

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tek Bir Dairesel Silindir ve Duvara Yakın Tandem Silindirler
Etrafındaki Akış Yapıları**

Gökhan YAŞAR

Makine Mühendisliği (Türkçe)

ŞUBAT, 2024

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

**Tek Bir Dairesel Silindir ve Duvara Yakın Tandem Silindirler
Etrafındaki Akış Yapıları**

Gökhan YAŞAR

Makine Mühendisliği (Türkçe) Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi 19/02/2024 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Dr.Öğr. Üyesi Engin PINAR (Danışman)

: Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ

: Doç. Dr. Tahir DURHASAN

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (Türkçe) Anabilim Dalında
Hazırlanmıştır.**

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VI
1. GİRİŞ	1
1.1. Reynolds Sayısına bağlı olarak bir silindirin yakın ard izindeki akış yapısı.....	4
1.1.1. Bölge I ($Re < 6$).....	4
1.1.2. Bölge II ($47 < Re < 300$).....	6
1.1.3. Bölge III ($300 < ReD < 3 \times 10^5$).....	6
1.1.4. Bölge IV ($2.5 \times 10^5 < ReD < 3.5 \times 10^6$).....	6
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
2.1. Kelvin-Helmholtz ve Karman Girdapları.....	8
2.2. Silindir Etrafındaki Akış Yapısı.....	9
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (PIV).....	15
3.2. Görüntü Yakalama	16
3.3. Akışa Parçacık Ekimi.....	18
3.4. Görüntü Değerlendirme ve Çapraz Korelasyon Süreci.....	19
3.5. Sürtünme Momenti (M_s).....	22
3.6. Su Kanal Sistemi ve Deney Düzeneği	23
3.7. Deneysel Model	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
4.1. Tek Silindir Etrafındaki Akış Yapısı	29
4.2. Ard Arda Yerleştirilmiş Silindirler Etrafındaki Akışa Taban Etkisi.....	36
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	53

Tek Bir Dairesel Silindir ve Duvara Yakın Tandem Silindirler Etrafındaki Akış Yapıları

Gökhan YAŞAR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin PINAR

Makine Mühendisliği (Türkçe) Anabilim Dalı

ÖZ

Bu çalışmada, ard arda yerleştirilmiş dairesel kesitli iki silindirin tabanla aralarındaki mesafenin değiştirilmesi ile oluşan akış yapısının karşılaştırmalı bir çalışması Parçaçık Görüntülemeli Hız ölçme Tekniği (PIV) kullanılarak deneysel olarak araştırıldı. Su kanalında $h/D = 0, 0,5$ ve 1 olmak üzere üç farklı yükseklik oranı için deneyler yapılmıştır. Yükseklik oranı, boşluk yüksekliğinin (dairese silindirin alt yüzeyi ile duvar yüzeyi arasındaki) silindir çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Ard arda yerleştirilen silindirler arasında ki mesafe G/D boşluk oranı olarak tanımlanmış olup, $G/D=1$ olarak deneyler süresince sabit tutulmuştur. Silindir çapına bağlı, D , Reynolds sayısı, $ReD = 2100$ ve sınır tabakasının kalınlığı $\delta/D = 0,4$ olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \psi \rangle$, zaman ortalamalı girdap eş düzey eğrileri, $\langle \omega \rangle$, ve Reynolds gerilmeleri, $\langle u'v' \rangle$, dikkate alınarak değerlendirildi. Bulgular, boşluk oranının, G/D ve yükseklik oranının, h/D silindirler etrafındaki akış yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Deneyden elde edilen akış verilerinden de anlaşılacağı üzere, silindir üzerindeki ayrılma noktasının ve silindir arkasındaki ölü akış bölgesinin farklı silindir yüksekliklerinde değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, ölü akış bölgesinde oluşan vorteks büyüklüklerinin ve Reynolds kayma gerilmesi, $\langle u'v' \rangle$, değerlerinin de silindir yüksekliğine bağlı olarak farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Silindir çiftinin etrafındaki akışın tek silindire göre daha karmaşık, kararsız ve çok değişken bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dairesel silindir, Akış yapısı, Yakın duvar, Türbülans, Art izi

