

KÜT FİRAR KENARLI KANAT KESİTLERİNİN GİRDAP PARÇACIK YÖNTEMİ İLE AERODİNAMİK ANALİZİ

Senem Ayşe Haser¹, Halil Kaya² ve Oğuz Uzol³
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Bu bildiride, küt firar kenarlı kanat kesitinden geçen iki boyutlu, sıkıştırılmayan ve sürtünmeli akımların aerodinamik analizi anlatılmaktadır. Analizler, küt cisimlerin aerodinamik analizlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan girdap parçacık yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Girdap parçacık yönteminde akış alanı girdaplar ile tanımlanıp Navier-Stokes denklemleri Lagrange yaklaşımıyla çözülmektedir. Bu çalışmada, girdapların difüzyonu deterministik bir yöntem olan Parçacık Gücü Değişimi (Particle Strength Exchange) yöntemi ile modellenmiştir. Geliştirilen girdap parçacık yöntemi ile öncelikle kare etrafında 20 000 Reynolds sayısındaki akış çözülmüştür ve elde edilen sonuçların literatürde geçen deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmüştür. Sonrasında rüzgâr türbinleri profil araştırmalarında sıklıkla kullanılan FB3500-2250, FB3500-1750 ve FB3500-0875 profillerinin 0° hücum açısında ve 50 000 Reynolds sayısındaki analizleri girdap parçacık yöntemi ile yapılmıştır. Sonuçları karşılaştırmak için aynı profillerin laminar ve zamana bağlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Girdap parçacık yöntemi sonuçları, HAD analiz sonuçları ve sonuçların karşılaştırmaları bildiride sunulmuştur. Karşılaştırmalara bakıldığında geliştirilen girdap parçacık yöntemi küt cisimlerin aerodinamik analizleri için uygun olduğundan küt kenar kalınlığı azaldıkça 0° hücum açısındaki girdap parçacık yöntemi sonuçlarının HAD sonuçlarından uzaklaştığı görülmüştür.

GİRİŞ

Küt firar kenarlı kanat profilleri rüzgâr türbini pallerinin kök bölgelerinde kullanımı son yıllarda yaygın olarak araştırılan bir konudur. Firar kenarlarının kütleştirilmesi yapısal ve aerodinamik açıdan fayda sağlamaktadır. Yapısal açıdan türbin pallerinin mukavemetini artırıp yapının daha fazla yük altında çalışabilmesini sağlarken, aerodinamik açıdan bakıldığında firar kenarlarının kütleştirilmesi akım ayrılmasını geciktirerek azami taşıma katsayısı arttırmaktadır [van Dam, Mayda, Chao ve Berg, 2008]. Kanat profillerinin firar kenarlarının kütleştirilmesinin dezavantajları ise sürüklenme kuvvetinin ve aeroakustik gürültünün artmasıdır. Küt kenar arkasında periyodik salınımlı girdaplar oluşmakta ve bu girdapların oluşturduğu iz bölgesi toplam basınç kaybına sebep olarak profil sürüklenmesini arttırmaktadır [Krentel ve Nitche, 2013].

Bu çalışmada küt firar kenarlı kanat profillerinin aerodinamik analizleri girdap parçacık yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Girdap yöntemi model etrafından geçen sıkıştırılmayan sürütüneli akışların çözümünü Lagrange yaklaşımıyla yapan yöntemdir. Son yıllarda, girdap yöntemi Navier-Stokes denklemlerinin çözümlerinde kullanılan sonlu elemanlar farkı ve spektral yöntemlere alternatif bir yöntem olarak hızla gelişmektedir [Cottet ve Koumoutsakos, 2000]. Girdap parçacık yönteminde sayısal çözüm elemanları olan girdap parçacıkları, bölgesel akışkan hızı ile yayılmaktadır. Çözüm

¹Yüksek Lisans Öğrencisi, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: saysehaser@gmail.com

²Doktora Öğrencisi, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: halilkaya23@gmail.com

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

ağlı yöntemlerden farklı olarak, girdap parçacık çözümlerinde akış alanında girdap içermeyen yerlerde çözüm yapılmamaktadır. Bu yüzden, girdap parçacık yöntemi Euler yaklaşımına dayanan sonlu elemanlar yöntemine göre daha hızlı sonuç vermektedir [Koumoutsakos, 1993].

Girdap parçacık yöntemlerinde girdapların difüzyonunu modellemek için Rastgele Yürüyüş (Random-Walk) yöntemi, Parçacık Gücü Değişimi (Particle Strength Exchange) ve Öz Yayılımı (Core Spreading) yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Rastgele Yürüyüş difüzyon yöntemi olasılık hesabına dayanan stokastik bir yöntemdir. Bu yöntemde tüm girdap parçacıkları birbirlerinden bağımsız olarak Gauss dağılımıyla hareket etmektedir [Lewis, 1991; Morgenthal, 2002; Kaya, 2012]. Rastgele Yürüyüş yönteminin uygulaması kolaydır, fakat yakınsaması düşüktür [Stock, 2007]. Parçacık Gücü Değişimi yöntemi Degond ve Mas-Gallic tarafından geliştirilen deterministik bir yöntemdir [Degond ve Mas-Gallic, 1989]. Rastgele yürüyüş yöntemi parçacıkların yer değiştirmesini olasılık hesabı ile modellerken, Parçacık Gücü Değişimi yöntemi ile difüzyon modellemesinde, parçacıkların girdap güçleri açısız momentum gradyanları göz önüne alınarak her zaman adımında yeniden hesaplanmaktadır [Cottet ve Koumoutsakos, 2000; Ploumhans, 2000; Yang, 2011; Huang, 2012]. Rastgele Yürüyüş yöntemine göre daha yüksek çözünürlükte çözüm yapabildiği için zaman ve uzay çözümlerinde daha doğru sonuçlar vermektedir [Morgenthal, 2002]. Öz Yayılım yöntemi ise tamamen Lagrange yaklaşımına dayanan deterministik bir yöntemdir. Bu yöntemde girdap parçacıklarının güçlerinin Gauss dağılımı ile yayıldığı kabul edilmekte ve bu dağılım ile oynanarak akıştaki viskozite etkisi modellenmektedir [Barba, 2004]. Bu bildiri kapsamında yapılan çalışmada Parçacık Gücü Değişimi difüzyon yöntemi kullanılmıştır.

