



**Bu bir MMO
yayıdır**

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

DÜZLEMSEL SİMETRİK ANİGENİŞLEMELERDE ÇEVİRİMLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL ARAŞTIRILMASI

TAHİR KARASU
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

DÜZLEMSEL SİMETRİK ANİGENİŞLEMELERDE ÇEVİRİTLİ TÜRBÜLANSLI AKIŞIN SAYISAL ARAŞTIRILMASI

Tahir KARASU

ÖZET

Bu araştırma, iki-boyutlu, düzlemsel simetrik anigenişlemelerde, sürekli, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışın, iki farklı Reynolds sayıları için kapsamlı bir çalışmasının sayısal araştırma sonuçlarını takdim etmektedir. Hibrit yöntemiyle sonlu hacim metodunu kullanarak, SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modeliyle beraber, süreklilik ve momentum korunum denklemlerinin sayısal çözümleri, iteratif bir sayısal çözüm tekniğini kullanarak sağlanmıştır. Katı cidarlar yakınında cidar fonksiyonları kullanılmıştır. Düzlemsel simetrik anigenişlemelerde türbülanslı akış için çeşitli akış yönü kesitlerinde, yerel akış yönü hızı, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite profilleri, geri akışın geometrik yeri, simetri eksenine boyunca simetri eksenine üzerindeki yatay hızın değişimi, üst cidar kayma gerilmesi, üst cidar sürtünme katsayısı dağılımları ile üst cidar statik-basınç katsayısının değişimi için sayısal hesaplamalar sunulmuş ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplamaların sonuçları deneysel ölçümlerle genel olarak iyi uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Düzlemsel simetrik anigenişlemelerde akış, $k-\epsilon$ türbülans modeli, Hesaplamalar.

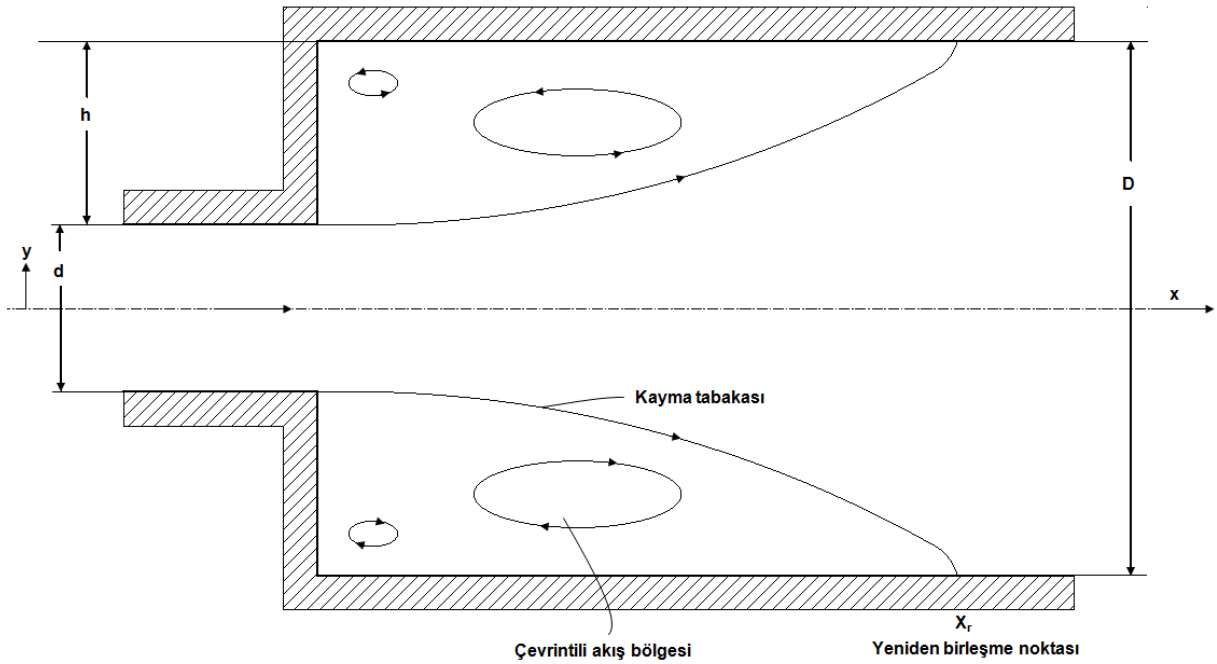
ABSTRACT

This research work presents the results of an extensive study of numerical investigation of steady, two-dimensional, incompressible, complex turbulent recirculating flow through plane symmetric sudden expansions in channels at two different Reynolds numbers. Employing the finite-volume method with a hybrid scheme, a computer program based on the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algorithm has been developed. Numerical solutions of the conservation equations of mass and momentum, together with the standard high-Reynolds-number $k-\epsilon$ turbulence model, are obtained using an iterative numerical solution technique. Near the solid boundaries, wall-functions are employed. Numerical computations for local streamwise velocity, turbulence kinetic energy, turbulence kinetic energy dissipation rate, effective viscosity, locus of flow reversal, streamwise variation of centre-line velocity, wall static-pressure coefficient, wall-shear stress and coefficient of friction distributions along top wall of the plane symmetric sudden expansion flow geometry are presented and compared with experimental measurements. The results of numerical computations show generally good agreement with experimental data.

Keywords: Flow through plane symmetric sudden expansions, $k-\epsilon$ turbulence model, Computations.

1. GİRİŞ

İki-boyutlu, düzlemsel simetrik anigenişlemelerde, aşağı akıştaki türbülanslı akış alanı ayrımlı, çevrıntili ve yeniden birleşmeli akış olarak tanımlanan çok karmaşık bir olaydır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, böyle bir akış alanı ayırıcı bir kayma tabakası yüzeyi ile biri çevrıntili akış bölgesi, diğeri ise ana akış bölgesi olmak üzere iki akış bölgesine ayrılabilir. Ayırıcı kayma tabakası yüzeyinin düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal cidarına çarptığı noktaya yeniden birleşme noktası adı verilir. Çevrıntili akış bölgesindeki yüksek ters basınç gradyanı, türbülans seviyesi ile istikrarsızlığı artırarak geri akışa neden olmaktadır. Akış yapışma noktası civarında ve çevrıntili akış bölgesinde yaratılan anaförler yüksek yoğunluklu bir türbülans kaynağı olarak algılanabilir. Müteakip taşınım, yayılım ve türbülanslı anaförlerin zayıflaması, zaman ortalama akış özellikleri üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanaldaki türbülanslı akış, ısı değıştiricileri, karışım teçhizatları, iklimlendirme kanalları, fluidik düzenekleri ve yanma odaları gibi pek çok sayıda önemli mühendislik uygulamalarıyla ilgili olmasına rağmen, düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanallardaki türbülanslı akışların literatürde bildirilen araştırmaları çok sınırlıdır. En çok ilgi çekici araştırmalar arasında olanlar [1-11] araştırmalarıdır. Bu araştırmanın ana amacı, standart yüksek Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelini [12] cidar fonksiyonları sınır koşuluyla beraber kullanarak, iki-boyutlu, düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanallarda, sürekli, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışların sayısal hesaplamasını yapmak ve deneysel ölçümlerle karşılaştırmak ve incelemektir. Bu araştırmada incelenen fiziksel geometriler [7] deneysel durumlarına karşılık olmaktadır.



