

Serbest akım içerisinde salınan bir silindir etrafındaki akışın ataletsiz koordinatlarda sayısal incelenmesi

Numerical investigation of the flow past an oscillating cylinder in a non-inertial reference frame

Utku ŞENTÜRK^{1*} 

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
utku.senturk@ege.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.02.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 11.09.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.92195
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, bir serbest akım içerisinde yer alan ve salınım hareketi yapmaya zorlanan bir silindirin etrafındaki akış, açık kaynaklı OpenFOAM ortamında geliştirilen bir çözücü ile sayısal olarak incelenmiştir. Akışkan hareketinin denklemleri, silindire yapışık, ataletsiz koordinat sistemi cinsinden yazılmış ve sonlu hacimler yöntemi ile çözülmüştür. Sıkıştırılmaz, daimi olmayan, iki boyutlu akış kabulleri altında çözüm yapılmıştır. Silindirin harmonik salınımı, tüm serbestlik dereceleri (dalıp çıkma, boyuna öteleme ve baş-kıç vurma) için ayrı ayrı ele alınmıştır. Çeşitli salınım frekansları taranarak, çevri kilitlenme davranışı yakalanmıştır. Hareketli silindir probleminde dair bulunan literatür ile uyumlu sonuçlar, yöntemin, rijit ve hareketli cisimlerin dış akış simülasyonlarında kullanışlı bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Salınan silindir, Ataletsiz, OpenFOAM

Abstract

In this study, the flow past a cylinder which is forced to oscillate in a free stream is numerically investigated using a solver developed within the framework of the open-source toolbox OpenFOAM. Governing equations are written in the non-inertial reference frame fixed to the cylinder and solved using the finite volume method. Flow is assumed to be incompressible, unsteady and two-dimensional. Harmonic oscillation of the cylinder is considered separately for each degree-of-freedom (heaving, surging and pitching). By spanning several oscillation frequencies, the lock-in behavior is captured. The agreement obtained in the moving cylinder problem demonstrates the convenience of the approach in the general flow simulations of moving rigid bodies.

Keywords: Oscillating cylinder, Non-inertial, OpenFOAM

1 Giriş

Sabit bir silindir etrafındaki akış probleminin tanımı görece kolaydır; ancak çözümü ise, akışın rejimine bağlı olarak çok çeşitli haller alabilir. Özellikle taşıtlar ve mimari yapılar gibi küt cisimlerin etrafındaki akışın daha iyi anlaşılmasına imkân vermesi açısından, önemli bir temel mühendislik problemidir. Genel bir tanım için, uniform U_∞ hızına ve ν kinematik viskozitesine sahip bir akışkan akımı içerisinde daldırılmış D çapında sabit bir silindir ele alınsın. Silindir etrafındaki akışın karakteristiğini belirleyen tek parametre, Reynolds sayısıdır ($Re_D = U_\infty \nu / D$). Reynolds sayısının kritik değeri $Re_{D,kr} \approx 47$ ve üzerindeki değerlerde, hız ve basınç gibi akış parametreleri zamana bağlı değişimler göstermeye başlar [1],[2]. Silindir art izinde, yerel olarak dönen ve serbest akımla taşınıp uzaklaşan çevri (vorteks) bölgeleri görülür. Silindir yüzeyinden koparak sırayla, saat yönünde ve saat yönünün tersi yönde oluşan bu çevrilere, von Kármán çevri caddesi adı verilir (Şekil 1). Silindirin maruz kaldığı hidrodinamik kuvvetler de harmonik salınımlar yaparlar. Bu, çoğunlukla istenmeyen bir durumdur. Örneğin, çevri kaynaklı titreşim, köprü ayakları, elektrik ve tabela direkleri, fabrika bacaları gibi cisimlerin maruz kaldığı ve yapı sağlığını tehdit eden bir kavramdır. Sabit silindirde çevri oluşumunun frekansı (f_0), boyutsuz biçimde Strouhal sayısı ile ifade edilir ($St = f_0 D / U_\infty$). Bu akışa ilişkin Strouhal sayısı, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olup, $10^2 < Re_D < 10^5$ aralığında yaklaşık 0.21 değerini almaktadır [3].

Silindir art izindeki çevri kopmasının frekansını kontrol etmek için çeşitli yöntemler mevcut olup, bunlardan biri, silindirin

harmonik salınımına zorlanmasıdır. İki boyutlu düzlemde hareketli bir cismin, iki adet öteleme ve bir adet dönme serbestlik derecesi vardır. Silindire ilişkin sözü edilen salınım hareketi, bunlardan herhangi biri ya da üst üste binmiş halde birden fazlası olabilir. Belirli frekans ve genlik aralıklarında salınım hareketleri incelendiğinde, silindirden kopan çevrilerin frekansının (f), zorlanmış hareketin frekansına (f_e) eşit hale geldiği, dolayısıyla art izindeki çevrilerin kontrol edilebildiği görülür. Buna çevri kilitlenmesi ya da senkronizasyonu adı verilir [4]-[6]. Bu kavram, bir akış kontrolü olmasının yanı sıra, çevri kaynaklı titreşimler için de önem arz eder. Örneğin, çevri kilitlenmesi gerçekleşen serbest akıma dik yönde zorlanmış salınım (dalıp çıkma) hareketinde, akışkanın silindir üzerinde yaptığı iş (ya da akışın cisme aktardığı mekanik enerji), serbest akıma dik yöndeki kaldırma kuvveti (F_L) ile silindir konumunun (y) çarpımı olarak yazılabilir. Bu iki harmonik fonksiyon arasındaki faz farkı ϕ olmak üzere, aktarılan enerjinin $\sin \phi$ ile doğru orantılı olduğu gösterilebilir [7]:

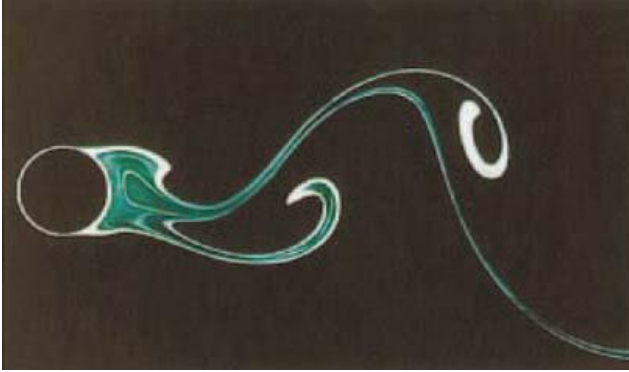
$$y(t) = A \sin \Omega t \quad (1)$$

$$F_L(t) = B \sin(\Omega t + \phi) \quad (2)$$

$$E = \int_0^{T_e} F_L(t) y'(t) dt = C \sin \phi \quad (3)$$

Buna göre, faz açısı 0° - 180° aralığında ise enerji pozitif işaretlidir. Yani, akış cisme enerji aktarır ve çevri kopması titreşime sebep olur. Benzer şekilde, bir diğer öteleme serbestlik derecesi olan, silindirin merkezi etrafındaki dönme

hareketinde salınım yapması (baş-kıç vurma) ile çevri kopma frekansı ve art izi karakteristiklerinin değiştirilebildiği, Baek ve Sung [8] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada gösterilmiştir.



Şekil 1: $Re_D = 100$ değerinde deneysel çalışmada görülen von Kármán çevri caddesi [9].

Akışkan hareketi içeren problemlerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile incelenmesi, deneylerde ölçülmesi güç olan ya da hiç ölçülemeyen büyüklükleri belirlemeyi mümkün kılar. Doğrulanmış HAD sonuçlarına ulaşıldığında, herhangi bir problem parametresinin davranışı, deney verilerinin de ötesinde bir detay ile incelenebilir. Hareketli cisimlerin dış akışına ilişkin HAD simülasyonları, temel denklemlerin ve sınır koşullarının türetilmesi açısından iki sınıfa ayrılır: (1) Ataletli koordinat sisteminde inceleme, (2) Ataletsiz koordinat sisteminde inceleme [10]. Birinci yaklaşımda, koordinat sistemi ya hareketsizdir ya da sabit hızla hareket etmektedir. Hareketsiz olması halinde, deneysel ölçümlere atfen, laboratuvarın koordinat sistemi olarak da adlandırılır. Bu sınıfta yer alan yöntemlerden biri olan dinamik ağ yönteminde, cismin konumu ve çevresinde oluşturulan çözüm ağı, simülasyonun her bir zaman adımında güncellenir. Yöntemin başlıca olumsuz yanı, bu ilave hesaplardan dolayı simülasyon süresinin artmasıdır. Buna ilişkin ikinci bir dezavantaj ise çözüm ağının güncellenmesi sırasında yaşanan hücre kalitesindeki değişimlerdir. Bu kaliteden ödün verilmesi, sonuçların doğruluğunu düşürür. Buna alternatif çeşitli yöntemler mevcuttur. Örneğin, batık sınır yönteminde [11], hareketli cisim üzerindeki ağ ile hareketsiz akış bölgesi aği birbirinden bağımsız olup üst üste biner. Cismin sınır koşulları interpolasyonlar ile akış bölgesinde güncellenir. Yeniden ağ örülmez ve hücre kalitesi değişmez. Bu yöntemin başlıca olumsuz yanı ise, yüksek Reynolds sayılarında sınır tabaka formunun yakalanmasındaki güçlülüdür. İkinci temel sınıfta verilen ataletsiz koordinat sisteminde inceleme, hareket denklemleri ve sınır koşullarının, cisim ile birlikte hareket eden koordinat sistemi cinsinden yazılması ile yapılır. Böylece, çözüm ağının tüm düğümleri simülasyon boyunca hareketsiz kalır. Dolayısıyla çözüm ağının kalitesi değişmez ve hesap süresi önemli ölçüde kısalmır. Sınır tabakayı yakalamak için, cisim yüzeyinde arzu edilen hassasiyette ağ yoğunluğu kullanılabilir. Ataletsiz koordinat sistemi yaklaşımı, cismin herhangi ivmeli hareketi için uygulanabilir. Bunun özel bir durumu olan yalnızca bir eksen etrafında, sabit devirle dönme hareketi, turbomakinaların HAD simülasyonlarında kullanılan standart tekniklerden biridir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için, dış akışı incelenen cismin rijit olması ve bağıl harekete sahip bileşenler içermemesi gerekir.

