

ÇAPRAZ JETLERDEKİ GİRDAP YAPILARININ İKİNCİ DERECE TÜRBÜLANS MODELİ İLE İNCELENMESİ

Seyfettin BAYRAKTAR*, Tamer YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü,
34349, Beşiktaş, İstanbul
*sbay@yildiz.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, çok geniş uygulama alanlarına sahip bir akış türü olan çapraz jet akışlarındaki girdap yapıları Reynolds gerilme modeli ile elde edilmiştir. Akış doğası gereği üç-boyutlu ve tam türbülanslı olduğundan sonuçlar üç-boyutlu bir kanal ve boru düşünülerek sağlanmıştır. Sonuçlar gösterilmeden önce söz konusu bu sayısal çalışma literatürdeki mevcut bir çalışma ile mukayese edilmiş ve hız bileşenleri ve türbülans kinetik enerji değişimlerinin deneyle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: HAD, girdap yapıları, çapraz jet, türbülans.

THE INVESTIGATION OF VORTICES BY USING SECOND ORDER TURBULENCE CLOSURE

ABSTRACT

In this study, the vortex structures seen in a jet in a crossflow phenomena which has numerous applications are obtained by using Reynolds Stress Turbulence Model. The flow is three-dimensional and fully turbulent in nature so a three-dimensional channel and a pipe are considered. The numerical results are compared with an experimental data found in open literature and it is seen that the velocity components and turbulent kinetic energy variations are in good agreement with the experimental results.

Keywords: CFD, Vortex structures, Transverse jets, Turbulence.

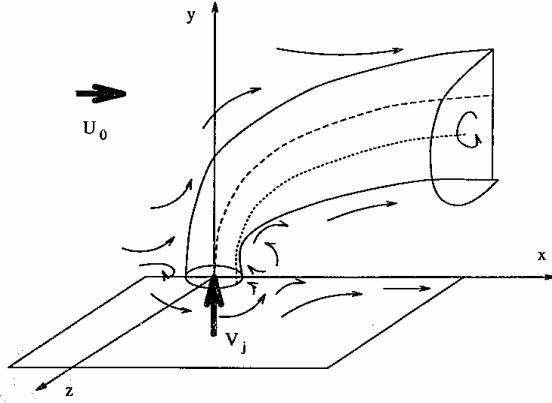
1. GİRİŞ

Çapraz akıştaki jet akışları veya kısa adıyla çapraz jetler askeri alanlardan (uçakların dikey olarak inip havalanması) çevre (nehir ve akarsuların denizlere karışması) ve pek çok endüstriyel uygulamalarda (gaz türbinlerinin soğutulması, soğutma kulelerinden ve ev, gemi veya fabrika bacalarından atılan dumanların atmosfere karışması) karşımıza çıkmaktadır. Değişik kesitlere sahip bir lüleden belli bir açı ile bir kanalda serbest olarak akmakta olan bir akışa püskürtülen jet, bu iki akışın birbirleriyle etkileşiminden dolayı yönünü değiştirerek serbest akış yönünde akmaya başlar (Şekil 1). Bu sırada kanalda akmakta olan serbest akış dolayısıyla oluşan sınır tabakanın varlığının da etkisiyle farklı girdap yapıları oluşur. Bu girdap yapıları iki ana gruba ayrılabilir [1]. Birinci gruptaki girdap yapıları zıt-dönümlü girdap çifti, at nalı girdap ve ön kısımdaki girdaplardır. İkinci grup girdap yapıları ise bir serbest jet akışında görülen girdap

yapıları olup oluşumu ve kararsızlığı çapraz akışın varlığından etkilendiğinden çapraz akıştaki jet akışlarında da kendini gösteren girdap yapılarıdır. Bu gruptaki en belirgin olanı jet ile çapraz akışın hızlarının farkından kaynaklanan kayma tabakası girdabıdır. Kayma tabakası girdabının şekli konuma bağlı olarak çapraz akış tarafından bozulur. Zıt dönümlü girdap çifti ile beraber bu girdap türü de çapraz akıştaki jet akışlarının hız ve vortisite alanları üzerinde büyük etkiye sahiptir. Jet kayma tabakası girdabının jet ile kanal akışı arasındaki Kelvin-Helmholtz kararsızlığından kaynaklandığı, at nalı girdabın ise jetten ileride bir noktada serbest akışın sınır tabasındaki artışla beraber bunun jet etrafında dönme, genişleme gibi hareketlerden dolayı oluştuğu tahmin edilmektedir. Buradaki at nalı girdap bir çepere monte edilmiş bir silindir etrafında oluşan girdap gibidir. Esasen lüleden çapraz akışa püskürtülen jet akışı da aynen bir silindir gibi sınır tabakayı kestiğinde böyle bir girdap yapısı kaçınılmaz

olarak oluşur. Çapraz akıştaki bir silindirin arkasında oluşan ve Von Karman Street olarak adlandırılan yapıdan dolayı meydana gelen iz girdabının yanında büyük öneme sahip ve çapraz jetlerdeki en baskın girdap türü olan zıt-dönümlü girdap çifti de oluşmaktadır [2]. Zıt-dönümlü girdap çiftinin akış yönünde taşınan değişik ve farklı jet kayma tabakası girdaplarından dolayı oluştuğu sanılmaktadır.