Girdap parçacık yönteminde önemli olan bir diğer konu ise sınır koşullarıdır. Koumoutsakos geliştirdiği yöntemde her zaman adımında model yüzeyinde, dik hız bileşenini sıfır yapan girdaplar oluşturup bu girdapların gücünü yüzeye yakın parçacıklara dağıtmaktadır [Koumoutsakos, 1993]. Zaman adımlarında yeni parçacık oluşmadığı için toplam parçacık sayısı sabit kalmaktadır. Chorin'in önerdiği yöntemde ise her zaman adımında model yüzeyinde teğet hız bileşenlerini sıfır yapan girdap parçacıkları oluşturulup, bu parçacıklar bir sonraki zaman adımında akışa bırakılmaktadır [Morgenthal, 2002; Lewis, 1991; Kaya 2012]. Böylelikle akış alanındaki parçacık sayısı değişkendir ve zamanla artmaktadır. Bu bildiride sunulan çalışmada Chorin'in önerdiği yöntem uygulanmıştır.

Bildiride öncelikle girdap parçacık yöntemi kısaca anlatılmıştır. Sonrasında yöntem doğrulama için yapılan bir boyutlu çözüm ve kare etrafındaki iki boyutlu akış çözümü sonuçları sunulmuştur. Yöntemin literatürde geçen deneysel ve sayısal sonuçlara yakın sonuçlar verdiği görüldükten sonra farklı firar kenarı kalınlıklarına sahip üç kanat kesitinin (FB3500-0875, FB3500-1750, FB3500-2250) geliştirilen girdap parçacık yöntemi ile aerodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarını kıyaslamak için aynı profillerin HAD analizleri yapılmıştır ve sonuçlar bildiride sunulmuştur.

YÖNTEM

Girdap parçacık yönteminde girdap gücü ve hız formunda yazılan Navier-Stokes denklemleri Lagrange yaklaşımı ile çözülmektedir. Girdap gücü ve hız formundaki Navier-Stokes denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{D\omega}{Dt} = \underbrace{\omega \cdot \nabla \mathbf{u}}_{\text{Yayılım}} + \underbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla^2 \omega}_{\text{Esneme}} + \underbrace{\omega \cdot \nabla \omega}_{\text{Difüzyon}} \quad (1)$$

Yayılım Esneme Difüzyon

İki boyutlu akışlarda esneme (stretching) terimi sıfırdır. Yayılım ve difüzyon terimleri ise Chorin'in önerdiği şekilde iki adımda ve ayrı ayrı çözülmüştür [Chorin, 1973].

Girdap parçacık yönteminde öncelikle tanımlanan profilin girilen başlangıç koşullarındaki basınç dağılımı girdap panel metoduyla hesaplanmaktadır. Girdap panel çözümünde yüzeye paralel hız bileşenin sıfır kabul edildiği Dirichlet sınır koşulunu uygulanmaktadır. Sonrasında girdap parçacıkları yüzeyden akışa bırakılıp Poisson denkleminin göre hızları hesaplanmaktadır. Poisson denklemi ve Poisson denkleminin Green fonksiyonu yaklaşımı ile çözümü aşağıda verilmiştir.

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} * \omega = -\frac{1}{2\pi} \int \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \times \omega d\mathbf{y} + \mathbf{U}_0 \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde geçen \mathbf{U}_0 denkleminin homojen çözümü, \mathbf{K} ise Cauchy Hız Kernel'dir.

$$\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{y}) = \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{y})}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^2} \quad (4)$$

Sonraki adım Helmholtz teoremini esas alan yayılım (convection) adımındır. Chorin yaklaşımına göre yayılım denklemi;

$$\frac{D\omega}{Dt} = 0 \quad (5)$$

Yayılım sırasında parçacıkların yerleri 2. Derece Adams-Bashforth şeması ile hesaplanmaktadır.

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t \left(\frac{3}{2} U_i(x_i^n, \Gamma^n) - \frac{1}{2} U_i(x_i^{n-1}, \Gamma^{n-1}) \right) \quad (6)$$

Yayılmadan sonraki adım ise parçacıkların difüzyonudur. Chorin yaklaşımına göre difüzyon denklemi;

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \mathbf{v} \nabla^2 \omega \quad (7)$$

Girdap parçacıklarının difüzyonu parçacık gücü değişimi yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu yöntem deterministik bir yöntem olup Laplace operatörünü integral formunda çözmektedir. 1 ve 2 boyutlu akışlar için integral formundaki difüzyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \frac{\mathbf{v} h^d}{\epsilon^2} \sum_{j=1}^N (\omega_j^{n-1} - \omega_i^{n-1}) \eta_\epsilon(x_i - x_j), \quad d = 1, 2 \quad (8)$$

$$\eta_\epsilon(x_i - x_j) = \mathbf{G}(x_i - x_j) = e^{-(x_i - x_j)^2 / \epsilon^2} \quad (9)$$

Denklem 8'de geçen η_ϵ yerine Gaussian Kernel (G) kullanılmıştır [Koumoutsakos,1993]. Gaussian Kernel (G) Denklem 9'da tanımlanmıştır.