Bu çalışmada, serbest akım içerisinde salınım yapan bir silindirin etrafındaki akış test problemi olarak ele alınarak, iki boyutta herhangi bir cisim etrafındaki akışın, ataletsiz koordinat sisteminde incelenmesinde kullanılacak bir HAD çözücüsü geliştirmek amaçlanmıştır. Çözücü, C++ temelli ve açık kaynaklı OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) ortamında geliştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde öncelikle, akışın ataletsiz koordinatlarda temel denklemleri ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra, OpenFOAM'da uygulanmasına yer verilecektir. Daha sonra, hareketli silindirin probleminin çözümü ve ard işlemlerine ilişkin detaylar ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır.

2 Temel denklemler

Sıkıştırılamaz, daimi olmayan ve iki boyutlu akış problemleri altında süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri,

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_a = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}_a \mathbf{V}_a) = -\nabla P + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V}_a) \quad (5)$$

olarak verilir. Bu denklemler, ataletli koordinat sistemi için yazılmış olup, burada, \mathbf{V}_a mutlak hız (m/s), P kinematik basınç (m^2/s^2) ve ν kinematik viskozitedir (m^2/s). Denklemler, rasgele harekete sahip bir cisim etrafındaki akış için, cisim üzerine iliştirilen (ataletsiz) koordinat sisteminde,

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V}) - [\mathbf{R}]^T \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} - \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{r} \quad (7)$$

olarak yazılırlar [10],[12]. Burada \mathbf{V} ataletsiz koordinatlardaki hız alanını, $\boldsymbol{\Omega}$ cismin dönme hareketine ilişkin açısal hızını, \mathbf{x} ataletsiz koordinat sisteminin merkezine ataletli koordinat sistemine göre konumunu, \mathbf{r} akış bölgesindeki bir noktanın ataletsiz koordinat sistemindeki konumunu ifade eder (Şekil 2a). Döndürme matrisi $[\mathbf{R}]$ olmak üzere, her iki koordinat sistemine göre konumların arasındaki ilişki,

$$\mathbf{r}_a = [\mathbf{R}] \mathbf{r} + \mathbf{x} \quad (8)$$

olup, iki sistemin hız alanları arasındaki ilişki de,

$$\mathbf{V}_a = [\mathbf{R}] (\mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{V}_s) \quad (9)$$

ile verilir [10]. Burada \mathbf{V}_s cismin öteleme hızıdır. Koordinat sistemi dönüşümü sonucunda, süreklilik denkleminin formunun aynı kaldığı ancak Navier-Stokes denklemlerine ilave dört adet ivme teriminin geldiği görülmektedir. Bunlardan ilki öteleme hareketi ile son üçü ise dönme hareketi ile ilgilidir. Bu terimler, sonlu hacimler ayrıklaştırmasında kaynak terimleri olarak değerlendirilirler.

Silindirin ataletsiz koordinat sisteminde maruz kaldığı hidrodinamik kuvvet (\mathbf{F}) hesaplanıp,

$$\mathbf{F}_a = [\mathbf{R}] \mathbf{F} \quad (10)$$

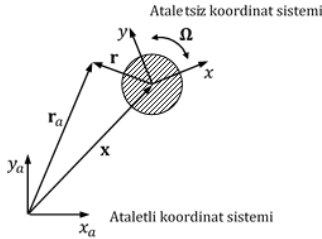
ilişkisi kullanılarak, ataletli koordinatlardaki kuvvet (\mathbf{F}_a) bulunur [10]. Direnç ve kaldırma kuvvetleri boyutsuz biçimde,

$$C_{D,L} = \frac{F_{D,L}}{\frac{1}{2} \rho A_{izd} U_{\infty}^2} \quad (11)$$

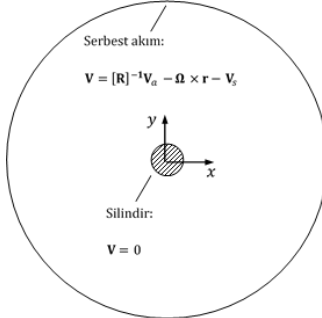
olarak ifade edilir. Burada, A_{izd} birim derinliğe sahip silindirin izdüşüm alanıdır.