Flow Structures Around A Single Circular Cylinder and Tandem Cylinders Near Wall

Gökhan YAŞAR

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Engin PINAR

Department of Mechanical Engineering (Turkish)

ABSTRACT

In this study, a comparative study of the flow structure formed by changing the distance between two consecutively placed circular cross-section cylinders and the base was investigated experimentally using the Particle Imaging Velocimetry Technique (PIV). Experiments were carried out for three different height ratios in the water channel: $h/D = 0, 0.5$ and 1 . The height ratio is defined as the ratio of the cavity height (between the bottom surface of the circular cylinder and the wall surface). The distance between consecutively placed cylinders was defined as the G/D gap ratio, and it was kept constant throughout the experiments as $G/D = 1$. Depending on the cylinder diameter, D is determined as the Reynolds number, $ReD = 2100$, and the thickness of the boundary layer is $\delta/D = 0.4$. Experimental results were evaluated by taking into account time-averaged streamlines $\langle \psi \rangle$, time-averaged vortex contour lines, $\langle \omega \rangle$, and Reynolds stresses, $\langle u'v' \rangle$. The findings showed that the gap ratio, G/D and height ratio, h/D have a significant impact on the flow structures around cylinders. As can be seen from the flow data obtained from the experiment, it has been observed that the separation point on the cylinder and the dead flow zone behind the cylinder vary at different cylinder heights. In addition, it was determined that the vortex sizes, $\langle \omega \rangle$, and Reynolds shear stress, $\langle u'v' \rangle$, values formed in the dead flow region differ depending on the cylinder height. It has been determined that the flow around a pair of cylinders has a more complex, unstable, and highly variable structure than that of a single cylinder.

Keywords: Circular cylinder, Flow structure, Near wall, Turbulance, Wake region

TEŐEKKÖR

Çalışma süresince desteklerini esirgemeyen, değerli yönlendirmeleriyle her daim yardımcı olan, kendimi geliştirmemde önemli katkısı olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Engin PINAR’a ve değerli jüri hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim sürecinde çalışmakta olduğum Koluman Otomotiv A.Ş. firmasındaki değerli yöneticilerim ve iş arkadaşlarıma yardım ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca sevgi ve desteklerini hayatım boyunca hep arkamda hissettiğim annem ve kız kardeşim’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türbin Kanadı Soğutması	3
Şekil 1.2. Isı Değiştiricisi	3
Şekil 1.3. Köprü Ayağı	3
Şekil 1.4. Açık Deniz Yapıları	3
Şekil 1.5. Rüzgar Türbini Kuleleri	3
Şekil 1.6. Enerji Santrallerinin Bacaları	3
Şekil 1.7. Enerji İletim Hatları	4
Şekil 1.8. Enerji Santrallerinin Bacaları	4
Şekil 1.9. Deniz Feneri	4
Şekil 1.10. Uçak İniş Takımları	4
Şekil 1.11. Dairesel Bir Silindir İçin Reynolds Sayısı Re 'ye Bağlı Akış Yapısı	5
Şekil 2.1. Direnç Katsayısının (CD) Reynolds Sayısına, Re 'ye ve Akış Desenlerinin Olası Sınırlarına Göre Değişimi	7
Şekil 2.2. Karman Girdapları İçin Dairesel Bir Silindirin Arkasındaki Akışın Görselleştirilmesi	8
Şekil 2.3. Küt Cisim Etrafındaki Akış	9
Şekil 2.4. Dairesel Silindirler İçin Strouhal Sayısı, St ve Reynolds Sayısı, Re_d Arasındaki İlişki Te	11
Şekil 3.1. PIV Deney Düzeneği	18
Şekil 3.2. Parçacık Görüntülemeli Hız Tekniği Süreç Analizi	20
Şekil 3.3. Temel PIV analiz süreci	21
Şekil 3.4. Görüntü İşlemeye Yönelik Genel Prosedür	22
Şekil 3.5. Deney Düzeneğinin Üstten Şematik Görünümü	24
Şekil 3.6. Deney Düzeneğinin Yandan Şematik Görünümü	24
Şekil 3.7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	25
Şekil 3.8. İstenilen Reynolds Sayısında Derin Su Akışı Oluşturmak İçin Kanala Yerleştirilen Platformun Şematik Gösterimi	25
Şekil 4.1. Yükseklik Oranın $H/D=0$ Değeri İçin 4.1 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \Omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir	31