Difüzyondan sonra yüzeyden bir sonraki zaman diliminde bırakılacak parçacıkların girdap güçleri ve yüzey basınç dağılımı hesaplanıp bulunulan zaman dilimindeki işlemler tamamlanmaktadır.

Girdap parçacık yöntemi ile analizlerde Euler-Lagrange Hibrit yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşım ile yayılım ve potansiyel akım çözümleri Lagrange yaklaşımı ile parçacıklar üzerinde yapılırken, hız hesaplama ve difüzyon denklemleri çözüm ağı noktalarında çözülmüştür. Bu sayede, hız hesaplama ve difüzyon basamaklarında daha az noktada işlem yapıldığı için sonuca daha hızlı

ulaşılabilir. Ayrıca parçacıkların çözüm ağına dağıtılıp toplanması çok yakın parçacıkların birbirlerine etkilerinden dolayı oluşabilecek hatanın önüne geçmektedir [Cottet ve Koumoutsakos, 2000] Çözüm ağı – parçacık arasında geçişi sağlayan interpolasyon denklemleri aşağıda verilmiştir. Denklemlerde geçen W_i , parçacık ve çözüm ağı noktası arasındaki mesafe ile değişen ağırlık fonksiyonudur [Büyükkeçeci, 2013].

$$W_i(\mathbf{m}, \mathbf{p}) = f(s_i(\mathbf{m}, \mathbf{p})) = f\left(\frac{|\mathbf{x}_i(\mathbf{m}) - \mathbf{x}_i(\mathbf{p})|}{h_i}\right) \quad (10)$$

2 ya da 3 boyutlu akış çözümlerinde ağırlık fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$W(\mathbf{m}, \mathbf{p}) = \prod_{i=1}^d W_i(\mathbf{m}, \mathbf{p}) \quad (11)$$

Parçacıklardan çözüm ağına geçerken kullanılan interpolasyon denklemi;

$$\omega(\mathbf{m}) = \sum_{\mathbf{p} \in P(\mathbf{m})} W(\mathbf{m}, \mathbf{p}) \omega(\mathbf{p}) \quad (12)$$

Çözüm ağından parçacıklara geçerken kullanılan interpolasyon denklemi;

$$\omega(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{m} \in M(\mathbf{p})} W(\mathbf{m}, \mathbf{p}) \omega(\mathbf{m}) \quad (13)$$

Bu çalışmada parçacık – çözüm ağı ve çözüm ağı – parçacık geçişleri lineer interpolasyon ile gerçekleştirilmiştir. Lineer interpolasyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$f_{\text{linear}}(s) = \begin{cases} 1 - s, & 0 \leq s \leq 1 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (14)$$

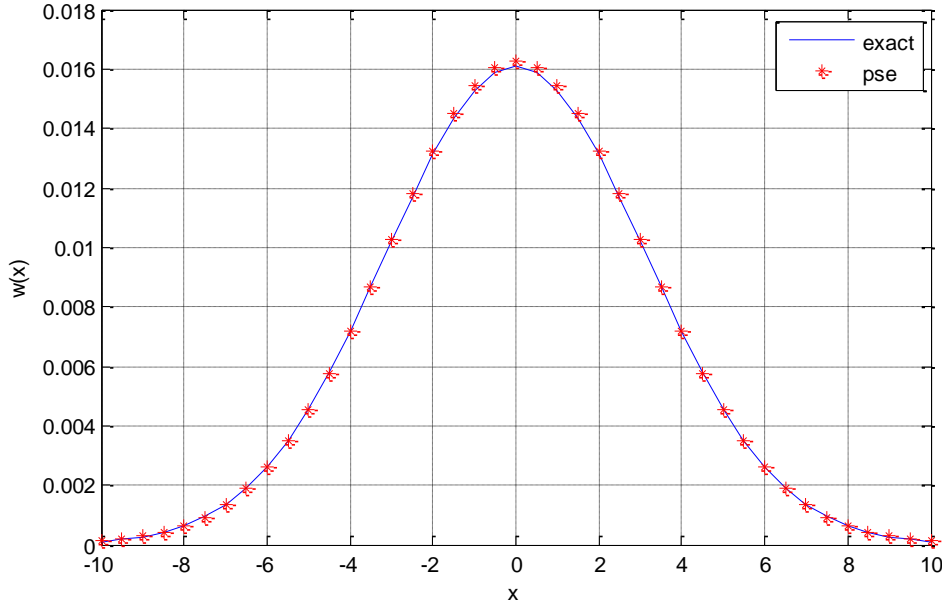
UYGULAMALAR

Doğrulama Simulasyonları

Parçacık gücü değişimine dayanan integral formdaki difüzyon denklemi ile $x=0$ 'a yerleştirilen tek bir girdabın 1 boyuttaki difüzyonunu hesaplanmıştır. Girdap gücü yayılımının gerçek denklemi;

$$\omega(r, t) = \frac{\Gamma}{4\pi vt} e^{-\left(\frac{r^2}{4vt}\right)} \quad (15)$$

$\Gamma = 1$, $v = 0.1$, $dt = 0.5$, $dx = 0.5$, $T = 50$, $X = 20$ girdileri ile Denklem 8 ve Denklem 15 çözülmüştür ve sonuçlar Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1'e bakıldığında parçacık gücü değişimi yöntemiyle yapılan çözümün denklemin gerçek çözümünü birebir yakaladığı görülmektedir.