3 Problemin tanımı ve sayısal çözüm

Ataletsiz koordinat sistemi ile çalışmanın başlıca avantajı, hareketli cisim etrafındaki akışın sabit bir çözüm ağı ile modellenmesidir. Bu kapsamda çapı D olan bir silindir, dairesel bir akış bölgesinin merkezine yerleştirilip, çevresine "0" tipi bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 2b). Akış bölgesinin çapı $50D$ olarak alınmıştır. Böylece toplam hücre sayısı, radyal ve teğetsel yöndeki düğüm sayıları ile kontrol edilmektedir. Silindir yüzeyindeki sınır tabaka modellemesi için, radyal yöndeki düğümler, silindir çeperine doğru yoğunlaştırılmıştır. Problem bölgesinin dış sınırına serbest akım sınır koşulu uygulanmıştır. Buna göre hız değeri Denklem 9 ile tanımlanmış ve basınç için sıfır gradyen ($\partial P / \partial n = 0$) sınır koşulu kullanılmıştır. Silindir üzerindeki hız ataletsiz koordinatlarda sıfır olup, basınç için yine sıfır gradyen sınır koşulu uygulanmıştır.



(a): Ataletli ve ataletsiz koordinat sistemlerinin birbiri ile ilişkisi.



(b): Simülasyonlar için oluşturulan akış bölgesi ve ataletsiz koordinatlardaki sınır koşulları.

Şekil 2: İncelenen problemin şematik görünümü.

Geliştirilen çözücünün test edilebilmesi için, iki boyutta her bir serbestlik derecesi ayrı ayrı ele alınmıştır. Ataletsiz koordinat sisteminin orijini, hareketli silindirin merkezine yerleştirilmiştir. İncelenen hareketin tipine göre, Denklem 7'de bazı terimler sadeleşir. Buna göre, dalıp çıkma ve boyuna öteleme hareketlerinde $\Omega = 0$ olup, $[R]$ birim matris halini alır. x vektörü ise, silindirin ataletli koordinat sistemindeki anlık konumunu ifade eder. Silindirin merkezi etrafındaki baş-kıç vurma hareketi için ise,

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

şeklinde dir. Burada α hareketin açısal genliğidir. Her iki koordinat sisteminin orijinleri çakıştırılarak $x = 0$ basitleştirmesi sağlanır ve öteleme olmadığından $V_s = 0$ yazılır. Bu çalışmada ele alınan sabit frekanslı harmonik salınımlar; öteleme hareketleri için,

$$x = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \sin(2\pi f_e t) \quad (13)$$

ve baş-kıç vurma hareketi için,

$$\alpha(t) = \alpha_{max} \sin(2\pi f_e t) \quad (14)$$

ile ifade edilmiştir. Bu ifadelerin zamansal türevleri ile V_s ve Ω bulunur ve Denklem 7'deki tüm ilave ivme terimleri açık olarak hesaplanabilir.

Problemi tanımlayan temel denklemlerin (Denklem 6 ve 7) sonlu hacimler yöntemine dayalı sayısal çözümleri, OpenFOAM ortamında gerçekleştirilmiştir. OpenFOAM ile akışkan dinamiği problemleri başta olmak üzere, genel transport denklemi formunda yazılabilen herhangi bir kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümü yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, OpenFOAM bünyesindeki mevcut çözücü ailesinden daimi olmayan, sıkıştırılmaz ve laminar akış çözücüsü *icoFoam* seçilip, ataletsiz koordinat sistemine uygun şekilde düzenlenerek yeni bir çözücü elde edilmiştir. Problemin temel bilinmeyenleri olan hız ve basınç alanları, PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. PISO, temel denklemlerin çözümünde kullanılan çok çeşitli basınç düzeltme yöntemlerinden biridir. Kısaca, tahmini bir basınç alanı ile Navier-Stokes denklemi çözülerek bir hız alanı hesaplanır. Bu hızlar süreklilik denklemini sağlayınca dek, yapılan basınç tahmini düzeltilir [13]. Dolayısıyla yöntem iteratif bir çözüm gerektirir. OpenFOAM'a özgü sentaks ile Denklem 7, Şekil 3'te olduğu gibi ifade edilmiştir.

```
fvVectorMatrix UEqn
(
    fvm::ddt(U)
  + fvm::div(phi, U)
  - fvm::laplacian(nu, U)
  + aOteleme
  + aCoriolis
  + aMerkezcil
  + aTegetsell
);
solve(UEqn == -fvc::grad(p));
```

Şekil 3: Ataletsiz koordinatlarda ortaya çıkan ek ivme terimlerinin, OpenFOAM'da PISO algoritmasına uygulanması.

Temel denklemlerin sonlu hacimler ayrıklaştırılmasında; zaman integrasyonu için örtülü Euler yöntemi, taşınım terimleri için Gauss GammaV düzeni, basınç ile difüzyon terimleri için ise doğrusal değişim kabulü kullanılmıştır. Elde edilen doğrusal denklem sistemlerinin iteratif çözümünde, hız ve basınç için toleranslar 10^{-6} ve 10^{-8} alınmıştır. Ard işlemlerde çörselleştirmeler, açık kaynaklı ParaView yazılımı ile yapılmıştır.

