



Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology
Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
 ISSN 1012-2354



Cilt (Volume): 28, Sayı (Issue): 1, Ocak/January-2012
<http://fbe.erciyes.edu.tr/>

90 Derecelik kare kesitli dirsekte türbülanslı akışın sayısal analizi

*Ela Aytel ÖZÇELİK BOSTANCI¹, Sebahattin ÜNALAN²

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Osmaniye MYO Teknik Programlar Bölümü-80000, Osmaniye, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü,38039, Kayseri, Türkiye

Anahtar

Kelimeler:

Dirsekte türbülanslı akış,
 Türbülans modelleri,
 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

ÖZET

Bu çalışmada, 90°'lik kare kesitli bir dirsekte, kararlı, sıkıştırılmaz, viskoz ve 3-D türbülanslı akışın sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. İncelenen kare kesitli dirsek üzerinde literatürde deneysel çalışma yapılmış olup [10, 12 ve 14], kesiti 80x80 mm², eğrilik yarıçapı 160 mm, giriş uzunluğu 2500 mm ve çıkış uzunluğu 1500 mm olarak incelenmiştir. Türbülans modeli olarak RNG (ReNormalization Group) k-epsilon modeli, SST (Shear-Stress Transport) k-omega modeli ve RSM (Reynolds Stress Model) modeli seçilmiştir. Sayısal analizler Re=40000'lık hava akışı için gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, dirsekte türbülanslı akışın sayısal analizi için en uygun modelin RNG k-epsilon modeli olduğu görülmüştür.

Numerical analysis of turbulent flow in 90 degree square sectioned bend

Keywords:

Turbulent Flow In Bend,
 Turbulence Models,
 Computational Fluid Dynamics

ABSTRACT

In this study, steady, incompressible, viscos and 3-D turbulent flow in a 90° square section bend numerical investigation has been aimed. Square section bend examined on experimental studies have been done in the literature [10, 12 ve 14], which has 80x80 mm² section, 160 mm curvature radius, 2500 mm upstream and 1500 mm downstream. RNG (renormalization group) k-epsilon, SST (shear-stress transport) k-omega and RSM (Reynolds stress model) models are selected. Numerical analysis was carried out for Re=40000 air flow. As a result, it is seen that the most acceptable model for numerical analysis of turbulent flow in bend is RNG k-epsilon turbulence model.

1. Giriş

Pek çok mühendislik uygulamasında dirsekte akış çok karşılaşılan bir problemdir. Bu nedenle pek çok mühendis ve araştırmacı tarafından teorik, sayısal ve deneysel olarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Hidrolik türbinlerde, santrifüj pompalarda, turbo makinelerde, ısı değiştiricilerinde, binaların sıhhi tesisatlarında, havalandırma kanallarında 90° , 180° veya daha değişik dirsek açısına sahip, kare-dikdörtgen-dairesel kesitli dirsekler mutlaka bir eleman olarak kullanılmaktadır. Bu konuda çok sayıda deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Hwang ve ark. (1998), radyal dönmelerin olduğu periyodik iki geçişli bir kanalda türbülanslı akış ve ısı transferinin sayısal çalışmasını yapmışlardır. Sayısal çalışmanın doğruluğunu tespit etmek için elde edilen sonuçlar mevcut deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Piller ve Nobile (2002), 10 milyon elemana (hücreye) bölünmüş kare kesitli bir boruda düşük Reynolds sayılı akışın sayısal çalışmasını yapmışlardır. Problemin büyüklüğü paralel bilgisayar kullanmayı gerektirmiştir. The OpenMP algorithm 'in orta büyüklükteki problemler için yeterli olduğunu ispatlamışlar ve sekiz işlemcinin kafi geleceğini göstermişlerdir. Lee ve Baek (2002), düşük Reynolds sayılı k-w modelinin, dönel boru ve dirsek içinde ortalama akış özellikleri için kullanımının uygun olduğunu göstermişlerdir. Fakat daha hassas türbülans modelleri için (mesela Reynolds stress model, LES) izotropik olmayan Coriolis kuvvetinin etkisini ve eğriliğin türbülans üzerine etkilerini göz önünde bulundurmışlardır. Bodnar ve Prihoda (2006), düz bir yüzey üzerinde türbülanslı akışın sayısal çalışmasını yapmışlardır. Sayısal çözüm sonlu hacimler metodu ile Runge-Kutta zaman integrasyonu ile gerçekleştirmişlerdir.

