

Pasif venturi aktüatörlü bir silindir etrafındaki akış: Reynolds sayısı ve hücum açısının etkileri

Flow past a cylinder with a passive venturi actuator: Effects of Reynolds number and angle of attack

Erhan FIRAT*¹ , Mehmet SEYHAN² 

¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 27.04.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 18.03.2025

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, Reynolds sayısı (Re) ve hücum açısının (α) yeni geliştirilen bir akış kontrol yöntemi olan Pasif Venturi Aktüatör'ünü (PVA) içeren bir silindirin aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla hem aerodinamik kuvvet ölçümleri hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın Reynolds sayıları $Re=28000$ ile 80000 arasında değişmektedir. Deneysel çalışmanın hücum açıları $\alpha=-30^\circ$ ile $+30^\circ$ arasında değişmektedir. PVA içeren ve içermeyen silindir için HAD benzetimleri $Re=36000$ ve $\alpha=0^\circ$ 'de gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri kullanılarak elde edilen bulgular, zaman ortalamalı direnç katsayısı $\overline{C_D}$ ile Re arasında oldukça doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. $\alpha=0^\circ$ için Re değerinin 28000 'den 80000 'e artırılması $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüşe neden olmuştur. Sonuçlar, test edilen hücum açısı ne olursa olsun, PVA'lı silindirin PVA'sız silindire kıyasla daha düşük bir $\overline{C_D}$ sergilediğini göstermektedir. Ayrıca PVA'nın benzer Re aralığında test edilen pasif kontrol yöntemlerine kıyasla çok iyi bir direnç performansı sergilediği de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akış kontrolü, Dairesel silindir, Direnç düşürme, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Pasif venturi aktüatörü (PVA), Rüzgar tüneli

Abstract

The main objective of this study is to investigate the effects of Reynolds number (Re) and angle of attack (α) on the aerodynamic characteristics of a cylinder with a recently developed flow control method, Passive Venturi Actuator (PVA). To this end, both aerodynamic force measurements and computational fluid dynamics (CFD) simulations have been carried out. The Reynolds numbers of the experimental study ranged from $Re=28000$ to 80000 . The attack angles of the experimental study ranged from $\alpha=-30^\circ$ to $+30^\circ$. For the cylinder with and without PVA, CFD simulations were conducted at $Re=36000$ and $\alpha=0^\circ$. Findings based on using the force measurements showed a fairly linear relationship between the time-averaged drag coefficient, $\overline{C_D}$, and Re. For $\alpha=0^\circ$, an increase in the Re from 28000 to 80000 resulted in a reduction in the $\overline{C_D}$. The results demonstrate that regardless of the attack angle tested, the cylinder with PVA exhibits a lower $\overline{C_D}$ compared to the cylinder without PVA. It has also been shown comparatively that PVA exhibits very good drag performance compared to passive control methods tested with it in a similar Re range.

Keywords: Flow control, Circular cylinder, Drag reduction, Computational Fluid Dynamics (CFD), Passive venturi actuator (PVA), Wind tunnel

*Erhan FIRAT; efirat@munzur.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Akış kontrolü, herhangi bir akışkan akışı içerisinde ele alınan bir veya birkaç bölgedeki akışkan davranışını, önceden belirlenmiş bir veya birkaç amaç çerçevesinde (aerodinamik direnci arttırmak ya da düşürmek, ısı transferini iyileştirmek gibi) değiştirmek için yapılan her türlü girişimdir (Gad-el-Hak, 2000). Akış kontrolü, akışkan akışının yer aldığı tüm sistemler için büyük bir öneme sahiptir. Bunun ana nedeni, ilgili sistemle ya da herhangi bir bileşeniyle ilgili bir performans iyileştirme süreci boyunca akış kontrolüne ait uygun en az bir yöntemden faydalanmanın kaçınılmaz olmasıdır. Bununla ilgili olarak, bir yüksek performans spor arabanın aynı dönemeci daha yüksek hızlarda geçmesi amaçlanıyorsa, araç etrafındaki akış yapısını değiştirmek için bir akış kontrol yönteminden faydalanarak araca etkiyen yere basma kuvvetinin artırılması gerekmektedir. Araç üst kısmından arka kısmına yönelen akışın yapısını değiştiren bir rüzgarlığın (spoiler) ilgili araç üzerinde uygun bir yere konumlandırılmasıyla bu amaç gerçekleştirilebilir.

Akış kontrol yöntemleri (AKY), akış kontrol ekipmanı enerji gereksinim durumuna göre iki gruba ayrılırlar. Enerji gereksinimi olan ekipmanlar aktif akış kontrol yöntemi (AAKY) grubunda, olmayanlar ise pasif akış kontrol yöntemi (PAKY) grubunda yer alırlar (Gad-el-Hak, 2000). İki grubun da birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar vardır. Bununla birlikte, belirlenen amaç ve hedefler doğrultusunda ilgili sonuca/sonuçlara erişebilmek için hangi gruptan/gruplardan kaç adet akış kontrol yönteminin kullanılması gerektiğine dair ilk tercihler, öncelikli olarak, ele alınan sistem ve onun etrafındaki akış yapısı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir.

Aerodinamik/hidrokinamik bir kuvvet olan direnç, aynı enerjiyi sarf ederek daha uzun mesafe kat etme amacı taşıyan sistemler için olabildiğince düşürülmeye çalışılan bir parametredir. Bu sebeple, bu düşüşü sağlayacağı düşünülen AKY'ler birçok araştırmacı tarafından test edilmiştir. Bununla ilgili olarak, Darabasz vd. (2023) basitleştirilmiş bir taşıt modeli olan arkası düz Ahmed aracı üzerine etkiyen aerodinamik direnci düşürebilmek amacıyla bu araç arkasına, ince plakalardan oluşan ve alt plakası yerden yukarı 5°'lik bir difüzör açısına sahip bir oyuk (cavity) eklemiş ve bu oyukun üstte kalan plakası üzerinde, derinlik boyunca ve belirli bir derinlikte olacak şekilde çentikler açarak farklı ekipmanlar oluşturmuştur. Araca eklenen bu ekipmanlardan belirli bir derinlik boyunca ve iki adet olarak açılan çentiklerin ilgili model aracın en düşük direnç kuvveti oluşturmaya yol açtığını ve bunu da, bu çentiklerden oluşan uzunlamasına çevrilerin art izi bölgesindeki balans kaçıklığını ortadan kaldırarak sağladığını belirtmişlerdir. Ahmed aracının yüksekliğine dayalı Reynolds sayısının 600000 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaları sonucunda ortalama direnç katsayısında %11.5'lik bir düşüş sağlanabildiğini belirtmişlerdir. Yemenici & Kasap (2023) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada ise HB (hatchback/heçbek) kasa türüne sahip 1:5 ölçekli bir binek otomobilin arka firar kenarı civarına yerleştirilen 8 adet kavisli ve yamuk çevri üreteçlerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri sayısal olarak daimi şartlar altında incelenmiştir. Kavisli çevri üreteçleri olan aracın direnç katsayısının olmayana nazaran %2.87 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Test edilen çevri üreteçlerinin araç kaldırma katsayısında hafif bir azalmaya sebep olduğunu da göstermişlerdir. Bununla birlikte, bu değişimlerin altında yatan sebepler açıklanmamıştır. Seyhan & Fırat (2022), sıfır ve sıfırdan farklı sapma açılarında, 1:25 ölçekli otobüs modelinin ön alt yüzeyine paralel ve modele göre daha önde olacak şekilde yerleştirilen düz plakaların model aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısının 104000 ± 3000 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında genişliği ve yüksekliği, sırasıyla, otobüs modeli genişliğinin 0.7 ve 0.3 katı olan ince bir plakanın otobüs modeli ön alt yüzeyinden 0.16 otobüs genişliği kadar ileriye yerleştirildiği durumda, otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnç katsayısında %7.1'lik bir düşüş elde edildiği ifade edilmiştir. Bu düşüşün altındaki nedenlerin yeterli açıklıkla oraya koyulmadığını da belirtmişlerdir.

Direnç, dairesel ve kare en-kesite sahip sistemlerde/sistem bileşenlerinde (köprü bacağı, sokak lambası, fabrika bacası, yüksek yapılar, sondaj yükselticisi (drilling riser), deniz altı boru hatları gibi) yüksek bir değere sahiptir. Dahası, yüksek genliğe sahip çalkantı kaldırma (fluctuating lift) kuvveti de onunla birlikte görülür. Yüksek direnç ve yüksek genlikli kaldırma kuvveti, ilgili sistemde/sistem bileşenlerinde ciddi yorulma meydana getirdiğinden ve bunun da sistemin servis ömrünün kısılmasına yol açtığı bilindiğinden, olabildiğince eş zamanlı olarak düşürülmeye çalışılan iki parametredir. Bununla ilgili olarak, Zhou vd. (2015) Reynolds sayısının 7400-18000 aralığında gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışma ile silindir yüzeyine onun genişliği boyunca açılan dikdörtgen oyukların o silindirin direnç katsayısı ve o silindir etrafındaki akışın karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, aynı Reynolds sayısında test edilen