Şekil 1: Parçacık Gücü Değişimi Yöntemi ile 1 Boyutta Girdap Difüzyonu Çözümünün Gerçek Çözüm ile Karşılaştırılması

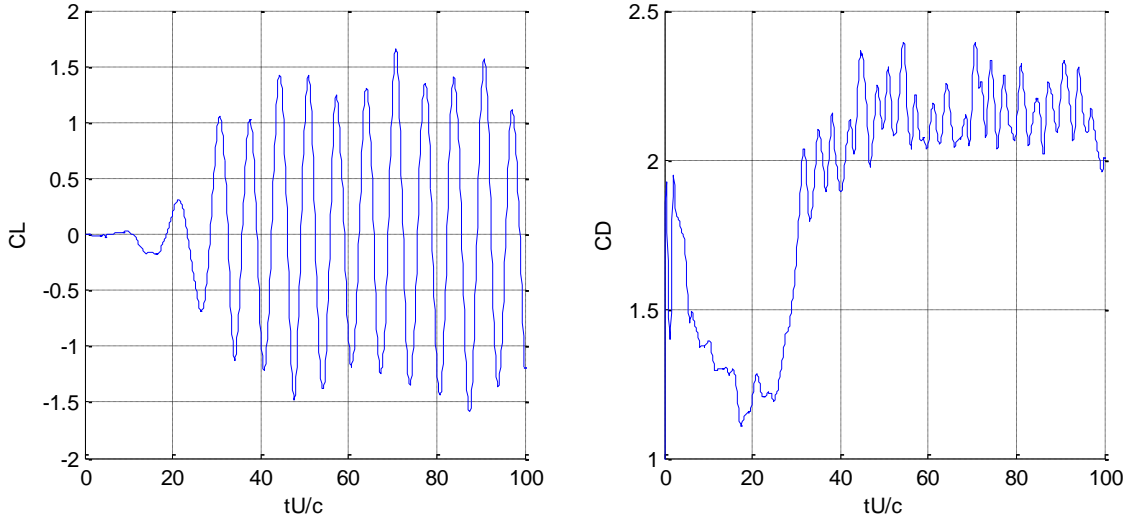
Difüzyon çözümü parçacık gücü değişimine dayanan girdap parçacık yöntemi ile kare etrafındaki akışı alan bulunmuştur. Çözümler 20 000 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de kare etrefindeki akış alanı gösterilmektedir.



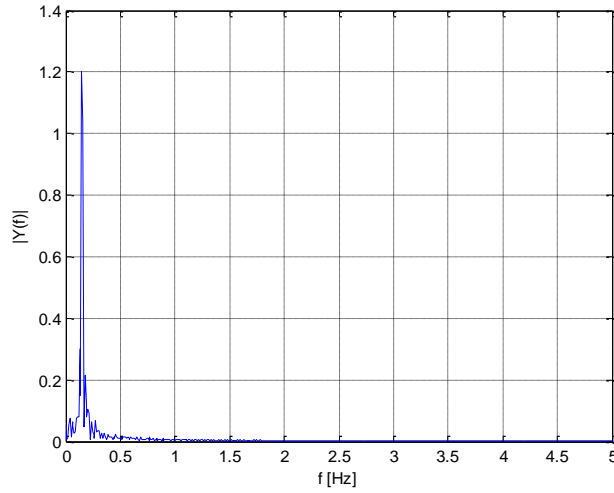
Şekil 2: Kare Etrafındaki Akış Alanı – Re = 20 000

Şekil 3'te taşıma katsayısının (C_L) ve sürüklenme katsayısının (C_D) boyutsuzlaştırılmış zaman parametresiyle (tU/c) değişimi verilmiştir. Şekil 4'de ise ayrık Fourier dönüşümü uygulanan taşıma katsayısı verisinin frekans spektrumu verilmiştir. Bu grafikte görülen baskın frekans değeri boyutsuzlaştırılarak Strouhal sayısı hesaplanmaktadır.

$$St = \frac{fL}{U} \quad (16)$$



Şekil 3: Taşıma ve Sürüklenme Katsayılarının Zaman ile Değişimi – $Re = 20\ 000$



Şekil 4: Taşıma Katsayısı Frekans Spectrumu – $Re = 20\ 000$

Girdap parçacık yöntemi ile elde edilen sürüklenme katsayısı (C_D), taşıma katsayısı ortalama karekök değeri (C_L rms) ve Strouhal sayısı değerlerinin literatürde geçen değerlerle karşılaştırmaları sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Karşılaştırmalara bakıldığında parçacık gücü değişimi difüzyon modelini kullanan girdap parçacık yönteminin literatürdeki değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 1: GPY ile Hesaplanan Sürüklenme Katsayısı Değerinin Literatürde Geçen Değerlerle Karşılaştırılması

Kaynak	C_D
GPY* (Parçacık Gücü Değişimi difüzyon yöntemi ile)	2.125
GPY* (Rastgele Yürüyüş difüzyon yöntemi ile) [Kaya, 2012]	2.170
Deneysel [Norberg, 1993]	2.150

*GPY : Girdap Parçacık Yöntemi

Tablo 2: GPY ile Hesaplanan Taşıma Katsayısı Ortalama Karekök Değerinin Literatürde Geçen Değerlerle Karşılaştırılması