Yapay sıkıştırılabilir metodu kararlı durum çözümlerinin araştırmaları için kullanmışlardır. Tüm modeller kısmen su ile doldurulmuş yatay yerleştirilmiş kare kesitli 90° lik dirsekte denemişlerdir. Fung-Chul (2001), iki boyutlu ve sabit yarıçaplı bir kanalda geçiş bölgesinde potansiyel akış alanını incelemiştir. Ayrıca çeşitli kanal geometrileri, çeşitli dirsek açıları ve kanal yüksekliklerinde potansiyel hız ve basınç profillerini araştırmıştır ve dirsekte potansiyel akışın genel bir çözümünü elde etmiştir. Rokni ve Sunden (1998), dirsekli borulardaki türbülanslı akışın zorlanmış taşınım tahmini için sayısal çalışma yapmışlardır. Dirsek eğimini artırarak Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün de artmasını sağlamışlardır. Bundan dolayı borulardaki Nusselt sayısının hesabı için farklı formüller önermişler ve Nusselt sayısının borunun genliğine, dalga boyuna ve tam kesit alanına, sürtünme faktörünün ise genellikle borunun genliğine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Sonuçları sayısal ve sürtünme faktörleri olarak

değerlendirmişlerdir. Papa ve ark.(2002), laminer akışı 180° lik dönel dirsekte, üç farklı kesit ile sonlu farklar metoduyla yerleştirilmiş koordinat sınır sistemi ve yapay sıkıştırılabilir metot kullanarak araştırmışlardır. Dönmenin akış üzerine etkisinin tamamını Navier-Stokes eşitliklerinde, Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinde ayrıca göz önünde bulundurmışlardır. Düz boruda dönme etkisindeki tam gelişmiş giriş hızı ve basınç için tanımlanmış çıkış şartlarını belirlemişlerdir. Sınır şartları bu çalışmada başarıyla kullanılmıştır.

Fortunato (1997), 3 boyutlu bir akışın hesabı yerine tek boyutlu benzer üç diziye indirgeyerek lambda formülüne bağlı 3 boyutlu akışı incelemiştir. Mevcut sonuçların doğruluğu ve güvenilirliğini elde edilen deneysel sonuçlar ile diğer teorik sonuçları karşılaştırarak ispatlamıştır. Elde edilen sonuçlar ile lambda formülündeki viskoz terimleri geliştirmiştir. Yang ve Kuan (2006), 90° lik bir dirsekteki türbülanslı akışı seyreltilmiş partikül davranışı ile gelişmiş lazer teşhis laboratuvarının CSIRO mineraller bölümünde (Advanced Laser Diagnostic Laboratory at CSIRO Division of Minerals) deneysel olarak araştırmışlardır. Çapı $77 \mu\text{m}$ olan ve 10m/s 'lik hızda ($Re=102,00$) hava akışının olduğu kare kesitli boru da katı fazı simgelemek için kullanılan cam küreler salıvermişlerdir. 2D Laser Doppler Anemometry (LDA) kullanılarak gazın ana hızı ve artıp azalan hızları ve partikül görünüşünü elde etmişlerdir. Önemli gaz-katı ayrımı borunun dış duvarının yakınında ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Duvarın iç bölgesinde ise gaz ve katı hızları hemen hemen aynı kaldığını ve bu bölgedeki partiküllerin ortadan kalktığını, dirsek girişinde ise hızdaki dalgalanmaların seviyesinin katı fazda gaz fazından daha büyük olduğunu göstermişlerdir.

Sudo ve ark. (2000), hava akışı için ise ana akışın hızı ve Reynolds gerilmeleri sıcak kablo (hot wire) ile elde etmişlerdir. Ancak, bu veriler sadece dirseklerdeki türbülanslı akışların genel davranışını anlamada yardımcı olabilmştir. Daha sonra önceki bilgi birikimlerinden de faydalanarak, dirsekteki türbülanslı akışın daha detaylı ölçümlerini, 90° ve 180° dairesel kesitli dirseklerde hava akışı için gerçekleştirmişlerdir. Sudo ve ark. (2001), bir başka çalışmada ise, dirsek giriş ve çıkışına bağlanan borularla tam olarak gelişmiş türbülanslı akışı sağlamıştır. Bu amaçla, dirsek girişindeki sınır tabaka kalınlığının dirsekteki akış gelişimi üzerine etkisini araştırmak için dirsek eğrilik yarıçapının (d) 6 ile 7.5 katı giriş uzunluğa sahip kanallar kullanmışlardır. Bununla birlikte tüm bu deneyleri akış hızının teğetsel veya radyal bileşenlerini ölçmek amacıyla yapılmışlardır. Bu ölçümler akışın mekanizması açısından yeterli bir bilgi vermemiştir. Bu nedenle, dirseğin her iki ucuna da daha uzun 100d lik giriş ve 40d lik çıkış boruları bağlanarak, $Rc=4$ ve $Re=4.0 \times 10^4$ özelliklerindeki 90° lik kare kesitli

dirsekte hava akışı üzerine deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Taylor ve ark. (1982), çalışmalarında, hava hızı ölçümünün daha kolay olması sebebiyle dikdörtgen kesitli dirseklerde akışı dairesel kesitli dirseklerde akıştan daha önce araştırmışlardır. Raisee ve ark. (2006), referans [13]'teki deneysel çalışmalarda kullanılmış 90°'lik kare ve dikdörtgen kesitli (yüksekliği H ve genişliği 6H) dirsekli kanallardaki türbülanslı akışların üç boyutlu sayısal analizi için iki farklı düşük reynolds sayılı eddy-viskoz modeli kullanmışlardır.