oyuklu ve düz silindirler için oyuk bulunan silindire etkiyen direncin düz silindire kıyasla %18-28 daha düşük olabileceğini göstermişlerdir. Bunu, oyukların, daha küçük boyutlu ve çevrinti şiddeti çok daha düşük kayma tabakaları oluşturmalarına dayandırmışlardır. [Gao vd. \(2020\)](#) ise bir silindirin durma çizgisi üzerine degecek ve serbest akım yönüne paralel olacak şekilde sırayla yerleştirdikleri farklı uzunluklardaki ince plakaların, aerodinamik kuvvetleri düşürebilme kabiliyetlerini Reynolds sayısının 26600 değerinde deneysel olarak test etmişlerdir. Plaka uzunluğunun silindir çapına eşit olduğu durumda plakasız silindire kıyasla ortalama direnç katsayısında %36'lık ve KOK (karelerinin ortalamalarının karekökü) kaldırma kuvvetinin değerinde %63.6'lık bir düşüş sağlanabildiği ifade edilmiştir. Bu düşüşe, plaka ön ucunda oluştuktan sonra plaka yüzeyinden geçip silindir yüzeyine ulaşan çevrilerin, silindirin serbest akış şartlarını değiştirmesinin sebep olduğunu bildirmişlerdir. Deneysel çalışmasının bir amacı da bir silindire etkiyen direnci düşürmek olan [Aksoy \(2024\)](#) ise bunu, o silindirin üzerine farklı açılarda konumlarına farklı sapma açılarıyla yerleştirdiği çevri üreteçleri ile gerçekleştirmeye çalışmıştır. Reynolds sayısının 8000 değerinde yaptığı çalışması sonucunda direnç katsayısını %33.3 civarında düşürülebildiğini belirtmiştir. Bu düşüşü, ilgili çevri üreticinin, zaman-ortalama tekrar dolaşım (recirculation) bölgesinin uzunluğunda yarattığı artışla ilişkilendirmiştir. [Lin vd. \(2016\)](#) de genişliği boyunca genliği sabit tutup dalga boyunu değiştirerek elde ettikleri sinüzoidal yüzeye sahip dairesel silindir art izindeki akış yapısını ve PAKY uygulanmış silindire etkiyen aerodinamik karakteristikleri Reynolds sayısının 3000 değerinde sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, direncin %16 civarında ve KOK kaldırma değerinin ise %93 civarında düşürülebildiğini ifade etmişlerdir. Bu düşüşler, dalgalı silindir genişliğince (spanwise) oluşan çevrilerin silindir uzunluğunca (streamwise) oluşan çevriler tarafından zayıflatılmasına dayandırılmıştır. [Tunay \(2023a\)](#) bir silindire, akış doğrultusuyla çakışık olan silindir yatay eksenli boyunca açtığı farklı yüksekliklerdeki yarıkların akış ve aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Büyük burgaç benzetimi (Large Eddy Simulation, LES) türbülans modelini kullandığı ve çapa-dayalı Reynolds sayısının 3900 değerinde gerçekleştirdiği akış benzetimi çalışmaları sonucunda silindir çapının 0.2 katı kadarlık bir yüksekliğe sahip yarığın silindire açılması sonucu zaman-ortalama direnç katsayısında %11.3'lük bir düşüşün sağlandığını belirtmiştir. Bu düşüşü silindir arka açıklığından çıkan jetin silindir arka yüzeyindeki düşük basıncı yükseltmesi ile ilişkilendirmiştir. [Tunay \(2023b\)](#) ise bir silindir etrafındaki akışı, onun dış kısmına eşmerkezli olacak şekilde yerleştirdiği gözenekli başka bir silindir vasıtasıyla çapa-dayalı Reynolds sayısının 5000 değerinde kontrol etmiştir. LES türbülans modelini kullandığı üç-boyutlu sayısal çalışmasında gözeneklilik oranını (açıklık bulunan alanların tüm yanal alana oranı) 0.5 değerinde sabit tutmuştur. Gözenekli silindirin eklenmesi sonucunda direnç katsayısında %69'luk bir düşüş olduğu ifade edilmiştir. Eş zamanlı olarak, KOK kaldırma katsayısında ise 7/8'lik bir düşüş elde edildiği gösterilmiştir.

Yukarıda aerodinamik performanslarından bahsedilen AAKY ve PAKY yöntemlerinden her biri tek bir AKY'den meydana gelmektedir. Bazı araştırmacılar, bir amaç uğruna birbiriyle uyumlu çalışabilecek birden çok AKY'nin bir araya getirilmesi ve AKY'ler ile ilgili test parametrelerinin optimize edilmesi sonucunda daha verimli sonuçlar elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bununla ilgili olarak, [Akbiyık & Akansu \(2021\)](#), bir dairesel silindire etkiyen ortalama direnci, 3.75 silindir çapına sahip ve silindire arka durma noktasından temas eden ayırıcı plakayı (PAKY) yalnız kullanarak, silindir durma noktasından $\pm 90^\circ$ konumlandırılan iki adet plazma aktuatörünü (AAKY) yalnız kullanarak ve ayırıcı plaka ile plazma aktuatörünü (PAKY+AAKY) birlikte kullanarak düşürmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmayı gerçekleştirdikleri iki farklı Reynolds sayısında da birlikte kullanılan hibrit AKY ile diğerlerine nazaran çok daha düşük ortalama direnç değerleri elde edebildiklerini göstermişlerdir. [Zheng vd. \(2021\)](#) ise ana eksenli yatay ve düşey pozisyonlarda konumlandırılan iki eliptik silindire etkiyen aerodinamik karakteristiklerde iyileşme yaratmak için yalnız yüzey pürüzlülüğünün (PAKY) ve yüzey pürüzlülüğü ile birlikte yüzeydeki yarıktan yapılan emmenin (PAKY+AAKY) birlikte kullanıldığı durumları deneysel olarak test etmişlerdir. Ana eksenli düşey olan eliptik silindir için hem yalnızca pürüzlü hem de pürüzsüz silindire kıyasla ortalama direnç katsayısı, KOK direnç katsayısı ve KOK kaldırma katsayısının her üçünde de ciddi düşüşler sağlanabilmiştir. [Galvao vd. \(2008\)](#) ise arka yüzey üçgen kaplama (PAKY) ve silindir yatay eksenine simetrik yerleştirilen kanat profilleri (PAKY) kullanarak bir çapraz akıştaki bir dairesel silindirin direncini düşürmeyi de amaçlamışlardır. Reynolds sayısının 8500 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında, hem arka yüzey üçgen kaplama hem de simetrik kanatları birlikte kullanmanın (PAKY+PAKY), yalnız üçgen kaplamanın kullanıldığı (dirençte %15 düşüş) ve yalnız simetrik kanatların kullanıldığı (dirençte artış) durumlardan çok daha fazla direnç düşürme kabiliyeti olduğunu (dirençte %48 düşüş) belirtmişlerdir. Sonuç olarak da, cisim etrafında potansiyel akış deseni oluşturma girişiminin cisme etkiyen direnci düşürmek için iyi bir başlangıç yolu olduğunu ifade etmişlerdir. [Fırat vd. \(2024\)](#) ise daimi emme ve üfleme Venturi etkisi üzerinden bir araya getirdikleri ve Venturi aktuatörü olarak isimlendirdikleri AKY'yi dairesel silindir üzerinde Reynolds sayısının 28000 değeri

için sayısal olarak test etmişlerdir. Çalışmada, farklı tasarımlara sahip pasif Venturi aktuatörlerinin çeşitli aerodinamik ve akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini ölçek-uyarlamalı benzetim (Scale-Adaptive Simulation, SAS) türbülans modelini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, iki yarıkli ve difüzör açısı 6° olan modele ait otalama direnç katsayısı, KOK direnç katsayısı ve KOK kaldırma katsayısının, düz dairesel silindire kıyasla, sırasıyla, %28.6, %58.5 ve %81.2 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıdaki paragrafta verilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere farklı kontrol yöntemlerinin amaca uygun şekilde bir arada çalışmasını sağlamak, yani hibrit bir akış kontrol yöntemi tasarlamak ve işe yararlığını ilgili parametreler açısından test etmek, arzu edilen amaca daha verimli bir şekilde ulaşılmasına yol açabilmektedir. [Firat vd. \(2024\)](#) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada pasif/aktif ventüri aktuatörleri tanıtılmış ve bir dairesel silindir içerisine gömülmüş 4 farklı pasif ventüri aktuatorünün hücum açısız ve $Re=28000$ durumunda aerodinamik karakteristikleri ve art izi akış yapıları incelenmiştir. Bu çalışmada da yine [Firat vd. \(2024\)](#) tarafından tasarlanan bir pasif venturi aktuatörü (PVA) türü (iki yarıkli ve difüzör açısı 14° olan) silindirik model içerisine yerleştirilmiştir. Literatürde henüz rastlanılmadığı için mevcut çalışma ile literatüre kazandırılması planlanan durumlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Farklı karakteristik uzunluğa sahip cisimler etrafında (anten, köprü bacağı, sokak lambası gibi) farklı Re değerlerine sahip akışlar akar. Reynolds sayısının PVA'lı modele ait aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi henüz incelenmemiş bir konudur. Burada, Reynolds sayısının PVA'lı model üzerine etkileyen aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi $28000 \leq Re \leq 80000$ için test edilecektir. Bu inceleme sayesinde farklı Re değerlerindeki aerodinamik etkiler daha belirgin bir şekilde okuyucuya sunulacak ve aerodinamik karakteristiklerin değişiminden sorumlu fiziksel olaylar gün yüzüne çıkarılacaktır.
- Atmosferin dinamik bir yapıya sahip olmasından dolayı hücum açısı (α), kara ve özellikle de hava taşıtları açısından çok önemli bir parametredir. Aerodinamik açıdan bu çalışma içerisinde test edilecek olan PVA için hücum açısının hesaba katıldığı bir çalışma henüz mevcut değildir. Burada, hücum açısının PVA'lı model üzerine etkileyen aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ için test edilecektir. Bu sayede, PVA'nın aerodinamik açıdan sağladığı avantajların farklı hücum açıları için korunup korunmadığı okuyucuya net bir şekilde sunulacaktır.

Çalışma içerisinde, sırasıyla, aşağıdaki süreçler gerçekleştirilecektir:

- Test edilecek modeller detaylarıyla açıklanacaktır.
- Kullanılan deneysel ve sayısal yöntemler açıklanacaktır.
- Hücum açısız durumda bir Reynolds sayısı aralığı için PVA'nın aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.
- Sabit bir Re değerinde bir hücum açısı aralığı için PVA'nın aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.
- Bir Reynolds sayısı aralığı için PVA'lı silindirin direnç performansı diğer bazı pasif akış kontrol yöntemleri uygulanmış silindirlerle kıyaslamalı olarak verilecektir.

