



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

TEK YANLI DÜZLEMSEL ANİGENİŞLEMELİ KANALLARDA ÇEVİRİNTİLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN BİLGİSAYARLI SİMÜLASYONU

TAHİR KARASU
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

TEK YANLI DÜZLEMSEL ANİGENİŞLEMELİ KANALLARDA ÇEVİRİTİLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN BİLGİSAYARLI SİMÜLASYONU

Tahir KARASU

ÖZET

Bu araştırma, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda üç farklı Reynolds sayılarında sürekli, iki-boyutlu, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın kapsamlı bir çalışmasının bilgisayarlı simülasyon sonuçlarını takdim etmektedir. Hibrit yöntemiyle geleneksel sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin bilgisayarlı çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrilerinin çeşitli kesitlerinde yerel akış yönü hızı, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite profilleri, üst ve alt cidar kayma gerilmeleri, alt cidar sürtünme katsayısı ile alt cidar statik-basınç katsayısının değişimi için bilgisayarlı simülasyonlar sunulmuş ve deneysel bulgularla ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Bilgisayarlı simülasyonların sonuçları çeşitli deneysel ölçümlerle genel olarak oldukça iyi uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akışı, $k-\varepsilon$ türbülans modeli, Simülasyonlar.

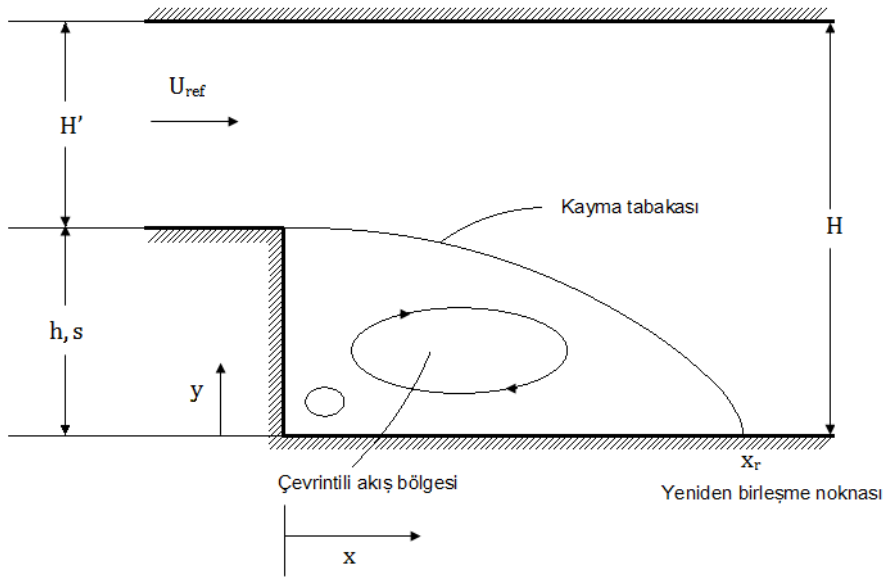
ABSTRACT

This research work presents the results of an extensive study of computer simulation of steady, two-dimensional, incompressible, separating and reattaching complex turbulent recirculating flow in single-sided planar sudden expansion channels at three different Reynolds numbers. Employing the conventional finite-volume method with a hybrid scheme, a computer program based on the SIMPLE algorithm has been developed. Computer solutions of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard high-Reynolds-number $k-\varepsilon$ turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall-functions are employed. Computer simulations for local streamwise velocity, turbulence kinetic energy, dissipation rate of turbulence kinetic energy, effective viscosity profiles, top and bottom wall shear stress distributions, variations of bottom wall friction coefficient and static-pressure coefficient along single-sided planar sudden expansion channel flow geometries are presented and wherever available compared with experimental data in detail. The results of computer simulations show generally good agreement with various experimental measurements.

Key Words: Single-sided planar sudden expansion channel flow, $k-\varepsilon$ turbulence model, Simulations.

1. GİRİŞ

Şekil 1’de gösterilen iki-boyutlu, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli bir kanalda, ayrımlı ve yeniden birleşmeli karmaşık 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, karmaşık çevrıntili bir akış bölgesi ile durgun bir akış bölgesidir. Bu akış rejimleri türbülans modellerinin geçerliliğini titizlikle test eder. Literatürde tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda karmaşık çevrıntili türbülanslı akış üzerine hem deneysel ve hem de teorik olarak pek çok çalışmalar yapılmıştır. En çok ilgi çekici çalışmalar arasında olanlar [1]-[14] çalışmalarıdır. Bu çalışmada, [1]-[3]’ün deneysel ölçümleri bilgisayarlı simülasyonlarla karşılaştırılmak için kullanılmıştır. Bu araştırmanın ana amacı, standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelini [15] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda sürekli, iki-boyutlu, sıkıştırılmayan, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın bilgisayarlı simülasyonunu yapmak ve bilgisayarlı simülasyonların geçerliliğini kontrol etmek için deneysel ölçümlerle karşılaştırmaktır.



Şekil 1. Kartezyen koordinat sistemi ve tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi.

2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1’e ilişkin olarak, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda sürekli, iki-boyutlu, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın bilgisayarlı simülasyonunda 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 kartezyen koordinatlarda genel bir diferansiyel denklem halinde aşağıdaki gibi 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 ve v sırasıyla yatay (x) ve dikey (y) yönlerindeki hız bileşenleridir. k ve ε sırasıyla 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} sıfıra eşitlenirse (1) denklemi süreklilik denklemine indirgenir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli k - ε modelidir [15]. Basınç, basınç düzeltme denkleminden çıkarılmıştır [16]. Taşınım denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Hareket denklemleri, katsayılar ve kaynak terimler.

| Değişken | Γ_{ϕ} | S_{ϕ} |
|---------------|--------------------------------|--|
| 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 | μ_e / σ_k | $G - \rho \varepsilon$ |
| ε | $\mu_e / \sigma_{\varepsilon}$ | $\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)$ |

Not: 1. $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$
2. Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir (Launder and Spalding, 1974):
 $C_{\mu} = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$

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

2.2. Sınır Koşulları

Şekil 1'e ilişkin olarak, göz önüne alınan tek yanlı düzlemsel anijenleşmeli kanallarda karmaşık çevriltili türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıdaki gibidir. Basamağın giriş düzleminde akış yönü hız dağılımı deneysel ölçümlerden belirtilirken, dikey yönündeki hız ise sıfıra eşit kılınmıştır. Türbülans büyüklükleri k ve ε 'na düzgün değerler verilmiştir; yani, $k = (0.002-0.004) u_{in}^2$ (veya u_{ref}^2) ve $\varepsilon = (C_{\mu} k^{3/2} / 0.03H)$, burada u_{in} (veya u_{ref}) girişteki referans hız olup H ise kanalın yüksekliğidir. Çıkışta tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, kanalın çıkış düzlemi çevriltili akış bölgesinden yeteri kadar uzaklıkta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde dikey hız sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar, çıkış düzleminin giriş düzleminin (20-29) basamak yüksekliğinde (h) alındığı aşağı akışa kadar sürdürülmüştür. Üst, alt ve basamak cidarlarında hız bileşenleri u , v ile türbülans büyüklükleri k ve ε sıfıra eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ε 'nın değerleri Launder ve Spalding'in [15] cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal iraksamaya neden olmamak için, başlangıç alan değerleri tüm sayısal hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal araştırmada, geleneksel sonlu hacim yaklaşımı kullanarak, Patankar'ın [16] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (1) eşitliğiyle verilen kısmi diferansiyel denklemleri hibrit yöntemle 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.

