

İKİ BOYUTLU PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZÖLÇER VERİLERİNDEN BASINÇ ALANI TAHMİNİ

Erkan GÜNAYDINOĞLU^{1 2}
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara¹
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara²

D. Funda KURTULUŞ³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Mevcut çalışmanın amacı iki boyutlu Parçacık Görüntülemeli Hızölçer (PGH) ile elde edilen hız vektörleri kullanılarak temassız bir basınç alanı ölçüm tekniği geliştirmektir. Sıkıştırılamaz akış alanları vektörel bir hız alanı ve skalar bir basınç alanı ile ifade edilmektedir. Çalışmada PGH ile elde edilen hız alanlarının, Poisson denkleminin yerleştirilmesi ile ilgili basınç alanlarının hesaplanmasına dayanan yöntemin detayları verilmektedir. Bu yöntemin, model enstürmantasyonunun zor olduğu karmaşık akışlar için faydalı olacağı öngörülmektedir. Poisson denkleminin çözümü ile elde edilen basınç alanları analitik akış alanları ile doğrulanmış ve yöntemin PGH verileri üzerinde uygulanmasına dair detaylar anlatılmıştır.

GİRİŞ

Basınç ölçümleri için kullanılan teknikler genellikle akış alanına müdahale eden, ortalama değerleri veren ve noktasal ölçüm yapabilen basınç problemlerine dayanmaktadır. Son zamanlarda temassız, zamana bağlı, global bir basınç ölçüm tekniği geliştirmek üzerinde yoğun çaba harcanmaktadır. Zamana bağlı ölçümler, basınç transdüserleri ile yüksek çözünürlükte elde edilebilmekte; fakat bu yöntem noktasal veriler ile kısıtlı kalmaktadır. Aynı şekilde yüzeyler üzerindeki basınç alanları basınca duyarlı boyalar ile elde edilebilmekte; fakat bu yöntem de zamana bağlı basınç ölçümü konusunda eksik kalmaktadır. Özetle zamana bağlı, temassız ve global bir basınç alanı ölçümü mevcut geleneksel teknikler ile elde edilememektedir.

Akışkan içerisine batırılan yüzeyler üzerindeki basınç alanları sistemler üzerindeki ilgili kuvvetlerin tahmin edilmesi açısından uygulamalı akışkanlar mekaniği çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Aerodinamik gövdeler üzerindeki sürüklenme kuvvetini ölçmek için kullanılan iz bölgesi tarama (wake-traverse) yöntemi bu çalışmaların en bilinen örneklerinden biridir. Bu yöntemde Navier-Stokes denklemlerinin integral hali kullanılarak aerodinamik yüzey üzerindeki sürüklenme kuvveti hesaplanabilmektedir. Basınç problemlerinin temel çalışma prensibi mevcut çalışmanın amacıyla benzer bir tavır göstermektedir. Basınç problemleri ile ölçülen basınç değerleri korunum denklemlerine - Bernoulli denklemlerine- yerleştirilip hız değeri tahmin edilmekteyken, mevcut yöntemde parçacık görüntülemeli hızölçer deneylerinde elde edilen hız vektörlerinden basınç değerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

¹ Doktora Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: erkan.gunaydinoglu@metu.edu.tr

² Öğretim Görevlisi, Pilotaj Böl., E-posta: egunaydinoglu@thk.edu.tr

³ Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: dfunda@ae.metu.edu.tr

Hız alanlarından basınç alanı tahmini konusu üzerindeki ilk çalışmalar, analitik formülasyon türetme üzerine yoğunlaşmıştır. Noca ve diğerleri [Noca vd., 1999] tarafından basınç bilgisi olmadan sadece hız alanları ile aerodinamik yüzeyler üzerindeki sürüklenme kuvvetinin hesaplanması için farklı integral formülleri türetilmiştir. İmpuls denklemi, momentum denklemi ve akı denklemi olarak adlandırdıkları üç farklı formülasyon ile salınan bir silindir üzerindeki kaldırma kuvveti hesabında miligram mertebesinde doğruluk yakalanmıştır. Kullanılan ilk iki formülasyonda hız alanının ve türevlerinin hacim integrali kullanılmakta iken akı formülasyonunda kanat yüzeyinin hızının bilinmesi gerekmektedir. Bahsi geçen analitik yöntemin yanı sıra kamera ve lazer teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, araştırmacıları parçacık görüntülemeli hızölçer sistemleri ile elde edilen yüksek frekanslı ve kesinlikli hız ölçümünlerini basınç tahmini için kullanma konusuna yönlendirmiştir. Bu bağlamda Kurtuluş ve diğerleri [Kurtuluş vd., 2007] zaman çözünürlüklü parçacık görüntülemeli hızölçer deneyleri ile elde ettikleri hız alanından kare prizma üzerindeki zamana bağlı kuvvetleri tahmin etmiştir. Akış alanı içinde Navier-Stokes denkleminin integral halini kullanmışlardır. Viskoz kuvvetlerin baskın olduğu sınırlarda Navier-Stokes denklemi entegre edilirken, viskoz kuvvetlerin etkili olmadığı düşünülen bölgelerde basınç sınır koşulu olarak Bernoulli denkleminde elde edilen değerler kullanılmıştır.