Kaynak	C_L rms
GPY* (Parçacık Gücü Değişimi difüzyon yöntemi ile)	0.96
GPY* (Rastgele Yürüyüş difüzyon yöntemi ile) [Kaya, 2012]	1.11
LES** [Wang ve Vanka, 1996]	1.01,1.02, 1.12
LES** [Porquie,1996]	1.29

*GPY: Girdap Parçacık Yöntemi

**LES: Large Eddy Simulation

Tablo 3: GPY ile Hesaplanan Strouhal Sayısı Değerinin Literatürde Geçen Değerlerle Karşılaştırılması

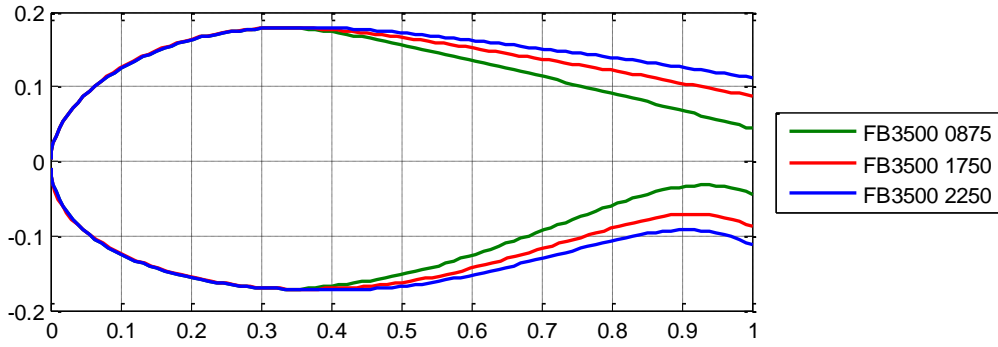
Kaynak	Strouhal Sayısı
GPY* (Parçacık Gücü Değişimi difüzyon yöntemi ile)	0.146
GPY* (Rastgele Yürüyüş difüzyon yöntemi ile) [Kaya, 2012]	0.145
LES** [Lyn,1994]	0.132

*GPY: Girdap Parçacık Yöntemi

**LES: Large Eddy Simulation

Küt Firar Kenarlı Profillerin Simulasyon Sonuçları

Bu çalışmada rüzgâr türbini araştırmalarında sıklıkla kullanılan FB3500-1750 ve FB3500-0875 küt firar kenarlı profillerin aerodinamik parametreleri girdap parçacık yöntemi ile incelenmiştir. Küt firar kenarlı profiller, maksimum kalınlık yeri ile firar kenarı arasında kalan kesitin üst ve alt kısımlarına eşit miktarda kalınlık eklenerek elde edilmektedirler [Chen, 2014]. Firar kenarı kalınlığının aerodinamik parametrelere etkisini gözlemlemek için FB3500-1750 ve FB3500-0875 profillerine ek olarak FB3500-2250 profili oluşturulmuştur. FB3500-0875, FB3500-1750 ve FB3500-2250 profilleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5: FB3500 Serisi Kanat Profilleri

Literatüre bakıldığında küt firar kenarlı kanat kesitlerinin 600 000 ve üzeri Reynolds sayılarında deneysel ve sayısal yöntemlerle incelendikleri görülmüştür. Geliştirilen girdap parçacık yönteminin laminar akışları çözümlemede iyi olduğu, türbülanslı akışları çözümlemede ise yetersiz kaldığı bilindiği için küt firar kenarlı kanat profili analizleri 50 000 Reynolds sayısında ve 0° hücum açısı için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6-8'de girdap parçacık yöntemi ile elde edilen küt firar kenarlı kanat kesitleri etrafındaki akış alanları sunulmuştur.



Şekil 6: FB3500-0875 Profili Etrafındaki Akış Alanı – Re = 50 000



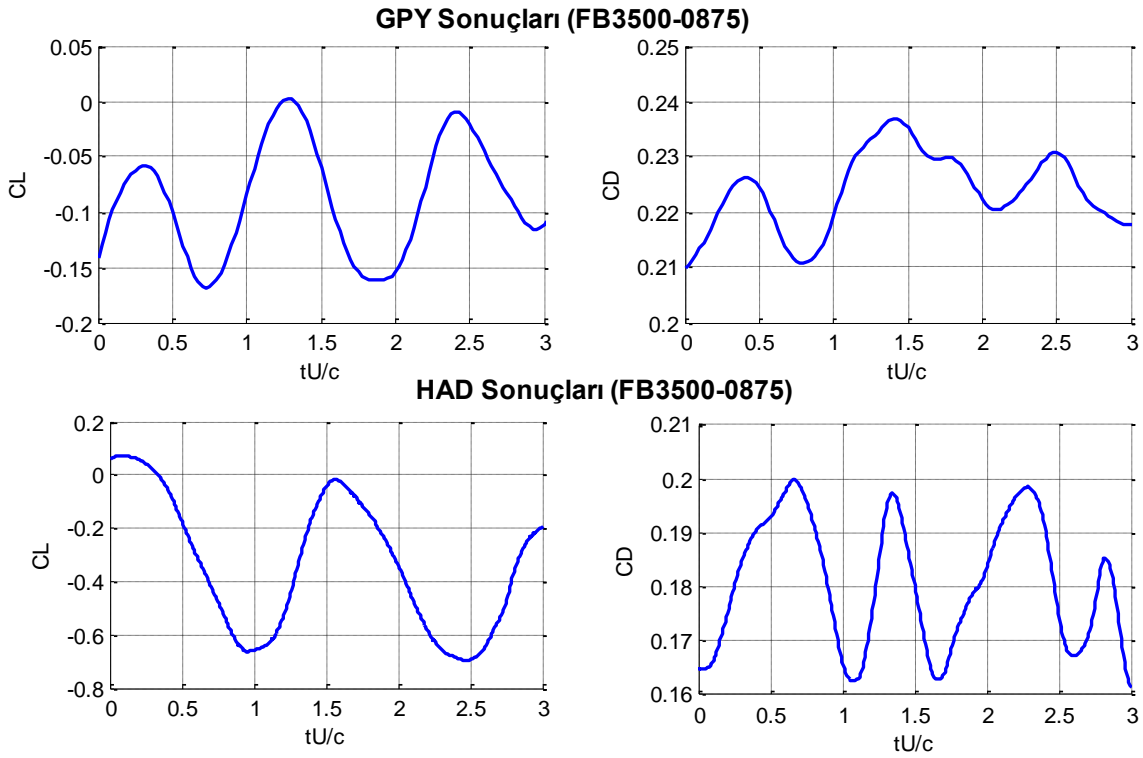
Şekil 7: FB3500-1750 Profili Etrafındaki Akış Alanı – Re = 50 000