2.4. Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarı yapılmıştır. Adams ve Eaton'un [1] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan sayısal ağlar tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalın (geriye doğru basamaklı kanal) cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonu düzgün olmayan bir şekilde oluşturulmuştur. Tüm akış durumları için optimum ağ-bağımsız bir çözüm elde etmek için farklı ağ büyüklükleriyle ağ testleri yapılmıştır. Bu araştırmada sunulan tüm hesaplamalar ağ-bağımsızdır. Akış yönü ve dikey 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 kararlılık elde etmek için u , v , k , ϵ , P ve μ_e için sırasıyla 0.3, 0.3, 0.8, 0.8, 0.5 ve 0.3 gevşetme faktörleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama ölçütü, tüm hesaplama alanında kalıcı kütlelerin mutlak değerlerinin toplamı önceden belirtilen 10^{-5} değerinden daha küçük olması durumunda iterasyonların bitirilmesi ölçütüdür. Tablo 2 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.

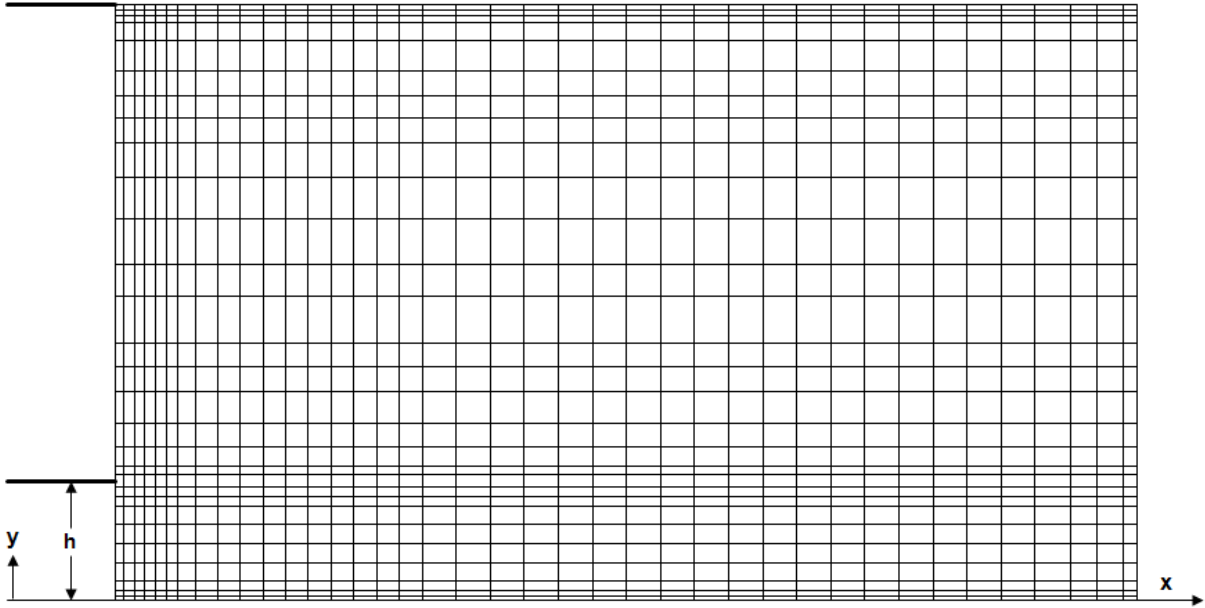
Tablo 2. Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı.

| Akış Durumu | Re | Ağ Büyüklüğü (x) x (y) | T cpu zamanı (saniye) | N | T / N |
|--------------------|---------|---------------------------|-----------------------------|-----|----------|
| Adams ve Eaton [1] | 36 000 | 40 x 30 | 3.625 | 274 | 0.013229 |
| Denham vd. [2] | 3025 | 40 x 30 | 6.67187 | 521 | 0.012805 |
| Stevenson vd. [3] | 172 518 | 40 x 30 | 8.09375 | 567 | 0.014274 |

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrintili türbülanslı akış için üç farklı Reynolds sayılarında bilgisayarlı simülasyonlar yapılmış ve simülasyonların sonuçları Adams ve Eaton [1], Denham ve diğerleri [2] ile Stevenson ve diğerleri'nin [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Buradaki sayısal araştırmada, çalışma akışkanı olarak hava kullanılan kanalda, Adams ve Eaton'un [1] deneysel ölçümleri hesaplamalarla karşılaştırmaya temel esas teşkil etmek üzere birinci olarak seçilmiştir. Kanaldaki akışın Reynolds sayısı $Re=3.6 \times 10^4$ 'tür ($Re = u_{ref} h / \nu$, burada u_{ref} serbest akımda basamaktan 12.7 cm üst akımda ölçülen referans hızıdır,

h ise basamak yüksekliğidir). Kanal $H/H'=1.25$ gibi bir genişleme oranına sahiptir. İki-boyutlu kanalda, sayısal hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akışta $20h$ kadar bir akış yönü mesafesine uzatılmıştır. Şekil 2'de Adams ve Eaton'un [1] akış durumu için kullanılan sayısal ağ dağılımı sergilenmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal karşısında $x/h=2$ 'den 18 'e kadar değişen akış yönü kesitlerinde, boyutsuz olarak u/u_{ref} cinsinden, Şekil 3'te Adams ve Eaton'un [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri karşılıkları olan deneysellerle iyi uyumdadır. Bununla beraber, hesaplanan karmaşık çevrintili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha incedir. Hesaplanan akış yapışma uzunluğu takribi olarak $x/h=4.4$ noktasında oluşurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise $x/h=6.6$ noktasında olduğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar, standart k- ϵ türbülans modelinin karmaşık çevrintili türbülanslı akışların hesaplanmasında yetersiz kalmasından ileri gelmektedir.



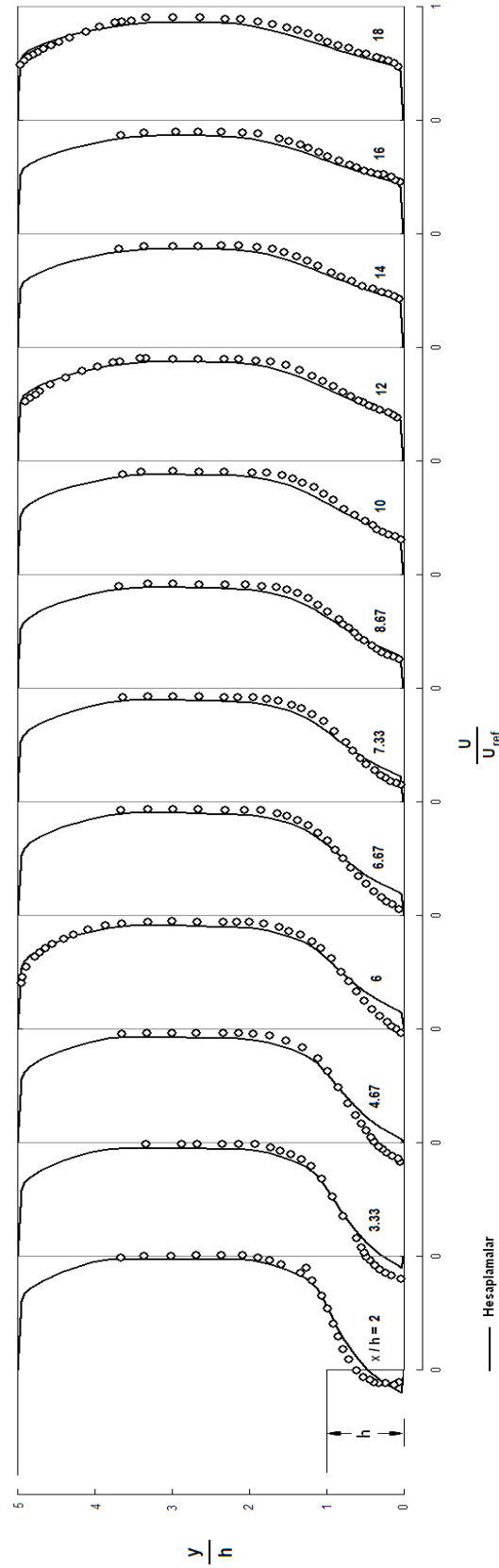
Şekil 2. Adams ve Eaton'un [1] tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.