Şekil 4.2.	Yükseklik Oranın $H/D=0.5$ Değeri İçin 4.2 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \Omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir.	33
Şekil 4.3.	Yükseklik Oranın $H/D=1$ Değeri İçin 4.3 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \Omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir.....	35
Şekil 4.4.	Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ Ve 1 Değeri İçin Tek Silindirin Ard İzinde Maksimum Türbülans Kinetik Enerji Değerleri	36
Şekil 4.5.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \psi \rangle$	37
Şekil 4.6.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalamalı Hız Vektörleri $\langle V \rangle$	38
Şekil 4.7.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \omega \rangle$	39
Şekil 4.8.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilme Konturları $\langle u'v'U_{\infty}^2 \rangle$	41
Şekil 4.9.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Akım Yönüne Paralel $\langle U_{rms} \rangle$ Hız Bileşeni Çalkantıları	42
Şekil 4.10.	Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Akım Yönüne Dik Hız Bileşeni Çalkantıları $\langle V_{rms} \rangle$ Hız Bileşeni	43
Şekil 4.11.	Ard Arda Yerleştirilmiş Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değişim ile Maksimum Türbülans Kinetik Enerji Değerleri	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\langle \Psi \rangle$: Zaman Ortalamalı Akım Çizgileri

$\langle \omega \rangle$: Zaman Ortalamalı Girdap Eş Düzey Eğrileri

U_{∞} : Silindirden Uzaktaki Serbest Akış Hızı

D : Silindir Çapı

ν : Kinematik Viskozite

F_D : Sürüklenme Kuvveti

Re_D : Reynolds Sayısı

h/D : Yükseklik Oranı

G/D : Boşluk Oranı

$\langle V \rangle$: Zaman Ortalama Hız Vektörleri

U_{rms} : Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması

V_{rms} : Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması

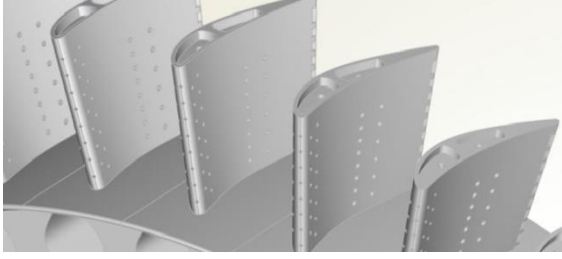
1. GİRİŞ

Bir silindir etrafındaki akış yapısı, Von Kármán girdap caddesi olarak adlandırılan olgunun klasik bir örneğidir. Bir sıvı, rüzgar tünelineki bir silindir veya su içinde hareket eden bir gemi gibi silindirik bir nesnenin yanından aktığında, silindirin yanlarından alternatif girdaplar saçılır. Bu girdaplar, Von Kármán girdap caddesi olarak bilinen, dönen sıvının kendine özgü bir akış yapısının oluşmasına neden olur. Macar-Amerikalı mühendis ve fizikçi Theodore Von Kármán, bu fenomenin ilk keşfini 20. yüzyılın başlarında yaptı. Sıvının silindirden geçerken bir tarafta düşük basınç, diğer tarafta ise yüksek basınç bölgesi oluşturduğunu gözlemledi. Bu basınç farkı, sıvının silindirden sürekli olarak kopan girdaplar oluşturmaya neden olur. Von Kármán girdap caddesi sadece görsel olarak büyüleyici değil, aynı zamanda pratik anlamlara da sahiptir. Bir sıvı içinde hareket eden nesnelerin stabilitesini ve sürüklenmesini etkileyebilir. Mühendisler ve bilim adamları, binalar, köprüler, uçaklar ve hatta golf topları ve spor ekipmanları gibi çeşitli nesnelerin tasarımını daha iyi