Türbülans modeli olarak, Launder ve Sharma düşük reynolds k-ε modeli ve son zamanlarda ortaya konan nonlinear düşük reynolds k-ε modellerini kullanmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarına göre kare kesitli dirseklerde daha güçlü ikincil akışlar etkili olurken, dikdörtgen kesitlerde ise daha hafif ikincil akışların köşe bölgelerinde meydana geldiğini görmüşlerdir. Her iki dirsekli kanallar için, dirseğin çıkış yönündeki ikincil hareket oluşumunu gözlemişler ve daha sonraki çıkış kanalında yavaşça gözden kaybolduğunu belirlemişlerdir. Kare kesitli dirsekler için, deneysel sonuçlarla karşılaştırarak her iki türbülans modeli içinde sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

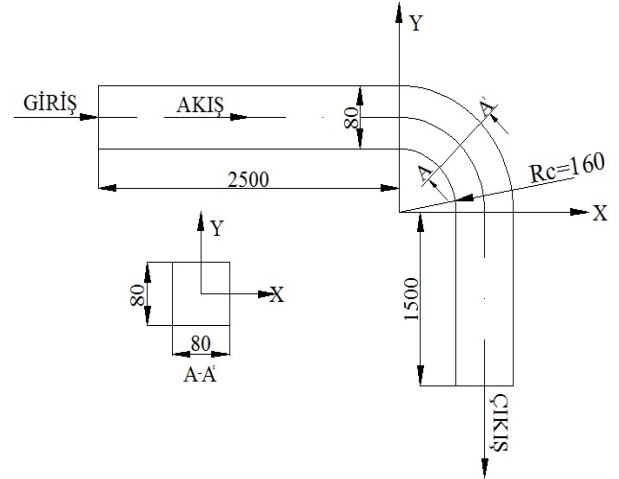
Dikdörtgen kesitli dirsekler için, genel olarak uyum derecesinin iyi olduğu ancak, nonlinear k-ε modeli türbülans alanı, basınç ve sürtünme katsayıları için daha da iyi sonuçlar verdiği bulunmuşlardır. Deneysel çalışmanın zaman ve maliyetinin yüksek olması, doğru ve hızlı bir şekilde sonuç verebilecek sayısal çalışmanın önemini artırmaktadır. Bundan dolayı yapılan bu çalışmada HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) bilgisayar simülasyonu kullanılarak, uygulamada çok pahalı ve zaman gerektiren deneysel araçları kullanmadan önce modelleme ve dizayn için çok önemli zaman ve maliyet kazancı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. Matematik modeli

2.1. Dirsek Geometrisi

Sunulan bu çalışmada, kare kesitli 90°'lik dirsekte 3-boyutlu türbülanslı akış incelemesi yapılmıştır. Sayısal çalışmanın yapıldığı 90°'lik dirsek modelinin ölçüleri şekil 1.'de gösterilmiştir. Yapılan sayısal çalışmanın doğruluğunun tespiti için elde edilen veriler referans [10, 12 ve 14] ile karşılaştırılacağından dolayı referans çalışmadaki model ölçüleri alınmıştır. Dirsek bir HAD programı olan Fluent 6.1 [15] kullanılarak modellenmiştir.

Sayısal çalışmanın yapıldığı model şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kare kesitli 90°'lik dirsek modeli

2.2. Matematiksel Model

Sayısal hesaplamalar için türbülans modelleri olarak RNG k-epsilon, shear-stress aktarım (sst) k-omega ve Reynolds stress (RSM) modelleri kullanılmıştır. Akışın kararlı, sıkıştırılmaz, viskoz, 3 boyutlu (3-D) olduğu ve akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir.

2.2.1. Türbülans Modelleri

RNG k-epsilon modeli "Renormalization group" metodu olarak adlandırılan matematiksel teknik kullanarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden türetilir. Analitik sonuçlardan türemiş model sabitleri, ilave terimler ve k ile ε için aktarım denklemlerindeki fonksiyonlar ile RNG modeli Standart k-epsilon modelinden farklıdır [15]. RNG k-epsilon modeli için aktarım denklemleri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2)$$

Bu denklemlerde G_k ortalama hız değişiminden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, G_b kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Y_M bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülans genişleyen çalkantıların katkısını simgelemektedir. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ ve $C_{3\epsilon}$ model sabitleridir. α_k ve α_ϵ sırasıyla k ve ε için zıt efektif Prandtl sayılarıdır. S_k ve S_ϵ kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir.