Boyuna öteleme hareketi, uygulama açısından, dalıp çıkma hareketinden farklı değildir. Dolayısıyla bu iki hareket, Guilmineau ve Queutey [6] tarafından verilen, tek bir test problemi kullanılarak sınanmıştır. Bu problem, $Re_D = 185$ değerinde serbest akıma dik yönde salınım yapan silindir etrafındaki akış problemidir. Bu Reynolds sayısında, sabit bir silindirin çevri oluşumuna ilişkin Strouhal sayısı, $St \approx 0.195$ olarak verilmiştir ([6]). Silindire, bu değere karşılık gelen f_0 frekansı civarında parametrik olarak zorlanmış salınım hareketi yaptırılmaktadır. Buna göre zorlanmış salınım frekansları $f_e/f_0 = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1$ ve 1.2 'dir. Salınımın genliği ise, $A_{x,y}/D = 0.2$ olarak sabit alınmıştır. Çözücüde, Denklem 13'te görülen $Y(t)$ tanımlanarak dalıp çıkma hareketi, $X(t)$ tanımlanarak ise boyuna öteleme hareketi modellenmiştir. Boyuna öteleme için serbest akım sınır koşulu (Denklem 9), bu harekete dik yönde olacak şekilde düzenlenmiştir.

Baş-kıç vurma hareketi için ise, Baek ve Sung [8] tarafından incelenmiş olan problemten yararlanılmıştır. Çalışmada ele alınan Reynolds sayısı $Re_D = 110$ ve bu değerde sabit silindirin çevri oluşumuna ilişkin Strouhal sayısı $St \approx 0.171$ olmaktadır. Bu frekans civarında çevri kilitlenme davranışının incelenmesi için, $f_e/f_0 = 0.82, 0.88, 0.94, 1.05$ ve 1.71 değerlerinde çözümler yapılmıştır. Salınımın açılal genliği, $\alpha_{max} = 15^\circ$ olarak sabit alınmıştır.

4 Bulgular ve değerlendirme

Çalışma kapsamında her bir serbestlik derecesi, seçilen test problemleri aracılığıyla sınanmış ve literatürde bu problemler için mevcut olan sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

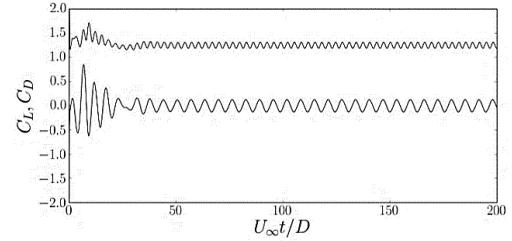
4.1 Dalıp çıkma ve boyuna öteleme hareketleri etrafındaki akış

Dalıp çıkma hareketinin test edildiği ilk problemde, akış karakteristiklerini değerlendirmek amacıyla öncelikli olarak hidrodinamik kuvvetler incelenmiştir. Şekil 4'te, her bir zorlanmış salınım frekansına karşılık gelen direnç ve kaldırma katsayılarının zamansal değişimi görülmektedir. Sonuçlar, Guilmineau ve Queutey [6] tarafından bulunan değerler ile nitel uyuma sahiptir. Burada ilk olarak, kuvvet katsayılarının hesabında düzenli rejime geçiş için yaklaşık 50 zaman biriminin gerektiği ve cismin simetrisinden ötürü ortalama kaldırma katsayısının beklendiği üzere sıfır olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, $f_e/f_0 = 0.8, 0.9$ ve 1.0 değerlerinde kuvvetlerin tek frekanslı salınım yaptıkları; $f_e/f_0 = 1.1$ ve 1.2 değerlerinde ise, birden çok fazla frekansın yer aldığı görülmektedir. Dahası, bu zorlanmış salınım frekanslarında elde edilen art izi çevri frekansları (f) incelendiğinde, $f_e/f_0 = 0.8, 0.9$ ve 1.0 için çevri kilitlenmesinin olduğu ortaya çıkmaktadır.

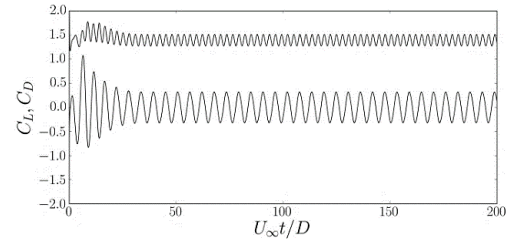
Bu kuvvetlerin ve faz açısının zamansal ortalamaları hesaplanarak, Guilmineau ve Queutey [6] tarafından bulunan değerler ile karşılaştırmalı halde Şekil 5'te sunulmuştur. Ortalama değerler, simülasyonun bitiş süresinden geriye doğru olmak üzere, salınım periyodunun çeşitli tam katları için tekrarlanarak kontrol edilmiştir. Geliştirilen çözücü ile elde edilen kuvvet katsayıları (Şekil 5a), genel olarak, referans çalışma ile iyi bir uyuma sahiptirler.