Şekil 4, 5 ve 6, sırasıyla, Adams ve Eaton'un [1] kanalı karşısında hesaplanan türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerini, Şekil 3'teki gibi aynı aşağı akış yönü kesitleri için göstermektedir. Burada, hesaplanan profiller, sırasıyla, üst akım referans hızının karesi u_{ref}^2 , akış alanındaki maksimum türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ϵ_{max} ve maksimum efektif viskozite $\mu_{e_{max}}$ ile boyutsuz kılınmıştır. Bu şekiller, boyutsuz türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ile efektif viskozite profillerinin tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal boyunca nasıl geliştiklerini göz önüne sermektedir. Kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı τ_{w_t} boyutsuz olarak τ_{w_t}/τ_{wd_t} ve akış yönü uzunluğu x/h cinsinden Şekil 7'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, üst cidar kayma gerilmesi girişteki akış bölgesinde takriben $x/h=1$ kesitinde en yüksek değerine eriştikten sonra, takriben $x/h=10$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve bu kesitten sonra da tamamıyla gelişmiş değerine (τ_{wd_t}) eriştiğinden sabit kalmaktadır. Kanal alt cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı (τ_{w_b}) ise Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kanalın giriş düzleminden takriben $x/h=4.6$ kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum değere ulaştıktan sonra, negatif yönde azalarak takriben $x/h=4.6$ kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler alarak artmakta ve yaklaşık olarak $x/h=19.7$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine

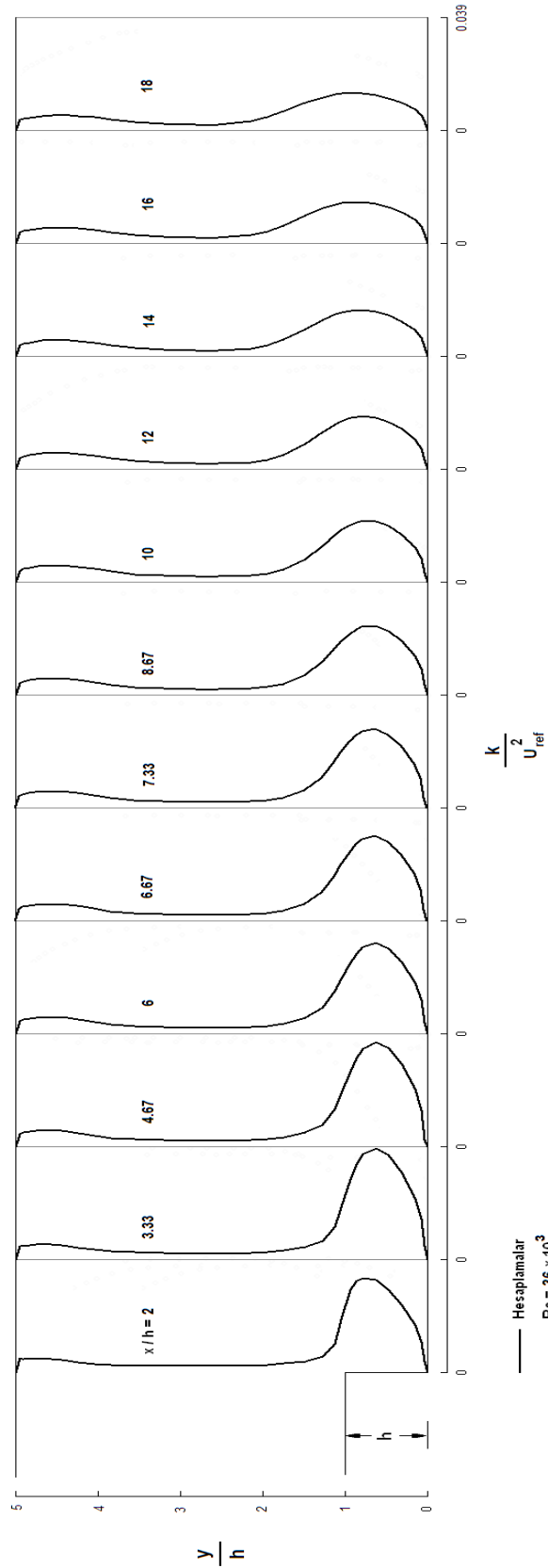


(τ_{wd_b}) ulaşmaktadır. Kanal alt cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f = \tau_w / 0.5\rho u_{ref}^2$) değişimi, aşağı akış yönü uzunluğunun (x/h) bir fonksiyonu olarak Adams ve Eaton'un [1] deneysel ölçümleriyle beraber Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplamalar deneysel ölçümlerle aynı trendi izlemekte olup makul bir uyum sergilemektedir. Burada hesaplanan kanal alt cidar sürtünme katsayısı (C_f) tamamıyla gelişmiş değerine takriben $x/h=19.7$ kesitinde ulaşmaktadır. Hesaplanan kanal alt cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5\rho u_{ref}^2$] değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir.

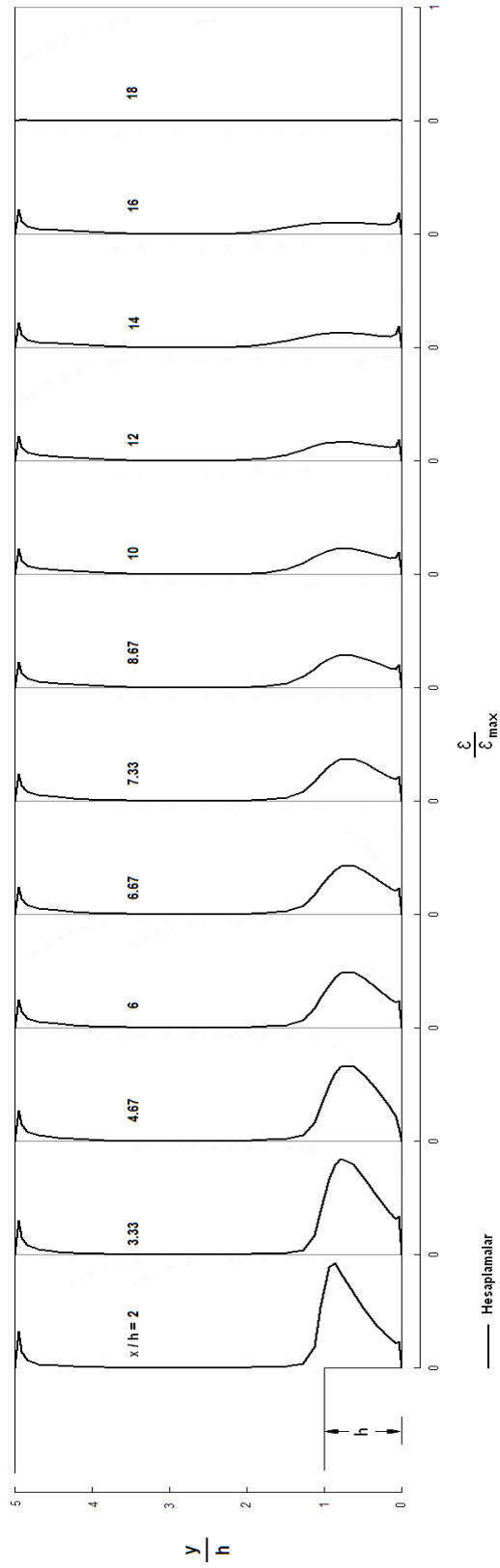
İkinci akış geometrisi, çalışma akışkanı olarak su kullanan Denham ve diğerleri'nin [2] tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akışı deneyine karşılık olmaktadır. Burada akışın Reynolds sayısı h basamak yüksekliğine ve basamağın üst akımdaki u_b ortalama hızına dayanır. Yani, $Re=u_b h/\nu=3025$. Kanalın genişleme oranı $H/H'=1.5$ 'tir.