Bu yapılar sayıları oldukça fazla olan çalışmaların da ana konusu olmuştur. Bunlar arasında Fric ve Rosko [2], Kelso vd. [3] ve Andreoploulos [4] sayılabilir. Bunun yanında jet yörüngesi, kullanılan lülenin kesidi, sayısı ve lüle ile kanal arasındaki açı da geniş olarak incelenmiştir. Rudman [5] doğrudan sayısal benzeşim (DNS) kullanarak jet yörüngesini literatürden elde ettiği deneysel verilerle mukayese etmiş ve ayrıca girdap yapılarını da incelemiştir. Zıt-dönümlü girdap çiftinin incelenmesi hem jet-çapraz akış karışımının kontrol edilmesi hem de film soğutma gibi konularda büyük önem taşımaktadır [6].



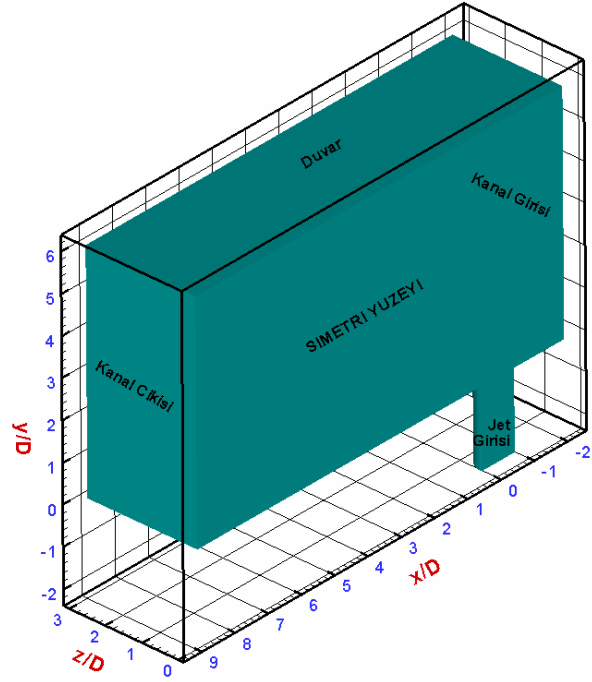
Şekil 1. Çapraz akıştaki dairesel jet akışı [7].

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çapraz akıştaki jet akışlarında görülen girdap yapıları elde edilmiştir. Sayısal çalışmanın doğruluğu literatürden elde edilen deneysel verilerle mukayese yapılarak gösterilmiştir.

2. SAYISAL ANALİZ

Bu doğası gereği üç-boyutlu ve tam türbülanslı olarak düşünülmüştür. Kullanılan türbülans modeli Reynolds gerilme türbülans modeli olup yakın-çeper davranışı ile beraber göz önüne alınmıştır. Çalışmada iki farklı akışkan kullanılmıştır. Lüleden püskürtülen akışkan olarak CO₂, kanaldan akan akışkan ise havadır. Reynolds gerilme modeli bilindiği gibi 7 adet denklemin beraber çözdürüldüğü bir 2.derece türbülans modelidir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri de düşünüldüğünde toplam 11 adet denklemin ardışık (iteratif) çözdürülmesi gerekmiştir. Problemin geometrisi ve ağ yapısı GAMBIT adlı bir ön-işlemci kullanılarak oluşturulmuş ve daha sonra FLUENT adlı ticari bir paket program yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçların alınması

Pentium-4, 3GHz ve 1 GB rastgele erişimli hafızaya (RAM) sahip bir kişisel bilgisayarda yaklaşık 10 günlük bir çalışmadan sonra mümkün olmuştur. Çalışma alanının boyutları ve koordinat eksenleri Şekil 2’de gösterilmiştir.

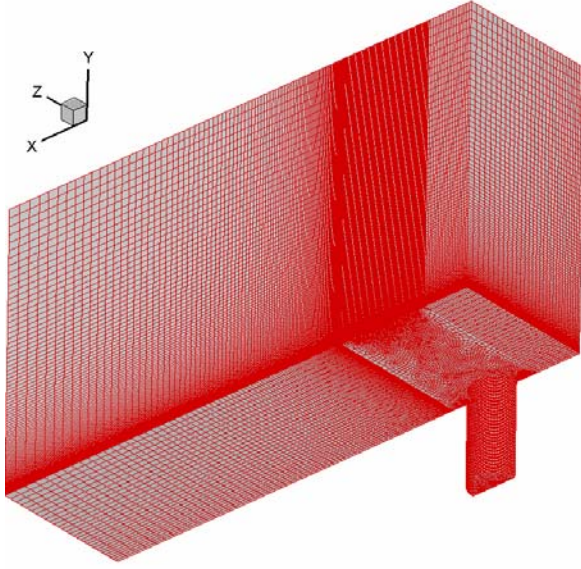


Şekil 2. Çalışma alanı boyutları ve koordinat sistemi.

Kanaldan serbest akmakta olan akışkan sağdan sola doğrudur. Jet ise +y yönünde aşağıdan yukarı doğru püskürtülmektedir. Çalışma alanı x, y ve z-yönlerinde $2 \leq x/D \leq 9$, $0 \leq y/D \leq 6$, $0 \leq z/D \leq 39$ ölçülerindedir. Burada D lüle çapını göstermekte olup değeri, $D=50$ mm’dir.