Buna ek olarak, $f_e/f_0 = 1.1$ ve 1.2 değerlerinde faz açısının negatif değere sahip olduğu saptanmıştır (Şekil 5b). Dolayısıyla bu frekanslar için, Denklem 1-3 uyarınca, enerji aktarımı, salınan silindirden akış bölgesine doğrudur. f_e/f_0

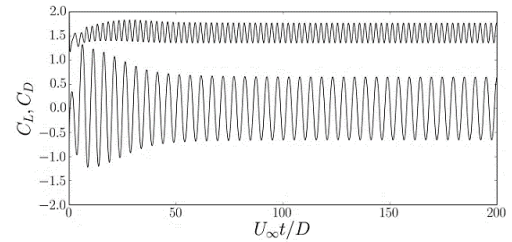
$f_0 = 0.8, 0.9$ ve 1.0 içinse, tersi yönde olup çevri kaynaklı titreşim yaratması beklenir. Boyuna öteleme (b. ö.) hareketi için kaldırma katsayısı ve faz açısı sonuçları, yine Şekil 5'te verilmiş olup, beklendiği üzere dalıp çıkma (d. ç.) hareketinin sonuçları ile özdeşdir. Sonuçlar arasındaki uyum, ataletsiz koordinatlarda öteleme serbestlik dereceleri için geliştirilen çözücünün doğrulandığı ortaya koymuştur.



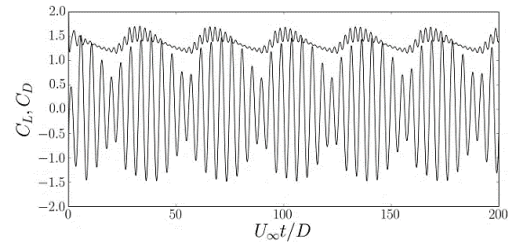
(a): $f_e/f_0 = 0.8$.



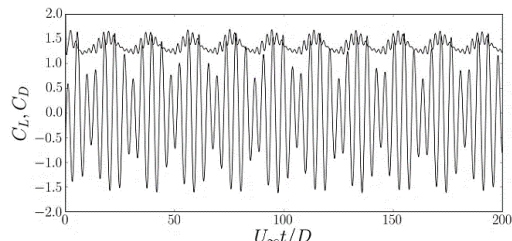
(b): $f_e/f_0 = 0.9$,



(c): $f_e/f_0 = 1.0$,

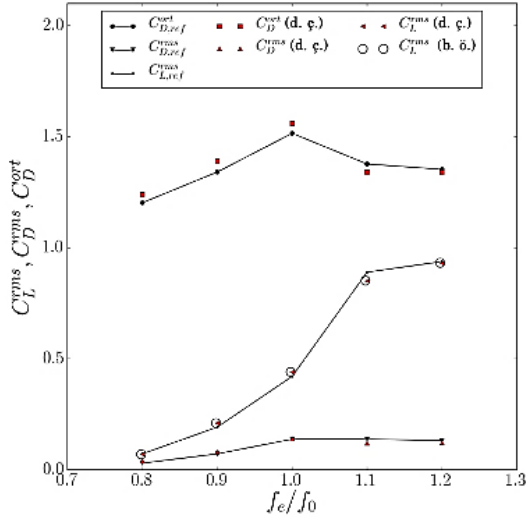


(d): $f_e/f_0 = 1.1$,

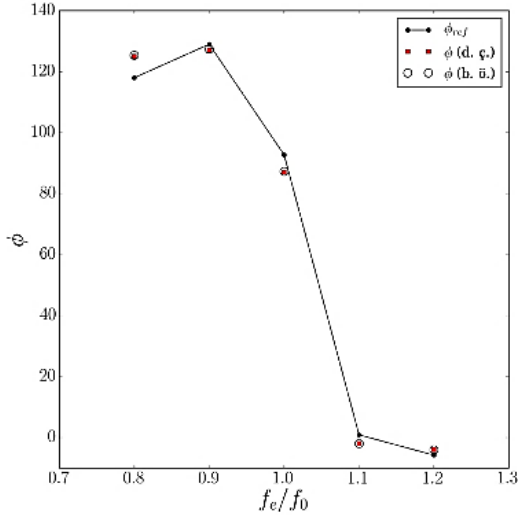


(e): $f_e/f_0 = 1.2$.

Şekil 4: Kaldırma ve direnç katsayılarının, silindirin çeşitli salınım frekansları için zamansal değişimleri: Her bir grafikteki iki eğriden üstte yer alan, dirence aittir.



(a): Kaldırma ve direnç katsayılarının karekök ortalaması (RMS) ve ortalama direnç katsayısı.



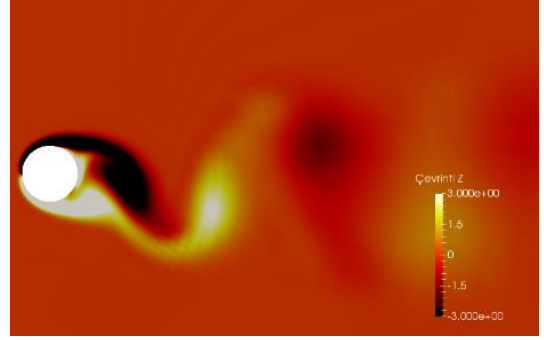
(b): Kaldırma katsayısı ve silindir konumu arasındaki faz farkı. (Boyuna öteleme sonuçları, içi boş daireler ile simgelenmiştir).
Şekil 5: Çeşitli akış parametrelerinin Guilmineau ve Queutey [6] tarafından verilen değerler ile karşılaştırılması.