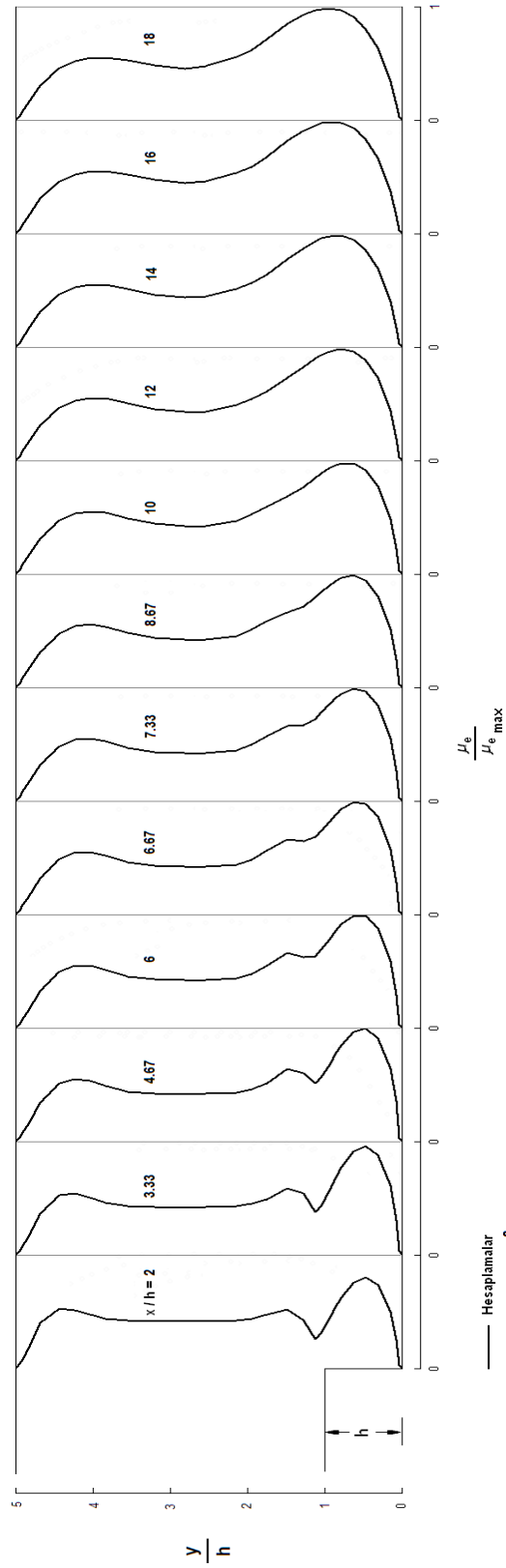
Şekil 3. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Adams ve Eaton'un [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



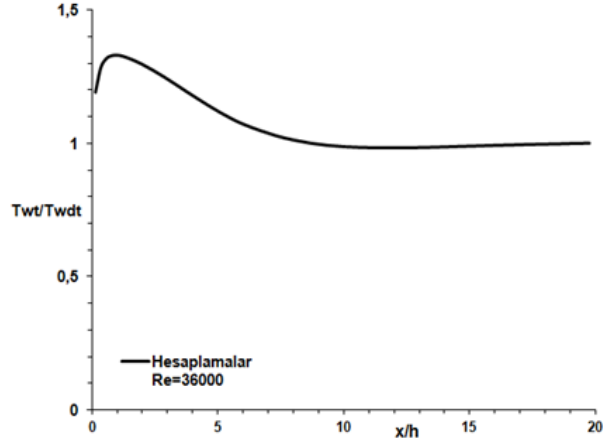
Şekil 4. Adams ve Eaton'un [1] kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



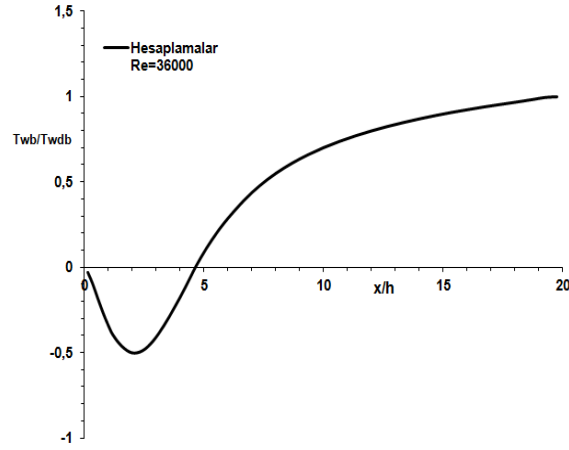
Şekil 5. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



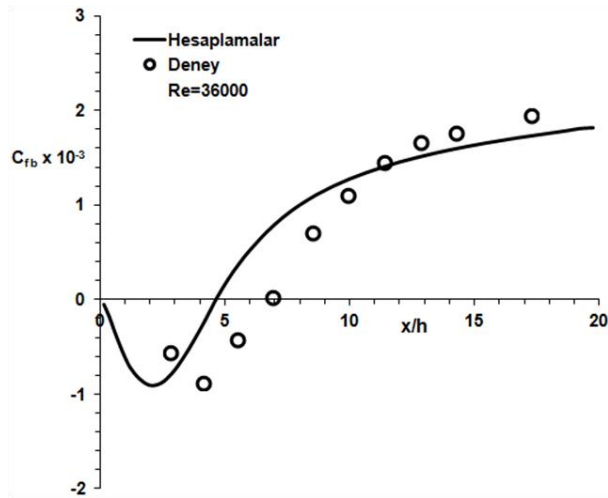
Şekil 6. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



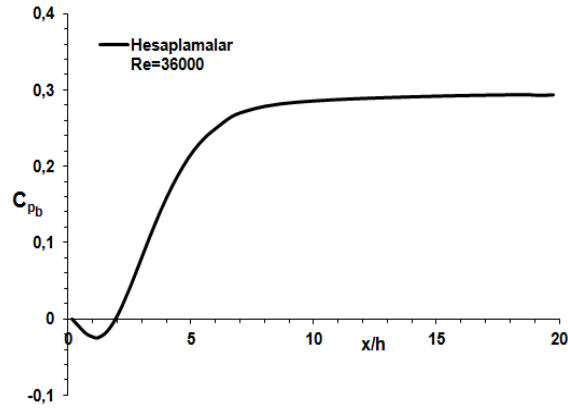
Şekil 7. Adams ve Eaton'un [1] kanalında hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



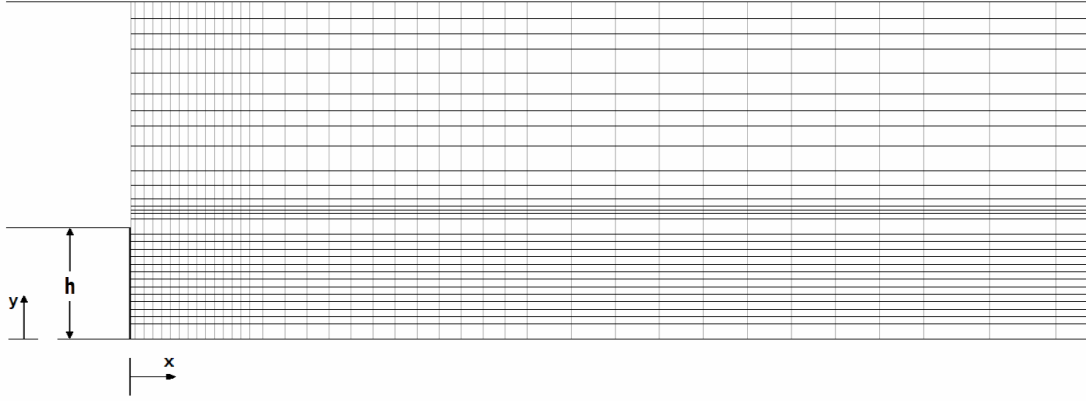
Şekil 8. Adams ve Eaton'un [1] kanalında hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