Başlangıç koşulu olarak kanal ve lüle girişleri hız girişi, kanal ve lüle akışlarının karşılaşır beraber kanalı terk ettikleri kanal çıkışı ise basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Bilgisayarın gereksiz yere işlem yapmaması ve daha kısa sürede sonuç almak amacıyla akış simetrik düşünülerek çalışma alanı yarıya bölünmüştür. Bölme işleminin yapıldığı yüzey için ise simetri özelliği kullanılmıştır. Ancak çapraz akıştaki jet akışlarının esasında simetrik olmadığı deneysel bir çalışma olan Referans [8]’de sunulmuştur. Bununla birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak jet akışlarının bir kanal içerisine püskürtülmesi durumlarının incelendiği çalışmalarda akışı simetrik olarak ele almak kolaylık ve hızlı sonuç alma açısından yapıla gelen bir kabuldür. Şekil 3’te de görüldüğü gibi, çalışma alanı dikdörtgenler prizması şeklinde küçük elemanlara bölünerek akışı modelleyen denklemlerin sonlu hacimler metodu ile ayrıştırılması ve çözdürülmesi sağlanmıştır. Serbest kanal akışı Şekil 2’ye göre sağdan sola yani (-x) yönünden (+x) yönüne, lüleden püskürtülen jet akışı ise (-y)’den (+y) yönüne doğrudur. x-yönünde 216, y-yönünde 100, z-yönünde ise 50 adet dikdörtgenler prizması şeklindeki elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3’den de görülebileceği üzere jet akışının sağlandığı lüle ile serbest kanal akışının

karşılaştığı ve bu iki akışkanın karışıp girdap yapılarının görülmeye başladığı bölgede daha sık elemanlar kullanılmıştır. Böylece hem karışımın önemli olduğu bölgede fazla, karışımın daha az önemli olduğu bölgelerde ise daha az eleman kullanılarak bilgisayar çözümünde ekonomiklik ve hızlı çözüm sağlanmıştır. Elemanların sıklıkları belli bir oran dâhilinde lüle ile serbest kanal akışının karşılaştığı bölgeye doğru sıklaştırılmıştır. Bu oran her üç yönde de 1.03 olarak tanımlanmıştır. Kullanılan elemanların sayısı kadar kalitesi de çözüm üzerinde etkilidir. Ağ üretiminde kullanılan elemanların kalitesinde en önemli faktör elemanların eğriliğidir. Bu çalışmada kullanılan elemanlar içerisinde maksimum eğriliğe sahip olan sonlu küçüklükteki hacimlerin sayısı yalnızca %0.01 olup eğrilik değeri 0.634'tür. Bu ise oldukça küçük bir değer olup kullanılan eleman kalitesinin yükseklğini ifade etmektedir.



Şekil 3. Çalışma alanına uygulanan ağ yapısı.

Bu çalışmada türbülans modeli olarak Reynolds gerilme modeli (RGM) [9, 10] kullanılmıştır. RGM türbülans gerilmelerini diferansiyel taşınım denklemleri yardımıyla çözen bir modeldir. Bu türbülans gerilmeleri ise daha sonra Reynolds ortalama momentum denklemindeki kapama için kullanılır. Reynolds gerilme modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) Reynolds gerilme tansöründen aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (1)$$

Reynolds gerilmelerinin hesaplanması için sınır koşulu olarak önce türbülans kinetik enerjisi denklemi çözdürülmüştür (Denk. 2). Bu denklem Standart k-ε türbülans modelindeki ile aynıdır.

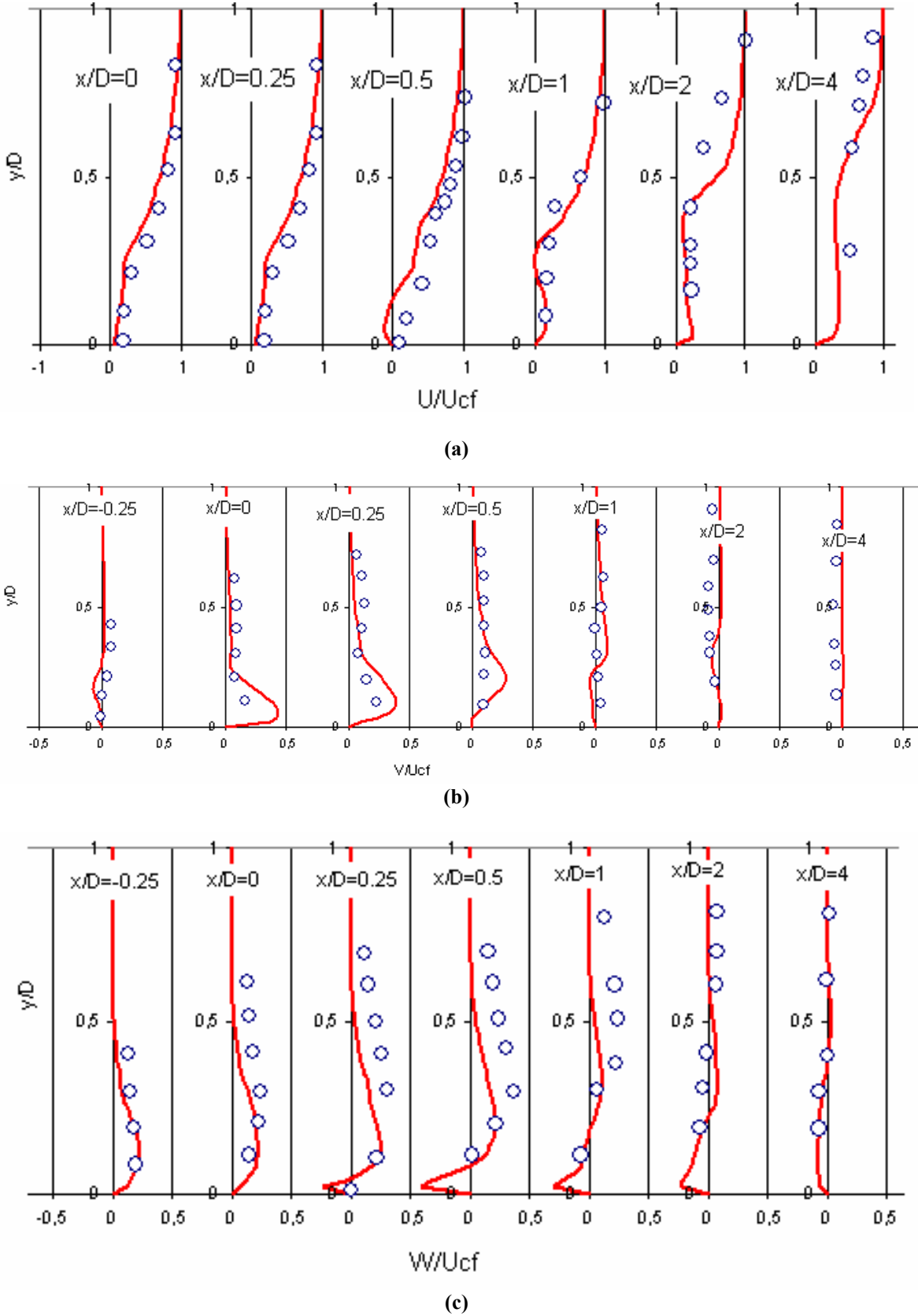
$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) \quad (2)$$