Parçacık görüntülemeli hızölçer verilerinden basınç alanı elde edilmesinde iki temel yöntem öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerin ilkinde Navier-Stokes denkleminde basınç gradyanı yalnız bırakılmakta ve denklemin diğer tarafında kalan maddesel ivme ve viskoz terimler hesaplanmaktadır. Maddesel türev, Lagrange ve Euler yaklaşımı olarak iki farklı şekilde hesaplanabilmektedir. Lagrange yaklaşımı ile parçacıkların hızlarından maddesel türeve ulaşılmaktadır. Bu yaklaşım genellikle parçacık izlemeli hızölçer sistemlerinde veya çarpıştırıcılarda kullanılmaktadır [La Porta vd., 2001]. Euler yaklaşımı ile sabit referans düzlemde maddesel türev uygulanmaktadır. İki farklı zamanda elde edilen hız alanlarından, her nokta için toplam türev hesaplanmaktadır. Kähler ve diğerleri [Kähler vd., 2000] hız alanlarını elde etmek için çift parçacık görüntülemeli hızölçer sistemi kullanmıştır. Aynı bölgeye odaklanan iki sistemin arasındaki zaman farkından aynı bölgedeki ivme ölçülebilmektedir. Farklı iki çalışmada ise [Liu vd., 2003] [Jakobsen vd., 1997] çoklu kamera ve lazer sistemleri ile aynı alan üzerinde üçten fazla görüntü yakalanmış ve bu şekilde elde edilen gecikmeli iki hız alanından maddesel türev hesaplanmıştır. Maddesel türev hesaplandıktan sonra basınç gradyanının akış alanı üzerinde entegre edilmesi sonrasında basınç alanı elde edilmektedir. Liu ve diğerleri [Liu vd., 2003] bu yöntem ile bir oyuk içindeki basınç alanını hesaplamıştır. Van Oudheuden ve diğerleri [van Oudheuden vd., 2008] yüksek Reynolds sayılarında viskoz terimin basınç tahmini için ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Ortalama Reynolds sayılarında (~9500) dahi viskoz terimin, maddesel türevden iki mertebe düşük olduğu belirtilmiştir. Basınç skalar bir büyüklük olduğu için entegrasyon yönü önemli olmamakla birlikte her entegrasyon sonrası ölçüm hatalarının basınç tahmini üzerindeki etkisi artmaktadır. Dabiri ve diğerleri [Dabiri vd., 2014] sadece ölçüm noktalarından geçen ve her nokta için sekiz yönden entegrasyon yapan yöntemi tanımlamış ve düşük hatalı basınç alanı tahmini yapılabileceğini göstermişlerdir.

Parçacık görüntülemeli hızölçer verilerinden basınç elde etmek için kullanılan bir diğer yöntem ise momentum korunum denkleminin diverjansını alıp basınç için Poisson denklemi elde etmektir. Mevcut çalışmada da kullanılan bu yöntemde iki boyutlu akış alanı için basıncın ikinci türevi hız alanına eşit olmaktadır. Bu yöntem ile Gurka ve diğerleri [Gurka vd., 1999] duvara vuran jet akışı için basınç dağılımını elde etmiştir. Bu yöntemde önemli bir nokta basınç sınır koşullarının tanımlanması noktasında ortaya çıkmaktadır. Fiziksel olarak kestirilemeyen durumlarda basınç sınır koşullarının yanlış tanımlanması çözüm üzerinde yüksek hatalara neden olabilmektedir.

Bu çalışma PGH ile elde edilen hız alanlarının basınç tahminleri için kullanılabilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır. Çalışmada belirtilen yöntem, takiben ODTÜ Havacılık ve Uzay Bölümü'nde oluşturulan deneysel ve sayısal zamana bağlı aerodinamik veritabanı üzerinde uygulanacaktır [Akay vd., 2007; Durmaz vd., 2013; Günaydinoğlu, 2009; Hızlı vd., 2011; Kurtuluş, 2005; Kurtuluş vd., 2005, 2006, 2015, 2016]. Konu üzerindeki güncel literatür van Oudhedsen [van Oudhedsen, 2013] ve Charonko ve diğerleri [Charonko, 2010] tarafından detaylı olarak derlenmiştir.