Deneysel verilerin akış fiziği ile ilgili bir olguyu açıklamada yetersiz kaldığı yerde benzetim verilerinden destek alınacaktır.

2. Materyal ve yöntem

2. Material and method

Çalışmanın bu bölümü 5 alt bölümden meydana gelmektedir. Bu alt bölümlerde, sırasıyla, çalışmada kullanılan boyutsuz parametreler, test edilen modeller ve üretim yöntemleri, deneysel çalışmanın detayları, sayısal çalışmanın detayları ve sayısal çalışmanın geçerlemesi konularına değinilmiştir.

2.1. Boyutsuz parametreler

2.1. Nondimensional parameters

Deneysel ve sayısal çalışmaların ilgili kısımlarında kullanılan boyutsuz sayılar aşağıda sırayla verilecektir. Bu boyutsuz sayıların ilki çapa-dayalı Reynolds sayısıdır (Re) ve aşağıdaki gibi ifade edilir ([Firat vd., 2024](#)).

$$Re = \frac{\rho \cdot \overline{U_\infty} \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

Burada yer alan $\overline{}$ operatörü içerisinde yazılan simgenin zaman-ortalamasını temsil etmektedir. Mevcut araştırmada Reynolds sayısının 28000-80000 aralığı çalışılmıştır. Aerodinamik direnç ve kaldırma katsayılarının (C_D ve C_L) zaman-ortalama ve KOK (karelerinin ortalamalarının karekökü) değerleri, sırasıyla, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Fırat vd., 2024).

$$\overline{C_D} = \frac{2 \cdot \overline{F_D}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2 \cdot A_F} \quad (2)$$

$$\overline{C_L} = \frac{2 \cdot \overline{F_L}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2 \cdot A_F} \quad (3)$$

$$C_{D-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{D,i} - \overline{C_D})^2} \quad (4)$$

$$C_{L-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{L,i} - \overline{C_L})^2} \quad (5)$$

Burada yer alan $C_{D,i}$ simgesi hesaplamaya katılan i 'inci anlık direnç katsayısının değerini ve $C_{L,i}$ simgesi de hesaplamaya katılan i 'inci anlık kaldırma katsayısının değerini temsil etmektedir. Basınç katsayısı (C_P) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Fırat vd., 2024).

$$\overline{C_P} = \frac{2 \cdot \overline{\Delta P}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2} \quad (6)$$

Yarık için hacimsel debi katsayısı (C_Q) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Fırat vd., 2024).

$$\overline{C_Q} = \frac{\overline{V} \cdot A_S}{\overline{U_\infty} \cdot A_F} \quad (7)$$

Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Fırat vd., 2024).

$$CFL = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

Strouhal sayısı (St) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Fırat vd., 2024).

$$St = \frac{f \cdot D}{\overline{U_\infty}} \quad (9)$$

Son olarak da yüzde hata (ε) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Fırat vd., 2024).

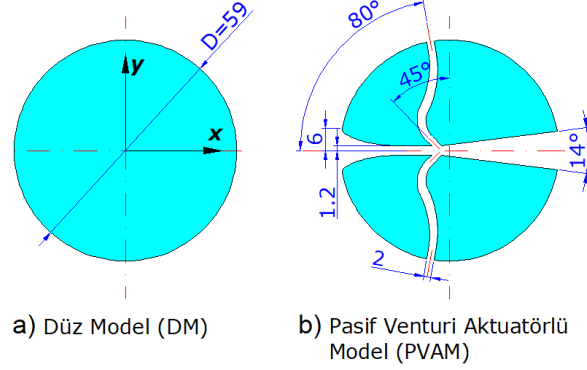
$$\varepsilon = \frac{|\text{Yeni tahmin} - \text{Mevcut tahmin}|}{|\text{Yeni tahmin}|} \cdot 100 \quad (10)$$

2.2. Modeller

2.2. Models

Mevcut çalışmada 2 adet model test edilecektir (Şekil 1). Bunlardan ilki modifiye edilmemiş düz silindirik modeldir (DM). Bu model hem sayısal modelin geçerleme çalışmalarında hem de ikinci model olan pasif

venturi aktuatörlü modelin (PVAM) aerodinamik performansını ölçmek için referans olarak kullanılacaktır. Modellerin çapları 0.059 m ve iki dairesel uç plaka arasında kalan kısımlarının genişlikleri ise 0.44 m'dir. Yarıklı kısım ise 0.40 m genişliğindedir. Bu durumda modellerin blokaj oranları %10.35 ve şekil oranları da 7.46'dır. Modeller eriyik yığma modelleme (EYM/FDM) teknolojisiyle çalışan bir yazıcıda bastırılmış sonrasında da dış yüzeyleri ince zımpara ile zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir (Şekil 2). İç yüzeylere erişimin zor olmasından dolayı buralara pürüzsüzleştirme işlemi yapılamamıştır.



Şekil 1. Test edilecek olan modeller: a) Düz model (DM) ve b) Pasif venturi aktuatörlü model (PVAM; [Fırat vd., 2024](#)). Tüm ölçüler milimetre cinsindendir. Çapraz akış yönü soldan sağdır.

Figure 1. Models to be tested: a) Plain model and b) Model with passive venturi actuator ([Fırat et al., 2024](#)). All dimensions are in millimeters. Cross flow direction is left to right.



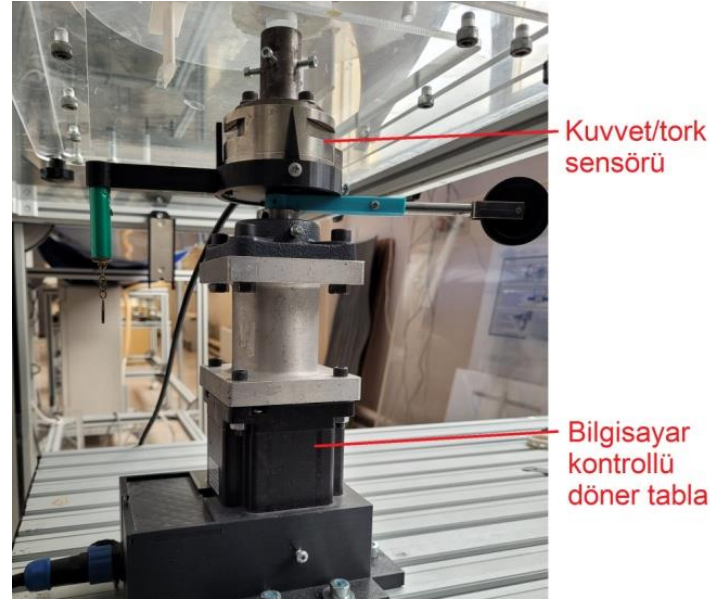
Şekil 2. Üç-boyutlu yazıcıda basıldıktan sonra dış yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiş PVAM.

Figure 2. PVAM with smooth outer surfaces after printing on a three-dimensional printer.



Şekil 3. Rüzgar tüneli.

Figure 3. Wind tunnel.



Şekil 4. Bütünleşik haldeki aerodinamik kuvvet ölçüm ve açı ayar sisteminin bir görüntüsü.
Figure 4. A view of the integrated aerodynamic force measurement and angle adjustment system.

2.3. DeneySEL yöntemler

2.3.Experimental methods

Bu araştırmanın deneysel kısmı Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde bulunan 570 mm × 570 mm test bölgesi en-kesit alanına sahip açık çevrim rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Tünel daralma konisinin daralma oranı 6.3:1'dir. Aerodinamik direnç ve kaldırma kuvvetlerinin ölçümleri $Re=28000-80000$ aralığında ve belirlenen bir Re değeri (28000) için -30° 'den $+30^\circ$ 'ye kadar olan hücum açısı (α) aralığında gerçekleştirilmiştir. Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı $\bar{U}_\infty=7.4\pm0.2$ m/s ($Re=28000$ 'e tekabül etmekte) iken serbest akım türbülans şiddeti yaklaşık %0.5, $\bar{U}_\infty=21.1\pm0.6$ m/s ($Re=80000$ 'e tekabül etmekte) iken serbest akım türbülans şiddeti %0.9 olmakla birlikte aralıktaki değişim neredeyse doğrusaldır. Testler tünel içi serbest akım sıcaklığının 22.5 ± 1 °C ve yerel atmosfer basıncının 101 ± 1 kPa olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Tünel içi serbest akım hızı değeri Pitot-tüplü dijital mikromanometre ile ölçülmüştür (PCE Inst., PCE PFM2). Gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonucunda Re değerindeki belirsizlik değerinin %68.7 güven aralığı için ± 800 olduğu hesaplanmıştır (UKAS, 2024).

Test modellerinin alt yüzeyine, onların eksenleriyle çakışık olacak ve rijit bir bağlantı sağlayacak bir saplama çubuğu eklenmiştir. Saplama çubuğunun diğer ucu ise, sırayla, alt taraftaki uç plaka ve rüzgar tüneli test bölgesi alt duvarındaki deliklerden geçerek 6-eksenli kuvvet/tork sensörünün (Schunk, FTD-Gamma SI-32-2.5) üzerindeki mil tutma aparatına yerleştirilmiştir. Bu sensörün alt kısmında laboratuvar personeli tarafından tasarlanmış ve imal edilmiş olan bilgisayar kontrollü döner tabla yer almaktadır. En altta ise tüm sisteme zemin olan sabit tabla yer almaktadır (Şekil 4). Kuvvet ölçümlerindeki örnekleme oranı 2000 Hz, örnek alma süresi ise 30 s'dir. Gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonucunda $\bar{C}_D$ ile $\bar{C}_L$ değerlerine ait belirsizlik değerinin %68.7 güven aralığı için aynı ve ± 0.04 olduğu hesaplanmıştır (UKAS, 2024).