anlamak ve optimize etmek için silindir etrafındaki akış yapısını incelemişlerdir. Bir silindir etrafındaki akış yapısını anlamak aerodinamik, hidrodinamik ve inşaat mühendisliği dahil olmak üzere birçok alanda ilgi, çekici bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmacılar bu olguyu inceleyerek daha verimli ve modern tasarımlar geliştirebilir ve bu da ulaşım, enerji üretimi ve yapı mühendisliğinde ilerlemelere yol açabilir. Ulaşım (örneğin otomotiv ve havacılık), yenilenebilir enerji (örneğin rüzgar türbinleri) ve denizcilik mühendisliği gibi belirli endüstrilerde akış kontrol tekniklerinin uygulanması odak noktası olmaya devam etmektedir. Gerçek yaşamda karşılaşılan farklı senaryoları incelemek, akış kontrolünün pratik sonuçlarını ve sınırlamalarını anlamak, başarılı uygulama alanlarını keşfetmek için çok önemlidir. Bir silindir etrafındaki akış kontrolü alanında araştırmacılar, farklı uygulamalarda daha iyi performans sağlamak amacıyla akış modellerini manipüle etmek ve optimize etmek için çeşitli teknikler kullanmışlardır. Bazı önemli yöntemler aşağıdaki gibidir. Pasif kontrol yöntemleri, silindirin geometrisinin değiştirilmesini veya akışı değiştirmek için pasif elementlerin eklenmesini içerir Noorani, A. ve Akdağ, V. (2018). Araştırmacılar, silindirlerin etrafındaki akışı kontrol etmek için farklı yüzey pürüzlülüğü türlerinin, girdap üreticilerin ve ayırıcı plakaların etkilerini inceleyen çeşitli yöntemler kullanmışlardır Barakos, G. ve Mitsoulis, E. (2015), Choi vd. (2015). Aktif kontrol, akışı aktif olarak manipüle etmek için aktüatörlerin veya kontrol mekanizmalarının kullanılmasını içerir. Sentetik jet aktüatörleri, plazma aktüatörleri ve piezoelektrik cihazlar gibi teknikler, akış ayrılması, girdap kopması ve genel akış yapısını kontrol etmedeki performansları açısından incelenmiştir Revell, A. ve Porteous, R. (2017). Hibrit sistemler oluşturmak için hem pasif hem de aktif farklı kontrol yöntemlerinin birleştirilmesi devam eden bir araştırma alanıdır. Hibrit yaklaşımlar, üstün akış kontrolü sonuçları elde etmek için farklı tekniklerin güçlü yönlerinden yararlanmayı amaçlamaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki (CFD) gelişmeler, araştırmacıların silindirlerin etrafındaki karmaşık akış modellerini daha iyi anlamak için ayrıntılı sayısal

simülasyonlar yapmasına olanak tanımıştır. Yüksek doğruluğa sahip simülasyon modelleri, kontrol stratejilerinin optimize edilmesine ve bunların akış yapısı üzerindeki etkisinin tahmin edilmesine yardımcı olur. Sayısal simülasyonları doğrulamak ve gerçek laboratuvar koşullarında farklı kontrol stratejilerinin etkinliğini araştırmak için rüzgar tünelleri ve PIV deneylerinde kullanılan su kanalları gibi tesisleri kullanarak deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir. Günümüzde deneysel çalışmaların zorluğu dikkate alındığı zaman optimizasyon ve makine öğrenimi gibi teknikler kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların sayısı azaltılmaya çalışılmaktadır.