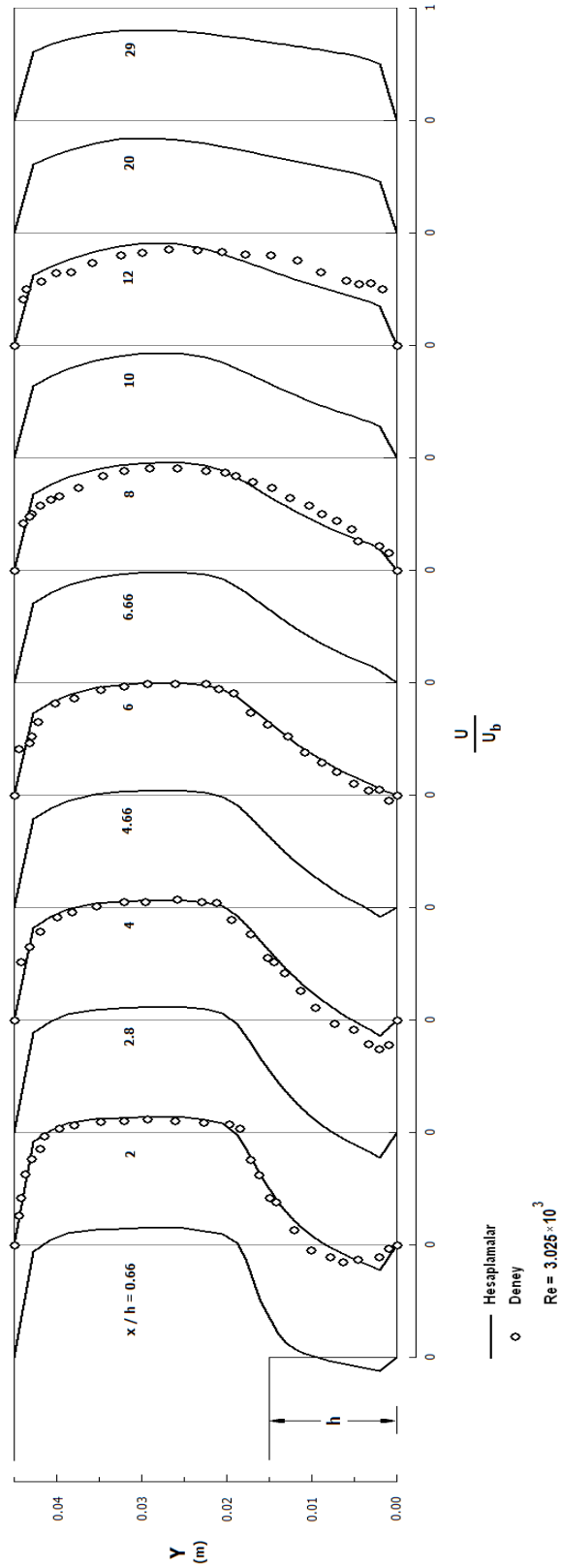
Şekil 9. Kanalda hesaplanan alt cidar sürtünme katsayısının Adams ve Eaton'un [1] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



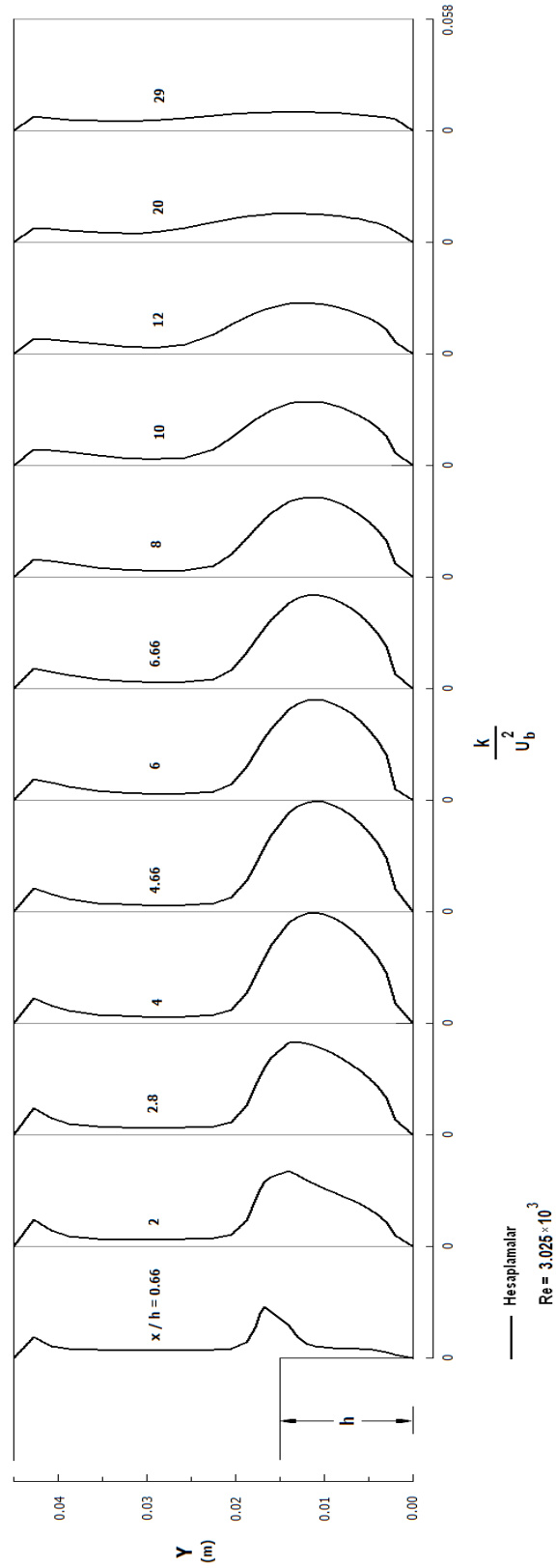
Şekil 10. Adams ve Eaton'un [1] kanalında hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının (C_p) değişimi.



Şekil 11. Denham ve diğerleri'nin [2] tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı için sayısal ağ dağılımı.

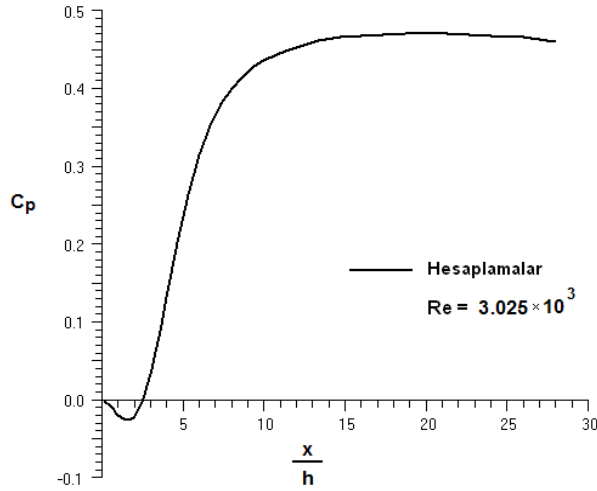


Şekil 12. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Denham ve diğerleri'nin [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.

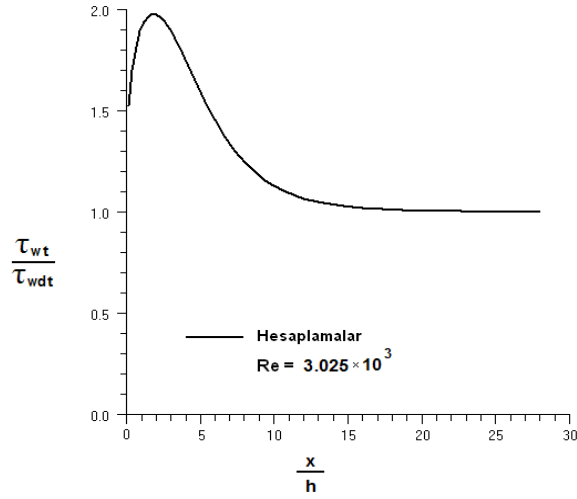


Şekil 13. Denham ve diğerleri'nin [2] kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.