Ataletli koordinatlardaki hız alanından çevrinti ($\nabla \times \mathbf{V}_a$) hesaplanarak silindir art izindeki çevri oluşumu görselleştirilebilir. Hidrodinamik kuvvetlerin salınım frekansına bağlı değişimi dikkate alınarak, $f_e/f_0 = 1.0$ ve 1.2 durumları, Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Burada, resimler silindirin en üst konuma ulaştığı ana aittir. Silindirin alt yarısından kopan pozitif işaretli çevrinin, kilitlenmenin olmadığı sağdaki durumda daha büyük olduğu; üst yarısından kopan negatif işaretli çevrinin ise, dağılarak şiddetinin azaldığı görülmektedir.

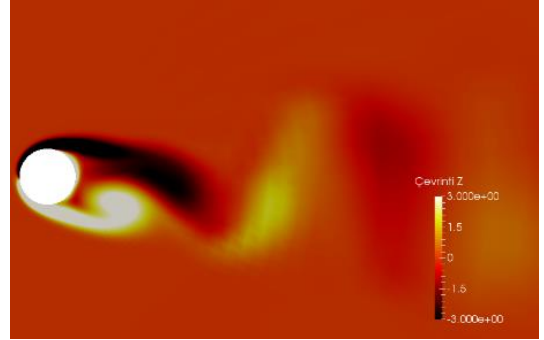
4.2 Baş-kıç vurma hareketi etrafındaki akış

Baek ve Sung [8] söz konusu zorlanmış harekete ilişkin kilitlenme frekansını, kaldırma katsayısının zamansal değişimlerini inceleyerek tespit etmişlerdir. Buna göre $\alpha_{max} = 15^\circ$ değerinde çevri kilitlenmesi, $f_e/f_0 = 0.82$ frekansında yok iken, $f_e/f_0 = 0.88$ frekansında yaşanmaktadır. Geliştirilen çözücü ile hesaplanan kaldırma katsayısı değişimleri, sözü edilen bu iki frekans için Şekil 7'de

karşılaştırılmıştır. Önceki test problemlerinde olduğu gibi, eğrilerin referans çalışma ile nitel uyumu, ilk olarak göze çarpmaktadır. Çevri kilitlenmesinin gerçekleştiği durumda (Şekil 7a), kaldırma kuvveti, zorlanmış hareketin frekansı ile salınmaktadır. Kilitlenmenin olmadığı frekansta ise (Şekil 7b) silindirin, önceki test problemlerinde olduğu gibi, çok frekanslı titreşimlere maruz kaldığı görülmektedir.

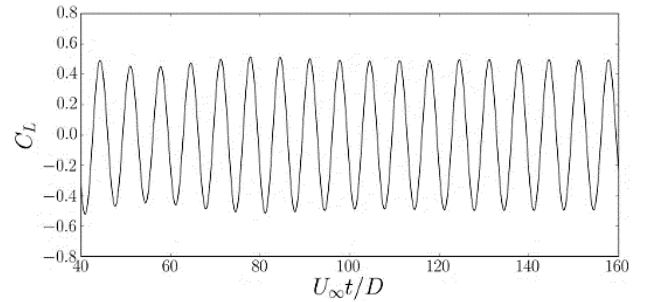


(a): $f_e/f_0 = 1.0$,

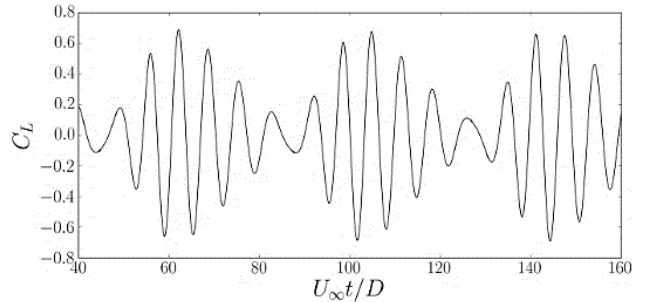


(b): $f_e/f_0 = 1.2$.

Şekil 6: Akış alanında görselleştirilen çevrinti.



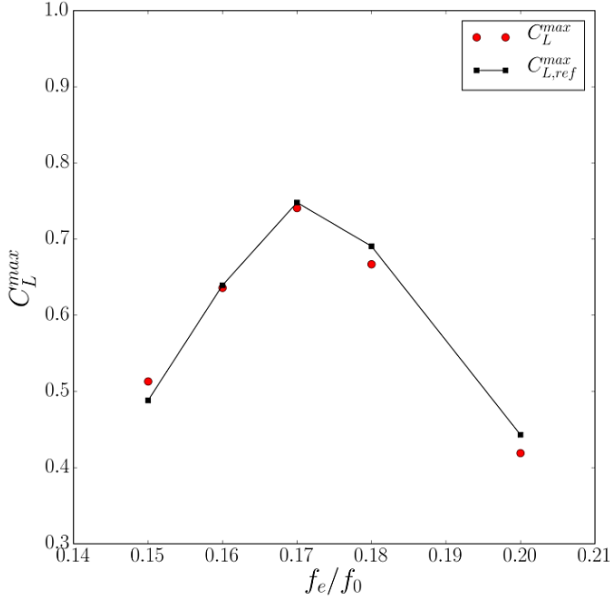
(a): $f_e/f_0 = 0.88$.