YÖNTEM

İki boyutlu, sıkıştırılamaz akış alanları için momentum denkleminin diverjansı Poisson denklemini vermektedir. Kartezyen koordinatlarda Poisson denklemi aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\rho \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

Navier-Stokes denklemindeki zamana bağlı terimler ve viskoz terimler Poisson formülasyonunda yok olmaktadır; fakat basınç tahmini için bu bilgilerin sınır koşullarında temin edilmeleri gerekmektedir. Diğer yandan bu yöntem ile basınç tahmini yaparken akış alanının sınırların ya basınç değerleri (Dirichlet Sınır Koşulu) ya da basınç gradyanının değeri (Neumann Sınır Koşulu) verilmelidir. Poisson denklemi eliptik tipte bir parçalı diferansiyel denklemdir ve iki boyutlu eşit aralıklı yapısal bir çözüm ağında aşağıda verilen ayrık formda bulunmaktadır:

İki boyutlu, sıkıştırılamaz akış alanları için momentum denkleminin diverjansı Poisson denklemini vermektedir. Kartezyen koordinatlarda Poisson denklemi aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$(\nabla^2 p)_{ij} = \frac{1}{\Delta x^2} (p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j-1} + p_{i,j+1} - 4p_{i,j}) = f_{ij} \quad (2)$$

Denklemin sağında bulunan kaynak terimi PGH ölçümlerinde elde edilen aşağıdaki ifadedir:

$$f_{ij} = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

Bu şekilde yapısal eşit aralıklı çözüm alanında problem doğrusal cebirsel bir denklem setine dönüşmektedir ve herhangi bir iteratif metot ile rahatlıkla çözülebilir. Herhangi bir $x_{i,j}$ noktasındaki basınç değeri aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir:

$$p_{i,j} = \frac{1}{4\Delta x^2} (p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j-1} + p_{i,j+1} - f_{ij}) \quad (4)$$

DOĞRULAMA

Yöntem Navier-Stokes denklemlerinin analitik çözümleri ile doğrulanmıştır. Taylor-Green girdabının özel bir formu olan Taylor'ın "Dört Silindir Akışı" [Taylor, 1934] üzerinde elde edilen çözücünün performansı değerlendirilmiştir. Taylor-Green girdap bozunması en genel hali ile aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$u_x(x, y) = u_0 \sin(x) \cos(y) \exp(-2\nu t) \quad (4)$$

$$u_y(x, y) = u_0 \cos(x) \cos(y) \exp(-2\nu t) \quad (5)$$

$$p(x, y) = p_0 + 0.25\rho (\cos(2x) - \cos(2y)) \exp(-2\nu t) \quad (6)$$

Dört Silindir akışı zamana bağlı Taylor-Green girdap bozunmasının aşağıda verilen kuvvetler uygulandığında elde edilen zamandan bağımsız çözümüdür. Zamandan bağımsız çözüm elde etmek için uygulanması gereken kuvvetler aşağıda verilmiştir:

$$F_x = 2\nu \sin(x) \sin(y) \quad (7)$$

$$F_y = 2\nu \sin(x) \sin(y) \quad (8)$$

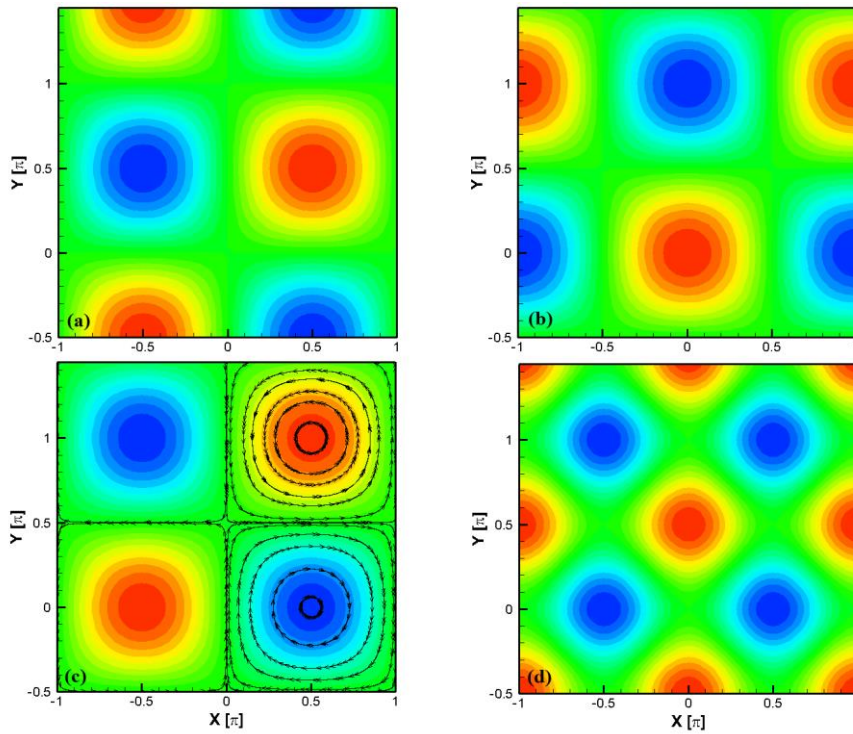
Yukarıda verilen kuvvetler uygulandıktan sonra elde edilen girdap dağılımı Taylor-Green girdabı ile benzer formülasyonda zamandan bağımsız olacaktır. Elde edilen akış aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$u_x(x, y) = u_0 \sin(x) \sin(y) \quad (9)$$