Deneysel çalışmada, yüksek Re değerlerine erişebilmek adına model çaplarının yüksek tutulması neticesinde blokaj oranı kabul edilebilir değerin üzerinde çıkmıştır. Bunu telafi edebilmek adına, deneysel yolla elde edilen direnç ve kaldırma kuvvetlerinden hesaplanan zaman-ortalamalı direnç ve kaldırma katsayılarına ($\bar{C}_{D-Den}$ ve $\bar{C}_{L-Den}$) Allen & Vincenti (1944) tarafından önerilen aşağıdaki düzeltmeler uygulanmıştır.

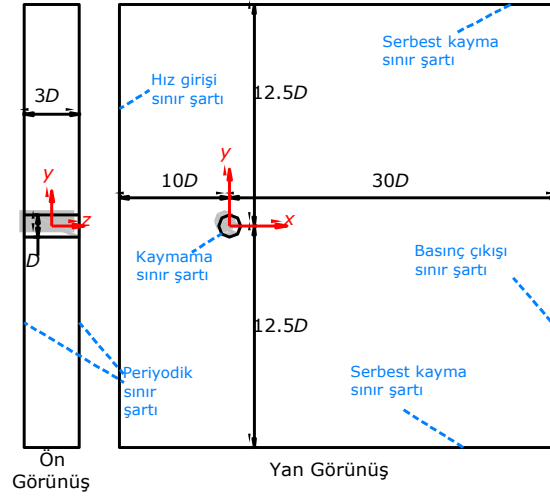
$$\frac{\bar{C}_D}{\bar{C}_{D-Den}} = 1 - 0.5 \cdot \bar{C}_{D-Den} \cdot \left(\frac{D}{H}\right) - 2.5 \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{\bar{C}_L}{\bar{C}_{L-Den}} = 1 - 0.5 \cdot \bar{C}_{L-Den} \cdot \left(\frac{D}{H}\right) - 2.5 \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^2 \quad (12)$$

2.4. Sayısal yöntemler

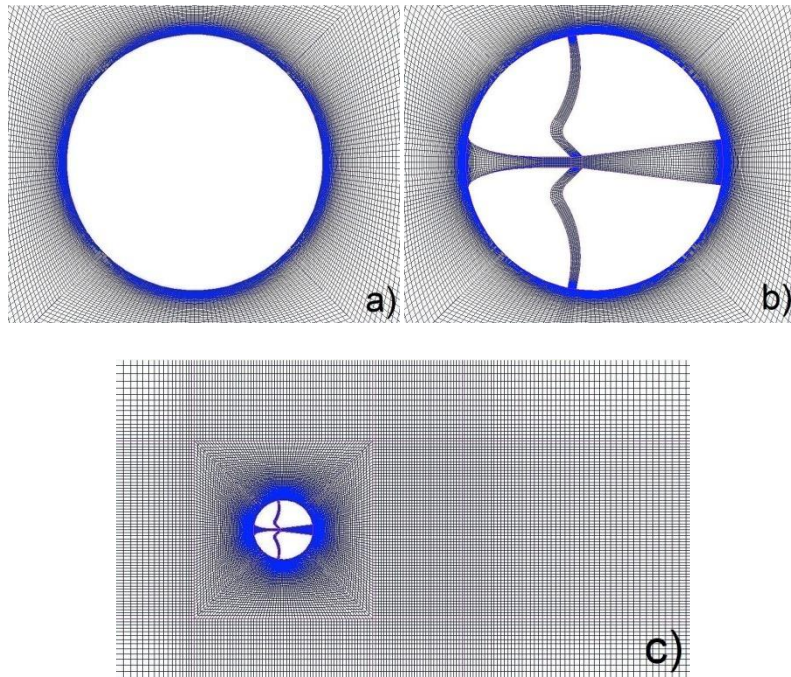
2.4. Numerical methods

Modeller etrafındaki akışın benzetimi üç-boyutlu bir hesaplama bölgesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen prizması şeklindeki hesaplama bölgesinin geometrisine ait detaylar ve sınır şartları Şekil 5'te sunulmuştur. Modellerin merkezi, hız girişi sınır şartının atandığı ön yüzeyden $10D$ mesafe geride, serbest kayma (free-slip) sınır şartının atandığı üst ve alt yüzeylere eşit ve $12.5D$ mesafede, basınç çıkışı sınır şartının atandığı arka yüzeyden ise $30D$ mesafe ileridedir. Bu durumda blokaj oranı %4 olmaktadır ve çoğu sayısal çalışmanınkinden daha düşük olarak alınmıştır (Prsic vd., 2014; Lloyd & James, 2016). Modeller üzerine kaymama (no-slip) sınır şartı atanmıştır. Yanal yüzeylere ise periyodik sınır şartı atanmıştır. Modellerin genişlikleri eşit ve $3D$ 'dir. Bu mesafe literatürle uyum içerisinde (Cheng vd., 2017).



Şekil 5. Hesaplama bölgesi geometrisi ve sınır şartları.

Figure 5. Computational domain geometry and boundary conditions.



Şekil 6. Modellerin yakın ve uzak çevresindeki yapılandırılmış ağların yandan görünüşleri: a) DM civarında, b) PVAM civarında, c) PVAM yakın art izinde.

Figure 6. Side views of structured meshes in the near and far vicinity of the models: a) Near the DM, b) near the PVAM, and c) in the near wake of PVAM.

Hesaplama bölgesi, yapılandırılmış altı yüzü ağırla donatılma maksatlı çeşitli sayıda bloklara bölünmüştür (Şekil 6). Bu işlem esnasında türbülans modeli olarak seçilen büyük burgaç benzetiminin (LES) duvar çözünürlüğü şartları ($\Delta x^+ \approx 40$, $\Delta y^+ \approx 1$ ve $\Delta z^+ \approx 20$) büyük oranda yerine getirilmiştir (Ansys, 2013b). Mevcut çalışmada $\Delta x^+ \approx 28$, $\Delta y^+ \approx 1$ ve $\Delta z^+ \approx 107$ 'dir.

Modeller etrafındaki daimi olmayan sıkıştırılmaz akışın benzetiminde LES türbülans modeli kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denklemlerinin, karakteristik uzunluğu $\Delta = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$ olan kapalı uzaysal filtre ile filtrelenmiş formları sırasıyla aşağıda verilmiştir (Kim & Menon, 1999).

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \tau_{ij} \right) + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (14)$$

Ağ-altı ölçek modeli olarak WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity) tercih edilmiştir (Nicoud & Ducros, 1999). Birçok akış türü için tatmin edici sonuçlar vermesinden dolayı WALE sabitinin (C_w) değeri 0.325 olarak atanmıştır. Sayısal çalışmada kullanılan çözümüye dair diğer detaylar Tablo 1'de sunulmuştur. Teorik detaylara ise (Ansys, 2013a; Ansys, 2013b) referanslarından erişilebilir.

Tablo 1. Sayısal çalışmadaki çözümü detayları.

Table 1. Solver details in the numerical study.

Ayar yeri	Kullanılan algoritma ve/veya değeri
Çözücü	Basınç-tabanlı algoritma
Türbülans modeli	LES (Large eddy simulation)
Ağ-altı ölçek modeli	WALE ($C_w=0.325$)
Basınç-hız bağlaşımı	PISO (Pressure-Implicit with splitting of operators)
Gradyan şeması	Ağ-tabanlı en küçük kareler (Least squares cell based)
Basınç ayrıklaştırması	İkinci derece
Momentum ayrıklaştırması	Sınırlandırılmış merkezi farklar (Bounded central differencing, BCD)
Zaman ayrıklaştırması	Sınırlandırılmış ikinci dereceden kapalı (Bounded second order implicit)
Zaman adımı boyutu	0.000012 s
İç iterasyon sayısı	6-8

Tablo 2. Mevcut sayısal çalışmanın diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla kıyası.

Table 2. Comparison of the present numerical study with other experimental and numerical studies.

Referans	Re	%Tu _x	$\bar{C}_D$	C_{L-KOK}	St
Gao vd. (2020); Deneysel	26600	0.40	1.22	0.46	0.201
Gao vd. (2022); Deneysel	32000	0.37	1.19	0.54	0.217
Yu vd. (2023); Deneysel	32000	0.40	1.12	0.36	0.222
Fırat vd. (2023); Sayısal (SAS)	32000	0.20	1.16	0.52	0.211
Mevcut çalışma; Deneysel	36000	0.50	1.24	-	0.207
Mevcut çalışma; Sayısal (LES)	36000	0.50	1.26	0.67	0.185
Norberg (2003); Ampirik	36000	-	-	0.49	0.190
Clapperton & Bearman (2018); Deneysel	40000	0.15	1.24	-	0.193
Gu vd. (2012); Deneysel	50000	0.10	1.18	0.47	0.207
Xu vd. (2020); Sayısal (LES)	50000	-	1.23	0.65	0.210

