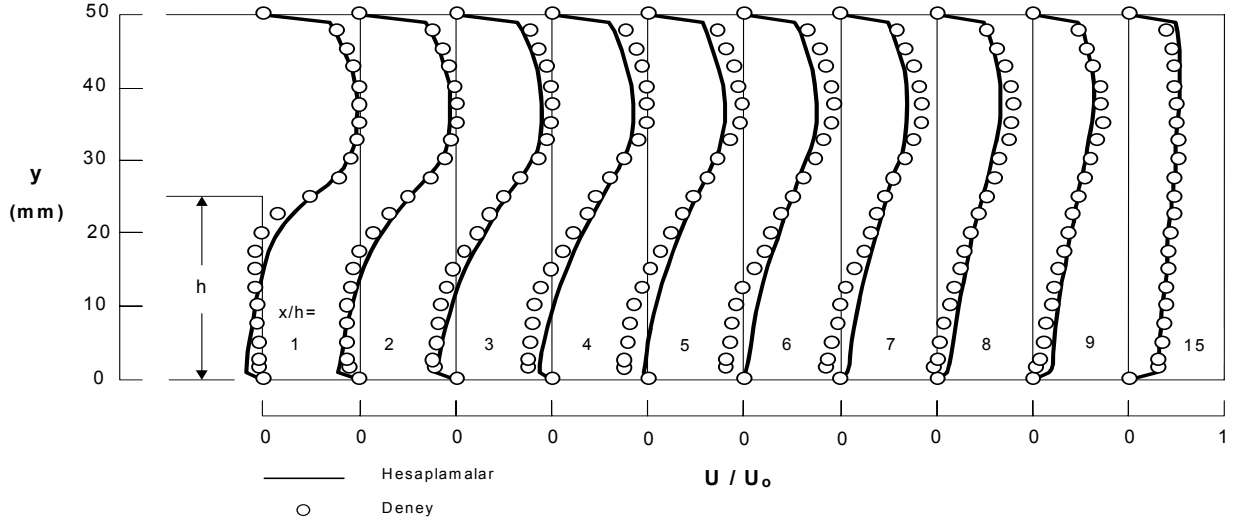
Şekil 8. Geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Fessler ve Eaton'un [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



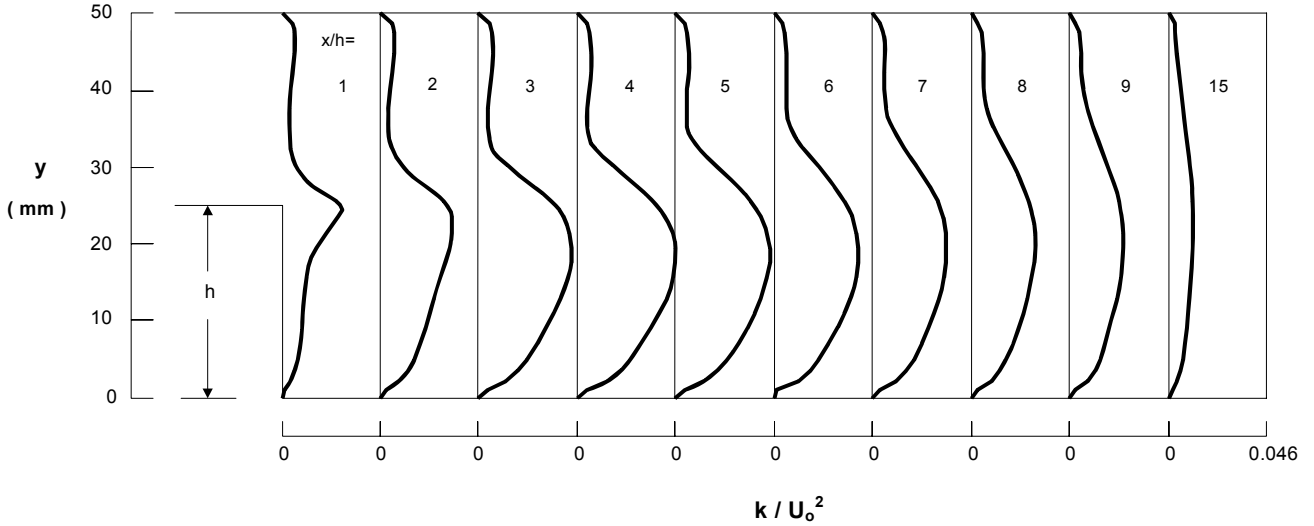
Şekil 9. Fessler ve Eaton'un [2] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.