Örneğin araştırmacılar, sürtünmeyi azaltmak veya girdap kopmalarını önlemek türbülans istatistik değerlerini azaltmak gibi belirli hedeflere ulaşmak için en uygun kontrol parametrelerini belirlemek amacıyla optimizasyon algoritmalarından ve makine öğrenimi tekniklerinden giderek daha fazla yararlanmaya başlamışlardır Revell, A. ve Porteous, R. (2017). Sürtünmeyi en aza indirirken kaldırmayı en üst düzeye çıkarmak gibi birden fazla hedefi aynı anda ele almak, akış kontrolünün zorlu ama önemli bir yönüdür. Araştırmacılar, çelişen hedefler arasında denge sağlayan çözümler bulmak için çok amaçlı optimizasyon tekniklerini kullanmaya başlamışlardır. Bununla birlikte makine öğrenimi ve yapay zeka da dahil olmak üzere veriye dayalı yöntemlerin entegrasyonu daha yaygın hale gelmektedir. Bu yaklaşımlar, akış yapılarındaki karmaşık olayların belirlenmesine ve büyük veri kümelerine dayalı kontrol stratejilerinin optimize edilmesine yardımcı olabilir Roshko'nun ilk kez 1955'te bir kayalık cismin akış aşağısında Karman girdap caddelerinin periyodunu ölçtüğü çalışması ve Strouhal (Strouhal, 1878) ve Rayleigh'in (1896) bu alandaki öncü çalışmalarından bu yana birçok araştırmacı girdap kopmalarını araştırmaya başlamıştır. Bir cismin küt bir cisim olarak tanımlana bilmesi için akış yönündeki uzunluğun, akış yönüne dik uzunluğa yakın veya eşit olması gerekir. Küt cisimleri etrafında belirli aralıklarla cismin gövdesini etkileyen girdapların kontrol edilmesi olgusu, katı cisim aerodinamiği alanındaki birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Çalışmaların çoğu dairesel, kare ve dikdörtgen kesitli silindirler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak dairesel silindirler etrafındaki akış yapısının incelenmesi konusu günümüzde araştırmacıların temel araştırma konusu olmayı sürdürmektedir. Bunun nedeni geometrik basitliğe rağmen pratik uygulamalarda ilgili akış mekanizmalarının karmaşık olması, kararsız akış yapısı, sınır tabaka ayrılması, kayma tabakaları ve art izi bölgesi gibi birçok karmaşık olgunun bir arada gerçekleşmesidir. Silindir etrafından ayrılan akışın sabit bir ayırılma açısına sahip olmadığı bu açının Reynolds sayısına, yüzeyin pürüzlülüğüne, akışa uygulanan kontrol tekniklerine, silindirin akış alını içerisinde ki blokaj oranına vb. çeşitli parametrelere bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Ek olarak akış ayırma noktalarının, silindir yüzeyinde oluşan dış akışın ve sınır tabakasının durumuna bağlı olarak silindirin yüzeyi boyunca hareket ettiği bilinmektedir. Geçmişte mühendislik uygulamalarında silindir benzeri yapıların yaygın olarak görülmesi nedeniyle çok sayıda araştırmacı, katı cisimlerin içerisinde genellikle silindirleri tercih etmişlerdir. Silindir etrafındaki akış yapılarının uygulamalarına; türbin kanatları (Şekil 1.1), ısı değiştirici borular (Şekil 1.2), köprü ayakları (Şekil 1.3), açık deniz yapıları (Şekil 1.4), rüzgar türbini kuleleri (Şekil

1.5), enerji santrallerinin bacaları (Şekil 1.6), iletim hatları (Şekil 1.7), silindirik binalar (Şekil 1.8), deniz fenerleri (Şekil. 1.9), Uçak iniş takımları (Şekil. 1.10) örnek olarak verilebilir.



Şekil 1.1. Türbin Kanadı Soğutması



Şekil 1.2. Isı Değiştiricisi



Şekil 1.3. Köprü Ayağı



Şekil 1.4. Açık Deniz Yapıları



Şekil 1.5. Rüzgar Türbini Kuleleri



Şekil 1.6. Enerji Santrallerinin Bacaları



Şekil 1.7. Enerji İletim Hatları



Şekil 1.8. Enerji Santrallerinin Bacaları



Şekil 1.9. Deniz Feneri PINAR.E (2013)