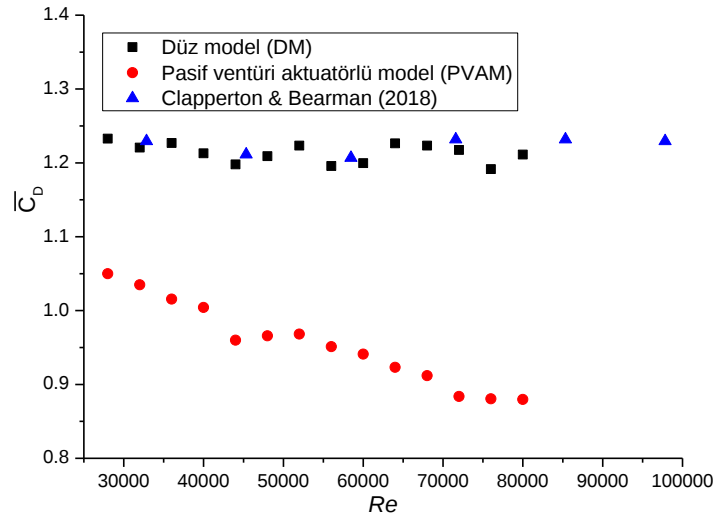
Sayısal çalışmalar $Re=36000$ değerinde ve sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma yapan Ansys Fluent 18.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan hava özellikleri ($\rho=1.186 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu=0.00001842 \text{ kg/m-s}$), deneysel çalışmada ölçülenle aynı değerlere sahiptir. Sayısal çalışmada hız girişi sınır şartına atanan serbest akım hız değeri 9.47 m/s , türbülans şiddeti %0.5 ve türbülans viskozite oranı da 0.7 olarak atanmıştır (Altair Engineering, 2024). Benzetim, türbülansın akış içerisindeki gelişimini büyük ölçüde tamamlaması adına, ilk olarak, 0.0001 s zaman adım boyutu ile 20000 zaman adımı koşturulmuştur (toplam 2 s). Sonrasında, hem CFL sayısının maksimum değerini 1 civarında tutabilmek hem de kullanılması gereken zaman adımı boyutuna geçişi sağlıklı bir şekilde tamamlayabilmek adına 0.000012 s zaman adımı boyutu ile 10000 zaman adımı daha koşturulmuştur (toplam 2.12 s). Son olarak, akışla ilgili karakteristiklerin zaman-ortalamalı

değerlerini elde edebilmek adına 0.000012 s zaman adımı boyutu ile 80000 zaman adımı daha koşturulmuştur (toplam 3.08 s). Bu son koşu modellerin art izinde 30 çevri dökülme süresinden daha fazla bir süreye tekabül etmektedir ve bu da zaman-ortalama istatistik elde etmek için yeterlidir. Her bir zaman adımının kalıntı değere dayalı yakınsama kriteri, süreklilik denklemi için 10^{-3} ve hız bileşenleri için 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Benzetimler 40 çekirdekli bir iş istasyonunda paralel işlem yapılarak gerçekleştirilmiştir. En düşük zaman adımı boyutu ile gerçekleştirilen benzetimin 1 saniyesi 6-8 günde tamamlanabilmektedir.

2.5. Geçerleme

2.5. Validation

Eldeki hesaplama kaynaklarının ve kullanım süresinin kısıtlı olmasından dolayı sayısal yöntemin doğrulanması (verification) gerek ağıdan bağımsızlık gerek de zamandan bağımsızlık şeklinde gerçekleştirilememiştir. DM ve PVAM etrafındaki akışın benzetiminde kullanılan ağ sayıları, sırasıyla, 3424800 ve 3697200'dür. Bunun yanında, her iki model için CFL sayısının hesaplama bölgelerinin %95'inin üzerinde kalacak şekilde 1 değerinden düşük tutulmuş olması, model yüzeylerinde $\Delta x^+ \leq 40$ ve $\Delta y^+ \leq 1$ değerlerinin sağlanmış olması ve ağ geçiş oranlarının 1.2'den büyük olmayacak şekilde tasarlanmış olması durumlarına dayanarak mevcut sayısal modelin yeterince düşük bir hata ile akış benzetimini gerçekleştireceği öngörülmüştür. Yapılan geçerleme çalışması sonuçları bu öngörümüzü doğrular niteliktedir (Tablo 2). Tabloda, $\overline{C_D}$ değerinin hafifçe yüksek tahmin edildiği, C_{L-KOK} değerinin biraz yüksek tahmin edildiği, St değerinin ise hafifçe düşük tahmin edildiği açıktır.



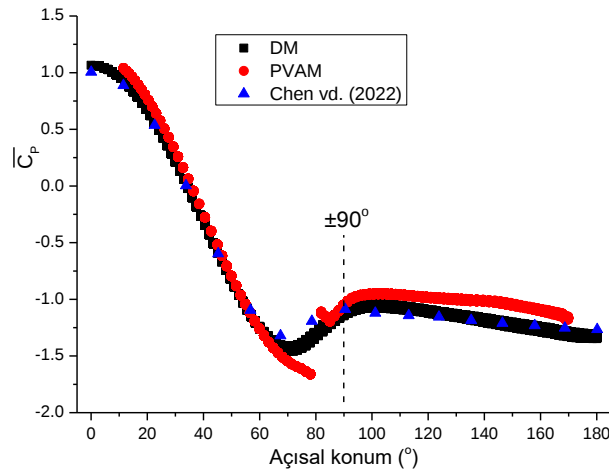
Şekil 7. Deneyssel olarak elde edilen zaman-ortalama direnç katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimleri. Clapperton & Bearman'ın (2018) deneyssel çalışmasından alınan $\overline{C_D}$ verileri de mevcut deneyssel sistemin geçerlemesi için grafiğe eklenmiştir.

Figure 7. Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with Reynolds number. The $\overline{C_D}$ data from the experimental work of Clapperton & Bearman (2018) are also plotted to validate the present experimental system.

3. Bulgular ve tartışma

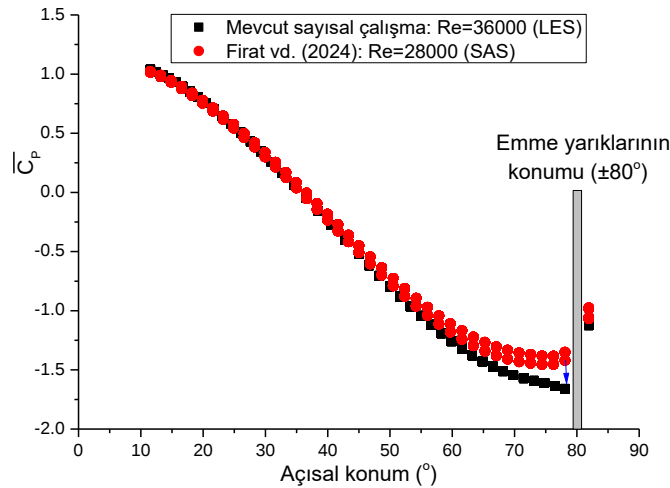
3. Results and discussion

Düz modele (DM) ve pasif venturi aktuatörlü modele (PVAM) etkiyen zaman-ortalama direnç katsayılarının, $\overline{C_D}$, çapa-dayalı Reynolds sayısına, Re , göre değişimleri Şekil 7 içerisinde verilmiştir. Literatürden, düz dairesel silindirik modele ait $\overline{C_D}$ değerinin alt kritik bölgede yaklaşık $Re > 10000$ için 1.2 civarında sabit kaldığı bilinmektedir. Şekilde ilk göze çarpan durum, mevcut deneyssel sistem ile elde edilen $\overline{C_D}$ değerlerinin de 1.2 civarında olduğudur. Dahası, mevcut $\overline{C_D}$ değerleri Clapperton & Bearman'ın (2018) oldukça uyumludur. Bu da mevcut kuvvet ölçüm sistemin sağlıklı ölçümler aldığını göstermektedir. Diğer göze çarpan ve konuyla direkt alakalı olan durum ise PVAM'ye etkiyen $\overline{C_D}$ 'nin artan Re ile neredeyse doğrusal olarak azalmasıdır. Test edilen Re aralığı için PVA kullanılarak $\overline{C_D}$ değerindeki en yüksek düşüş $Re=80000$ değerinde ve %27.3 olarak elde edilmiştir. Bu azalmanın nedenlerini ortaya çıkarmak için yeterli deneyssel ve sayısal sistem altyapısı bulunmadığından hem literatür hem de mevcut sayısal çalışmadan faydalanılarak çıkarımlarda bulunulacaktır.



Şekil 8. Sayısal olarak elde edilen zaman-ortalamalı basınç katsayılarının açısal konum ile değişimleri. [Chen vd.'nin \(2022\)](#) $Re=38000$ değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmasından alınan $\overline{C_p}$ verileri de mevcut sayısal çalışmanın geçerlemesi için grafiğe eklenmiştir.

Figure 8. Variations of the numerically obtained time-averaged pressure coefficients with angular position. The $\overline{C_p}$ data from the experimental study of [Chen et al. \(2022\)](#) at $Re=38000$ were also added to the graph to validate the present numerical study.



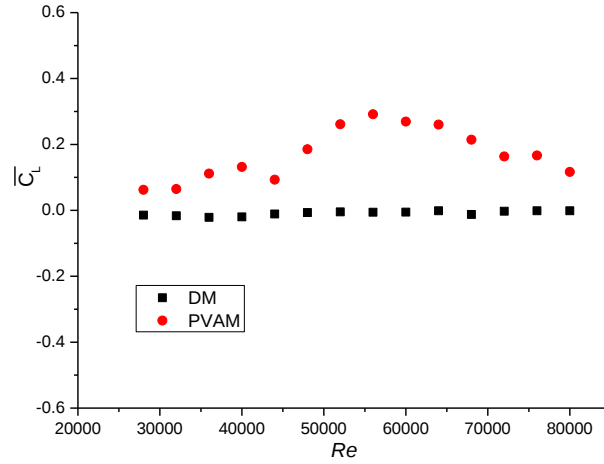
Şekil 9. Farklı Reynolds sayılarında PVAM'lerin yüzeylerindeki zaman ortalamalı basınç katsayısı dağılımları.

Figure 9. Time-averaged pressure coefficient distributions on the surfaces of the PVAMs at different Reynolds numbers.