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

2. MATEMATİKSEL VE FİZİKSEL MODEL

2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Şekil 1'e ilişkin olarak, iki-boyutlu, düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanallarda, sürekli, sıkıştırılmayan 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 kaybolla

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 [12]. Basınç, basınç düzeltme denkleminde çıkarılmıştır [13,14]. 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:
- $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$
 - Türbülans modeli sabitlerine aşağıdaki değerler verilmiştir (Launder and Spalding, 1974):
 $C_{\mu} = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$
 - $G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$

2.2. Sınır Koşulları

Şekil 1'e ilişkin olarak, incelenen iki-boyutlu, düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanalda, türbülanslı akış için sınır koşulları aşağıda takdim edilmiştir. Dört farklı sınır koşulu kullanılmıştır; giriş düzlemi, çıkış düzlemi, simetri eksen ve katı cidar. Anigenişlemeli kanalın giriş düzleminde bütün büyüklükler için düzgün bir profil kabul edilmiştir; yani, yatay (x) yönündeki hıza deneysel ölçümlerden U_b ortalama hız değeri verilmiş, dikey (y) yönündeki hız ise sıfıra eşit kılınmıştır. Türbülans büyüklükleri k ve ε 'na düzgün değerler verilmiştir; yani, $k = (0.001-0.003)U_b^2$ ve $\varepsilon = (C_{\mu} k^{3/2} / 0.03h)$, burada U_b debiden hesaplanan ortalama hız olup h ise basamak yüksekliğidir. Anigenişlemeli kanal çıkışında, tamamıyla gelişmiş akış koşullarının hüküm sürdüğünün kabul edilebilmesi için, kanal çıkış düzlemi çevrintili akış bölgesinden çok uzakta alınmıştır. Yani, çıkış düzleminde dikey hız sıfır kabul edilmiş ve bağımlı değişkenlerin akış yönündeki tüm gradyanlarının sıfır olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar, çıkış düzleminin giriş düzleminin (45xh) uzunlukta alındığı aşağı akışa kadar sürdürülmüştür. Anigenişlemeli kanal ekseninde simetri kabul edilmiştir. Yani, $(\partial \phi / \partial y) = v = 0$, ϕ burada u , k ya da ε

olabilir. Anigenişlemeli kanalın üst ve basamak cidarlarında hız bileşenleri u , v ile türbülans büyüklükleri k ve ε sifira eşit kılınmıştır. Katı cidar yakınındaki ağ noktalarında k ve ε 'nin değerleri Launder ve Spalding'in [12], cidar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal iraksamaya neden olmamak için başlangıç değerleri tüm hesaplama alanı boyunca uygun olarak belirtilmiştir.

2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu sayısal araştırmada, sonlu hacim yaklaşımı kullanarak Patankar'ın [13], 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, Spalding [15].

2.4. Hesaplama Ayrıntıları

Sayısal hesaplamalar Pentium 4 CPU 1.60 GHz kişisel bilgisayarında yapılmıştır. Poole ve Escudier'in [7], akış durumları için kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan sayısal ağ düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanalın cidarları yakınında ve çevrintili akış bölgesinde yoğun ağ çizgileri konsantrasyonuyla 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. Yatay 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_c için sırasıyla 0.3, 0.3, 0.8, 0.8, 0.5 ve 0.5 gevşetme faktörleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalarda benimsenen yakınsama ölçütü, tüm hesaplama alanında kalıcı kütlelerin mutlak değerlerinin toplamı önceden belirtilen 10^{-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.

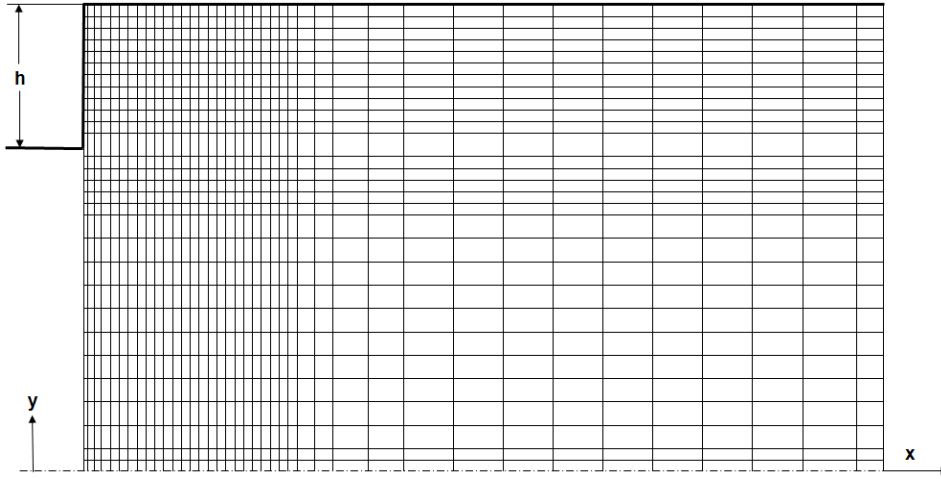
Tablo 2. Akış durumu, Reynolds sayısı, ağ büyüklüğü, cpu zamanı ve iterasyon sayısı

Akış Durumu	Re	Ağ Büyüklüğü (x) \times (y)	T, cpu zamanı (saniye)	N	T / N
Poole ve Escudier [7]	40 000	40 \times 30	6.421875	440	0.014595
Poole ve Escudier [7]	4 000	40 \times 30	5.1875	385	0.013474

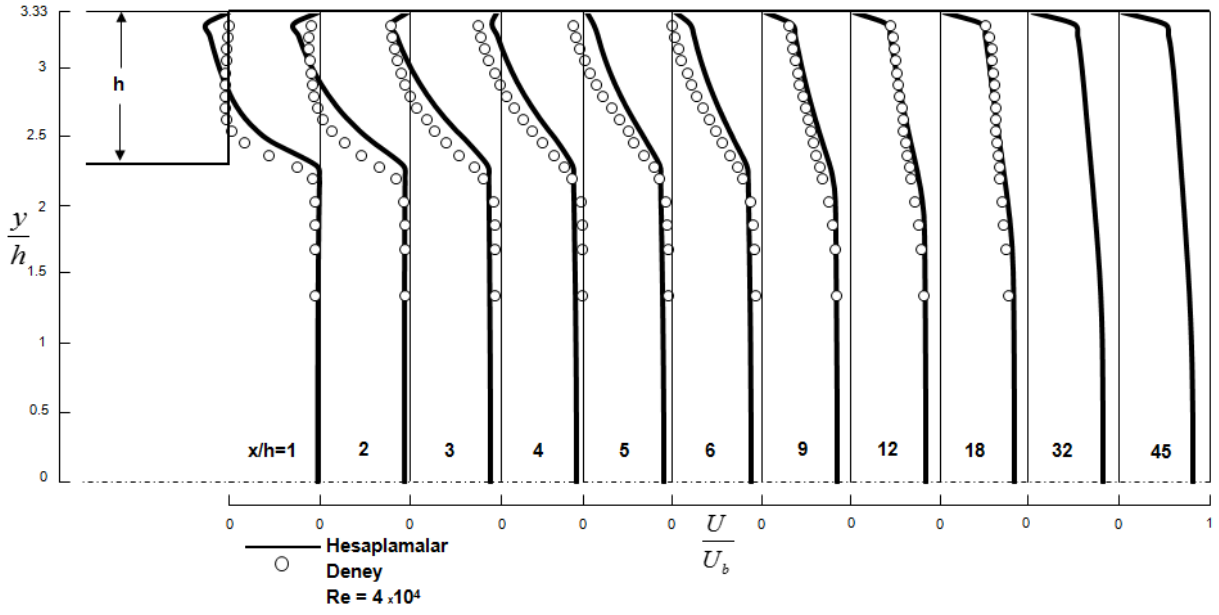
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanallarda, sürekli, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrintili türbülanslı akış için iki farklı Reynolds sayılarında sayısal hesaplamalar yapılmış ve hesaplamaların sonuçları Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Buradaki sayısal araştırmada, çalışma akışkanı olarak su kullanılan anigenişlemeli kanalda, Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçümleri hesaplamalarla karşılaştırmaya temel teşkil etmek için seçilmiştir. Düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal $R=D/d=1.428$ gibi bir genişleme oranına sahiptir. Kanaldaki akışın Reynolds sayısı $Re = 4 \times 10^4$ 'tür ($Re=U_b h / \nu$, burada U_b debiden hesaplanan ortalama hızdır, h ise kanalın basamak yüksekliğidir). Anigenişlemeli kanalda, sayısal hesaplama alanı giriş düzleminden aşağı akışta $45h$ kadar bir akış yönü mesafesine uzatılmıştır. Şekil 2'de Poole ve Escudier'in [7], akış durumları için kullanılan sayısal ağ dağılımı sergilenmiştir. Hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri,