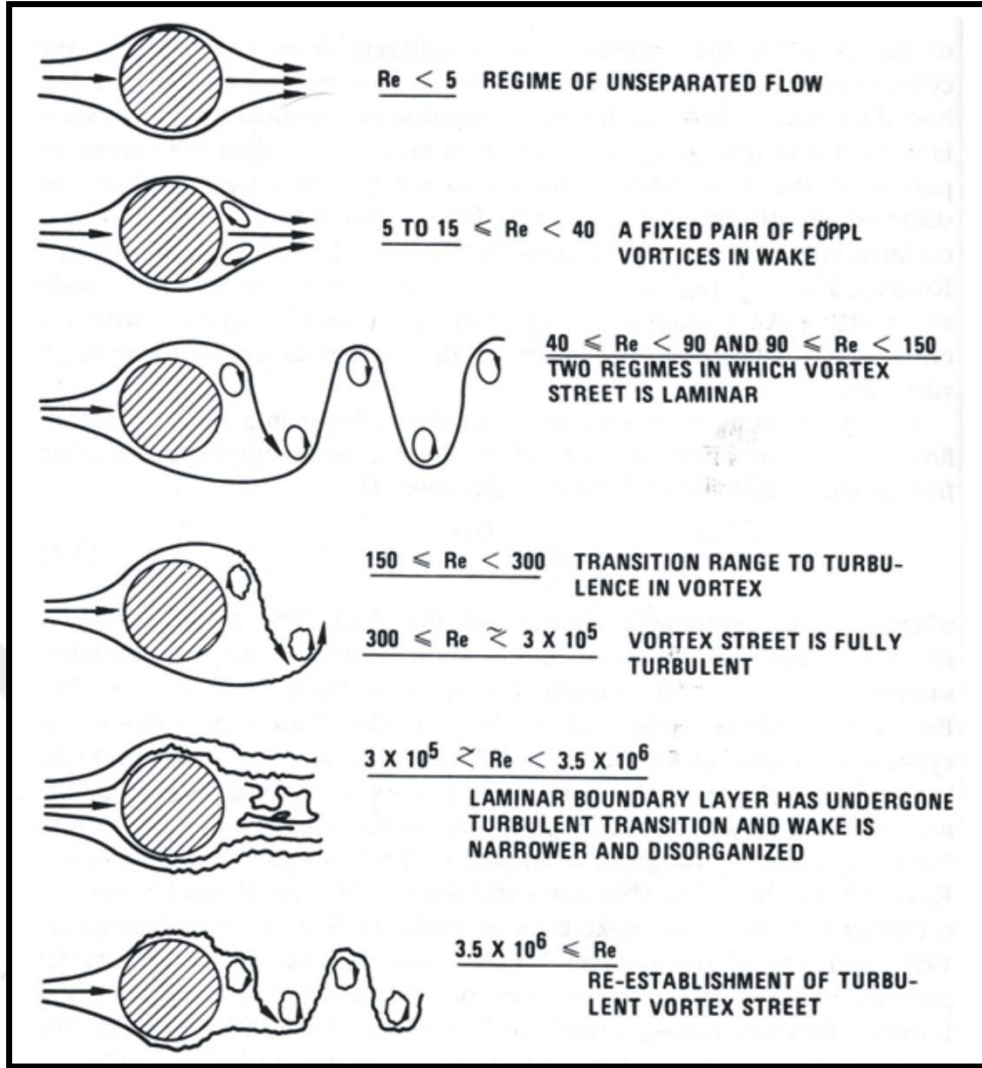
Şekil 1.10. Uçak İniş Takımları PINAR.E (2013)

1.1 Reynolds Sayısına bağlı olarak bir silindirin yakın ard izindeki akış yapısı

Bir silindir etrafındaki akışın dinamiği yalnızca Reynolds sayısına bağlıdır ($Re=U_{\infty}D/v$ burada U_{∞} silindirden uzaktaki serbest akış hızıdır, D silindirin çapıdır ve v kinematik viskozitedir). Sürünme akışında ($Re \ll 1$) tamamen türbülanslı akışlara ($Re=10^7$) kadar (Delaunay ve Kaiktsis 1999), farklı şekillerde sınıflandırılabilen farklı akış rejimleri vardır.

1.1.1. Bölge I ($Re < 6$)

Akış yapısı büyük ölçüde Reynolds sayısına bağlıdır ve Şekil 1.11'de Reynolds sayısına bağlı olarak oluşan çeşitli akış yapıları. Reynolds sayıları küçük olduğunda (1 ve altı), akış potansiyel akış gibi davranır. Silindir etrafında akış ayrılması görülmemektedir. Akım çizgilerinin şekli, viskoz olmayan bir sıvıdakilerden farklıdır. Viskoz kuvvetler, akış çizgilerinin silindirin akış yönüne göre daha fazla hareket etmesine neden olur. Bu noktada akış ayrılmıştır ve oluşan girdaplar, $ReD < 6$ için yalnızca bir ayırma noktasına sahiptir ve silindirin üzerine yüksek bir sürüklenme kuvvetinin (FD) etki etmesine neden olur.