$$u_y(x, y) = u_0 \cos(x) \cos(y) \quad (10)$$

$$p(x, y) = p_0 + 0.25\rho u_0^2 (\cos(2x) - \cos(2y)) \quad (11)$$

Dört Silindir akışına ait hız ve girdap alanları Şekil 1'de verilmiştir. Mevcut yöntem ile elde edilen basınç alanı da Şekil 1'de gösterilmiş ve analitik çözüm ile arasında maksimum 10^{-5} göreceli hata yakalanmıştır. Bu durumda tüm sınırlarda simetri sınır koşulu kullanılmıştır. Gösterilen tüm değişkenlerin büyüklükleri kendilerine ait maksimum değer ile normalize edilmiştir.



Şekil 1: Dört Silindir akışı için birimsiz (a) x hız alanı, (b) y hız alanı, (c) girdap alanı ve (d) hesaplanan basınç alanı. Tüm parametreler $[-1, 1]$ aralığındadır.

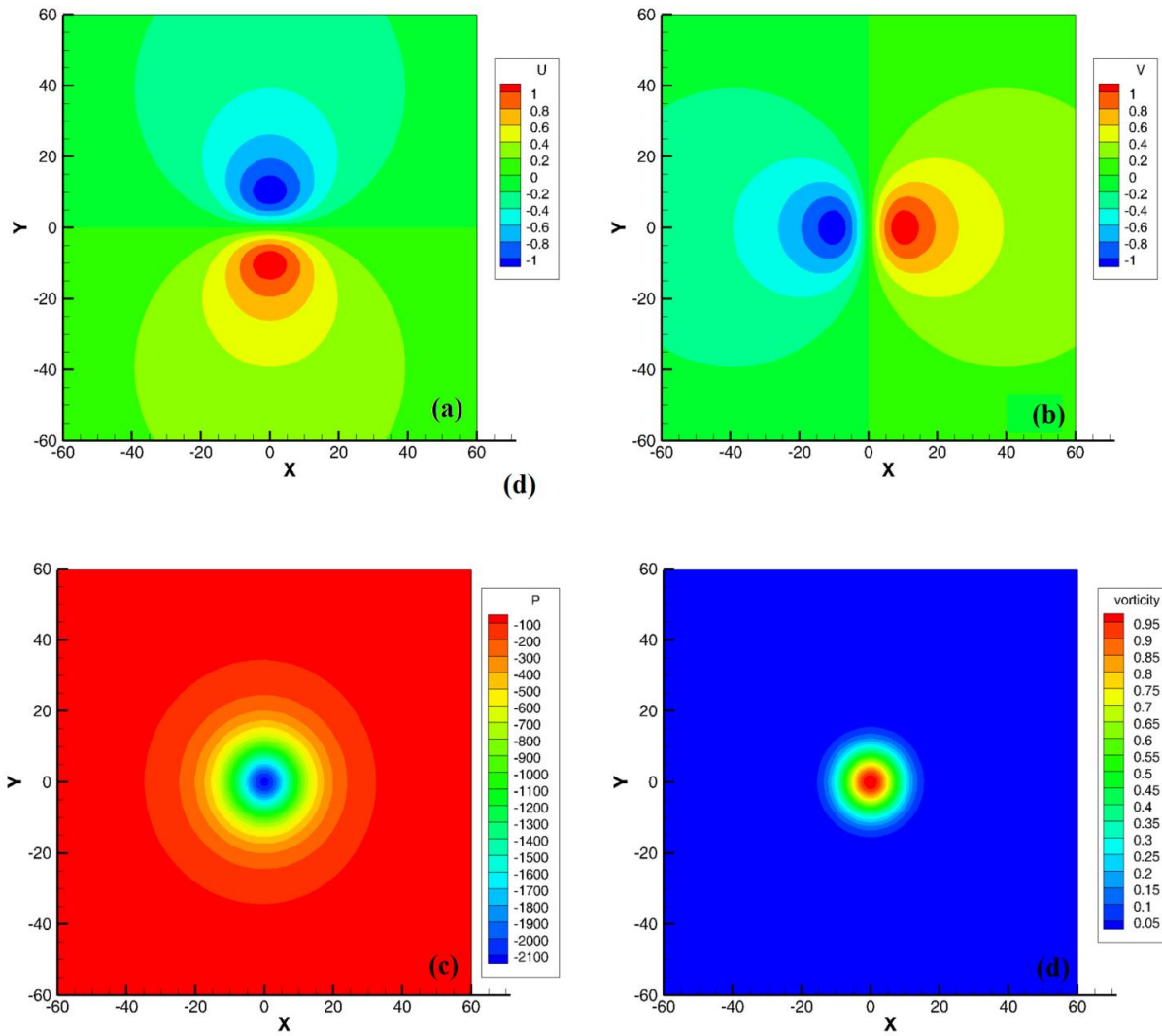
Mevcut yöntemin dört silindir akışı dışında literatürde sıklıkla kullanılan farklı akışlar ile de test edilmesi için de Kat ve diğerleri [de Kat, 2012] tarafından kullanılan çöken Taylor girdabı akışı kullanılmıştır. Çöken Taylor girdabı için teğet hız ve analitik basınç alanı Denklem (12) ve (13)'te verilmiştir:

$$V_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{c_{\theta}}} \right) \quad (12)$$

$$p = -\frac{1}{2} \rho V_{\theta}^2 - \frac{\rho \Gamma^2}{4\pi^2 c_{\theta}} \left(E_1 \left(\frac{r^2}{c_{\theta}} \right) - E_1 \left(\frac{2r^2}{c_{\theta}} \right) \right) \quad (13)$$

Denklem (12)'de kullanılan Γ sirkülasyonu, $c_{\theta} = r_c^2/\gamma$ ve $\gamma = 1.256431$ maksimum hızı girdabın merkezine yerleştirmek için kullanılan sabittir. Minimum basınç $\lim_{r \rightarrow 0} p = -\rho \Gamma^2 \ln 2 / (4\pi^2 c_{\theta})$ şeklinde verilmektedir. E_1 üstel integrali ifade etmekte ve Denklem (14)'te verildiği şekilde tanımlanmıştır:

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (14)$$



Şekil 2: Gauss girdabı üzerinde basınç tahmini. (a) x- hızı dağılımı, (b) y-hızı dağılımı, (c) tahmin edilen basınç alanı ve (d) girdaplılık dağılımı

DENEYSEL UYGULAMA

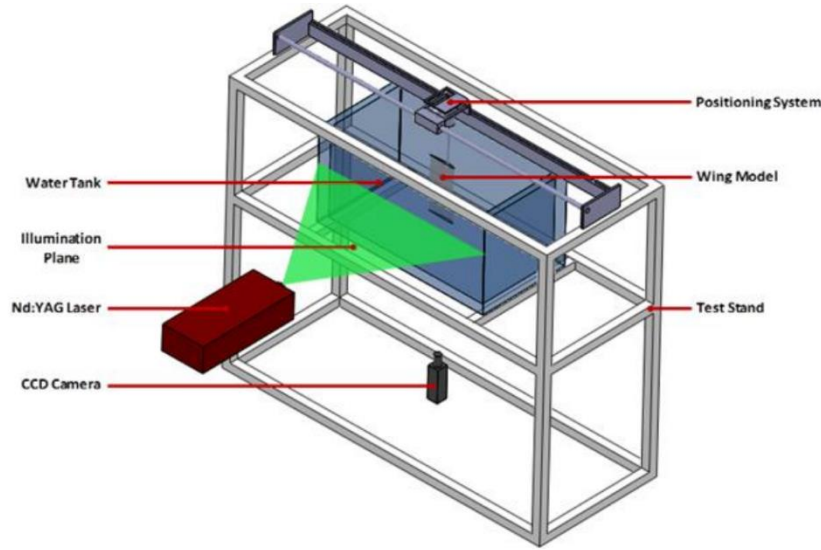
Çalışmada belirtilen yöntemi, Reynolds sayısı 751 ve indirgenmiş frekansı $k=1.2$ olacak şekilde yunuslama yapmadan çırpan NACA 0012 kanat kesiti üzerinde yapılan iki boyutlu parçacık görüntülemeli hızölçer ölçümleri üzerinde test edilmiştir [Hızlı, 2012]. Parçacık görüntülemeli hızölçer deneyleri için 100 mm uzunluğunda pleksiglas NACA 0012 profil kanat kullanılmış, iki boyutlu ölçümler kanat açıklığının ortasından alınmıştır. Kanat, su tankı içinde çeyrek vetere konumlu step motoru ile dijital olarak kontrol edilmiştir. Reynolds sayısı ve indirgenmiş frekans, hücum kenarının maksimum hızı referans alarak tanımlanmıştır.

$$Re = \frac{U_{ref} c}{\nu} \quad (15)$$

$$k = \frac{\omega c}{2U_{ref}} \quad (16)$$

$$U_{ref} = \max \left(\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \right) \quad (17)$$