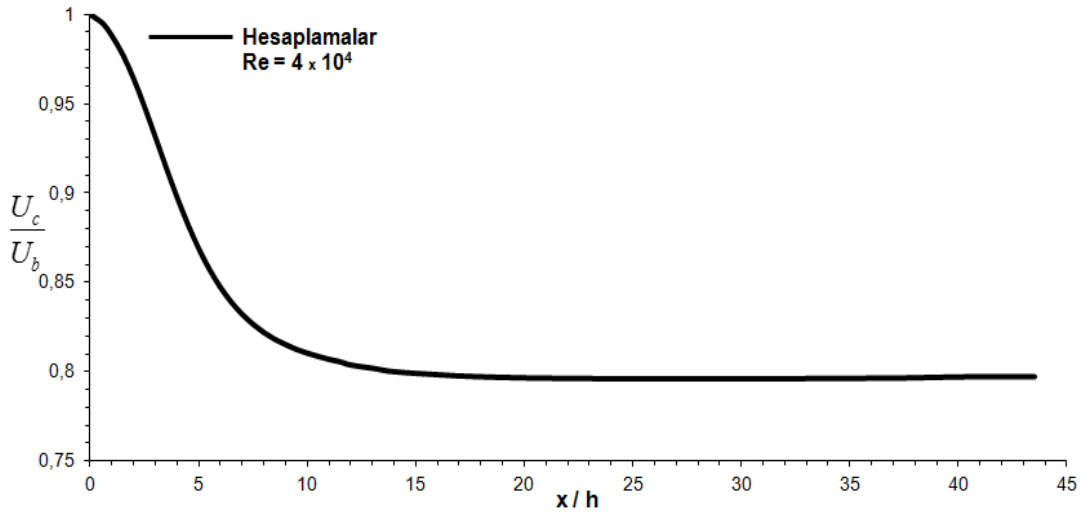
iki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal karşısında $x/h=1$ 'den 45'e kadar değişen akış yönü kesitlerinde, boyutsuz olarak u/u_b cinsinden, Şekil 3'te Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri karşılıklı olan deneysellerle iyi uyumdadır. Buna rağmen, hesaplanan karmaşık çevrintili akış bölgesi deneyselden uzunlukça daha kısa ve genişlikçe daha incedir. Bundan başka bu şekil, kanal boyunca yatay hız profillerinin nasıl geliştiğini de göstermektedir. Şekil 4'te, boyutsuz olarak u_c/u_b ve yatay uzunluk x/h cinsinden, simetri eksenini üzerinde hesaplanan yatay hızın (u_c) kanal boyunca değişimi çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, simetri eksenindeki hız, kanal girişinden başlayarak önce hızlı olarak azalmakta, daha sonra da yavaşlayarak aşağı akışta takriben $x/h=20.8$ kesitinde tamamiyle gelişmiş değerine ulaştıktan sonra simetri eksenini boyunca sabit kalmaktadır. İki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal akışı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) Şekil 5'te verilmiştir. Cidardan ölçülen dikey uzunluk y , basamak yüksekliği (h) ile boyutsuz kılınmış ve basamak yüksekliği ile boyutsuz hale getirilen aşağı akış uzunluğunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminden aşağı akış yönünde takriben $x_r/h=4.25$ kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise $x_r/h=6.5$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu farklılık, standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin karmaşık çevrintili türbülanslı akışların hesaplanmasında yetersiz kalmasından ileri gelmektedir. Yine şekilde gösterilen içi boş daire sembollerinde yatay hız (u) sıfır olup, bu daire sembollerin üstünde kalan bölgede pozitif, altında kalan bölgede ise negatiftir. Şekil 6, 7 ve 8, sırasıyla, Poole ve Escudier'in [7], anigenişlemeli 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 sergilemektedir. Burada hesaplanan profiller, sırasıyla, ortalama hızın karesi u_b^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 iki-boyutlu kanal boyunca nasıl geliştiğini göstermektedir.



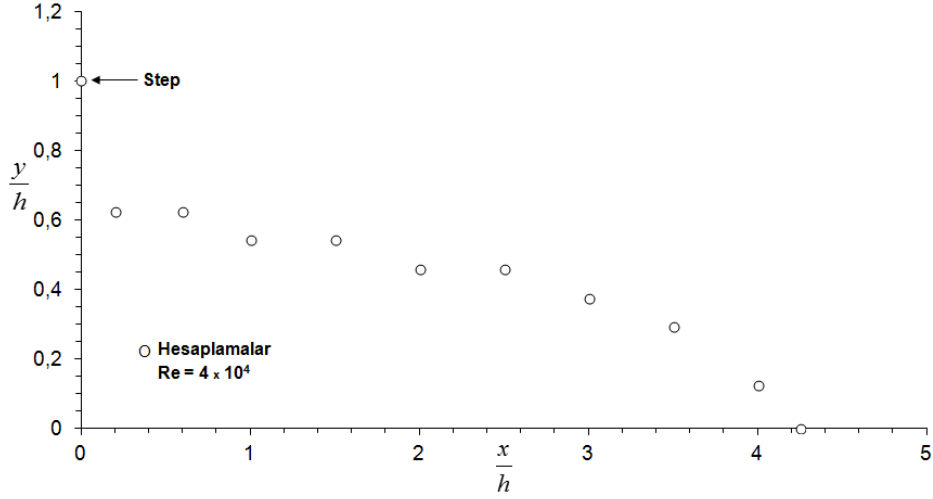
Şekil 2. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal akış geometrisi için sayısal ağ dağılımı.



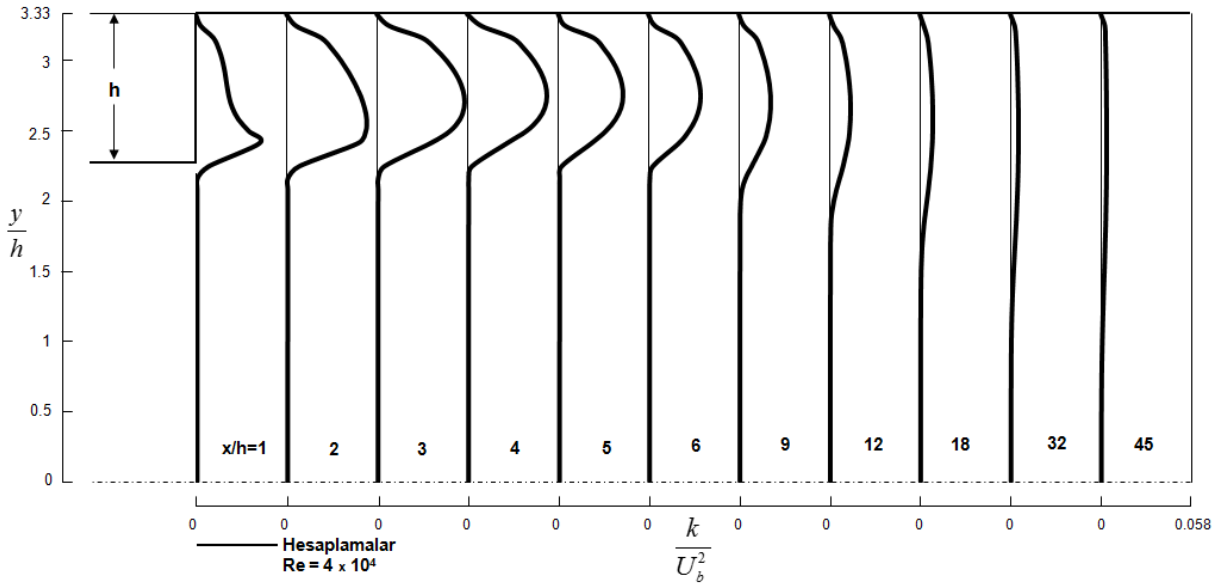
Şekil 3. Düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçüleriyle karşılaştırılması.