Çapraz akıştaki jet akışlarında en önemli karakteristikler lüleden püskürtülen jet hızının kanaldan serbest olarak akmakta olan çapraz akış hızına oranı olan R ve jet ve çapraz akışların Reynolds (Re) sayılarıdır. Bu çalışmada hızların oranı R=0.5 ve Re sayısı 20500'dür.

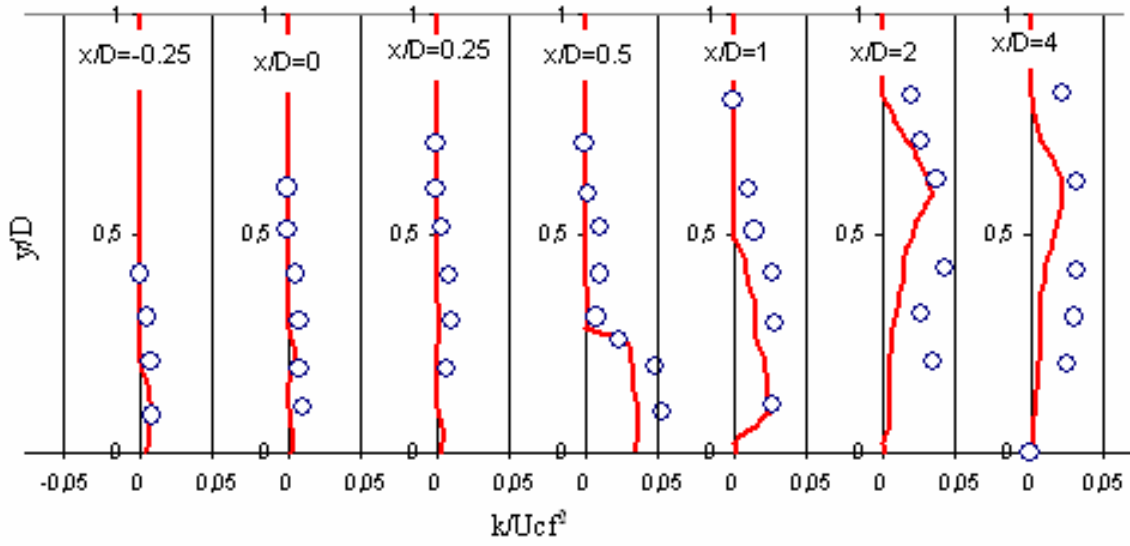
3. SONUÇLAR

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çapraz jetlerdeki girdap yapıları gösterilmiştir. Çalışmanın doğruluğu amacıyla literatürden elde edilen ve deneysel bir çalışma olan Andreopoulos ve Rodi [4]'nin deneysel verileriyle mukayese yapılmıştır. Şekil 4'te hızların x, y ve z-yönlerindeki değişimleri ve Şekil 5'te ise türbülans kinetik enerjilerinin deneysel sonuçlarla olan mukayeseleri verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere karşılaştırmalar lüleden önce başlayıp kanal çıkışına doğru yedi farklı istasyon için yapılmıştır. Deneysel veriler ile sayısal çalışmanın sonuçları arasındaki yakın uyum özellikle hızın x-yönündeki bileşeni ve türbülans kinetik enerji için oldukça dikkat çekicidir. Kanal çıkışına doğru aralarında belli bir fark oluşmakta ise de özellikle karışımın olduğu ilk istasyonlardaki benzerlik buradaki girdap yapılarının doğruluğunu ifade etmesi açısından memnuniyet vericidir. Kanal ve lüle giriş şartları olarak hız, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji kaybının uniform olarak tanımlanması deneysel sonuçlarla sayısal çalışma arasındaki farkların bir sebebi olarak düşünülebilir. Türbülans kinetik enerjisi ile hızın x-yönündeki bileşeni birbirleriyle ilişkili olduklarından Şekil 5'teki türbülans kinetik enerjilerinin mukayesesinde deneysel verilerle sayısal sonuçların yakınlığı sürpriz olmamalıdır.