Fluent aynı zamanda değişim olarak bilinen shear-stress aktarım (SST) k-omega modelini de sağlamaktadır. Böyle

adlandırılmasının sebebi türbülans shear stress aktarımının hesaplanması için tanımlanan türbülans viskozitesinin düzenlenmesindedir. Bu özelliklerinden dolayı SST k-w modeli standart k-w modeli ve standart k-ε modelinden daha iyidir. Model eşitliklerindeki duvara yakın ve uzak bölgelerdeki hareketleri uygun bir şekilde kesinleştirmek için w eşitliklerindeki karşı difüzyon terimleri ve harmanlanmış bir fonksiyon ek olarak diğer değişikliklerde dahil edilmelidir [15]. SST k-w modeli aktarım denklemleri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + D_w + S_w \quad (4)$$

G_w ; w üretimi, Γ_k ve Γ_w ; k ve w 'nın efektif yayılma gücü, Y_k ve Y_w ; k ve w 'nın türbülansdan dolayı dağıtımı, D_w ; karşı difüzyon terimi, S_k ve S_w ; kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir.

Reynolds stress (RSM) modeli, kompleks akışlarda hız ve uzunluk skalaları yöne bağlı olarak değişir, özel Reynolds gerilmelerinin hesaplandığı akışlar için gereklidir ve bu tip durumlarda iyi sonuçlar vermektedir. RSM'de gerilme bileşenleri, bu tip taşıma gerilmelerini tanımlayan diferansiyel denklemlerde direk hesaplanır. Momentum denklemlerinden elde edilen taşıma denklemleri gerilme bileşenleri için çözülür [16]. Reynolds gerilme denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i u_j) + u_k \frac{\partial}{\partial x_k}(u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{v_j}{\sigma_k} \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_k} \right) - \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k}(u_i u_k) + \frac{\partial u_i}{\partial x_k}(u_j u_k) \right) + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (5.20)$$

Φ_{ij} : basınç gerilme korelasyonuna bağlı kaynak/kayıp,

ε_{ij} viskoz yayılımdır.

2.2.2.Sınır Şartları

Dirseğin üst kanal girişinde hava uniform hız değeri, dirsek çıkışında ise akışın basınç değeri tanımlanmıştır. Bu çalışmada dirsek yüzeyleri sabittir, bu yüzden yüzeylerdeki hızlar sıfır olarak alınmıştır. Havanın giriş hızı 7,4 m/s ve Reynolds sayısı 4×10^4 olarak alınmıştır. Türbülans kinetik enerjileri (k), türbülans yayılım oranı (ε) ve spesifik yayılım oranı (w) kare kesitli dirsek için sırasıyla $0,148 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $1,674 \text{ m}^2/\text{s}^3$, 125 1/s olarak alınmıştır. Bu sınır şartları neticesinde her bir türbülans modeli için, dirsek içerisindeki ve çıkış kanalındaki hız dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen bu hız dağılımları referans [10], [12] ve [14]'deki ölçülen hız değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3. Hesaplama yöntemi

3.1. Hesaplama araçları

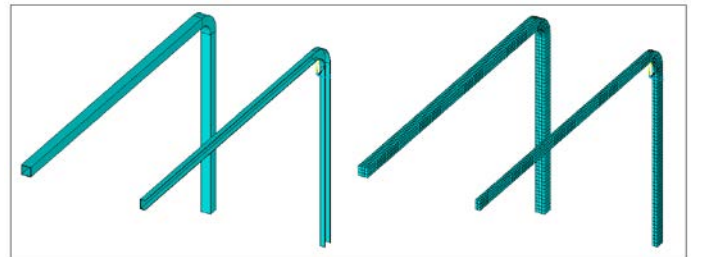
Bu çalışmada, dirseğin modellenmesinde tanımlanan başlangıç ve sınır şartları için korunumu karakterize eden diferansiyel denklemleri, Simple algoritmasına dayanan ve sonlu kontrol hacim yöntemi ile çözüm yapan HAD programı FLUENT 6.1 kullanılarak çözülmüştür. Çözümde türbülans modelleri olarak RNG k-epsilon, shear-stress aktarım (sst) k-omega ve Reynolds stress (RSM) modelleri kullanılmıştır.

3.2. Simülasyon değerleri

Fiziksel özellikler: Çalışmada kullanılan kare kesitli dirseğin kesiti $80 \times 80 \text{ mm}^2$, eğrilik yarıçapı 160 mm, giriş uzunluğu 2500 mm ve çıkış uzunluğu 1500 mm'dir. Akışkan olarak hava kullanılmıştır.

Havanın yoğunluğu $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, dinamik viskozite $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ ve giriş hızı ve Reynolds sayıları ise sırasıyla 7,4 m/s ve 4×10^4 alınmıştır. Türbülans kinetik enerjileri (k), türbülans yayılım oranı (ε) ve spesifik yayılım oranı (w) kare kesitli dirsek için sırasıyla $0,148 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $1,674 \text{ m}^2/\text{s}^3$, 125 1/s olarak alınmıştır.