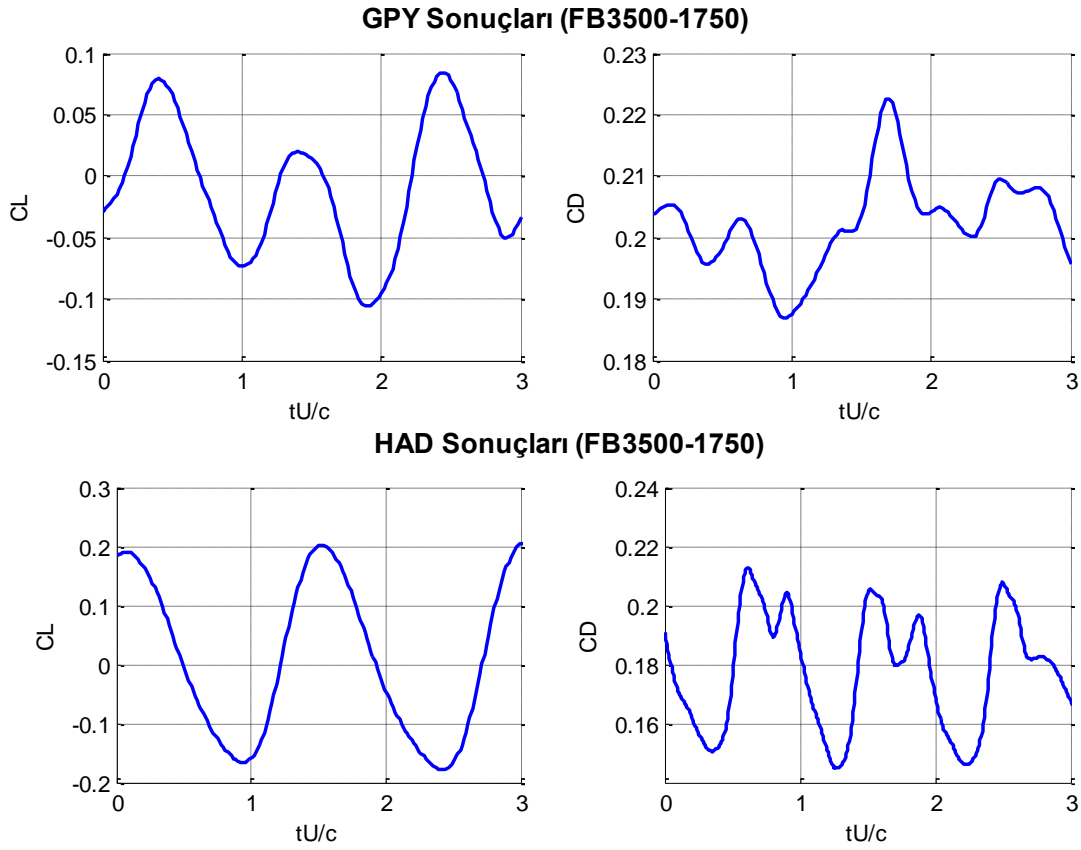
Şekil 8: FB3500-2250 Profili Etrafındaki Akış Alanı – Re = 50 000

Girdap parçacık yöntemi sonuçlarını kıyaslayabilmek için kanat kesitlerinin laminar ve zamana bağlı HAD analizleri yapılmıştır. HAD analizleri için çözüm ağları GAMBİT ve TGRID yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Analizler ise FLUENT yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı çözümlerde boyutsuz zaman adımı 0.01 (dtU/c) olarak alınmıştır.