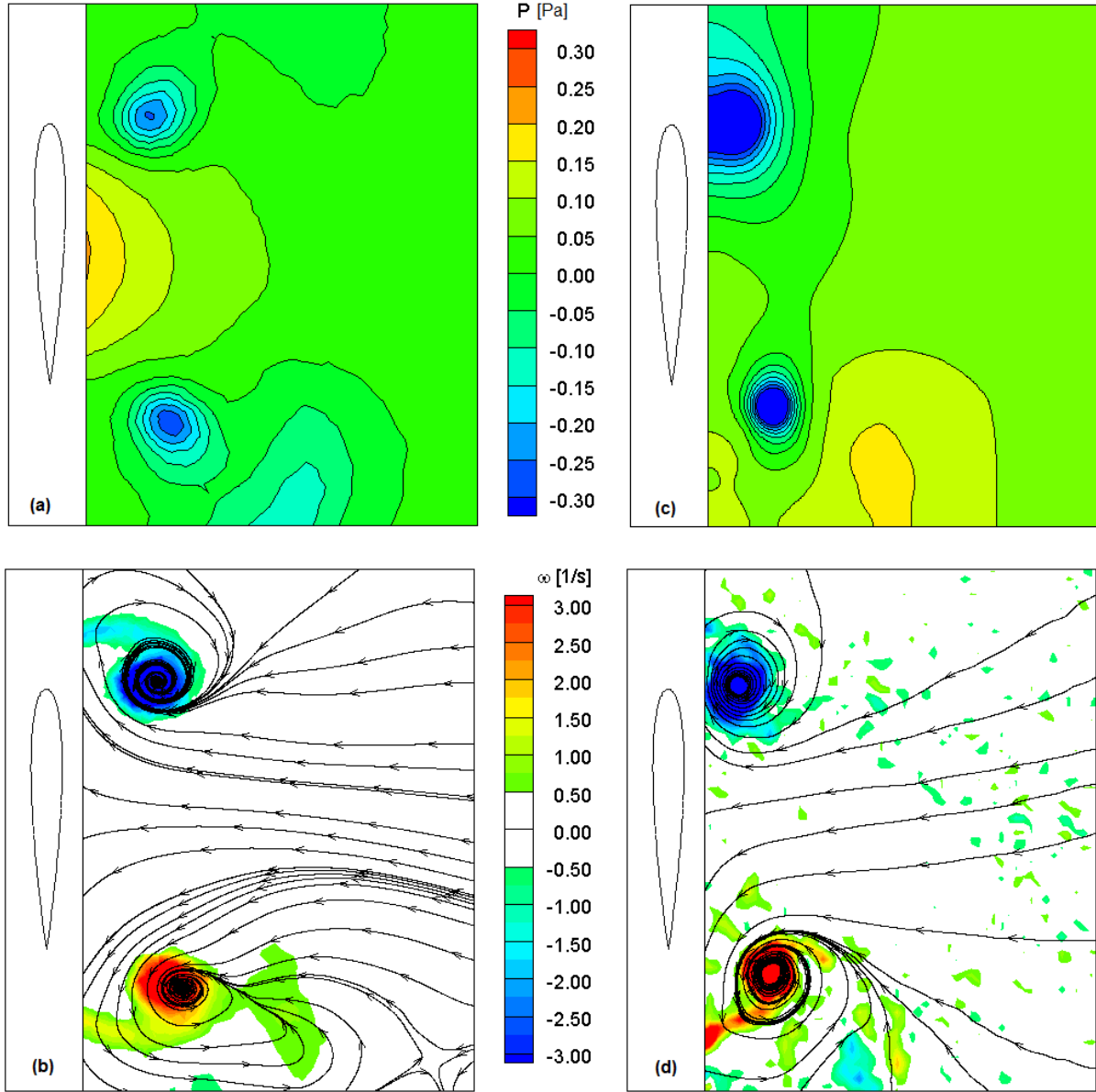
Aynı akış koşullarında HAD çözümleri iki boyutlu laminar Navier-Stokes denklemlerinin düzenli ağ yapısı üzerinde çözülmesi ile elde edilmiştir. Su tankı deneyleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözümlerinin detayları Hızlı'nın çalışmasında bulunabilir [Hızlı, 2012].