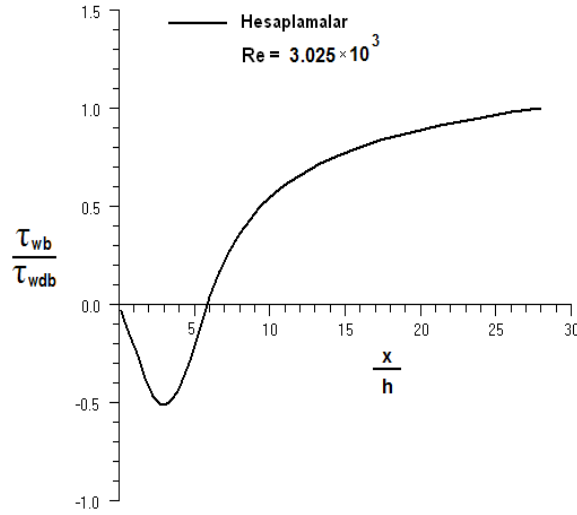
İki-boyutlu kanalda, sayısal hesaplama alanı basamaktan aşağı akış yönünde 29h kadar bir akış yönü mesafesine uzatılmıştır. Denham ve diğerleri'nin [2] akış kanalı için hesaplamalarda kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 11'de göz önüne serilmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal karşısında, $x/h=0.66$ 'dan 29'a kadar değişen aşağı akış yönü kesitlerinde, boyutsuz olarak u/u_b cinsinden, Şekil 12'de Denham ve diğerleri'nin [2] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı, giriş düzlemindeki u_b ortalama hızıyla boyutsuz kılınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan yerel akış yönü hız profilleriyle karşılıklı olan deneyseller arasında genel olarak oldukça iyi bir uyum olmasına rağmen, Şekil 3'te olduğu gibi, hesaplanan karmaşık çevrilti akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha dardır. Bunun nedeni mevcut standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin yetersizliğidir. Şekil 13, kanal karşısında hesaplanan türbülans kinetik enerji profillerinin gelişimini, Şekil 12'deki gibi aynı aşağı akış yönü kesitleri için sergilemektedir. Burada türbülans kinetik enerji profilleri giriş düzlemindeki ortalama hızın karesiyle (u_b^2) boyutsuzlaştırılmıştır. Şekilden gözlemlendiği üzere, türbülans kinetik enerji dağılımı kanal boyunca azalmaktadır. Hesaplanan kanal alt cidar statik-basınç katsayısının [$C_p=(P-P_{ref})/0.5\rho U_b^2$] değişim biçimi Şekil 14'te takdim edilmiştir. Akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_{w_t} , τ_{w_b}) çizimleri sırasıyla Şekil 15 ve 16'da verilmiştir. Burada, üst ve alt cidar kayma gerilmeleri tamamiyle gelişmiş değerleri olan (τ_{wd_t} , τ_{wd_b}) ile boyutsuz kılınmıştır. Şekil 15'ten görüldüğü üzere, kanal üst cidar kayma gerilmesi $x/h=1.73$ kesitinde maksimum değerine ulaştıktan sonra, $x/h=20$ kesitine kadar düşmekte ve akabinde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Kanal alt cidar kayma gerilmesi ise, Şekil 16'dan görüldüğü üzere, kanalın başlangıcından takriben $x/h=5.8$ kesitine kadar negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrilti akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Alt cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak azalmakta ve bir minimum değere ulaştıktan sonra, yön değiştirerek negatif yönde artmakta ve takriben $x/h=5.8$ kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler alarak artmakta ve yaklaşık olarak $x/h=28$ kesitinde gelişmiş değerine ulaşmaktadır.



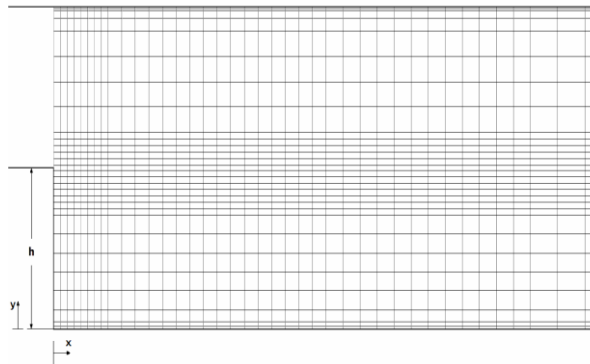
Şekil 14. Kanalda hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının (C_p) değişimi.