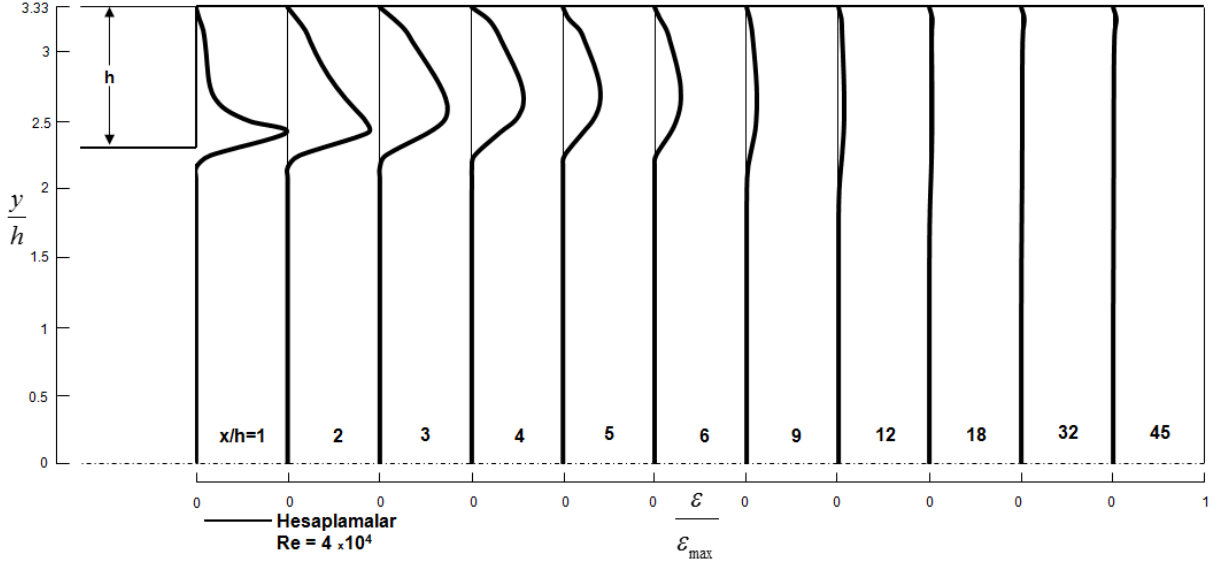
Şekil 4. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri ekseninde hesaplanan yata y hızının değişimi.



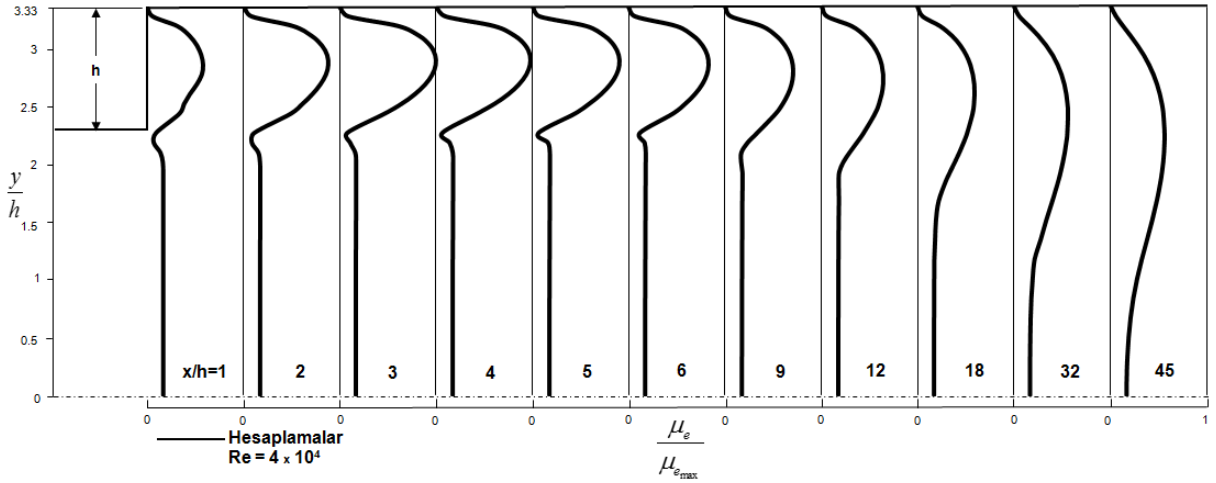
Şekil 5. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



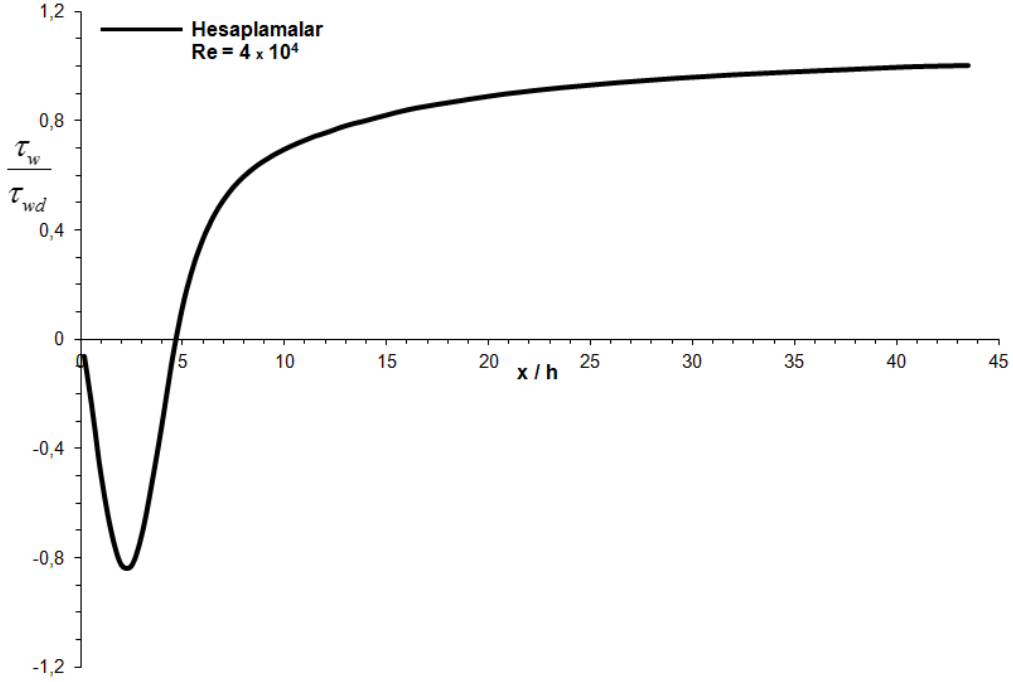
Şekil 6. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



Şekil 7. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.

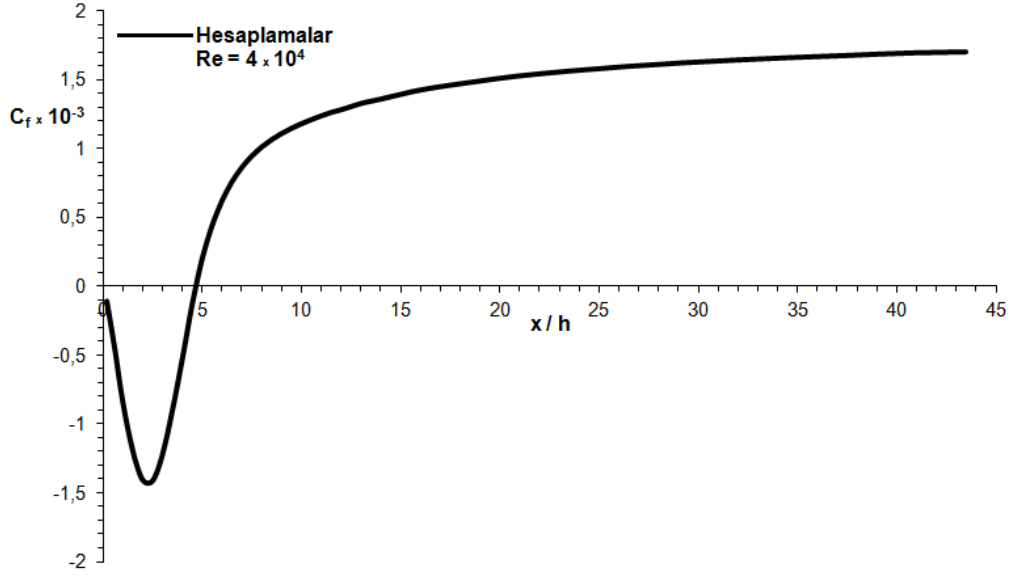


Şekil 8. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.