Şekil 3: Çırpan kanat üzerindeki akışın elde edilmesi için kullanılan deneysel düzenek [Hızlı, 2012]

Reynolds sayısının 751, indirgenmiş frekansın $k=1.2$ olduğu akış koşulunda ölçülen girdaplılık dağılımı Şekil 3d'de verilmiştir. Bu akış alanı 200x200 lük bir alan üzerinde interpolate edilmiş ve mevcut yöntem ile Şekil 3c'de verilen basınç alanı kestirilmiştir. Çözümde sıfırıncı Neumann sınır koşulu kullanılmış ve çözüm alanının sağ üst köşesindeki basınç değeri sıfır olarak verilmiştir. Mevcut yöntem ile kestirilen basınç alanının doğruluğunu değerlendirebilmek için yakın koşullarda HAD çözümü elde edilmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b'de sırasıyla HAD çözümü ile elde edilen basınç ve girdaplılık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3b ve 3d karşılaştırıldığında deneysel sonuçlarda elde edilen hücum kenarı ve firar kenarı girdaplarının HAD çözümünde elde edilen girdaplardan daha güçlü olduğu görülmektedir. Bu fark Şekil 3a ve 3b'de verilen basınç dağılımları üzerinde de

görülmektedir. Deneyel sonuçlarda elde edilen güçlü girdap yapıları daha yoğun bir düşük basınç alanı oluşturmakta dolayısıyla tahmin edilen basınç alanlarında ortaya çıkan dağılım çizgileri daha hızlı bir şekilde sıklaşmaktadır. Deneyel sonuçlarda elde edilen hücum kenarı girdabının merkezi HAD çözümünde elde edilen girdap merkezi ile karşılaştırıldığında, deney koşulunda elde edilen hücum kenarı girdabının kanadın hücum kenarına daha yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3c'de bulunan basınç dağılımı incelendiğinde Şekil 3d'de akım çizgilerinin işaret etki girdap merkezi noktasında minimum basınç değeri elde edildiği görülmektedir. Şekil 3b'de verilen HAD çözümünde firar kenarı girdabının hemen arkasında düşük yoğunlukta bir girdaplılık görülmektedir. Bu bölgenin Şekil 3a'da görüldüğü üzere düşük bir basınç bölgesi oluşturmaktadır.



Şekil 4: $Re=751$ ve $k=1.2$ koşullarında salınan NACA 0012 profili arkasında (a) HAD çözümü ile elde edilen basınç alanı ve (b) girdaplılık alanı. Yakın koşullarda yapılan deney sonucunda (c) elde edilen hız verilerinden tahmin edilen basınç alanı ve (d) ölçülen girdaplılık alanı.

SONUÇ

Çalışmada parçacık görüntülemeli hızölçer deneylerinde elde edilen iki boyutlu hız alanları kullanılarak iki boyutlu basınç alanı kestirimi için kullanılabilecek bir yöntem tanımlanmıştır. İki boyutlu, sıkıştırılamaz akış alanı için momentum denkleminin dıvejansı, basınç için Poisson denklemi halini almaktadır. Denklemin sağında kalan terimler, parçacık görüntülemeli hızölçer deneylerinden elde edilen hız değerleridir ve Poisson denkleminde kaynak terim olmaktadır. Bu şekilde basınç Poisson denklemi eşit aralıklı yapısal bir ağ üzerinde uygun sınır koşulları ile çözülmüştür. Çalışmada ifade edilen yöntem analitik çözümü olan Gauss girdabı ve “dört silindir akışı” ile doğrulanmıştır. Sonrasında mevcut yöntem ile çırpın NACA 0012 profili çevresindeki iki boyutlu parçacık görüntülemeli hızölçer deneyi sonuçları üzerinde basınç alanı kestirimi yapılmıştır. Tahmin edilen basınç alanı, ölçülen girdap alanı ile tutarlılık göstermektedir. Deneyisel değerler ile elde edilen basınç alanının nicel değerlendirmesi için yakın koşullarda HAD çözümü alınmış ve benzer basınç alanları bulunmuştur. Mevcut yöntem, farklı akışlar için uygun sınır koşullarının tanımlanması ile iki boyutlu parçacık görüntülemeli hızölçer verilerinden basınç kestirimi için kullanılabilecektir.