Grid boyutu: Bu çalışmada kullanılan dirseğin modellenmesi için, gambit koordinat grid sistemi kullanılarak her bir model için eksene simetrik grid geliştirilmiştir. Kare kesitli dirsekte tüm hacmin grid aralığı 0.3 olarak belirlenmiştir. Nümerik analiz için ihtiyaç duyulan 3 boyutlu şekil ve 3 boyutlu grid (ağ) yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 2).

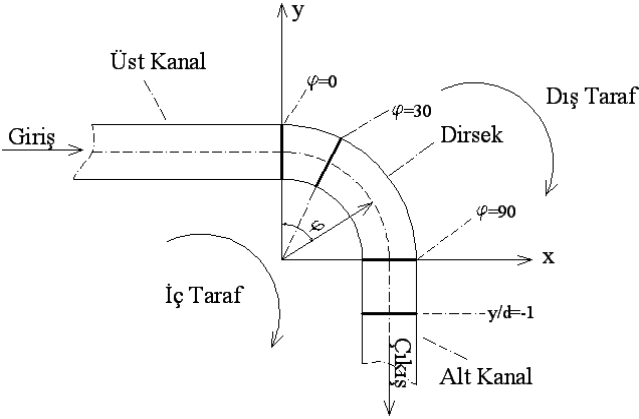


Şekil 2. Kare kesitli 90°'lik dirseğin 3- boyutlu şekli ve grid (ağ) yapısı

4. Sayısal sonuçlar

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modellemesi gerçekleştirilen, dirseğin akış karakteristikleri simule edilerek her bir dirsek için RNG k-epsilon, shear-stress aktarım (sst) k-omega ve Reynolds stress (RSM) modelleri kullanılarak hız eğrileri elde edilmiştir. Her bir model için hız eğrileri dirsek giriş ($\varphi=0^\circ$), dirsek içinde ($\varphi=30^\circ$), dirsek çıkışında ($\varphi=90^\circ$) ve dirsek çıkışından

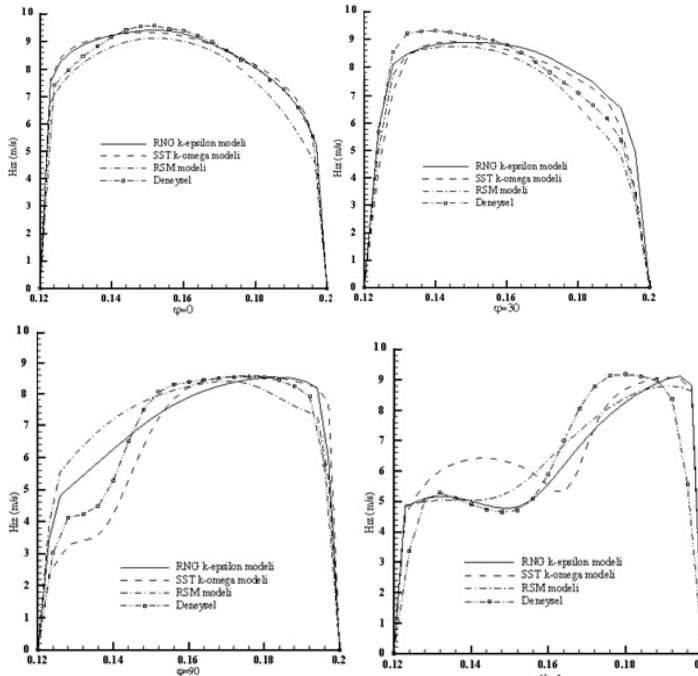
belirli mesafede ($y/d=-1$) çizilmiştir. (ϕ dirsek açısını d ise hidrolik çapı göstermektedir.) Bu hız eğrilerinin incelendiği yerler aşağıda Şekil 3’de gösterilmiştir. Elde edilen bu hız eğrileri referans [10], [12] ve [14]’daki hız eğrileriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 90°'lik kare kesitli dirsekteki hız eğrilerinin incelendiği yerler

4.1. Hız Eğrileri

Hız eğrileri deneysel bir çalışma olan referans [12] ile karşılaştırılmıştır. Her bir model için hız eğrileri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4. 90°'lik kare kesitli dirsekte $\phi=0^\circ$, $\phi=30^\circ$, $\phi=90^\circ$ ve $y/d=-1$ 'de RNG k-epsilon, SST k-omega ve RSM modellerindeki hız eğrileri