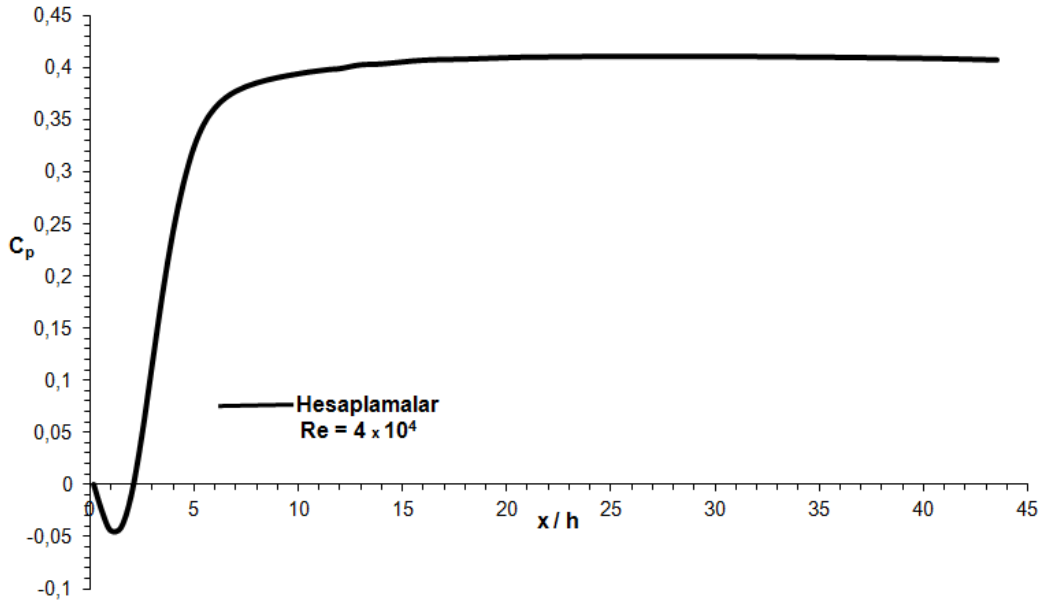


Şekil 9. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.

Poole ve Escudier'in [7], anigenişlemeli kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı boyutsuz olarak τ_w / τ_{wd} ve yatay uzunluk x/h cinsinden Şekil 9'da sunulmuştur. Burada τ_{wd} , kanal çıkış düzlemindeki cidar kayma gerilmesi değeridir. Şekilden görüldüğü gibi, kanalın giriş düzleminde takriben $x/h=4.75$ kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu durum, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlardan (-u) kaynaklanmaktadır. Üst cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum değere ulaştıktan sonra, negatif yönde azalarak takriben $x/h=4.75$ kesitinde sıfır değerine erişmekte ve ondan sonra da pozitif değerler alarak artmaktadır. Anigenişlemeli kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının ($C_f = 2 \tau_w / \rho u_b^2$) değişimi, x/h cinsinden Şekil 10'da çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üst cidar sürtünme katsayısı, Şekil 9'daki cidar kayma gerilmesi ile aynı değişimi göstermektedir. Şekil 11'de ise anigenişlemeli kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar statik-basınç katsayısının [$C_p = (P - P_{ref}) / 0.5 \rho U_b^2$] değişim biçimi takdim edilmiştir. Görüldüğü gibi cidar statik-basınç katsayısı, kanal girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrıntili akıştan dolayı, $x/h=14$ kesitine kadar ani yükseliş göstermektedir. Bu kesitten sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



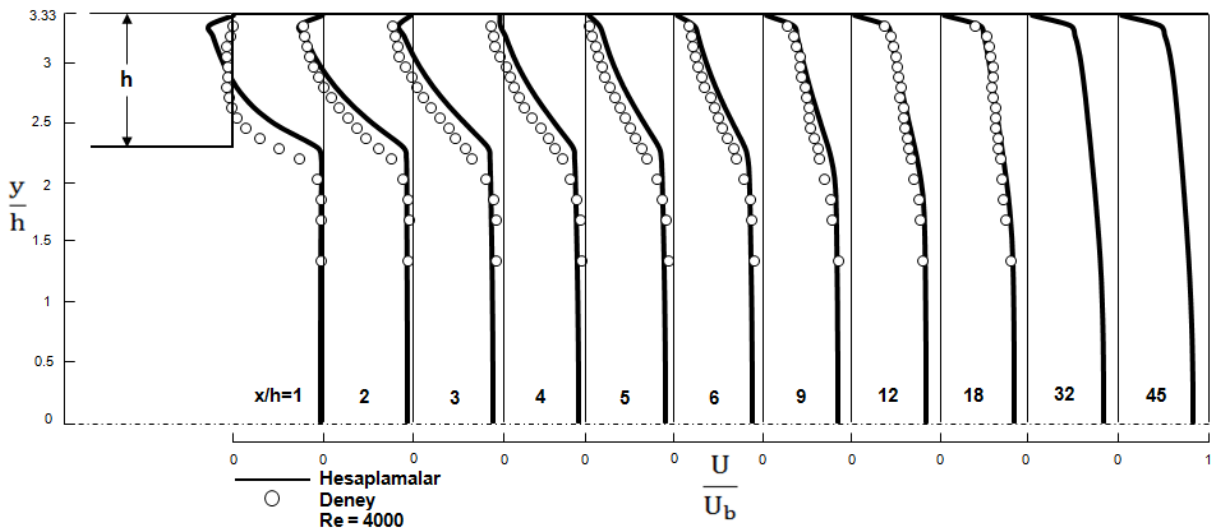
Şekil 10. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar sürtünme katsayısının değişimi.



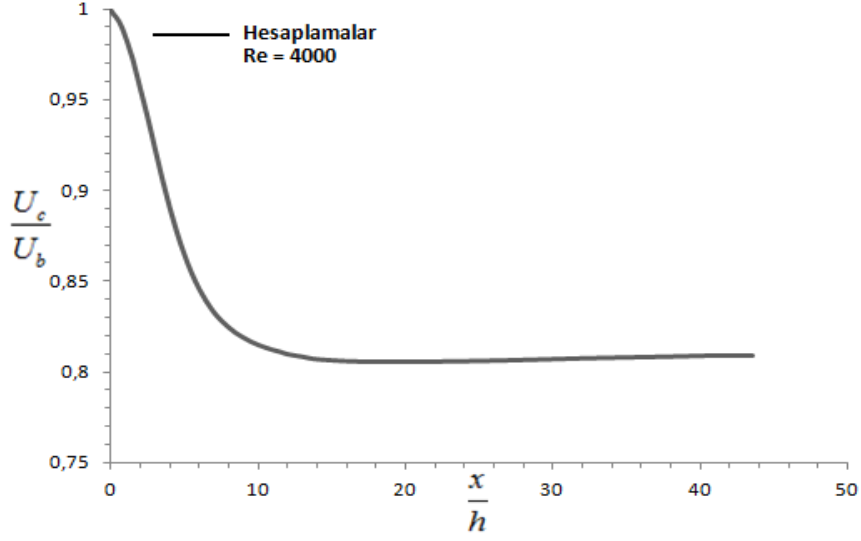
Şekil 11. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının (C_p) değişimi.

İkinci akış tipi, çalışma akışkanı olarak yine su kullanan Poole ve Escudier'in [7], iki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal akışı deneyine karşılık olmaktadır. Burada da anigenişlemeli kanal $R=D/d=1.428$ gibi bir genişleme oranına sahiptir. Burada akışın Reynolds sayısı u_b ortalama hızına ve h basamak yüksekliğine dayanır. Yani, $Re = u_b h/\nu = 4 \times 10^3$. Bu akış olayı için sayısal hesaplama alanı, anigenişlemeli kanal giriş düzleminde aşağı akışta $45h$ kadar bir akış yönü mesafesine uzatılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan sayısal ağ dağılımı Şekil 2'de takdim edilmiştir. Anigenişlemeli kanal boyunca hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri, boyutsuz olarak u/u_b ve dikey mesafe y/h