Şekil 1.11. Dairesel Bir Silindir İçin Reynolds Sayısı Re 'ye Bağlı Akış Yapısı (Chen, 1987).

Reynolds sayısının 6 ila 47 aralığında, akış silindirin arka tarafından ayrılır ve bunun sonucunda yakın izde birbirine simetrik olan bir çift girdap oluşur. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi akış yönünde oluşan girdapların uzunluğu Reynolds sayısına bağlı olarak artmaktadır. Reynolds sayısı kritik değeri olan 47'ye ulaştığında, akışa ait tüm koşullar sabit tutulmasına rağmen akıştaki kararsızlık kendiliğinden ortaya çıkar. Girdap kopması olarak bilinen bu olay, dairesel silindirin aşağısında meydana gelir ve Von Karman Girdap Caddesi olarak akış yapısının oluşmasına neden olur. Silindirin bir tarafından girdapların kopması sonucu silindirin bir tarafında negatif basınç oluşurken, diğer tarafında pozitif basınç meydana gelir. Silindirin üst ve alt taraflarından gelen alternatif girdap kopmaları, dönüşümlü olarak negatif ve pozitif darbeler üretir, bu da her iki tarafta da ses basıncı dalgalarının üretilmesiyle sonuçlanır. Oluşan ses basınç dalgalarının frekansı, girdap kopmalarının kuvvetinin frekansı ve kaldırma kuvvetinin dalgalanma frekansı ile aynıdır. İz son derece geniştir ve F_D olarak da bilinen önemli miktarda sürükleme kuvvetinin oluştuğu görülür.

1.1.2. Bölge I I ($47 < Re < 300$)

Belirtilen Reynolds sayısı aralığında periyodik düzensiz bir akış yapısı meydana gelmektedir. Silindirin akış aşağısında yer alan yakın iz, girdap dökülmesinin gerçekleştiği yerdir ve buna periyodik olarak salınan bir kaldırma kuvveti eşlik eder. Periyodun her yarısında silindirin yüzeyinden bir girdap ayrılması sonucu silindiri çevreleyen yüzey basınç dağılımı değişime uğrar. Silindir periyodik bir net kuvvete maruz kalmasına neden olacak şekilde kopan bu girdaplar, silindirin üst ve alt noktaları tarafında yüksek ve alçak basınç alanlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu basınç dalgalanmalarının girdap kopmalarının frekansının artmasına neden olması mümkündür. Bunun nedeni, silindirin akışta hareket etmesi ve bunun da önemli bir genlik oranıyla girdap caddesinin oluşmasına katkı sağlamasıdır. Bu tür bir akış periyodiktir; belirli bir zaman aralığında kendini tekrarlayan kararsız bir akıştır, ancak tutarlı değildir. Hızdaki değişikliklere bağlı olarak basınçta bir değişiklik olduğunda dolsayı girdap kopmaları rüzgâr tonu olarak adlandırılan bir sesin çıkmasına neden olur. Sonbahar ve kış aylarında rüzgâr yüksek gerilim güç kabloları üzerinden veya ağaç dalları arasında estiğinde duyulabilen sestir. Bu ses ürkütücüdür ve genellikle düşük perde olarak bilinen düşük bir frekansa sahiptir. Reynolds sayısı arttıkça akış bir geçiş aşamasından geçer ve daha sonra giderek oldukça türbülanslı hale gelir.