Şekil 15. Kanalda hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

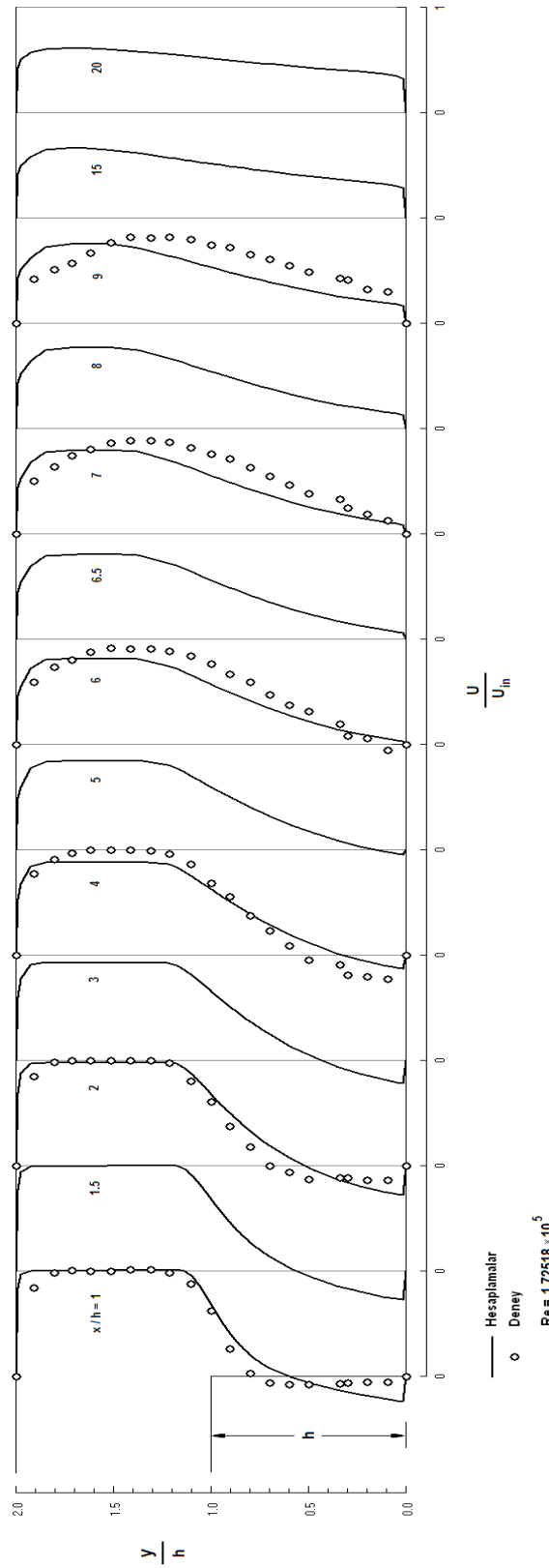


Şekil 16. Kanalda hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

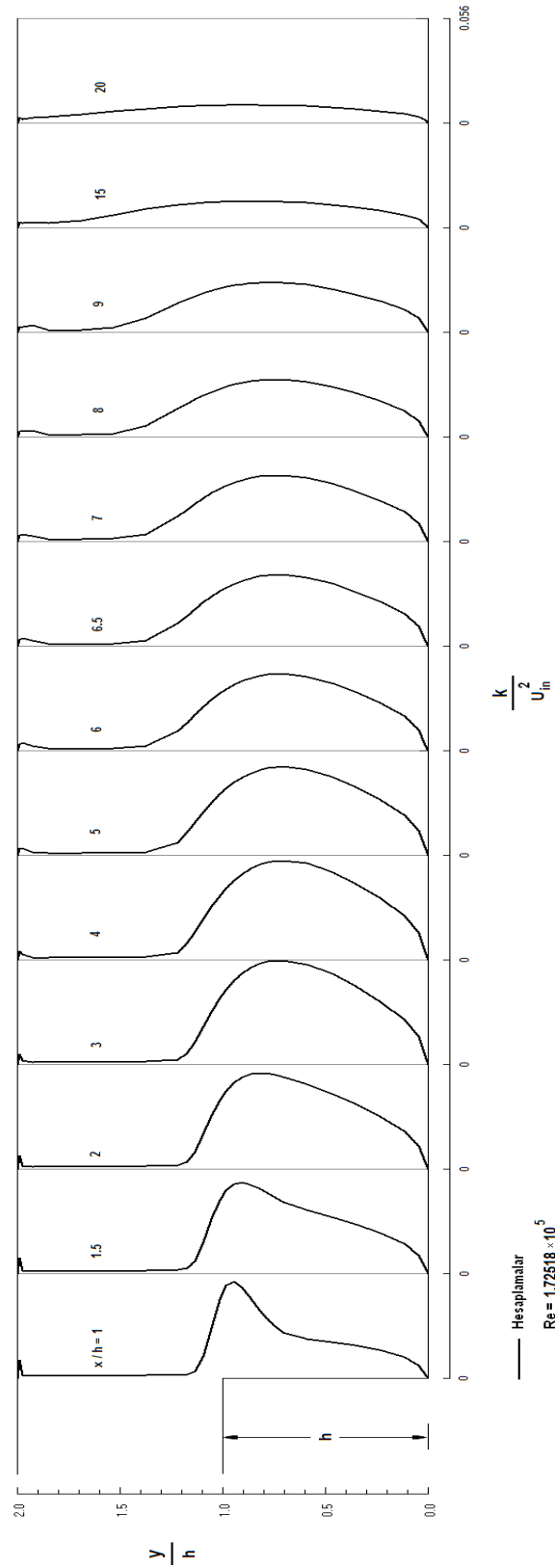


Şekil 17. Stevenson ve diğerleri'nin [3] tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.

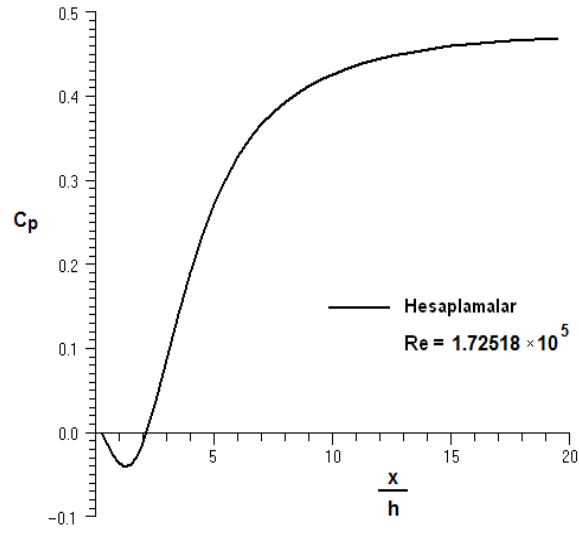
Çalışma akışkanı olarak hava kullanılan tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanalda, Stevenson ve diğerleri'nin [3] deneysel çalışması, buradaki sayısal çalışma için üçüncü kanal akış geometrisi olarak seçilmiştir. Girişte akışın Reynolds sayısı $Re=172518$ 'dir ($Re= u_{in} h/\nu$, burada u_{in} girişte basamakta ortalama serbest akım hızıdır, h ise basamak yüksekliğidir). Kanal $H/H'=2$ gibi bir genişleme oranına sahiptir. Bu akış durumu için, sayısal hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akış yönünde $20h$ kadar bir akış yönü mesafesine uzatılmıştır. Şekil 17'de Stevenson ve diğerleri'nin [3] akış kanalı için kullanılan sayısal ağ dağılımı sunulmuştur. Hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal karşısında, $x/h=1$ 'den 20 'ye kadar değişen aşağı akış yönü kesitlerinde, boyutsuz olarak u/u_{in} cinsinden, Şekil 18'de Stevenson ve diğerleri'nin [3] deneysel bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Yerel akış yönü hızı, girişte basamakta u_{in} ortalama serbest akım hızıyla boyutsuzlaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri ile karşılıklı olan deneyseller arasında basamaktan aşağı akış yönünde kalitenin uzunlukla sayısal olarak azalmasına rağmen makul bir uyum gözlenmektedir. Bundan başka, hesaplanan karmaşık çevrintili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha incedir. Hesaplanan akış yapışma uzunluğunun yaklaşık olarak $x/h=5.6$ kesitinde olduğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise $x/h=7$ kesitinde olduğu bildirilmiştir. Bu farklılıklar, standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin karmaşık çevrintili türbülanslı akışların hesaplanmasında yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 19'da kanal karşısında hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri, Şekil 18'deki gibi aynı aşağı akış yönü kesitlerinde boyutsuz olarak k/u_{in}^2 cinsinden gözönüne sunulmuştur. Görüldüğü üzere, akış kanal boyunca geliştikçe, hesaplanan türbülans kinetik enerji dağılımı azalmaktadır. Hesaplanan kanal alt cidar statik-basınç katsayısının $[C_p=(P-P_{ref})/0.5\rho U_{in}^2]$ değişimi Şekil 20'de gösterilmiştir. Stevenson ve diğerleri'nin [3] tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst ve alt cidar kayma gerilmelerinin (τ_{wt} , τ_{wb}) çizimleri sırasıyla Şekil 21 ve 22'de takdim edilmiştir. Burada, üst ve alt cidar kayma gerilmeleri tamamıyla gelişmiş değerleri olan (τ_{wdt} , τ_{wdb}) ile boyutsuz hale getirilmiştir. Şekil 21'de görüldüğü gibi, kanalın üst cidar kayma gerilmesi takriben $x/h=15$ kesitine kadar düşüş göstermekte ve akabinde takriben sabit kalmaktadır. Kanalın alt cidar kayma gerilmesi ise, Şekil 22'de görüldüğü gibi başlangıçtan itibaren yaklaşık olarak $x/h=5.8$ kesitine kadar, çevrintili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) dolayı negatif değerler almakta ve yaklaşık olarak $x/h=19.5$ kesitinde gelişmiş değerine ulaşmaktadır.



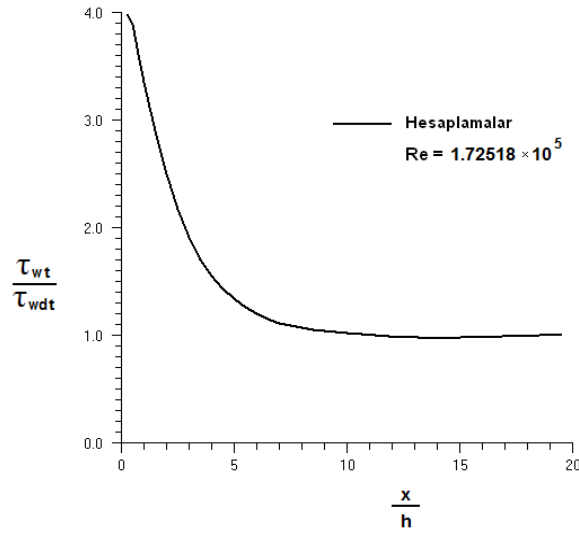
Şekil 18. Kanal boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Stevenson ve diğerleri'nin [3] deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