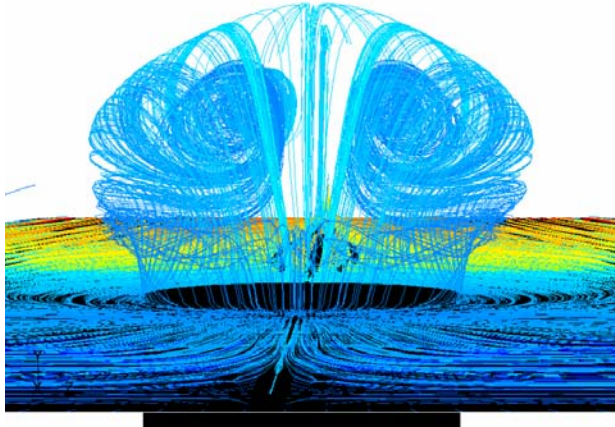
Şekil 6'da lüleden püskürtülen CO₂ gazının kanalda serbest olarak akmakta olan havaya karışımından dolayı oluşan girdap yapısı değişik bakış açılarından gösterilmiştir. Şekil 6a'da kanal girişinden kanal çıkışına doğru bakılarak oluşan girdap yapısının jetin arka kısmındaki görünüşü gösterilmiştir. Kanaldan akmakta olan serbest akış, silindirik bir cismin varlığıyla karşılaşmış gibi ayrılmış ve Şekil 6b'deki gibi jetten hemen sonra akışta tekrar birleşme olmuştur. Bu akış ayrılması at nalına benzer bir görünüme sahip olduğundan at nalı girdap olarak adlandırılır. Şekil 7a'da kanal serbest akışının ayrılması daha net olarak görülebilir. Bunun sebebi kanal serbest akışındaki sınır tabakanın jetin varlığından dolayı ayrılmasıdır. Şekil 7b'de lüleden hemen sonra (lüle çapının yaklaşık yarısı kadar sonra) iz girdabının varlığı kendini göstermektedir.



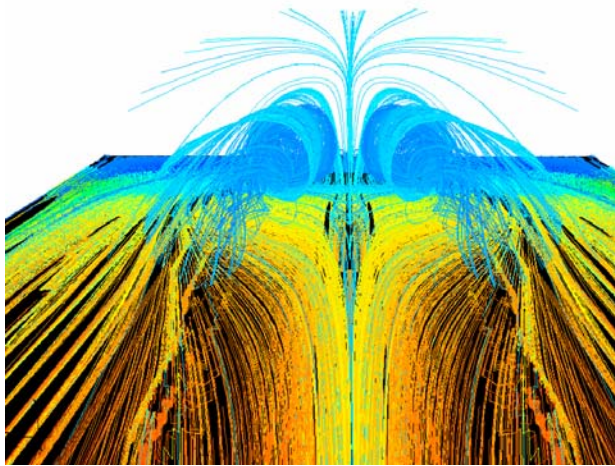
Şekil 4. Reynolds gerilme modeli ile deneysel çalışmanın [4] mukayesesi, a) Hızın x-yönündeki bileşeni, b) Hızın y-yönündeki bileşeni, c) Hızın z-yönündeki bileşeni, $z/D=0$, $R=0.5$, (o: deneysel sonuçlar, —: RGM sonuçları)



Şekil 5. Reynolds gerilme modeli ile deneysel çalışmanın [4] türbülans kinetik enerjilerinin mukayesesi, $z/D=0$, $R=0.5$, (o: deneysel sonuçlar, —: RGM sonuçları).

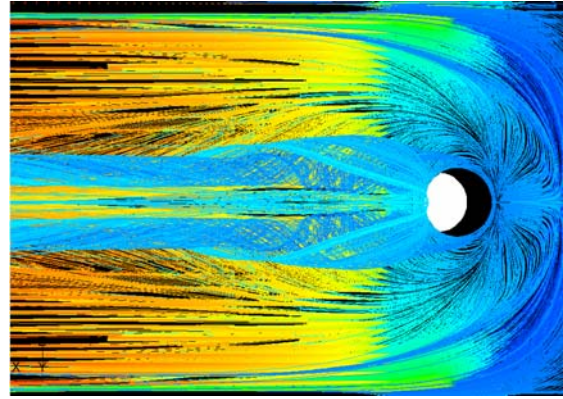


(a)

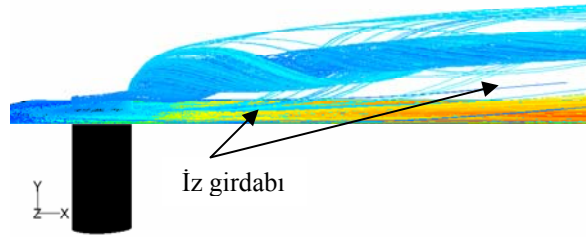


(b)

Şekil 6. Lüleden püskürtülen jet akışının kanal üzerinde akması. Arkadan (a), önden görüş (b).