Şekil 10 geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profilleri ile Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel ölçümleri arasında, $x/h=1$ 'den 15'e kadar değişen akış yönü kesitlerinde $Re=64000$ için bir karşılaştırma vermektedir. Reynolds sayısı $Re= u_0 h / \nu$ olarak tanımlanmıştır. Burada u_0 basamaktan önce hız profilindeki maksimum hızdır, h ise basamak yüksekliğidir. Bu akış durumu için, sayısal hesaplama alanı basamaktan aşağı akışta 25 basamak yüksekliğinde bir akış yönü mesafesine kadar uzanır. Şekil 10 incelendiğinde görüldüğü ki, hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profilleri karşılıklı olan deneysellerle iyi kalitatif uyum göstermektedir. Akış

iki-boyutlu kanal boyunca geliştikçe bu uyum daha da iyi olmaktadır. Bununla beraber, önceki araştırılan akış durumlarında olduğu gibi, kompleks çevrintili akış bölgesinin uzunluğu daha kısa olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kayma tabakası akışının yapışma uzunluğunun takriben $x/h=5.5$ kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel kayma tabakası akışının yapışma uzunluğunun ise takribi olarak $x/h=8$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu problemin kaynağı standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin bir sınırlamasıdır. Model, yaratılan extra türbülans enerji ile etkisinin hissedildiği yutulma hareketleri arasında geçen zamanı dikkate almamaktadır. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profillerinin gelişimi, Şekil 10'daki gibi aynı aşağı akış kesitleri için, Şekil 11'de gösterilmiştir.



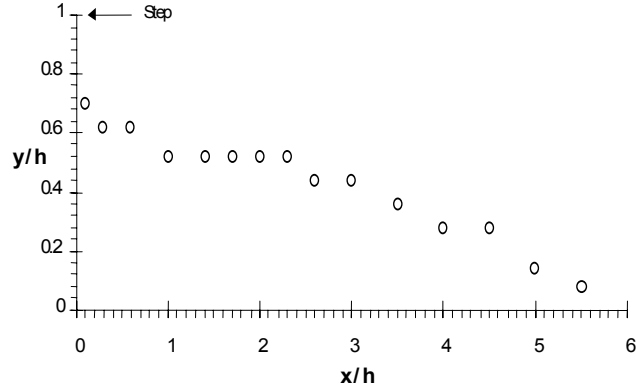
Şekil 10. Geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



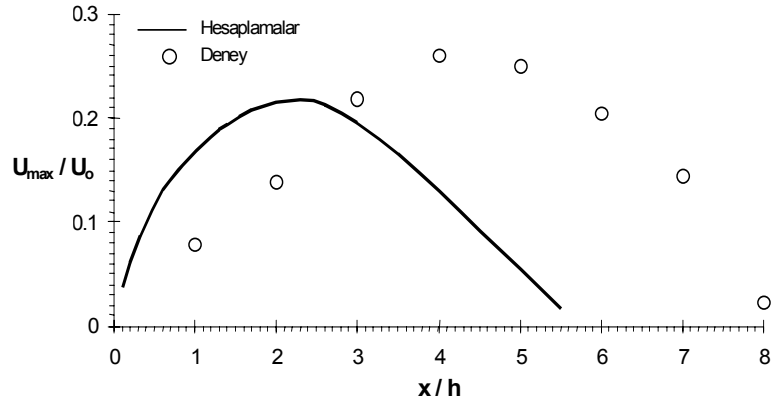
Şekil 11. Ruck ve Makiola'nın [3] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.

Şekilden görüldüğü üzere, kanal boyunca türbülans kinetik enerji dağılımı azalmaktadır. Şekil 12, geri basamakta hesaplanan geri akışın geometrik yerini ($u=0$) gösterirken, akış tutunma uzunluğunun yaklaşık olarak $x/h=5.5$ kesitinde oluştuğunu da göstermektedir. Şekil 13 ise, kompleks çevrintili akış bölgesinde hesaplanan boyutsuz maksimum negatif akıntıya karşı yönde olan hızın, Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel bulgularıyla bir karşılaştırmasını vererek, $k-\varepsilon$ türbülans modelinin bu maksimum negatif hızın akış yönündeki yerini deneyselden daha kısa olarak hesapladığını

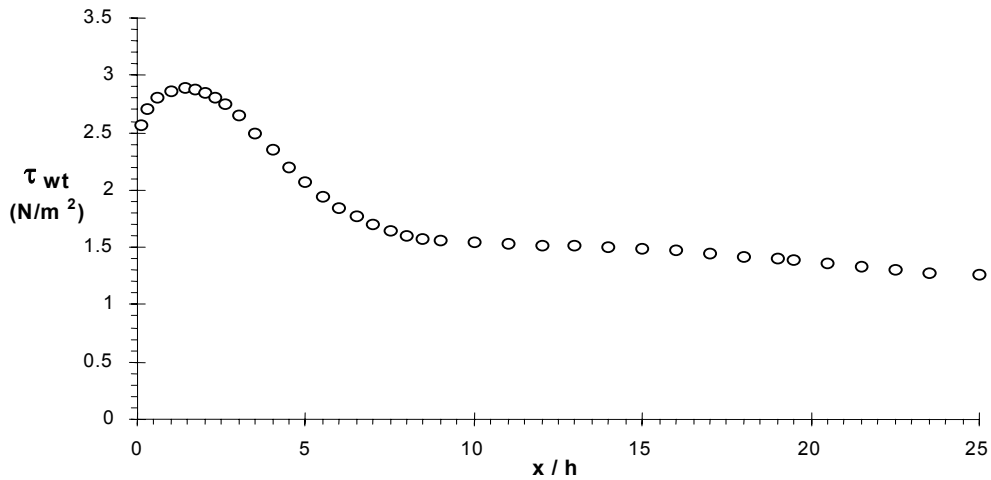
göstermektedir. Buna rağmen, hesaplamalar deneysel ölçümlerle aynı trendi sergilemektedir. Son olarak, Şekil 14'te Ruck ve Makiola'nın [3] geriye doğru basamaklı akış geometrisinin üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı, basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılan aşağı akış mesafesinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekilden gözlemlendiği üzere, cidar kayma gerilmesinin tamamıyla gelişmiş değeri takriben $x/h=22$ kesitinde elde edilmiştir.