Kaynaklar

- Akay, B., Kurtuluş, D.F. & Alemdaroğlu, N., 2007, *Unsteady Aerodynamics of Different Wing Profiles at Low Reynolds Number*, RTO-MP-AVT-146, NATO AVT-146 Symposium on Platform Innovations and System Integration for Unmanned Air, Land and Sea Vehicles, 14-17 May 2007, Florence, Italy
- Auteri, F., Carini, M., Zagaglia, D., Montagnani, D., Gibertini, G. & Merz, C., 2015, *A novel approach for reconstructing pressure from PIV velocity measurements*, Experiments in Fluids.
- Charonko, J., King, C., Smith, B., & Vlachos, P. 2010. *Assessment of pressure field calculations from particle image velocimetry measurements*. Meas Sci Technol, 21, 105401.
- Dabiri, J.O., Bose, S., Gemmell, B.J., Colin, S.P. & Costello, J.H., 2014, *An algorithm to estimate unsteady and quasi-steady pressure fields from velocity field measurements*, The Journal of Experimental Biology, 7, 331-336
- de Kat, R., & van Oudheusden, B. ,2012, *Instantaneous planar pressure determination from PIV in turbulent flow*, Exp. Fluids, 52, 1089–1106.
- Durmaz, O., Karaca, H.D., Ozen, G.D., Kasnaoğlu, C. & Kurtuluş, D.F., 2013, *Dynamical Modeling of the Flow over a Flapping Wing using Proper Orthogonal Decomposition and System Identification Techniques*, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Volume 19, Issue 2, pp.133-158
- Günaydinoğlu, E. & Kurtuluş, D.F., 2009, *Numerical investigation of pure plunge and pitch/plunge motions at low Re numbe*, Proceeding of International Symposium on Light Weight Unmanned Aerial Vehicle Systems and Subsystems, UAS LW 2009, Oostend Belgium, 11-13 March 2009
- Gurka, R., Liberzon, A., Hefetz, D., Rubinstein, D., & Shavit, U., 1999, *Computation of pressure distribution using PIV velocity data*, 3rd Int. Workshop on Particle Image Velocimetry, (s. 671-676). Santa Barbara.
- Hızlı, H. & Kurtuluş, D.F., 2011, *Experimental and Numerical Investigation of Pitching Airfoils in Hover*, AIAC-2011-010, 6th Ankara International Aerospace Conference, 14-16 September 2011, Ankara, Turkey
- Hızlı, H. & Kurtuluş, D. F., 2012, *Numerical and Experimental Analysis of Purely Pitching and Purely Plunging Airfoils in Hover*, International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition, 03-06 July 2012 – Braunschweig, Germany
- Jakobsen, M., Dewhurst, T., & Greated, C., 1997, *Particle Image Velocimetry for predictions of acceleration fields and forces within fluid flow*, Meas. Sci. Technol., 8, 1502-1516.
- Kähler, C. & Kompenhans, J., 2000, *Fundamentals of multiple plane stereo PIV*, Exp. Fluids, 29, 70-77.

- Kurtuluş, D.F., Farcy, A., & Alemdaroğlu, N., 2004, *Numerical Calculation and Analytical Modelization of Flapping Motion*. Proceeding of 1st European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition. Braunschweig, Germany, 13-14 July 2004
- Kurtuluş, D.F., 2005, *Numerical and Experimental Analysis of Flapping Motion in Hover. Application to Micro Air Vehicles*, Ph.D Thesis Poitiers University/ENSMA (Poitiers-France) and METU (Ankara-Turkey)
- Kurtuluş, D.F., Farcy, A. & Alemdaroğlu, N., 2005, *Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoil in Hovering Flight at Low Reynolds Numbers*. AIAA-2005-1356, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 10 - 13 Jan 2005
- Kurtuluş, D.F., David, L., Farcy, A., & Alemdaroğlu, N., 2006, *A Parametrical Study with Laser Sheet Visualization for an Unsteady Flapping Motion*. AIAA-2006-3917, 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, San Francisco, California USA, 5 - 8 June 2006
- Kurtuluş, D.F., David, L., Farcy, A. & Alemdaroğlu, N., 2006, *Laser Sheet Visualization for Flapping Motion in Hover*, AIAA-2006-0-254, 44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 9 - 12 Jan 2006
- Kurtuluş, D.F., Scarano, F., David, L., 2007, *Unsteady aerodynamic forces estimation on a square cylinder by TR-PIV*, Experiments in Fluids, Vol.42, No:2, pp.185-196
- Kurtuluş, D.F., 2015, *On the unsteady behavior of the flow around NACA 0012 airfoil with steady external conditions at $Re=1000$* , International Journal of Micro Air Vehicles, Vol 7, No 3, pp 301-326
- Kurtuluş, D.F., 2016, *On the wake pattern of symmetric airfoils for different incidence angles at $Re= 1000$* , International Journal of Micro Air Vehicles 8 (2), 109-139
- La Porta, A., Vorth, G., Crawford, A., Alexander, J. & Bodenschatz, E., 2001, *Fluid particle accelerations in fully developed turbulence*, Nature, 409, 1017-1019.
- Liu, X., & Katz, J., 2003, *Measurements of pressure distribution by integrating the material acceleration*, 5th Int. Symp. on Cavitation (CAV2003). Osaka, Japan.
- Noca, F., Shiels, D. & Jeon, D., 1999, *A comparison of methods for evaluating time-dependent fluid dynamic forces on bodies, using only velocity fields and their derivatives*, J. Fluids Struct., 13, s. 551-578
- Taylor, G., 1934, *The formation of emulsions in definable fields of flow*, Proc. R. Soc. London A, s. 501-523
- van Oudheusden, B., 2008, *Principles and application of velocimetry-based planar pressure imaging in compressible flows with shocks*, Exp Fluids, 45, 657-674.
- Van Oudheusden, B., 2013, *PIV-based pressure measurement*, Meas. Sci. Technol, 24, 032001.