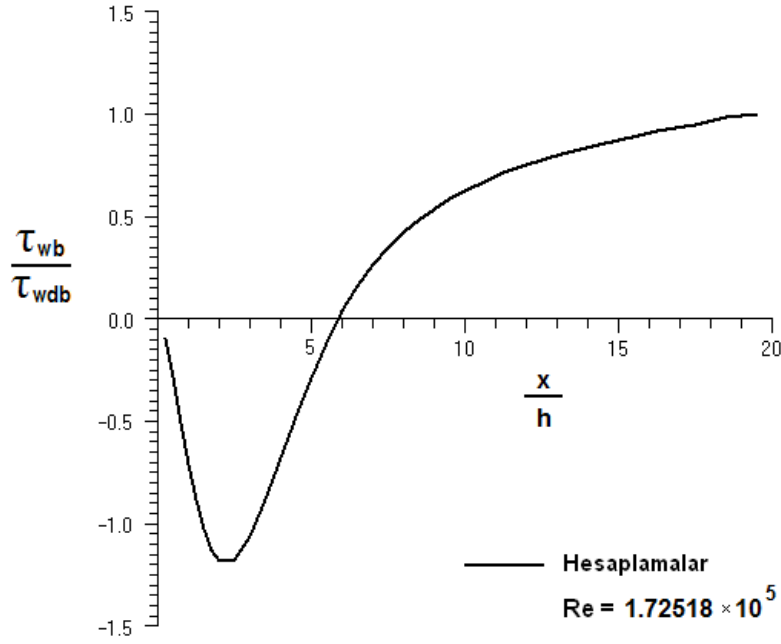
Şekil 19. Stevenson ve diğerleri'nin [3] kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



Şekil 20. Kanalda hesaplanan alt cidar statik-basınç katsayısının (C_p) değişimi.



Şekil 21. Kanalda hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 22. Kanalda hesaplanan alt cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

4. SONUÇLAR

İki-boyutlu, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanallarda, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrıntili türbülanslı akış için standart yüksek Reynolds sayılı k-ε türbülans modelini kullanarak üç farklı Reynolds sayılarında bilgisayarlı simülasyonlar sunulmuştur. Geleneksel sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar'ın [16] SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Üç farklı, tek yanlı düzlemsel anigenişlemeli kanal akışları için standart k-ε türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. Standart k-ε türbülans modeliyle hesaplanan yerel akış yönü hızı, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite, alt cidar statik-basınç katsayısı, üst ve alt cidar kayma gerilmeleri ile alt cidar sürtünme katsayısının değişimi literatürde bildirilen deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve genel olarak oldukça iyi uyum elde edilmiştir. Buna rağmen, basamak arkasındaki karmaşık çevrıntili akış bölgesinin uzunluğu ve genişliği standart k-ε türbülans modeli tarafından daha küçük olarak hesaplanmıştır.

SEMBOLLER

- C_1, C_2, C_μ : Türbülans modeli sabitleri
E : Logaritmik yasa sabiti (E=9.0)
G : Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
h, s : Basamak Yüksekliği
H' : Kanal Giriş Yüksekliği
H : Kanal Çıkış Yüksekliği
k : Türbülans kinetik enerji
P : Basınç
Re : Reynolds sayısı
 S_ϕ : Taşınım denkleminde kaynak terimi
U : Yerel akış yönü hızı (yatay hız bileşeni)



| | |
|--------------------------------|--|
| U_{ref} | : Referans hız |
| U_b | : Debiden hesaplanan ortalama hız |
| u_τ | : Sürtünme hızı ($=\sqrt{\tau_w / \rho}$) |
| u', v', w' | : Türbülans çalkantıları |
| v | : y-yönü normal hız bileşeni (dikey hız bileşeni) |
| x | : Akış yönünde ölçülen mesafe |
| x_r | : Çevrintili akış bölgesi uzunluğu |
| y | : Akışa dik yönde ölçülen mesafe |
| y_p | : Cidardan, cidar yakınındaki P ağ düğüm noktasına olan akışa dik yöndeki mesafe |
| y^+ | : Boyutsuz cidar mesafesi ($=y_p u_\tau / \nu$) |
| C_p | : Statik-basınç katsayısı [$=(P-P_{ref})/0.5\rho u_{ref}^2$] |
| C_f | : Cidar sürtünme katsayısı [$=\tau_w / 0.5\rho u_{ref}^2$] |
| ε | : Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı |
| ϕ | : Genel değişken |
| κ | : Von Karman sabiti ($=0.41$) |
| μ | : Laminar dinamik viskozite |
| μ_t | : Türbülans dinamik viskozite |
| μ_e | : Efektif viskozite ($=\mu + \mu_t$) |
| ν | : Laminar kinematik viskozite ($=\mu / \rho$) |
| ρ | : Akışkanın yoğunluğu |
| Γ_ϕ | : Yayınım mübadele katsayısı |
| $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ | : k ve ε 'nin yayınımları için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları |
| τ_w | : Cidar kayma gerilmesi |
| τ_{wd} | : Kanal çıkış düzlemindeki cidar kayma gerilmesi değeri |

KAYNAKLAR

- [1] Adams, E. W, and Eaton, J. K, An LDA study of the backward-facing step flow, including the effects of velocity bias, ASME, J. Fluids Eng., **110**, 275-282, 1988.
- [2] Denham, M. K, Briard, P, and Patrick, M. A, A directionally sensitive laser anemometer for velocity measurements in highly turbulent flows, J. Physics E: Scientific Instruments, **8**, 681-683, 1975.
- [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] Fessler, J. R, and Eaton, J. K, Particle Response in a Planar Sudden Expansion Flow, Experimental Thermal and Fluid Science, **15**, 413-423, 1997.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.



- [9] Westphal, R. V, and Johnston, J. P, Effect of Initial Conditions on Turbulent Reattachment Downstream of a Backward-Facing Step, AIAA Journal, **22(12)**, 1727-1732, 1984.
- [10] Ruck, B, and Makiola, B, Particle Dispersion in a Single-Sided Backward-Facing Step Flow, Int. J. Multiphase Flow, **14**, 787-800, 1988.
- [11] Ötügen, M. V, Expansion Ratio Effects on the Separated Shear Layer and Reattachment Downstream of a Backward-Facing Step, Experiments in Fluids, **10**, 273-280, 1991.
- [12] Kasagi, N, and Matsunaga, A, 3-D Partical-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.
- [13] Yang, J. T, Tsai, B. B, and Tsai, G. L, Separated-Reattaching Flow Over a Backstep With Uniform Normal Mass Bleed, J. Fluids Eng., ASME, **116**, 29-35, 1994.
- [14] Driver, D. M, and Seegmiller, H. L, Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow, AIAA Journal, **23(2)**, 163-171, 1985.
- [15] Launder, B. E, and Spalding, D. B, The numerical computation of turbulent flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Engng, **3**, 269-289, 1974.
- [16] 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 yılı Eskişehir doğumludur. **D.I.C.** (**D**iploma of **I**mperial **C**ollege), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, İngiltere; **M.Sc.**, The University of Birmingham, Birmingham, İngiltere; ve **Ph.D.**, The University of London, London, İngiltere, derecelerini almıştır. 1982-1983 yıllarında Amerika Birleşik Devletlerinde Kaliforniya'da Los Angeles'ta University of Southern California'da postdoktoral araştırmacı olarak çalışmıştır. 1981-1986 yıllarında Uludağ Üniversitesi'nde, 1986-1988 yıllarında Çukurova Üniversitesi'nde ve 1988-1993 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde çalışmıştır. 1984'te doçent, 1995'te profesör oldu. 1993 yılından beri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Enerji Anabilim Dalı Başkanlığını yapmakta olan Prof. Dr. Tahir Karasu İngilizce bilmekte ve ağırlıklı olarak Akışkanlar Mekaniği, Termodinamik, Isı Transferi, Türbülans, Sayısal Akışkanlar Dinamiği ve Sayısal Isı Transferi alanlarında çalışmaktadır.