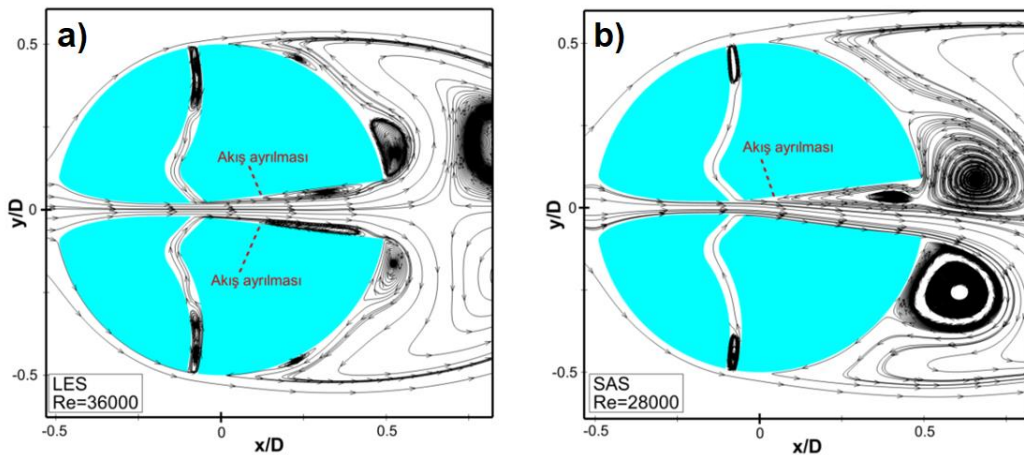
Şekil 8'de, HAD benzetiminden elde edilen DM ve PVAM çevresindeki zaman-ortalamalı basınç katsayısı dağılımları sunulmuştur. Şekil içerisinde, $Re=36000$ değerinde DM için gerçekleştirilen mevcut sayısal çalışmadan elde edilen $\overline{C_p}$ dağılımı ile $Re=38000$ değerinde [Chen vd. \(2022\)](#) tarafından deneysel olarak düz silindirik model üzerinde gerçekleştirilen çalışmadaki $\overline{C_p}$ dağılımının iyi bir uyum içerisinde olduğu açıktır. Buna ek olarak, PVAM'nin daha düşük bir $\overline{C_p}$ değerine sahip olması, hem ön yüzeydeki yüksek basıncın emme yarıkları sayesinde düşürebilmesinden ($\pm 65^\circ$ 'den $\pm 80^\circ$ 'ye kadar) hem de arka kısımdaki düşük basıncın daralan-genişleyen eksenel yarık sayesinde arttırabilmesinden ($\pm 90^\circ$ 'den $\pm 170^\circ$ 'ye kadar) kaynaklanmaktadır (Şekil 8). Bu durum, [Fırat vd. \(2024\)](#) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmadaki veriler ve açıklamalar ile uyushmaktadır. Emme yarıkları öncesi açısal konumlardan yarık sonrası açısal konumlara geçildiğinde PVAM'nin $\overline{C_p}$ dağılımında bir sıçrama gözlemlenmiştir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Yarıklardan yapılan emme, model yüzeyinde gelişen sınır tabakanın alt kısmında yer alan düşük momentumlu kısmı ortadan kaldırmıştır. Kalkan kısmın yerini ise serbest akımla etkileşimde olan ve bu yüzen de daha yüksek momentuma sahip sınır tabakanın üst kısmı almıştır ([Gad-el-Hak, 2000](#)). Bu üst kısım ise temas ettiği yüzeye tutunurken basınçta ve sürtünme kuvvetinde bir artış meydana getirmiştir. Yüksek momentumlu bu üst kısım, aynı zamanda, model yüzeyinden ayrılmayı DM'ye göre 5° daha geciktirmiştir.

Artan Reynolds sayısı ile $\overline{C_D}$ 'deki azalma arasındaki bağlantıyı kurabilmek için Fırat vd. (2024) tarafından $Re=28000$ değerinde gerçekleştirilen sayısal çalışmadaki PVA'lı modele ait $\overline{C_D}$ dağılımı ile $Re=36000$ değerinde gerçekleştirilen mevcut sayısal çalışmadaki PVA'lı modele ait $\overline{C_D}$ dağılımı kıyaslanmıştır (Şekil 9). Bu kıyaslama, model dış yüzeyi için ve 0° 'den $\pm 80^\circ$ 'ye kadar olan aralıkta yapılmıştır. Bunun esas nedeni, bu aralıkta model dış yüzeylerinde laminar sınır tabakanın yer alması ve herhangi bir ayrılmanın gerçekleşmemiş olmasından dolayı da oldukça doğru sonuçlar elde edilebilmesindendir. Şekil 9'da, Fırat vd. (2024) tarafından model alt ve üst yüzeyinden elde edilen $\overline{C_D}$ dağılımlarının çakışık olmaması, model içindeki yatay eksene göre asimetric olan akış yapısının model etrafındaki akışı da yatay eksene göre asimetric hale getirmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9'da Re 'nin 28000 'den 36000 'e artırılması sonucu ön yüzeydeki yüksek basıncın daha da düşürüldüğü görülmektedir. Bu düşüş $\overline{C_D}$ değerinde de düşüşe sebep olmaktadır. Bu düşüş yalnızca emme yarıklarından emilen akışkan debisinin artması sonucunda sağlanabilir. Artan Re ile emme yarığı debisinde gözlemlenen artış ise PVAM'nin boğaz kısmındaki basınç ile dış yüzeydeki basınç arasındaki farkın daha da açılmasıyla açıklanabilir.

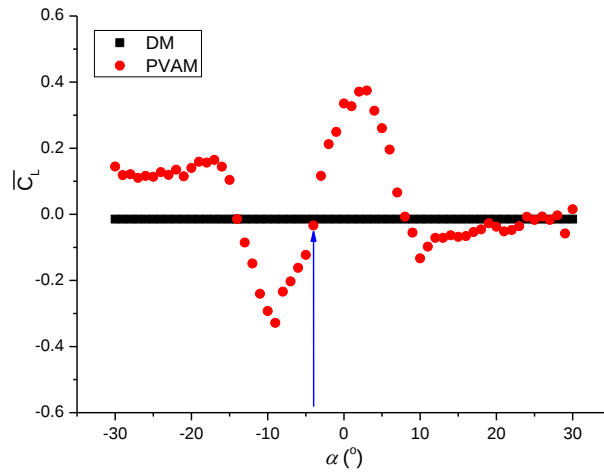
Diğer yandan, PVAM'nin boğaz kısmındaki basınç ile dış yüzeyindeki basınç arasındaki farkın açılması için eksenel yarığa artan Re ile daha fazla debide akışkan girmiş olması gerektiği çıkarımı yapılabilir. Bu akışkan ise arka açıklıktan jet olarak düşük basınç bölgesine yönelerek buradaki basınç değerini artan Re ile daha da arttıracaktır. Bu artış da $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüşe sebep olacaktır. Yukarıdaki paragraf ile bu paragrafta açıklanan durumlar artan Re ile neden $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüş yaşandığını makul bir şekilde ortaya koymaktadırlar.



Şekil 10. Deneyssel olarak elde edilen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimleri.
Figure 10. Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with Reynolds number.

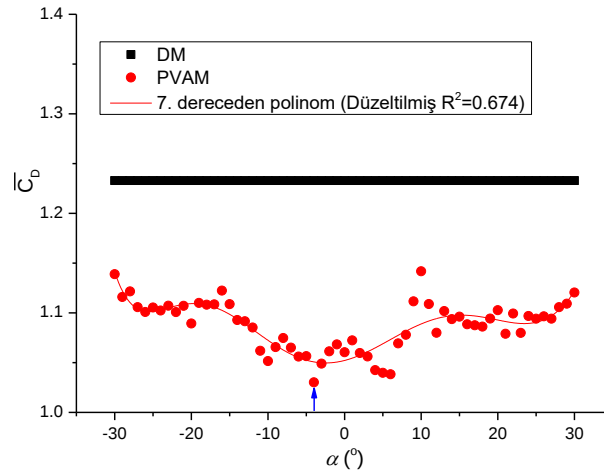


Şekil 11. Orta açıklıkta, $z/D=0$, zaman-ortalamalı akım çizgisi topolojisinin karşılaştırılması: a) LES türbülans modeli ($Re=36000$) ve b) SAS türbülans modeli ($Re=28000$; Fırat vd., 2024)
Figure 11. Comparison of time-averaged streamline topology at the midspan, $z/D=0$: a) LES turbulence model ($Re=36000$) and b) SAS turbulence model ($Re=28000$; Fırat et al., 2024)



Şekil 12. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.
Figure 12. Variations of the experimentally obtained time-averaged lift coefficients with attack angle.

İlgili modellere etkiyen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının, $\overline{C_L}$, Re ile değişimleri ise Şekil 10 içerisinde verilmiştir. Şekilde, PVAM'ye etkiyen $\overline{C_L}$ değerinin DM'ye etkiyen ve yaklaşık olarak değeri sıfıra eşit olan $\overline{C_L}$ değerinden belirli bir oranda saptığı görülmektedir. Mevcut HAD benzetimi ile elde edilen PVA'lı modelin $\overline{C_L}$ değeri sıfıra oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte, kaldırma katsayısındaki bu sapmanın ana nedeninin PVA'nın difüzör kısmındaki akışın yatay eksene göre simetrik yapıda olmamasından kaynaklanabileceği söylenebilir (Şekil 11). Bu çıkarım, Fırat vd.'nin (2024) sayısal çalışmasına dayandırılmıştır. Bunun sebebi, bahsi geçen çalışmada, aksenal yarık difüzör kısmının tek yüzeyinden akış ayrılması gerçekleştiği gösterilmiş ve bunun da $\overline{C_L}$ değerini sıfırdan farklı bir değere kaydıracağı ifade edilmiştir (Şekil 11). Sonuç olarak, deneysel olarak elde edilen $\overline{C_L}$ değerlerinin hücum açısız durumda Re'den bağımsız olarak sıfırdan farklı bir değere sahip olmaları, difüzör kısmındaki tek taraflı akış ayrılmasına dayandırılmıştır.



Şekil 13. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.
Figure 13. Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with attack angle.