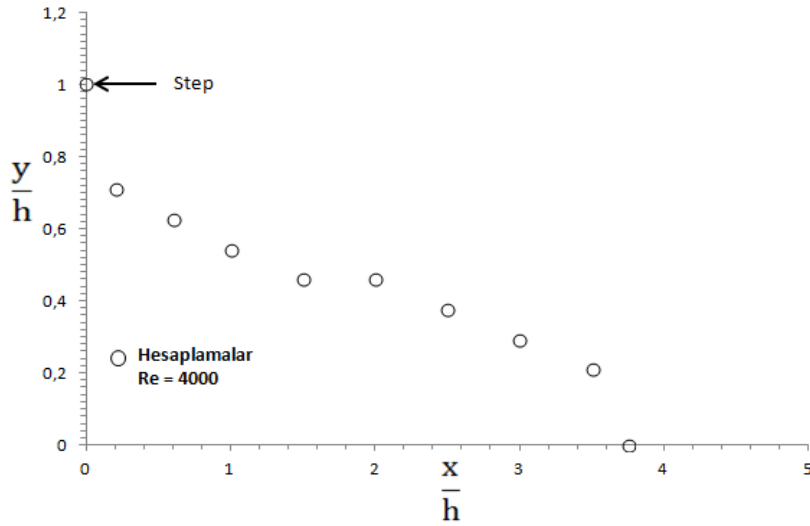
cinsinden, $x/h=1$ 'den 45'e kadar değişen aşağı akış yönü kesitlerinde, Şekil 12'de sunulmuş ve Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilden gözlemlendiği üzere, hesaplanan hız profilleri karşılıkları olan deneysel ölçümlerle oldukça iyi uyum göstermektedir. Bundan başka bu şekil, anigenişlemeli kanal boyunca yatay hız profillerinin nasıl geliştiğini de gözönüne sermektedir. Şekil 13'te, boyutsuz olarak u_c/u_b ve yatay uzunluk x/h cinsinden, simetri ekseninde hesaplanan yatay hızın kanal boyunca değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, simetri eksenindeki hız, anigenişlemeli kanal girişinden başlayarak önce hızlı olarak azalmakta, daha sonra da yavaşlayarak aşağı akışta takriben $x/h=18$ kesitinde tamamıyla gelişmiş değerine ulaştıktan sonra simetri ekseninde sabit kalmaktadır. Çevrıntili akış bölgesinde hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$) ise Şekil 14'te takdim edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, hesaplanan akış yapışma uzunluğu giriş düzleminden aşağı akış yönünde yaklaşık olarak $x_r/h=3.75$ kesitinde oluştuğu bulunurken, deneysel akış yapışma uzunluğunun ise $x_r/h=5$ kesitinde oluştuğu bildirilmiştir. Bu farklılık, karmaşık çevrıntili türbülanslı akışların layıkıyla hesaplanmasında kifayetsiz kalan standart $k-\epsilon$ türbülans modelinden ileri gelmektedir. Şekil 14'teki içi boş dairelerde yatay hız (u) sıfıra eşit olup, bu dairelerin üstünde kalan bölgede pozitif, altında kalan bölgede ise negatif değerler alır. Şekil 15, 16 ve 17, sırasıyla, Poole ve Escudier'in [7], anigenişlemeli kanalı karşısında hesaplanan türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı ve efektif viskozite profillerini, Şekil 12'deki gibi aynı aşağı akış yönü kesitleri için takdim etmektedir. Burada hesaplanan profiller, sırasıyla, ortalama hızın karesi u_b^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 anigenişlemeli kanal boyunca nasıl geliştiğini gözönüne sermektedir. Poole ve Escudier'in [7], anigenişlemeli kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar kayma gerilmesinin dağılımı boyutsuz olarak τ_w/τ_{wd} ve yatay uzunluk x/h cinsinden Şekil 18'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, anigenişlemeli kanalın giriş düzleminden yaklaşık olarak $x/h=4.25$ kesitine kadar kayma gerilmesi negatif değerler almaktadır. Bu hal, çevrıntili akış bölgesindeki negatif hızlardan (- u) dolayıdır. Üst cidar kayma gerilmesi önce negatif yönde değerler alarak hızla bir maksimum değere ulaştıktan sonra, negatif yönde azalarak yaklaşık olarak $x/h=4.25$ kesitinde sıfır değerine ulaşmakta ve ondan sonra da pozitif değerler alarak artmaktadır. Anigenişlemeli kanal üst cidarı boyunca hesaplanan cidar sürtünme katsayısının (C_f) değişimi, x/h cinsinden Şekil 19'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üst cidar sürtünme katsayısı, Şekil 18'deki cidar kayma gerilmesi ile aynı değişimi sergilemektedir. Son olarak, Şekil 20'de takdim edilen grafikten görüldüğü üzere, üst cidar statik-basınç katsayısı (C_p), anigenişlemeli kanal girişinden hemen sonra negatif değerler almaktadır. Çevrıntili akış bölgesinden dolayı, $x/h=10$ kesitine kadar ani yükseliş göstermekte olup, devamında ise yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



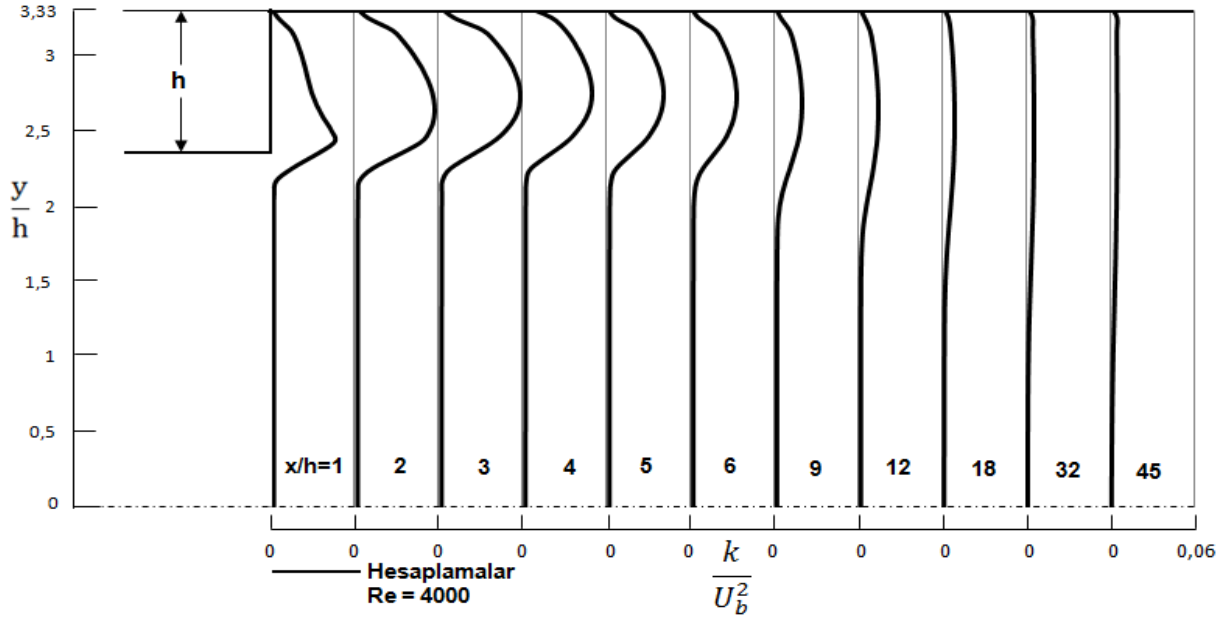
Şekil 12. Düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz akış yönü hız profillerinin Poole ve Escudier'in [7], deneysel ölçümleriyle karşılaştırılması.