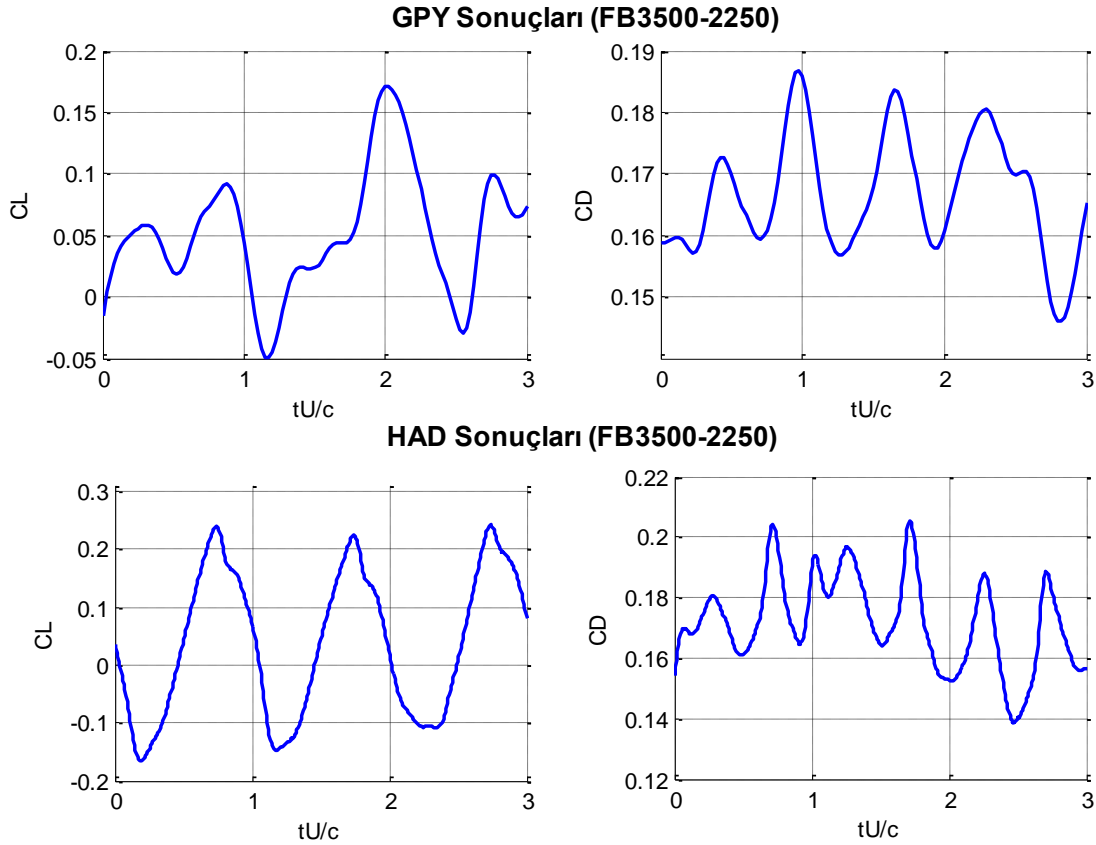
Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de sırasıyla FB3500-0875, FB3500-1750, FB3500-2250 profillerinin Girdap Parçacık Yöntemi (GPY) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinden elde edilen taşıma katsayılarının (C_L) ve sürüklenme katsayılarının (C_D) boyutsuzlaştırılmış zaman (tU/c) ile değişimleri verilmiştir.



Şekil 9: FB3500-0875 Profili GPY ve HAD Analizleri Sonuçları - Taşıma ve Sürüklenme Katsayılarının Zamanla Değişimi ($Re = 50\ 000$)



Şekil 10: FB3500-1750 Profili GPY ve HAD Analiz Sonuçları - Taşıma ve Sürüklenme Katsayılarının Zamanla Değişimi (Re = 50 000)



Şekil 11: FB3500-2250 Profili GPY ve HAD Analiz Sonuçları - Taşıma ve Sürüklenme Katsayılarının Zamanla Değişimi (Re = 50 000)

Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da sırasıyla FB3500-0875, FB3500-1750, FB3500-2250 profillerinin Girdap Parçacık Yöntemi (GPY) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinden elde edilen aerodinamik parametrelerinin karşılaştırmaları verilmiştir.

Tablo 4: FB3500-0875 Profili GPY ve HAD Analiz Sonuçları Karşılaştırılması (Re = 50 000)

Parametre	GPY Sonuçları	HAD Sonuçları
C_L (ortalama)	-0.0859	-0.0305
C_L (rms)	0.0538	0.2534
C_D (ortalama)	0.2234	0.2179
Strouhal Sayısı	0.0684	0.0570

Tablo 5: FB3500-1750 Profili GPY ve HAD Analiz Sonuçları Karşılaştırılması (Re = 50 000)

Parametre	GPY Sonuçları	HAD Sonuçları
C_L (ortalama)	0.0104	0.0124
C_L (rms)	0.0559	0.1353
C_D (ortalama)	0.2025	0.1761
Strouhal Sayısı	0.1709	0.1823

Tablo 6: FB3500-2250 Profili GPY ve HAD Analiz Sonuçları Karşılaştırılması (Re = 50 000)

Parametre	GPY Sonuçları	HAD Sonuçları
C_L (ortalama)	0.0332	0.0370
C_L (rms)	0.0796	0.1320
C_D (ortalama)	0.1680	0.1719
Strouhal Sayısı	0.2285	0.2344

Yukarıda verilen tablolar incelendiğinde GPY ve HAD analizlerinden elde edilen Strouhal sayıları ve sürüklenme katsayıları değerlerinin birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Ortalama taşıma katsayısı değerlerine bakıldığında firar kenarı kalınlığı arttıkça GPY sonuçlarının HAD sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. GPY ve HAD kaynaklı taşıma katsayısı salınımlarına bakıldığında salınım frekansları benzerlik gösterirken GPY kaynaklı taşıma katsayısı salınım genliğinin HAD kaynaklı taşıma katsayısı genliğinden küçük olduğu görülmektedir. Sonuçlara genel olarak incelendiğinde firar kenarı kalınlığı arttıkça GPY sonuçlarının HAD sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir.

Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'daki sonuçlar, 50 000 Reynolds sayısında ve 0° hücum açısında FB3500 profillerinin firar kenarı kalınlığı arttıkça taşıma katsayısının ve Strouhal sayısının arttığını, sürüklenme katsayısının ise azaldığını göstermektedir. GPY sonuçlarına bakıldığında taşıma katsayısındaki salınımın genliğinin de firar kenarı kalınlığı ile arttığı görülmektedir.

SONUÇ

Bu bildiriye küt firar kenarlı kanat kesitlerinden geçen iki boyutlu, sıkıştırılmayan ve sürtünmeli akımların girdap parçacık yöntemi ile aerodinamik analizleri anlatılmaktadır. Öncelikle girdap parçacık yöntemi kısaca anlatılmıştır, difüzyon yöntemi olarak parçacık gücü değişimi yöntemi kullanıldığına ve çözümlerin Lagrange-Euler hibrit çözüm yöntemi ile yapıldığına değinilmiştir. Geliştirilen girdap parçacık yöntemi ile kare etrafındaki akış çözümlere elde edilen sonuçların literatürde yer alan sonuçlara yakın olduğu gösterildikten sonra küt firar kenarlı kanat kesitlerinin

çözümlerine geçilmiştir. Küt kenar kalınlıkları farklı 3 profilin girdap parçacık yöntemi ile analizleri ve HAD analizleri 50 000 Reynolds sayısında ve 0° hücum açısında yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında firar kenarı kalınlığı arttıkça, yani profil kütleştikçe, girdap parçacık yöntemi sonuçlarının HAD analiz sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. Analizler sonucunda ayrıca 50 000 Reynolds sayısında ve 0° hücum açısında FB3500 kanat kesitlerinin taşıma katsayılarının, taşıma katsayısı salınımlarının ve Strouhal sayılarının küt kenar kalınlığı ile arttığı, sürüklenme katsayısının ise azaldığı görülmüştür.

Kaynaklar

- Barba, L. A., 2004 , *Vortex Method for computing high-Reynolds number flows: Increased accuracy with a fully mesh-less formulation*, Doktora Tezi, California Institute of Technology.
- Büyükkeçeci, F., Awile, I. ve Sbalzarini, F., 2013, *A portable OpenCL implementation of generic particle-mesh and mesh-particle interpolation in 2D and 3D*, Parallel Computing, Cilt. 39, s. 94-111.
- Chorin, A. J., 1973, *Numerical study of slightly viscous flow*, Journal of Fluid Mechanics.
- Cottet, G.-H. ve Koumoutsakos , P., 2000 , *Vortex Methods Theory and Practice*, Cambridge University Press.
- Degond, P. ve Mas-Gallic, S., 1989, *The Weighted Particle Method for Convection-Diffusion Equations Part 1: The Case of an Isotropic Viscosity*, Mathematics of Computation, Cilt. 53, No. 188, s. 485-507.
- Degond, P. ve Mas-Gallic, S., 1989, *The Weighted Particle Method for Convection-Diffusion Equations Part 2: The Anisotropic Case*, Mathematics of Computation, Cilt. 53, No. 188, s. 509-525.
- Huang, G., Huan, H., Xu, X. ve Liu, Y., 2012, *Simulation of flow past two tandem cylinders using deterministic vortex method*, Thermal Science, Cilt. 16, No. 5, s. 1460-1464.
- Kaya, H., 2012, *Aerodynamic analysis of long-span bridge cross-sections using random vortex method*, Yüksek Lisans Tezi, METU
- Koumoutsakos, P.D., 1993, *Direct Numerical Simulation of Unsteady Separated Flows Using Vortex Methods*, Doktora Tezi, California Institute of Technology.
- Krentel, D. ve Nitsche, W., 2013, *Investigation of the near and far wake of a bluff airfoil model with trailing edge modifications using time-resolved particle image velocimetry*, Experiments in Fluids, Cilt. 54, Sayı 7, No. 1551.
- Lewis, R. I., 1991, *Vortex Element Methods for Fluid Dynamics Analysis of Engineering Systems*, Cambridge University Press.
- Lyn, D. ve Rodi, W., 1994, *The flapping shear layer formed by flow separation from the forward corner of a square cylinder*, Journal of Fluid Mechanics, Cilt. 267, s. 353-376.
- Morgenthal, G., 2002, *Aerodynamic Analysis of Structures Using High-resolution Vortex Particle Methods*, Doktora Tezi, University of Cambridge.
- Norberg, C., 1993, *Flow around rectangular cylinders: pressure forces and wake frequencies*, Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, Cilt. 49, s. 187–196.
- Ploumhans, P. ve Winckelmans, G.S., 2000, *Vortex Methods for High-Resolution Simulations of Viscous Flow Past Bluff Bodies of General Geometry*, Journal of Computational Physics, Cilt. 165, s. 354-406.
- Porquie, M., Breuer, M. ve Rodi, W., 1996, *Computed test case: square cylinder. Institute for hydromechanics*, University of Karlsruhe, Germany
- Stock, M. J., 2007, *Summary of Vortex Methods Literature (A living document rife with opinion)*, unpublished
- van Dam, C.P., Mayda, E.A., Chao, D.D. ve Berg, D.E, 2008, *Computational Design and Analysis of Flatback Airfoil Wind Tunnel Experiment*, Sandia Report, SAND2008-1782.
- Wang, G. ve Vanka, S.P., 1996, *LES of flow over a square cylinder*, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Yang, S., Cremona, C., Zhou, Z. Ve Chen, A., 2011, *Analysis of Reynolds number effects on bridge sections by PSE method*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Cilt. 15, No. 1/2011, s. 99-124