Şekil 12. Ruck ve Makiola'nın [3] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış geometrisi için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



Şekil 13. Geriye doğru bir basamak arkasındaki akış için kompleks çevrintili akış bölgesinde hesaplanan boyutsuz maksimum negatif akış yönü hızının Ruck ve Makiola'nın [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



Şekil 14. Ruck ve Makiola'nın [3] geriye doğru bir basamak arkasındaki akış geometrisi için kanalın üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

SONUÇ

Geriyeye doğru basamaklar arkasında ayrımlı ve yeniden birleşmeli, kompleks çevrıntili türbülanslı akış için üç farklı Reynolds sayısında, standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Geleneksel sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar ve Spalding'in [15] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Üç farklı geriyeye doğru basamaklı akış geometrileri için standart $k-\epsilon$ türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. Standart $k-\epsilon$ türbülans modeliyle elde edilen hesaplanan yerel akış yönü hızı ve türbülans kinetik enerji profilleri literatürde bildirilen çeşitli deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. İki-boyutlu kanal karşısında hesaplanan ve ölçülen yerel akış yönü hızı ile türbülans kinetik enerji profillerinin karşılaştırılması genel olarak oldukça iyidir. Bununla beraber, basamak arkasındaki kompleks çevrıntili akış bölgesinin uzunluğu ve genişliği standart $k-\epsilon$ türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] KASAGI, N., and MATSUNAGA, A., "3-D Particle-Tracking Velocimetry Measurement of Turbulence Statistics and Energy Budget in a Backward-Facing Step Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 16, 477-485, 1995.
- [2] FESSLER, J.R., and EATON, J.K., "Particle Response in a Planar Sudden Expansion Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15, 413-423, 1997.
- [3] RUCK, B., and MAKİOLA, B., "Particle Dispersion in a Single-Sided Backward-Facing Step Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, 14, 787-800, 1988.
- [4] CHUN, K.B., and SUNG, H.J., "Control of Turbulent Separated Flow Over a Backward-Facing Step by Local Forcing", *Experiments in Fluids*, 21, 417-426, 1996.
- [5] de GROOT, W.A., "Laser Doppler Diagnostics of the Flow Behind a Backward-Facing Step", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1985.
- [6] KIM, J., KLINE, S.J., and JOHNSTON, J.P., "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step", *ASME J. Fluids Eng.*, 102, 302-308, 1980.
- [7] VOGEL, J.C., and EATON, J.K., "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward-Facing Step", *ASME J. Heat Transfer*, 107, 922-929, 1985.
- [8] KARASU, T., KURAL, O., EĞRİCAN, N., ATAER, Ö.E., BORAT, O., ÖZCAN, O., "Computer Simulation of Turbulent Flow Over Backward-Facing Steps", Fourth Turkish National Combustion Symposium, 19th-21st July 1995, Kirazlıyayla, Uludağ, Bursa, Türkiye, Proc., 370-379, 1995.
- [9] KARASU, T., KURAL, O., "Geriyeye Doğru Basamaklar Üzerinde Türbülanslı Akışın Sayısal Simülasyonu", Kayseri Birinci Havacılık Sempozyumu, Kayseri, Bildiriler Kitabı, 283-288, 1996.
- [10] KARASU, T., KURAL, O., ATAER, Ö.E., "Kanallarda Türbülanslı Akımların Sayısal Hesaplanması", 9. Ulusal Mekanik Kongresi, Ürgüp, Bildiriler Kitabı, 400-415, 1995.
- [11] KARASU, T., "Numerical Investigation of Separating and Reattaching Turbulent Flow Over Backward-Facing Steps", 3. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 279-286, 1998.
- [12] KARASU, T., KURAL, O., EĞRİCAN, N., BORAT, O., ÖZCAN, O., "Numerical Simulation of Turbulent Flow in Axisymmetric Sudden Expansions", Fourth Annual Mechanical Engineering Conference of ISME Second International Mechanical Engineering Conference, Shiraz, Iran, Proc., 2, 261-268, 1996.
- [13] KARASU, T., CHOUDHURY, P.R., and GERSTEIN, M., "Prediction of Some Turbulent Flows Using Upwind and Hybrid Discretisation Schemes and the Two-Equation Turbulence Model", *Journal of the Faculty of Engineering of Uludağ University*, 1, 1-20, 1984.
- [14] LAUNDER, B.E., and SPALDING, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 3, 269-289, 1974.
- [15] PATANKAR, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Chapters 5 and 6, 79-138,
- [16] 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 Los Angeles’ta 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.