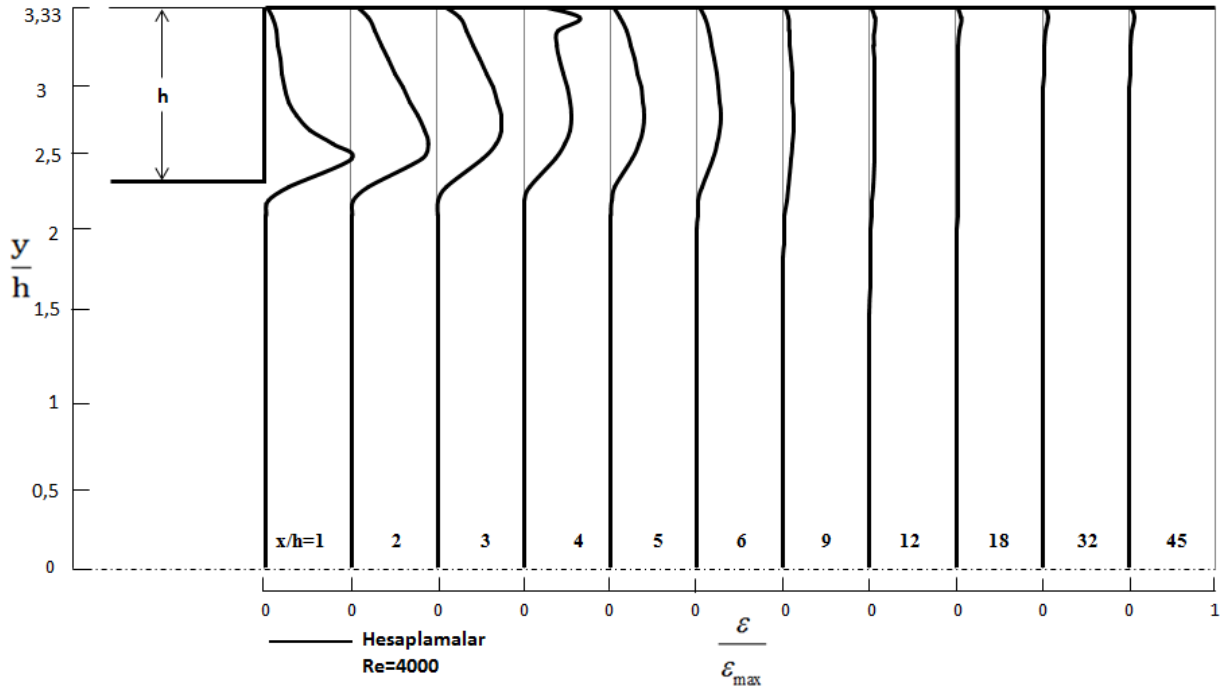
Şekil 13. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca simetri ekseninde hesaplanan yatay hızın değişimi.



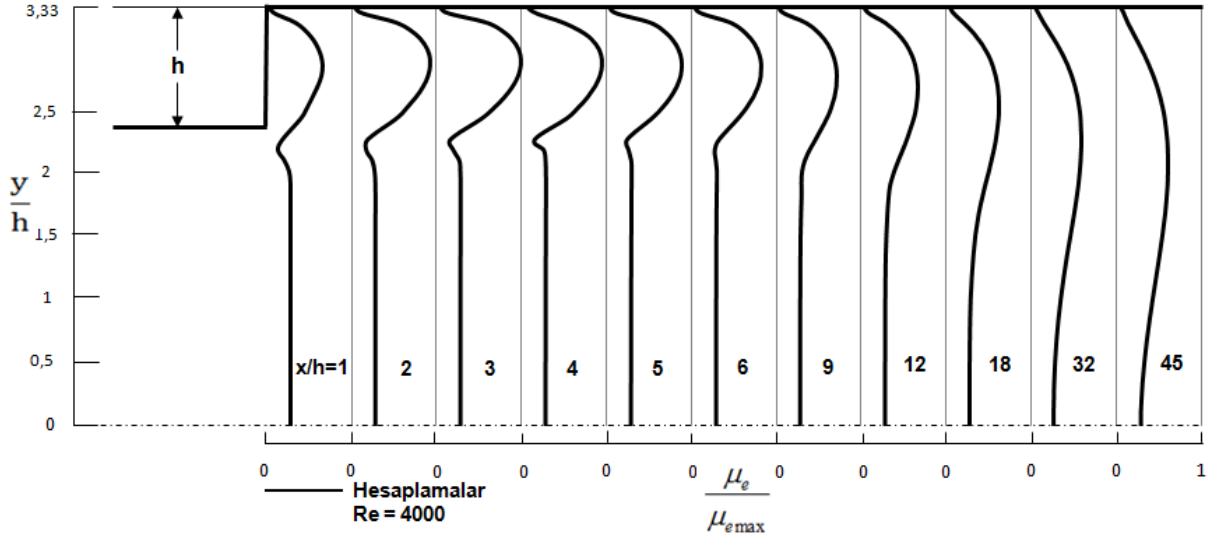
Şekil 14. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı için hesaplanan geri akışın geometrik yeri ($u=0$).



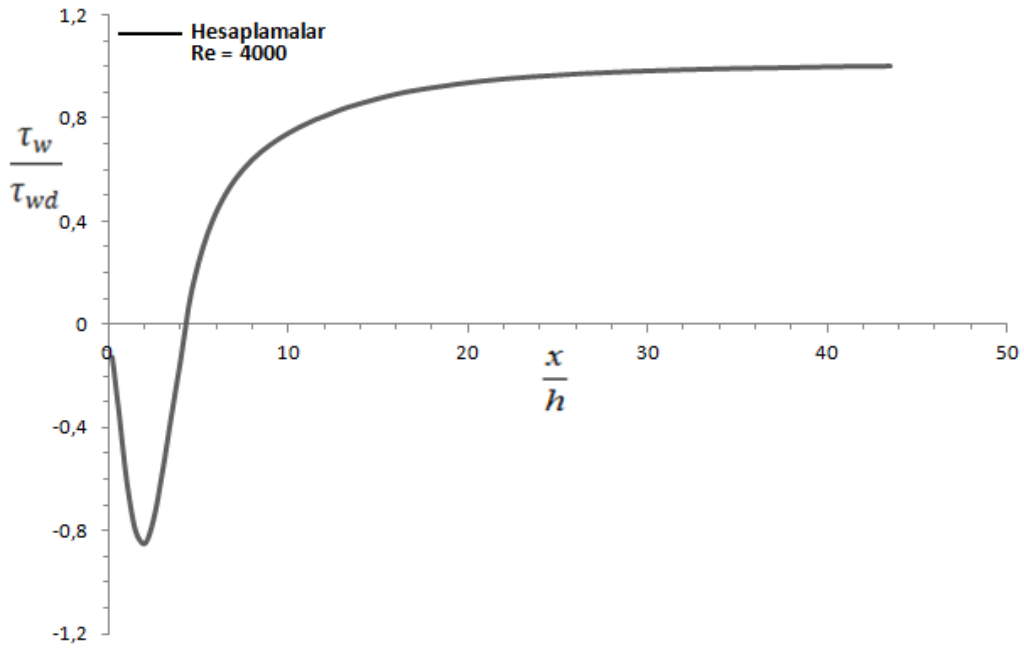
Şekil 15. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji profilleri.



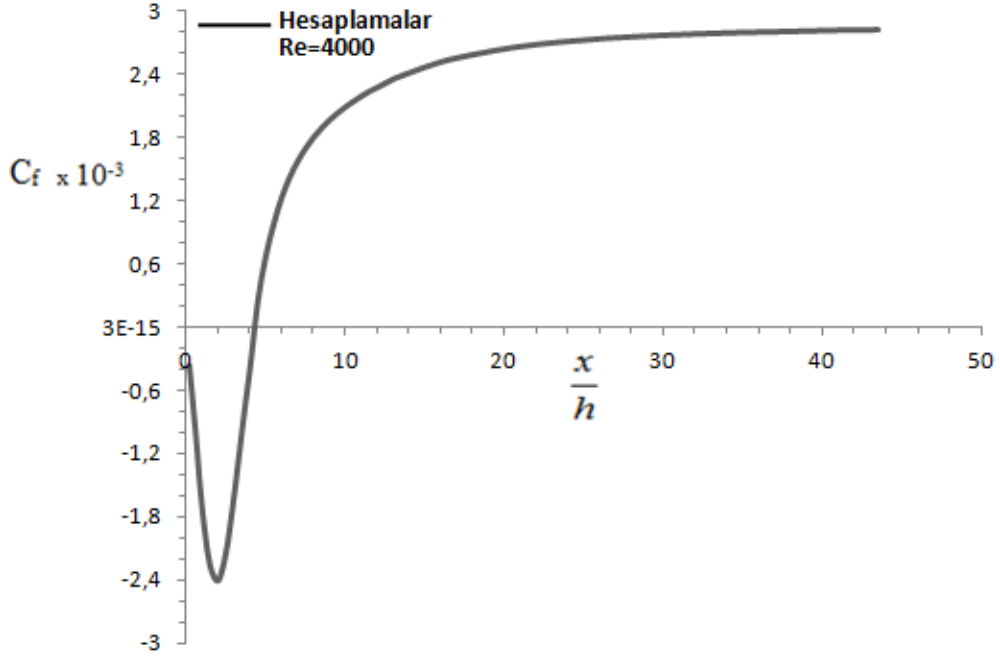
Şekil 16. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı profilleri.