(b): $f_e/f_0 = 0.82$.

Şekil 7: $\alpha_{max} = 15^\circ$ açılmal genliği ile baş-kıç vurma hareketi yapan silindir için kaldırma katsayısının zamansal değişimi.

Baş-kıç vurma hareketi problemiine ilişkin çözümün nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, kaldırma katsayısının en yüksek değeri, salınım frekansları için bulunmuş ve Baek ve Sung [8] ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 8). Sonuçlar uyum içinde olup, çözücü, iki boyutlu problem bölgesine dik bir eksen etrafındaki salınım hareketi için de böylece doğrulanmıştır.



Şekil 8: Kaldırma katsayısının en yüksek değerinin, çeşitli salınım frekanslarında, Baek ve Sung [8] tarafından bulunan sonuçlarla karşılaştırılması.

5 Sonuç

Bu çalışmada; serbest akım içinde basit harmonik hareketler yapmaya zorlanan bir silindirin etrafındaki akış problemi, bir test aracı olarak kullanılarak, ataletsiz koordinat sisteminde çözüm yapan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü geliştirilmiştir. OpenFOAM ortamında geliştirilen çözücü, dalıp çıkma, boyuna öteleme ve baş-kıç vurma hareketleri için ayrı ayrı test edilerek doğrulanmıştır. Bu kapsamda hidrodinamik kuvvetlerin ve çevri oluşumunun salınım frekansına bağlı davranışları belirlenmiştir. Sonuçlar, halihazırda bulunan literatür verileri ile hem nicel hem de nitel uyuma sahiptir. Böylece çözücü, iki boyutta, hareketi tanımlı herhangi bir cismin dış akışını incelemek için kullanılabilir. Yöntemde yeniden ağ örme gerekmediğinden, alternatif yöntemlere göre daha hızlı çözümler yapılabilir. Yüksek doğruluğa sahip hidrodinamik kuvvet hesabı için yoğun sınır tabaka ağları kullanılabilir. Kullanılan OpenFOAM ortamının açık kaynaklı olması, çözücünün lisanssız kullanımı ve paralelleştirilmesi

açısından da çok önemli bir avantajdır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, Kim ve Choi [10] tarafından verilen genel hareket denklemleri ile çözücü genişletilecek, üç boyutta tüm öteleme ve dönme serbestlik derecelerine sahip hareketli cisimler için çözüm yapılabilir. Böylece rasgele harekete sahip cisimler etrafındaki üç boyutlu akışlar modellenilecek, rijit cisim-akış etkileşimi problemleri de incelenebilecektir.

6 Kaynaklar

- [1] Dong S, Triantafyllou GS, Karniadakis GE. "Elimination of vortex streets in bluff-body flows". *Physical Review Letters* 100(20), 1-4, 2008.
- [2] Posdziech O, Grundmann R. "A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over a circular cylinder". *Journal of Fluids and Structures*, 23(3), 479-99, 2007.
- [3] Smits AJ. *Physical Introduction to Fluid Mechanics*. 1st ed. New York, USA, John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Williamson CHK, Roshko A. "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder". *Journal of Fluids and Structures* 2(4), 355-81, 1988.
- [5] Meneghini JR, Bearman PW. "Numerical simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder". *Journal of Fluids and Structures*, 9(4), 435-55, 1995.
- [6] Guilmineau E, Queutey P. "A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder." *Journal of Fluids and Structures*, 16(6), 773-94, 2002.
- [7] Griffin OM, Skop RA, Koopmann GH. "The vortex-excited resonant vibrations of circular cylinders". *Journal of Sound and Vibration*, 31(2), 235-249, 1973.
- [8] Baek SJ, Sung HJ. "Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder". *Physics of Fluids* 10(4), 869-76, 1998.
- [9] Samimy M. *A Gallery of Fluid Motion*. 1st ed. New York, USA, Cambridge University Press, 2004.
- [10] Kim D, Choi H. "Immersed boundary method for flow around an arbitrarily moving body". *Journal of Computational Physics*, 212(2), 662-80, 2006.
- [11] Mittal R, Dong H, Bozkurtas M, Najjar FM, Vargas A, Von Loebbecke A. "A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries". *Journal of Computational Physics*, 227(10), 4825-852, 2008.
- [12] Kundu PK, Cohen IM, Dowling DR, Tryggvason G. *Fluid Mechanics*. 6th ed. Massachusetts, USA, Academic Press, 2016.
- [13] Ferziger JH, Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Berlin, Germany, Springer, 2012.