Kare kesitli 90°'lik dirsekte RNG k-epsilon, SST k-omega ve RSM modelleri kullanarak $\phi=0^\circ$, $\phi=30^\circ$, $\phi=90^\circ$ ve $y/d=-1$ için referans [12]'den elde edilen deneysel hız

eğrileri ile bu çalışmadan elde edilen hız eğrileri Şekil 4’de karşılaştırılmıştır. RNG k-epsilon türbülans modelinde dirsek girişinde hız profilleri arasında yüksek bir uyum söz konusudur. Bu seçilen türbülans modelinin düz kanal içindeki akış analizi için çok uygun olduğu manasına gelmektedir. Üst kanal girişindeki uniform hız dağılımı 2.5m sonra dirsek girişindeki gerçek hız dağılımına çevrilebilmiştir. $\phi=30^\circ$, $\phi=90^\circ$ ve $y/d=-1$, grafiklerinde RNG k-epsilon modeli için deneysel ve nümerik değerler arasında belirgin bir uyumsuzluk gözlenmiştir. Dirsek içinde ilerledikçe nümerik ve deneysel değerler arasındaki farkın artması, türbülans modelinin dirsek içinde düz kanaldaki kadar yüksek performans gösteremediği anlamına gelir. Dirsekten çıktıktan sonra ($y/d=-1$) özellikle kanal yüzeylerine yakın bölgede açık bir fark oluşmuştur. Genel olarak, kare kesitli kanal ve dirsek içindeki akışın analizi için RNG k-epsilon türbülans modelinin iyi bir performans sergilediği söylenebilir.

SST k-omega modeli de RNG k-epsilon modelinde olduğu gibi düz kanal içindeki akış analizi için çok uygun olduğu $\phi=0^\circ$ ’deki grafikte açıkça görülebilmektedir. Dirsek girişi ($\phi=0^\circ$), dirsek içi ($\phi=30^\circ$) ve $y/d=-1$ ’de kanal yüzeyine yakın bölgelerdeki hız dağılımlarının deneysel çalışmaya daha yakın olduğu görülmektedir. Dirsek çıkışında ise ($\phi=90^\circ$) dirsek yüzeylerine yakın bölgelerde deneysel ve nümerik değerler arasında fark olmasına karşılık, dirsekten çıktıktan sonra ($y/d=-1$) nümerik değerler her ne kadar deneysel değerlere yaklaşmış olmasa da kanal yüzeylerine yakın bölgedeki fark kapanmıştır. Bu grafiklerden, SST k-omega modelinin kare kesitli kanal ve dirsek içindeki akış analizleri için iyi olduğu söylenebilir.

RSM modelinde de uniform hız dağılımı, çok küçük farklılıklar olmasına rağmen dirsek girişinde meydana gelmiştir. Dolayısıyla nümerik değerlerin ve eğri şeklinin en uyumlu olduğu yer dirsek girişinde gözlenmiştir. Fakat dirsek içinde ve dirsek çıkışında eğriler arasındaki uyum bozulmuş, kanal yüzeylerine yakın bölgedeki nümerik değerler deneysel değerlere daha yakındır. Dirsekten çıktıktan sonra ise kanal yüzeylerine yakın bölgelerde fark oluşmuş ama nümerik eğrinin gidişatı deneyselle daha da yaklaşmıştır.

Kare, kesitli dirsek için oluşturulan hız grafiklerinin oluşturulmasında faydalanan deneysel ve sayısal değerler kullanılarak tablolar oluşturulmuştur. Dirsek ve model için bulunan sayısal değerlerin deneysel değerlere olan yakınlığı incelenmiştir. Elde edilen değerler tablolar halinde sunulmuştur (Tablo 1-4).

Tablo 1. 90°'lik kare kesitli dirsekte $\varphi=0^\circ$ 'daki hız değerleri

$\varphi=0^\circ$ 'daki Hız Değerleri				
Ölçüm Noktaları	RNG k-Epsilon Modeli	SST k-Omega Modeli	RSM Modeli	Deneyisel Değerler
0,12	0	0	0	0
0,13	8,874	8,763	8,328	8,473
0,14	9,253	9,263	9,0788	9,172
0,15	9,419	9,355	9,297	9,590
0,16	9,348	9,158	9,229	9,421
0,17	8,771	8,766	8,703	8,686
0,18	8,128	8,213	7,984	8,097
0,19	6,761	6,979	6,384	6,608
0,20	0	0	0	0

Tablo 2. 90°'lik kare kesitli dirsekte $\varphi=30^\circ$ 'daki hız değerleri

$\varphi=30^\circ$ 'daki Hız Değerleri				
Ölçüm Noktaları	RNG k-Epsilon Modeli	SST k-Omega Modeli	RSM Modeli	Deneyisel Değerler
0,12	0	0	0	0
0,13	8,535	8,658	8,476	9,309
0,14	8,893	9,005	8,821	9,457
0,15	8,987	8,959	8,914	9,124
0,16	8,890	8,757	8,796	8,992
0,17	8,470	8,242	8,273	7,883
0,18	7,837	7,648	7,386	7,182
0,19	6,091	6,782	5,853	5,744
0,20	0	0	0	0