(a)



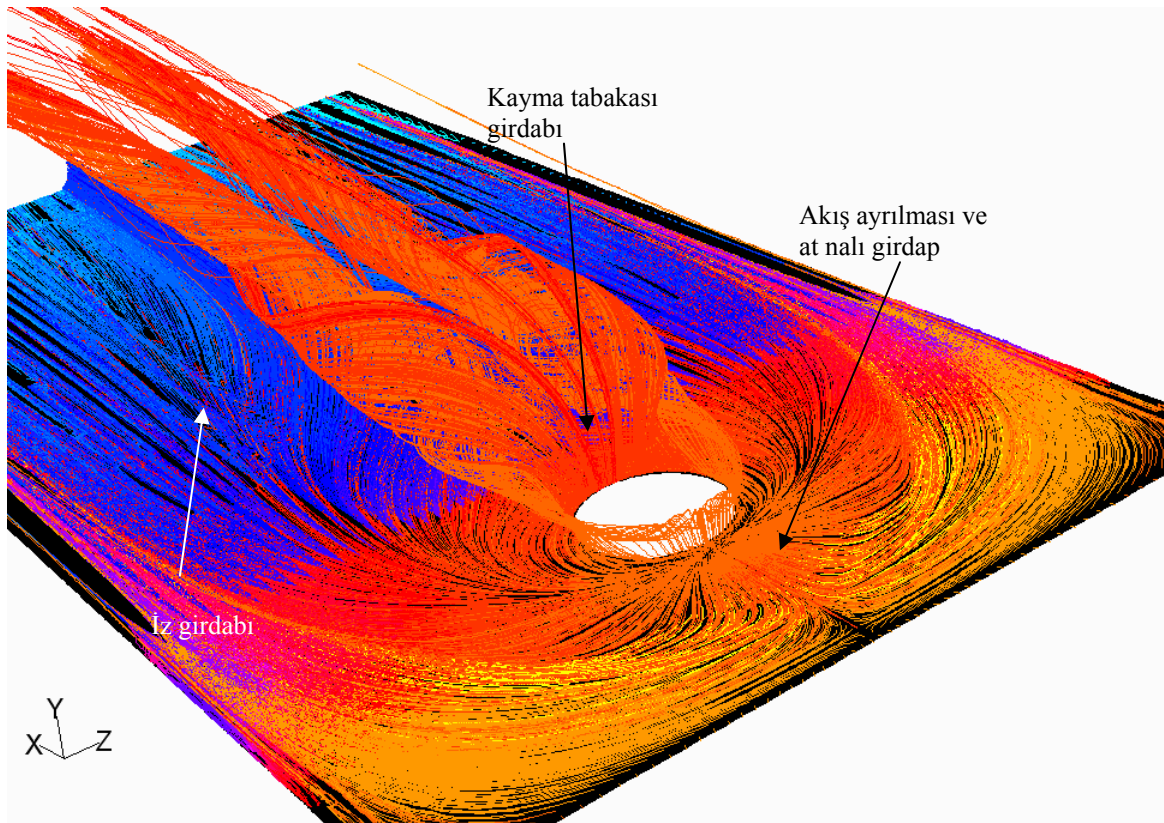
(b)

Şekil 7. Lüleden püskürtülen jet akışının kanal üzerinde akması. Üstten görünüş (a) ve yandan görünüş (b).

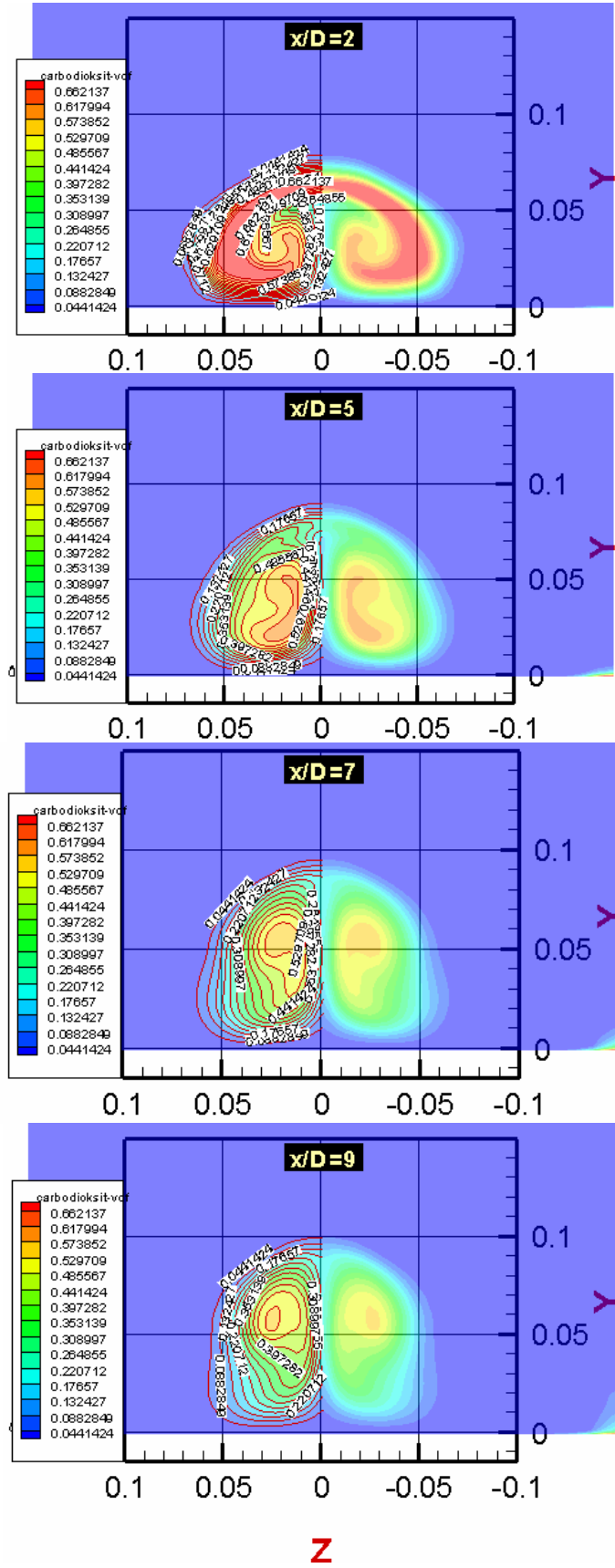
Bir başka görüşe göre zıt-dönüşlü girdap çifti değişik kayma tabakası girdaplarının akış yönünde taşınmasından kaynaklanmaktadır. Bir girdap halkası başka bir girdap halkasından hemen önce ve bir öncekinin de altında oluşmaktadır çünkü ilk oluşan girdap halkası akışla beraber akış yönünde taşınmaya devam etmektedir. Akış yönünde olmayan girdap