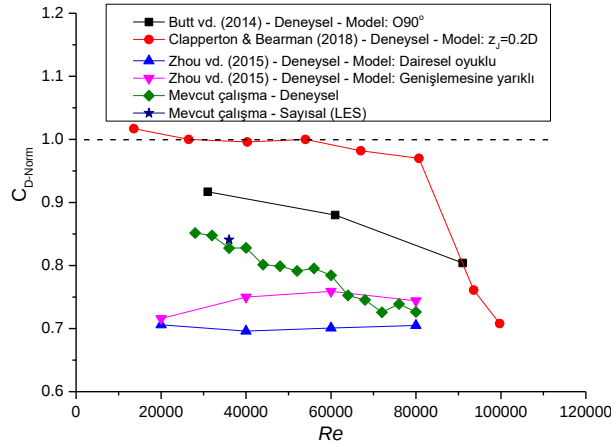
$\overline{C_L}$ dışında diğer bir önemli parametre de C_{L-KOK} değeridir ve bu parametre yalnızca sayısal olarak elde edilebilmiştir. Bu değer yüksek olması malzemeye kaldırma doğrultusunda etkiyen dinamik kuvvetin daha büyük genliğe sahip olduğunu ifade eder ki bu da genellikle istenmeyen bir durumdur. DM ve PVAM için bu değerler $Re=36000$ değerinde, sırasıyla, 0.684 ve 0.406 olarak elde edilmiştir. Bu da PVA'nın C_{L-KOK} değerini iyi bir oranda düşürdüğünü göstermektedir. Dahası, PVA, C_{D-KOK} değerinin de ciddi bir oranda (%41) düşmesine sebep olmuştur.

Şekil 12'de verilen, yatay eksene göre simetrik bir model olan PVAM'ye ait $\overline{C_L}$ değerlerinin 0° 'lik hücum açısına (α) göre simetrik bir dağılım sergilememeleri tek taraflı akış ayrılması görüşünü desteklemektedir. Buradan, türbülans şiddetinin düşük olduğu yerlerde hızlı bir şekilde daimi ya da daimi olmayan Reynolds-

ortalamalı Navier-Stokes moduna geçiş yapabilen SAS türbülans modelinin aksenel yarık içerisindeki akış davranışını, benzer ağ sayısı için, LES'e göre daha doğru tahmin edebildiği söylenebilir. Şekil 12'deki dağılımda, yaklaşık $\alpha = -4^\circ$ olduğu durumda $\overline{C_L} = 0$ olmuştur. $\overline{C_L}$ değerleri -4° 'nin $\pm 14^\circ$ bandında α ile keskin bir değişim sergilemelerine rağmen bu bandın dışında hafif bir değişim sergilemişlerdir. Bu bandın dışındaki $\overline{C_L}$ değerleri arasında oluşmaması beklenen fakat bir şekilde oluşan farkın ne ile ilgili olabileceğine dair bir yaklaşımda bulunulamamıştır. Hücum açısının $\pm 8^\circ$ gibi düşük bir bandta değiştirilmesi sayesinde $\overline{C_L}$, ± 0.4 gibi bir değere ulaşabilmektedir.

Diğer yandan, $\overline{C_L}$ değerinin yaklaşık 0 olduğu $\alpha = -4^\circ$ hücum açısında $\overline{C_D}$ değeri de minimum değerine erişmiştir (Şekil 13). Bu da, PVA'nın direnç performansının en iyi olduğu durumun hücum açısına denk düştüğünü göstermektedir. Diğer bir deyişle, PVA içindeki yatay eksene göre asimetrik akış yapısının simetriğe dönmesi durumu $\overline{C_D}$ değerini minimuma düşürmüştür. Şekil 13'te $\overline{C_D}$ ile alakalı gözlemlenen diğer bir durum ise test edilen hücum açısı aralığında, PVAM'ye etkiyen direncin DM'ninkinin altında kalmış olmasıdır. Bu da, ilgili pasif kontrol yönteminin $\pm 30^\circ$ hücum açısı bandında iyi bir direnç performansı sergilediğini göstermektedir.

Mevcut akış kontrol yönteminin direnç performansını benzer Reynolds sayısı aralığında test edilen diğer bazı akış kontrol yöntemleriyle kıyaslamak için normalleştirmeden faydalanmak gerekmektedir. Zaman-ortalamalı direnç katsayısının normalleştirilmiş hali, C_{D-Norm} , ilgili araştırmacılar tarafından ilgili Re değerinde akış kontrol yöntemi uygulanmış modelin $\overline{C_D}$ değerinin uygulanmamış modelin (düz silindir) $\overline{C_D}$ değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 14. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.

Figure 14. Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with attack angle.

Şekil 14 içerisinde, Clapperton & Bearman (2018) tarafından deneysel olarak test edilen pasif jetlerin, Butt vd. (2014) tarafından deneysel olarak test edilen dışa çıkıntılı altıgen şekilli yüzey desenlerinin ($O90^\circ$), Zhou vd. (2015) tarafından deneysel olarak test edilen dairesel oyukların ve genişlemesine yarıkların C_{D-Norm} değerleri ile hem deneysel hem de sayısal olarak test edilen PVA'nın C_{D-Norm} değerleri kıyaslanmıştır. Grafikte, dışa çıkıntılı altıgen şekilli yüzey desenlerinin uygulandığı silindirik modelin $\overline{C_D}$ değerinin de PVA uygulanmış silindirik model (PVAM) gibi artan Re ile birlikte düştüğü fakat bunu PVA kadar başarılı gerçekleştiremediği görülmüştür. Silindirik yüzey oyukları ve boylamasına oyuklar uygulanan silindirik modellerin $\overline{C_D}$ değerinin Re'den neredeyse bağımsız olduğu, PVA'lı modelin ise $Re=80000$ civarında bu pasif akış kontrol yöntemlerinin direnç performansına eriştiği tespit edilmiştir. Diğer yandan, pasif jetlerin $Re=80000$ civarına kadar direnç performanslarının düşük olduğu fakat $Re>80000$ için ciddi bir direnç performansı dundukları da gözlemlenmiştir. Daha yüksek Re için testler gerçekleştirilememiş olsa da artan Re ile birlikte, en azından kritik Re değerine kadar (≈ 200000) PVA'nın $\overline{C_D}$ 'yi daha da düşüreceği öngörülmektedir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışma, henüz yeni tasarlanan ve pasif Venturi aktuatörü (PVA) olarak isimlendirilen bir pasif akış kontrol yönteminin aerodinamik karakteristikler (direnç katsayısı, kaldırma katsayısı) üzerindeki etkisini henüz test edilmemiş olan Reynolds sayısına (Re) ve hücum açısına (α) bağlı olarak ortaya çıkarmaktır. Bu çalışmada,

PVA uygulanmış (PVAM) ve uygulanmamış (Düz model, DM) modeller hücum açısız durumda ($\alpha=0^\circ$) bir Reynolds sayısı aralığı ($28000 \leq Re \leq 80000$) için ve $Re=28000$ durumunda bir hücum açısı aralığı ($-30^\circ \leq \alpha \leq +30^\circ$) için aerodinamik açıdan kıyaslamalı olarak rüzgar tüneline test edilmişlerdir. Rüzgar tüneli ile elde edilemeyecek olan bazı durumları aydınlatmak adına $Re=36000$ ve $\alpha=0^\circ$ durumunda bir HAD benzetimi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aşağıda, maddeler halinde verilmiştir.

- PVA'nın zaman-ortalamalı direnç katsayısını, $\overline{C_D}$, düşürme konusundaki performansı artan Re ile daha da artmakta, $Re=80000$ değerinde bu oran %27'lere ulaşmaktadır. Dahası, test edilen Re aralığı için PVAM'ye ait $\overline{C_D}$ değeri DM'ye ait değerin üzerine hiç çıkmamaktadır. PVA'nın bu başarısı, emme yarıklarından çekilen akışkanın debisinin artan Re ile daha da artması ve bu artışın da ön yüzeyde daha fazla basınç düşüşü yaratmasıyla ilgili olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, model eksenel yarığından geçen akışkan debisinin artan Re ile artması sayesinde model arka yüzeyindeki düşük basıncın daha da yükselmesinin de $\overline{C_D}$ 'deki düşüşe katkı sağladığı belirtilmiştir.
- Test edilen α aralığı için PVAM'ye ait $\overline{C_D}$ değeri DM'ye ait değerin üzerine hiç çıkmamaktadır. Bu da PVA'nın geniş bir hücum açısı aralığı için iyi bir direnç performansı sergilediğini göstermektedir.
- $Re=100000$ civarına kadar direnç performansları test edilmiş olan bazı pasif akış kontrol yöntemlerine kıyasla PVA'nın direnç performansının iyi bir noktada olduğu belirlenmiştir.
- Test edilen PVAM, içerisinde akış ayrılması gerçekleşecek kadar geniş bir difüzör açısına (14°) sahip olmasından dolayı hücum açısız durumda bile zaman-ortalamalı kaldırma katsayısı, $\overline{C_L}$, değeri sıfırdan farklı olmaktadır. Test edilen Re aralığında, hücum açısı sıfır olmasına rağmen $\overline{C_L}$ değeri sıfırdan farklıdır. Dahası, düşük hücum açısı aralığındaki değişimler PVAM'nin ciddi bir $\overline{C_L}$ oluşturmaya sebep olmaktadır.

Bu çalışmadan sonra, PVA'lı modellerle ilgili olarak yapılması planlanan çalışmalarda ise aşağıdaki hususların ele alınması planlanmaktadır.

- Mevcut çalışmada emme yarıklarının açılal konumu $\pm 80^\circ$ 'de sabit tutulmuştur. Farklı yarık açılal konumlarının aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.
- PVA'lı modelin ön kısmındaki giriş ağzının yüksekliğinin (12 mm) boğaz kısmının yüksekliğine (2.4 mm) oranı 5'tir. Bu oranın farklı değerlerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.
- Mevcut çalışmadaki emme yarıkları 2mm'lik sabit genişliğe sahiptir. Farklı yarık genişliklerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.