Tablo 3. 90°'lik kare kesitli dirsekte $\varphi=90^\circ$ 'daki hız değerleri

$\varphi=90^\circ$ 'daki Hız Değerleri				
Ölçüm Noktaları	RNG k-Epsilon Modeli	SST k-Omega Modeli	RSM Modeli	Deneyisel Değerler
0,12	0	0	0	0
0,13	5,431	3,415	5,873	4,238
0,14	6,338	4,413	6,748	5,091
0,15	7,414	7,343	7,452	8,129
0,16	7,966	8,081	8,076	8,327
0,17	8,308	8,521	8,354	8,503
0,18	8,488	8,541	8,450	8,532
0,19	8,387	8,298	7,989	7,917
0,20	0	0	0	0

Tablo 4. 90°'lik kare kesitli dirsekte $y/d=-1$ 'deki hız değerleri

$y/d=-1$ 'deki Hız Değerleri				
Ölçüm Noktaları	RNG k-Epsilon Modeli	SST k-Omega Modeli	RSM Modeli	Deneyisel Değerler
0,12	0	0	0	0
0,13	5,168	5,995	5,006	5,295
0,14	4,984	6,408	5,030	4,839
0,15	4,769	6,166	5,297	4,558
0,16	5,369	5,348	6,542	5,650
0,17	7,158	6,948	7,575	9,100
0,18	8,198	8,650	8,360	9,244
0,19	9,047	9,079	8,795	8,913
0,20	0	0	0	0

Kare kesitli 90°'lik dirsekte RNG k-epsilon, SST k-omega ve RSM modelleri kullanarak $\varphi=0^\circ$ (dirsek girişi) için referans [12]'den elde edilen deneysel hız değerleri ile bu çalışmada elde edilen hız değerleri tablo 1'de karşılaştırılmıştır. Dirsek girişinde RNG k-epsilon türbülans modeli ile elde edilen hız değerleri deneysel değerlere yakın olduğu gözlenmiştir. Bu türbülans modelinin düz kanal içindeki akış analizi için çok uygun olduğunu göstermiştir. Tablo 2'de dirsek içinde ($\varphi=30^\circ$), tablo3'de dirsek çıkışında ($\varphi=90^\circ$) ve tablo 4'de dirsekten çıktıktan sonraki ($y/d=-1$) hız değerleri incelendiğinde RNG k-epsilon modeli için deneysel ve nümerik değerlerin birbirine yakın olmadığı gözlenmiştir. Dirsek içinde ilerledikçe nümerik ve deneysel değerler arasındaki farkın artması, RNG k-epsilon türbülans modelinin dirsek içinde düz kanaldaki kadar yüksek performans gösteremediği anlamına gelir. Dirsekten çıktıktan sonra ($y/d=-1$) özellikle kanal yüzeylerine yakın bölgede deneysel değerler arasında açık bir fark oluşmuştur. Bundan dolayı, kare kesitli kanal ve dirsek içindeki akışın analizi için RNG k-epsilon türbülans modelinin iyi bir performans sergilediği söylenebilir.

SST k-omega modeli de RNG k-epsilon modelinde olduğu gibi tablo 1'de dirsek girişindeki ($\varphi=0^\circ$) hız değerleri deneysel değerlere yakındır. SST k-omega modelinin de düz kanal içindeki akış analizi için çok uygun olduğu açıkça görülebilmektedir. Aynı zamanda tablo 2'den dirsek içi ($\varphi=30^\circ$) ve tablo 4'ten dirsekten çıktıktan sonraki ($y/d=-1$) kanal yüzeyine yakın bölgelerdeki hız değerlerinin deneysel çalışmaya daha yakın olduğu görülmektedir. Tablo 3'te ise dirsek çıkışında ise ($\varphi=90^\circ$) dirsek yüzeylerine yakın bölgelerde deneysel ve nümerik hız değerleri arasında fark oluşurken, dirsekten çıktıktan sonra ($y/d=-1$) nümerik değerler, deneysel değerlere yaklaşmış olmasa da kanal yüzeylerine yakın bölgedeki fark kapanmıştır. SST k-omega modelinin de kare kesitli kanal ve dirsek içindeki akış analizleri için uygun olduğu söylenebilir.

RSM modelinde de çok küçük farklılıklar olmasına rağmen tablo 1’de dirsek girişindeki ($\varphi=0^\circ$) hız değerlerinin deneysel değerlere yakın olduğu gözlenmiştir. Fakat tablo 2’de dirsek içinde ($\varphi=30^\circ$) ve tablo3’de dirsek çıkışında ($\varphi=90^\circ$) hız değerleri ile deneysel değerler arasındaki uyum bozulmuş, kanal yüzeylerine yakın bölgedeki nümerik değerler deneysel değerlere daha yakındır. Tablo 4’de dirsekten çıktıktan sonraki ($y/d=-1$) hız değerleri ile deneysel hız değerleri arasında ise fark oluşmuştur.

Kısacası nümerik hız değerlerin deneysel hız değerlerine en çok yaklaştığı ve kanal yüzeylerine yakın bölgelerdeki değerler arasındaki farkın en az olduğu modelin, RNG k-epsilon modeli olduğu açıkça görülmüştür.