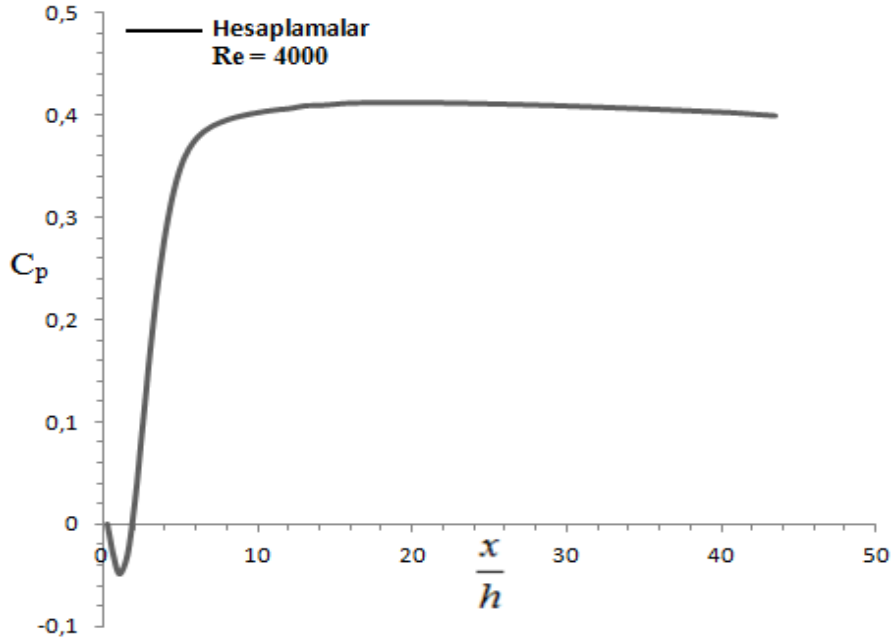
Şekil 17. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan boyutsuz efektif viskozite profilleri.



Şekil 18. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar kayma gerilmesinin dağılımı.



Şekil 19. Poole ve Escudier'in [7], düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 20. Poole ve Escudier'in [7], iki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli akış kanalı boyunca hesaplanan üst cidar statik-basınç katsayısının (C_p) değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu araştırmanın sayısal hesaplamalarından çıkarılan başlıca ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. İki-boyutlu düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanallarda, sürekli, sıkıştırılmayan, ayrımlı ve yeniden birleşmeli, karmaşık çevrintili türbülanslı akış için standart yüksek Reynolds sayılı $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak, iki farklı Reynolds sayılarında sayısal hesaplamalar takdim edilmiştir. Sonlu hacim yöntemini kullanarak, Patankar'ın [13], SIMPLE algoritmasına dayanan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. İki farklı, düzlemsel simetrik anigenişlemeli kanal akışları için standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin performansı araştırılmıştır. Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle hesaplanan yerel akış yönü hızı, türbülans kinetik enerji, türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı, efektif viskozite, simetri eksenindeki hız, üst cidar kayma gerilmesi, üst cidar sürtünme katsayısı ile üst cidar statik-basınç katsayısının dağılımları sunulmuş ve hesaplanan yerel akış yönü hız profilleri literatürde bildirilen deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve genel olarak oldukça iyi uyumda oldukları bulunmuştur. Buna rağmen, karmaşık çevrintili akış bölgesinin yapışma uzunluğu ve genişliği standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli tarafından daha kısa olarak hesaplanmıştır.

SEMBOLLER

- C_1, C_2, C_μ : Türbülans modeli sabitleri
 C_f : Cidar sürtünme katsayısı [$C_f=2 \tau_w / \rho U_b^2$]
 C_p : Statik-basınç katsayısı [$C_p= \Delta P / 0.5 \rho U_b^2$]
 d : Kanal giriş yüksekliği
 D : Kanal çıkış yüksekliği
 E : Logaritmik yasa sabiti [$E=9.0$]
 G : Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
 h : Basamak yüksekliği
 k : Türbülans kinetik enerji
 P : Basınç
 R : Genişleme oranı [$R=D/d=1.428$]
 Re : Reynolds sayısı
 S_ϕ : Taşınım denkleminde kaynak terimi
 U : Yerel akış yönü hızı [yatay hız bileşeni]
 U_b : Debiden hesaplanan ortalama hız
 U_c : Kanal simetri eksenindeki yatay 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 [$=y_p u_\tau / \nu$]
 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 yayınımı için türbülans Prandtl-Schmidt sayıları
 τ_w : Cidar kayma gerilmesi
 τ_{wd} : Kanal çıkış düzlemindeki cidar kayma gerilmesi değeri

KAYNAKLAR

- [1] **Abbott, D. E., Kline, S. J.** 1962. "Experimental Investigation of Subsonic Turbulent Flow Over Single and Double Backward Facing Steps," J. Basic Eng., D84, p. 317-325.
- [2] **Alouri, F., Souhar, M.** 2000. "Experimental Study of Turbulent Asymmetric Flow in a Flat Duct Symmetric Sudden Expansion," J. Fluids Eng., vol. 122, p. 174.
- [3] **De Zilwa, S. R. N., Khezzar, L., Whitelaw, J. H.** 2000. "Flows Through Plane Sudden Expansions," Int. J. Num. Meth. Fluids, vol. 32, p. 313.
- [4] **Escudier, M. P., Oliveira, P. J., Poole, R. J.** 2002. "Turbulent Flow Through a Plane Sudden Expansion of Modest Aspect Ratio," Physics of Fluids, vol. 14, p. 3641-3654.
- [5] **Mehta, P. R.** 1981. "Separated Flow Through Large Sudden Expansions," J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., vol. 107, p. 451.
- [6] **Poole, R. J., Escudier, M. P.** 2003. "Turbulent Flow of Non-Newtonian Liquids Over a Backward-Facing Step, Part I. A thixotropic and shear-thinning liquid," J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 109, p. 177-191.
- [7] **Poole, R. J., Escudier, M. P.** 2003. "Turbulent flow of non-Newtonian liquids over a backward-facing step, Part II. Viscoelastic and shear-thinning liquids," J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 109, p. 193-230.
- [8] **Poole, R. J., Escudier, M. P.** 2003. "Turbulent flow of a viscoelastic shear-thinning liquid through a plane sudden expansion of modest aspect ratio," J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 112, p. 1-26.
- [9] **Restivo, A., Whitelaw, J. H.** 1978. "Turbulence Characteristics of the Flow Downstream of a Symmetric Plane Sudden Expansion," J. Fluids Eng., vol. 100, p. 308.
- [10] **Smyth, R.** 1979. "Turbulent Flow Over a Plane Symmetric Sudden Expansion," J. Fluids Eng., vol. 101, p. 348.
- [11] **Szymocha, K.** 1984. "An Experimental Analysis of the Turbulent Flow Downstream of a Plane Sudden Expansion," Arch. Mech., vol. 36, p. 705.
- [12] **Launder, B. E., Spalding, D. B.** 1974. "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., vol. 3, p. 269-289.
- [13] **Patankar, S. V.** 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Chapters 5 and 6, p. 79-138, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, D.C., USA.
- [14] **Patankar, S. V., Spalding, D. B.** 1972. "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows," Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, p. 1787-1806.
- [15] **Spalding, D. B.** 1981. "A General-Purpose Computer Program for Multi-Dimensional One-and-Two Phase Flow," Math. Comput. Simulation, vol. XXIII, p. 267-276.

ÖZGEÇMİŞ

Tahir KARASU

1950 yılı Eskişehir doğumludur. **D.I.C.** (Diploma of Imperial College), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, İngiltere; **M.Sc.**, The University of Birmingham, Birmingham, İngiltere; ve **Ph.D.**, The University of London, London, İngiltere, derecelerini almıştır. 1982-1983



yıllarında Amerika Birleşik Devletlerinde Kaliforniya'da Los Angeles'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.