halkası ile akış yönündeki girdap halkası birbirlerine göre tamamen zıt vortisitelere sahiptirler ve zıt-dönümlü girdap çiftinin oluşmasına yol açarlar [11]. Şekil 7b'de görülen resimde lüleden sonra kanal alt çeperi ile bu lüleden püskürtülen jet akışının etkileşiminden kaynaklanan iz girdabı görülmektedir. Bu da aynı kayma tabakasında olduğu gibi bir silindirin arkasında oluşan bir Von Karman girdap caddesi olayıdır. Ancak Ref [11]'de farklı bir mekanizma önerilmiştir. Buna göre at nalı girdaptan ayrılan bazı girdap iplikçikleri lüleden çıkan jet tarafından yukarı doğru çekilmekte fakat kanalın alt çeperinden de ayrılamamaktadır. Bu durum Şekil 7b'de de görülmektedir. Bu ise Von Karman girdap caddesinden tamamen farklı bir oluşum biçimidir. Çapraz jetlerde görülen bu girdap yapılarının bilinmesi hem girdap yapılarını anlamaya hem de özellikle sınır tabaka ayrılması uygulamalarında önem arz eder çünkü ayrılmış bir sınır tabaka örneğin bir uçak kanadındaki taşıma kuvvetinde ve bir yayıcıda olduğu gibi basınç kaybına yol açar.

Bir çeperdeki kayma gerilmesi değeri sıfır olduğunda çeperdeki sınır tabaka ayrılacaktır ve bu olay akış yönünde bulunan çeperlerde momentum olmadığından kaçınılmaz olur. Kelso ve Smith [13]'e göre bu girdap türü jet hızının çapraz akış hızına oranı ve Reynolds sayısına da bağlı olmak üzere daimi, dalgalı olabilir. At nalı girdap bir kanal üzerinde monte edilmiş katı bir cisim etrafında akış olduğunda da çok rahatlıkla görülebilen bir girdap türüdür. Jetin serbest akış ile temas ettiği üst kısmında kayma tabakası girdabı denilen bir girdap türü daha meydana gelir. Bu en temel düzeyde jet ile serbest kanal akışkanlarının farklı hızlara sahip olmasından dolayıdır ve Kelvin-Helmholtz kararsızlığı olarak adlandırılır. Ancak Reynolds sayısının ve jet hızının çapraz akış hızına oranı ne kadar fazla ise bu girdap türünün yakalanması da o kadar kolay olur. Söz konusu bu girdap yapıları ve akış ayrılması Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 9'da zıt-dönümlü girdap çiftinin gelişimi 4 farklı istasyonda (lüle çıkışından kanal çıkışına doğru) kesitler alınarak gösterilmiştir. Her bir istasyona bakıldığında zıt-dönümlü girdap çiftinin böbrek kesidi gibi bir görüntüsü olduğu fark edilebilir.



Şekil 8. Çapraz jetlerde akış ayrılması, at nalı girdap ve jet akışının gelişimi.



Şekil 9. Zıt-dönümlü girdap çiftinin kanal çıkışına doğru gelişimi.