5. Sonuç ve öneriler

Türbülans genellikle akıştaki dönme ya da girdaptan etkilenir. Bu çalışmada kullanılan Fluent6.1. CFD kodu dönme yada girdabın etkilerinin de hesaba katılmasıyla uygun bir şekilde türbülans viskozitesinin hesaplanmasını sağlayan RNG k-epsilon türbülans modelini geliştirmiştir. Kare kesitli 90° ’lik dirsek için yapılan üç farklı türbülans modeli için elde edilen sonuçlar;

- Seçilen türbülans modelleri ve deneysel verilerin hız dağılımları arasında genel olarak karakteristik olarak bir benzerlik mevcuttur.
- 2.5 m lik üst kanala üniform hızla giren hava dirsek girişine kadar gelişerek, girişte gerçek hız profiline yakın bir hız dağılımı göstermiştir. Dirsek girişinde deneysel verilere göre uyum her üç model içinde dirsek içinde aynı orandadır. Dirsek içinde ilerledikçe uyumun bozulduğu gözlenmiştir.
- Dirsek çıkışındaki ($\varphi=90^\circ$) ve çıkış kanalındaki ($y/d=-1$) verilere göre, RNG k-epsilon modeli diğerlerine göre daha yüksek uyum sergilemiştir.
- Hız eğrileri incelendiğinde, uyumsuzluğun dirseğin iç ve dış radyal yüzeylerine yakın bölgelerde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar radyal yüzeylere yakın bölgelerde türbülans modellerinin ikincil akışı, vorteksleri, ani basınç değişimlerini yakalamada çok yüksek bir performans sergileyemediklerini göstermiştir.
- Literatürde yer alan türbülanslı akış modelleri üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde de, benzer yapıdaki geometrilerde, ayrılmış akışlar, girdaplı akışlar ve durgun akışlar için RNG k-epsilon modelini daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu çalışmada da deneysel değerlere en yakın sonuçlar RNG k-epsilon modelinden elde edilmiştir. Dolayısıyla dirsekte ve kanal içi akışların nümerik analizi için en uygun türbülans modelinin bir kez daha RNG k-epsilon türbülans modelinin olduğu sonucuna varılmıştır.

2. Kaynaklar

1. Hwang J.J., Lia T.Y. and Chen S.H., Prediction of turbulent fluid flow and heat transfer in a rotating periodical two-pass square duct, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 5(8), 519-538, 1998.
2. Piller M., and Nobile E., Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in a square duct, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 6(12), 658-686, 2002.
3. Lee H.G. and Baek J.H., A Numerical study of the similarity of fully developed turbulent flows in orthogonally rotating square ducts and stationary curved square ducts, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 3(12), 241-257, 2002.
4. Bodnar, T. and Prihoda, J., Numerical simulation of turbulent free-surface flow in curved channel, Flow Turbulence Combust, (76), 429-442, 2006.
5. Fung-Chul, S. Analysis of potential flow field in a two-dimensional duct, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 73(3), 271-278, 2001.
6. Rokni, M., and Sunden, B., 3D numerical investigation of turbulent forced convection in wavy ducts with trapezoidal cross-section, International Journal for Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 8(1), 118-141, 1998.
7. Papa, F., Keith T.G., DeWitt, Jr. And K.J., Vaidyanathan, K., Numerical calculation of developing laminar flow in rotating ducts with a 180° bend, International Journal for Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 12(7), 780-799, 2002.
8. Fortunato, B., A fast Euler solver for the solution of three-dimensional rotational compressible flows, Engineering Computations, 14(3), 306-324, 1997.
9. Yang, W., and Kuan, B., Experimental investigation of dilute turbulent particulate flow inside a curved 90° bend, Chemical Engineering Science, 61, 3593-3601, 2006.
10. Sudo K; Sumida M; Hibara H, Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend. Exp Fluids, 25, 42-49, 1998.
11. Sudo K; Sumida M; Hibara H , Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 180-degree bend. Exp Fluids, 28, 51-57, 2000.
12. Sudo K, Sumida M, Hibara H, Experimental investigation on turbulent flow in a square – sectioned 90-degree bend, Experiments in Fluids, 30, 246-252, 2001.
13. Taylor, AMKP., Whitelaw, JH. and Yianneskis, M. Curved ducts with strong secondary motion: Velocity measurements of developing laminar and

- turbulent flows. Journal of Fluids Engineering, 104, 350-359, 1982.
14. M.Raisee, H.Alemi and H. Iacovides, Prediction of developing turbulent flow in 90° curved ducts using linear and non-linear low-Re k-ε models, International Journal for numerical methods in Fluids, 51(12), 1379-1405, 2006.
 15. Fluent Incorporated FLUENT User's Guide Version 6.1, 1998.
 16. İlbaş, M., Studies of Ultra Low NO_x Burner, PhD Thesis University of Wales, Cardiff, U.K., 1997.