Semboller

Symbols

A_F	: Dairesel silindirin ön görünüş alanı [m^2]
A_S	: Yarık içinde akan akışkan doğrultusuna dik yarık kesit alanı [m^2]
C_D	: Direnç katsayısı [-]
C_{D-Den}	: Blokaj düzeltmesi uygulanmamış direnç katsayısı [-]
C_{D-KOK}	: Direnç katsayısı değerlerinin karelerinin ortalamalarının karekökü [-]
C_{D-Norm}	: Normalleştirilmiş direnç katsayısı [-]
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy sayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı [-]
C_{L-Den}	: Blokaj düzeltmesi uygulanmamış kaldırma katsayısı [-]
C_{L-KOK}	: Kaldırma katsayısı değerlerinin karelerinin ortalamalarının karekökü [-]
C_P	: Basınç katsayısı [-]
C_Q	: Hacimsel debi katsayısı [-]
D	: Silindir çapı [m]
f	: Çevri dökülme frekansı [Hz]
F_D	: Direnç kuvveti [N]
F_L	: Kaldırma kuvveti [N]

H	: Test bölgesi genişliği [m]
n	: Hesaplamaya katılan toplam anlık değer sayısı [-]
P	: Statik basınç [Pa]
t	: Zaman [s]
Tu _x	: Serbest akım türbülans şiddeti [-]
Re	: Reynolds sayısı [-]
U _∞	: Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı [m/s]
U	: Hız [m/s]
V	: Yarık içinde akan akışkan hızı [m/s]
x	: Akış doğrultusu [m]
y	: Akışa dik doğrultu [m]
z	: Genişlik doğrultusu [m]
α	: Hücum açısı [°]
δ _{ij}	: Kronecker delta
ΔP	: Model yüzeyinde ve serbest akım içerisinde bulunan noktalar arasındaki basınç farkı [Pa]
Δt	: Zaman adımı boyutu [s]
Δx	: x'deki ağ boyutu [m]
Δx ⁺	: Yüzey üzerindeki ağın akış doğrultusundaki boyutsuz uzunluğu [-]
Δy	: y'deki ağ boyutu [m]
Δy ⁺	: Yüzey üzerindeki ağın akışa dik doğrultudaki boyutsuz yüksekliği [-]
Δz	: z'deki ağ boyutu [m]
Δz ⁺	: Yüzey üzerindeki ağın genişlik doğrultusundaki boyutsuz genişliği [-]
ε	: Yüzde hata [-]
μ	: Hava viskozitesi [kg/m-s]
ν	: Hava kinematik viskozitesi [m ² /s]
ρ	: Hava yoğunluğu [kg/m ³]
τ _{ij}	: Çözümlemeyen ağ-altı ölçeği (sub-grid scale) gerilme tensörü [m ² /s ²]
...	: Zaman-ortalaması alma operatörü
...	: Uzaysal filtreleme operatörü

Yazar katkısı

Author contribution

Erhan FIRAT: Konunun kavramsallaştırılması, Literatür taraması (%50), Makalenin yazılması (%50), Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50), Sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesi, Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi (%50), Veri analizi (%50). Mehmet SEYHAN: Literatür taraması (%50), Makalenin yazılması (%50), Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50), Test modellerinin imal ettirilmesi, Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi (%50), Veri analizi (%50).

Etik beyanı

Declaration of ethicalcode

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Allen, H. J., & Vincenti, W. G. (1944). *Wall interference in a two-dimensional-flow wind tunnel, with consideration of the effect of compressibility*. NACA, 1944, Report No 782. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091861>
- Altair Engineering, Inc. (2024, February 2). *Inlet turbulence parameters*. https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/inlet_turb_params_r.htm

- Akbıyık, H., & Akansu, Y. E. (2021). Effective flow control around a circular cylinder by using both a splitter plate and plasma actuators as passive and active control methods. *Journal of Thermal Science and Technology*, 41(1), 133-140. <https://doi.org/10.47480/isibted.979377>
- Aksoy, M. H. (2024). Flow characteristics and passive flow control of circular cylinders with triangular vortex generators: An experimental investigation. *Applied Ocean Research*, 142, 103836. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103836>
- ANSYS, Inc. (2013a). ANSYS Fluent User's Guide, Release 15.0 [PDF slides]
- ANSYS, Inc. (2013b). ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0 [PDF slides]
- Butt, U., Jehring, L., & Egbers, C. (2014). Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 45, 128-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008>
- Cheng, W., Pullin, D. I., Samtaney, R., Zhang, W., & Gao, W. (2017). Large-eddy simulation of flow over a cylinder with $Re=3.9 \times 10^3$ to 8.5×10^5 : a skin-friction perspective. *Journal of Fluid Mechanics*, 820, 121-158. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.172>
- Chen, W.-L., Min, X.-W., & Guo, Y.-J. (2022). Performance of seal vibrissa-inspired bionic surface in suppressing aerodynamic forces and vortex shedding around a circular cylinder. *Ocean Engineering*, 260, 112032. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112032>
- Clapperton, B. L., & Bearman, P. W. (2018). Control of circular cylinder flow using distributed passive jets *Journal of Fluid Mechanics*, 848, 1157-1178. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.399>
- Darabasz, T. Bonnavion, G., Cadot, O., Goraguer, Y., & Borée, J. (2023). Drag reduction using longitudinal vortices on a flat-back Ahmed body. *Experiments in Fluids*, 64, 20. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03555-x>
- Firat, E., Seyhan, M., & Sarıoğlu, M. (2023). SAS türbülans modeli performansının bazı dış akış durumları için kıyaslamalı incelenmesi. Çoğun, H., Parlar, İ., & Üzmuş, H. (Editörler). *Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar* 8, (ss. 77-92), Bilgin Kültür Sanat Yayınları. <https://www.bidgecongress.org/wp-content/uploads/2023/07/Doğa-ve-Muhendislik-Bilimlerinde-Guncel-Tartismalar-8-11.pdf>
- Firat, E., Seyhan, M., & Ozkan, G. M. (2024). Aerodynamic drag improvements on a circular cylinder using passive Venturi actuators. *Physics of Fluids*, 36, 025168. <https://doi.org/10.1063/5.0188890>
- Gad-el-Hak, M. (2000). *Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Galvao, R., Lee, E., Farrell, D., Hover, F., Triantafyllou, M., Kitney, N., & Beynet, P. (2008). Flow control in flow-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 24(8), 1216-1226. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.07.006>
- Gao, D., Chang, X., Tursuntohti, V., Yu, H., & Chen, W.-L. (2022). Modification of subcritical cylinder flow with an upstream rod. *Physics of Fluids*, 34, 015107. <https://doi.org/10.1063/5.0075167>
- Gao, D.-L., Chen, G.-B., Huang, Y.-W., Chen, W.-L., & Li, H. (2020). Flow characteristics of a fixed circular cylinder with an upstream splitter plate: On the plate-length sensitivity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 117, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110135>
- Gu, F., Wang, J. S., Qiao, X. Q., & Huang, Z. (2012). Pressure distribution, fluctuating forces and vortex shedding behavior of circular cylinder with rotatable splitter plates. *Journal of Fluids and Structures*, 28, 263-278. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.11.005>
- Kim, W.-L. & Menon, S. (1999). An unsteady incompressible Navier–Stokes solver for Large Eddy Simulation of turbulent flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 31, 983-1017. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19991130\)31:6%3C983::AID-FLD908%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19991130)31:6%3C983::AID-FLD908%3E3.0.CO;2-Q)
- Lloyd T. P., & James, M. (2016). Large eddy simulations of a circular cylinder at Reynolds numbers surrounding the drag crisis. *Applied Ocean Research*, 59, 676-686. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.11.009>

- Lin, Y. F., Bai, H. L., Alam, M. M., Zhang, W. G., & Lam, K. (2016). Effects of large spanwise wavelength on the wake of a sinusoidal wavy cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 61, 392-409. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.12.004>
- Nicoud, F., & Ducros, F. (1999). Subgrid-Scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62, 183-200. <https://doi.org/10.1023/A:1009995426001>
- Norberg, C. (2003). Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures*, 17, 57–96. [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00099-3)
- Prsic, M. A., Ong, M. C., Pettersen, B., & Myrhaug, D. (2014). Large Eddy Simulations of flow around a smooth circular cylinder in a uniform current in the subcritical flow regime. *Ocean Engineering*, 77, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.10.018>
- Seyhan, M., & Fırat, E. (2022). Yan rüzgar koşullarında ön kısmı düz plakalı bir otobüs modeli üzerindeki aerodinamik direncin düşürülmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1163-1171. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1141511>
- Tunay, T. (2023a). Large Eddy Simulation of the Biased Wake Flow Downstream of Circular Cylinders with a Slit. *OKU Journal of The Institute of Science and Technology*, 6(2), 1481-1499.
- Tunay, T. (2023b). Numerical Investigation of the Passive Flow Control Around a Circular Cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 243-252.
- UKAS (2024). The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (M3003), Edition 5 [PDF Slides] <https://www.ukas.com/wp-content/uploads/2023/05/M3003-The-expression-of-uncertainty-and-confidence-in-measurement.pdf>
- Xu, F., Chen, W.-L., Duan, Z.-D., & Ou, J.-P. (2020). Large eddy simulation of passive jet flow control on the wake of flow around a circular cylinder. *Computers and Fluids*, 196, 104342. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.104342>
- Yemenici, O., & Kasap, H. (2023). Farklı girdap üreteçlere sahip bir aracın aerodinamiğinin sayısal incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 581–587. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1232871>
- Yu, H., Gao, D., Chen, W.-L., & Deng, Z. (2023). Effects of a pair of adjacent rods on circular cylinder flow. *Journal of Visualization*, 26, 1037–1053. <https://doi.org/10.1007/s12650-023-00919-1>
- Zheng, C., Sun, K., & Zhang, W. (2021). Effects of passive and combined aerodynamic control on the aerodynamic characteristics of an elliptical cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 218, 104779. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104779>
- Zhou, B., Wang, X., Guo, W., Ghossein, W. M., & Tan, S. K. (2015). Experimental study on flow past a circular cylinder with rough surface. *Ocean Engineering*, 109, 7–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.062>