Bu görüntü özellikle $x/D=5$ 'e kadar belirgin olarak görülmektedir. Ancak bu noktadan sonra jetten çıkan akışkanı temsil eden CO_2 gazının konsantrasyonunda azalma saptanırken kanaldan akmakta olan hava ile karışım fazlalaşmaktadır. Yine istasyonlar sırasıyla izlendiğinde zıt-dönüslü girdap çiftinin lüleden $x/D=1$ kadar mesafeden itibaren daha güçlü fakat daha küçük ebatla olduğu ve kanal çıkışına doğru kanaldan çıkan akışkanın daha az yoğunluğa sahip olarak fazla alana yayıldığı gözlenebilir. Bu durum jetin bir tazyik odasından beslendiği ve bu tazyik odası ile serbest kanal akışının aynı yönlü olduğu durumlar için geçerli iken, tazyik odasına gönderilen akışkan ile serbest kanal akışının farklı olduğu durumlar için daha az olduğu Peterson ve Plesniak [6] tarafından da belirtilmiştir. Benzer bir sonuç Hale vd. [12] tarafından da ifade edilmiştir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki lüleden sağlanan jet akışının kanal tabanına daha yakın olarak akması özellikle film soğutma tekniğinde daha arzu edilen bir durumdur. Çünkü böylece lüleden püskürtülen soğuk akışkan adyabatik kanal alt çeperi üzerinde bir film tabakası oluşturarak sıcak çapraz kanal akışını çeperden uzak tutacaktır. Şekil 8'de net olarak görülen akış ayrılması, lüleden püskürtülen jet akışının serbest kanal akışı önünde bir engel gibi davranması nedeniyledir. Bu ise jet akışından meydana gelen zıt-dönüslü girdap çiftinin varlığından dolayıdır. Jete yakın bölgede sınır tabaka akışkanının ayrılıp jetten sonra toparlanması zıt-dönüslü girdap çiftinin sebebi olabilir. Şekil 9'da görülen at nalı girdap jetten hemen önce oluşmaya başlamış ve jetten sonra akışın bir araya gelmesiyle son bulmuştur. Kanaldan akmakta olan serbest akışın meydana getirdiği sınır tabaka jet akışı ile karşılaştığında sınır tabakada ters basınç gradyanına bağlı olarak ayrılma olur ve ayrılarak at nalı girdabı oluşturur.

4. SONUÇ

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak çapraz akıştaki jet akışlarında görülen girdap yapıları $R=0.5$ için Reynolds gerilme modeli yardımıyla gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar çapraz jetlerde görülen girdap yapılarından en baskın ve en önemlisi olan zıt-dönüslü girdap çiftinin böbrek kesidi şeklinde olduğunu göstermekte ve lüle girişinden kanal çıkışına doğru ilerlerken kesidinin ebat olarak büyüdüğünü ortaya koymuştur. Çalışmanın doğruluğu literatürden elde edilen deneysel bir çalışma ile hızların her üç yöndeki bileşenleri ve türbülans kinetik enerjisi için mukayese yapılarak gösterilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak elde edilen verilerin deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olması son zamanlarda gelişen bilgisayar ve hesaplama tekniklerinden yararlanılabileceğini de ortaya koyması açısından önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Devlet Planlama Teşkilatı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 25-DPT-06-02-01.

5. KAYNAKLAR

- [1] V. Mariotti, S. Camari, M.V. Savletti, B. Koobus, A. Dervieux, H. Guillard, S. Wornom. "Numerical Simulation of a jet in Crossflow Application to GRID Computing", INRIA Report No:5638, 2005.
- [2] Fric, T.F., Roshko, A., "Vertical Structures in the Wake of a Transverse Jet", J. Fluid Mechanics, Vol. 279, pp.1-47, 1994.
- [3] Kelso, R. M., Lim, T.T., Perry, A.E., "An Experimental Study of Round Jets in Crossflow", J. Fluid Mechanics, Vol. 306, pp.111-144, 1996.
- [4] Andreopoulos, J., Rodi, W., "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", J. Fluid Mechanics, Vol. 138, pp.93-127, 1984.
- [5] Rudman, M., "Simulation of the Near Field of a Jet in a Crossflow", Exp. Thermal and Fluid Flow, 12, 134-141, 1996.
- [6] Peterson, S.D., Plesniak, M.W., "Short-Hole Jet-in Crossflow Velocity Field and Its Relationship to Film Cooling Performance", Experiments in Fluids 33, 889-898, 2002.
- [7] Ni, W., "Numerical Prediction of the Statistical Properties of Heated Turbulent Air Jets in a Crossflow", PhD Thesis, University of Toronto, 1994.
- [8] Camussi, R., Guj, G., Stella, A., "Experimental Study of a Jet in a Crossflow at a Very Low Reynolds Number", J. Fluid Mechanics, Vol. 454, pp.113-144, 2002.
- [9] Gibson, M.M., Launder, B.E., "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer", J. Fluid Mechanics, Vol.86, pp.491-511, 1978.
- [10] Launder, B.E., "Second-Moment Closure: Present and Future?", Int. J. Heat and Fluid Flow, 10(4):282-300, 1989.
- [11] T.F. Fric, "Structure Near Field of the Transverse Jet", PhD Thesis, California Institute of Technology, 1990.
- [12] Hale, C. A., Plesniak, M. W., Ramadhyani, S. "Structural Features and Surface Heat Transfer Associated with a Row of Shot-Hole Jets in Crossflow", International Journal of Heat and Fluid Flow 21, 542-553, 2000.
- [13] Kelso, R.M., T. T. Lim., A.E. Perry, "An Experimental Study of a Round Jet in a Cross-Flow", J. Fluid Mechanics, Vol. 306, 1996.

ÖZGEÇMİŞLER

Doç. Dr. Tamer YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği bölümünden 1991 yılında

BAYRAKTAR, YILMAZ

lisans, 1993 yılında ise yüksek lisans derecelerini alarak mezun oldu. Doktorasını İTÜ, Uçak Mühendisliği Bölümünde 1998 Yılında tamamladı, Halen Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi Olarak çalışmaktadır.

Arş. Gör. Seyfettin BAYRAKTAR

Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği bölümünden 1998 yılında lisans, 2001 yılında ise yüksek lisans derecelerini alarak mezun oldu. Yüksek lisans çalışması olarak borulardaki engel ve oyukların akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini inceledi. Halen aynı bölümde doktora eğitimine devam etmekte olan yazar evli ve bir çocuk babasıdır.