1.1.3. Bölge III ($300 < Re < 3 \times 10^5$)

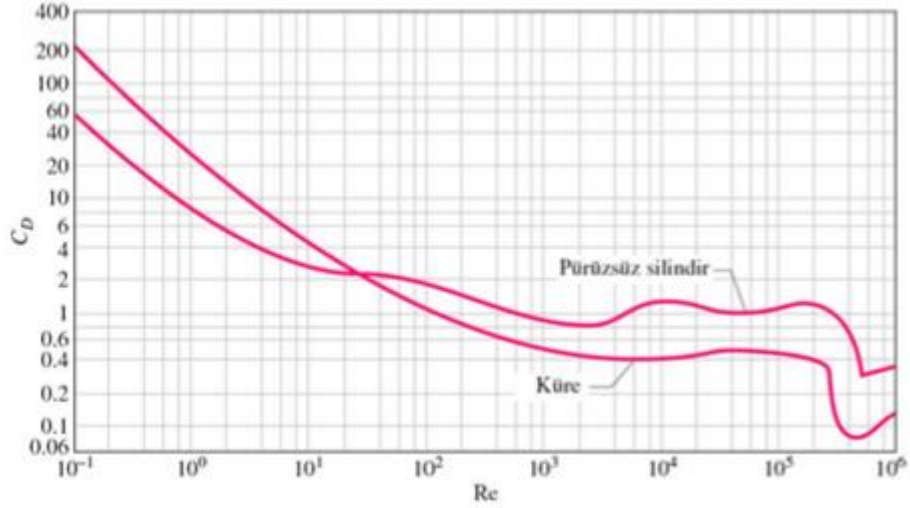
Reynolds sayısının 150 ile 300 arasında olduğu aralıkta bir geçiş meydana gelir ve laminar girdap kopması türbülanslı girdap kopmasına dönüşür. $300 < Re < 3 \times 10^5$ bölgesi içerisinde sınır tabakası laminar gibi görünmektedir ancak girdap caddesi tam türbülanslı davranış sergilemektedir. "Kritik altı akış rejimi" terimi sıklıkla bu akış rejimini belirtmek için kullanılır. Sürtünme yalnızca basıncın bir sonucudur ve sürüklenme katsayısı 1 civarında bir değerle sabit kalır. 10^3 ila 10^5 aralığı için Re'nin değer aralığı da sabittir. Başlangıçta, laminar sınır tabakası silindirin ön tarafında bölünerek bir ayrılma balonunun oluşmasına neden olur. Ayrılmış akışın yeniden silindire tutunmasını türbülanslı bir sınır tabakası takip eder ve ayrılma noktası, ön durma noktasının kabaca 140 derece aşağısında, arka tarafa doğru hareket eder. Bu, ayırma noktasının taşındığı anlamına gelir.

1.1.4. Bölge IV ($2.5 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$)

Reynolds sayısı $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ aralığındadır, laminar sınır tabakası türbülanslı hale gelir ve ayırma noktası gövdenin arka kısmına doğru ilerler. Buna bağlı olarak sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelir. Ek olarak ard izinin daralmasına bağlı olarak ve karman girdap caddesi kaybolmaktadır. Bu ani azalmanın ardından daha yüksek Reynolds sayılarında direnç katsayısında bir artış meydana gelir. Bu, sürtünme direncinin artmasıyla, yani ayrılma açısı 140° gibi daha büyük değerler aldığı anda akışkanın daha büyük bir yüzey alanıyla temas etmesiyle açıklanabilir.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Roshko'ya (1954) göre akış rejimleri, çeşitli Reynolds sayıları için hız dalgalanmasının, spektrumların ve frekansın gözlemlenmesine dayanarak belirlenmiştir. 1966'da Gerrard, Şekil 2.1'e görüldüğü gibi girdapların oluşum bölgesini tanımladı. Girdap kopması süreci bağlamında, süreç boyunca eşzamanlı iki karakteristik uzunluğun fiziksel temelini araştırdı.



Şekil 2.1. Direnç Katsayısının (CD) Reynolds Sayısına, Re'ye ve Akış Desenlerinin Olası Sınırlarına Göre Değişimi (Çengel, Y.A (2012))

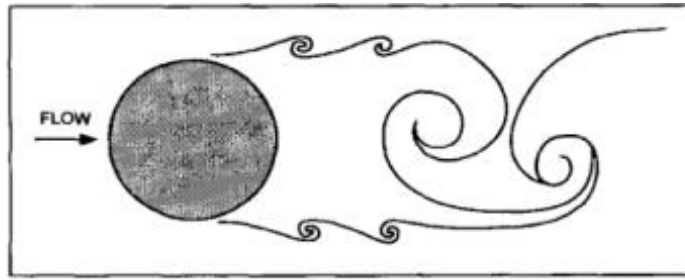
Reynolds sayısının, $Re = 5 \times 10^3$ 'ten 10^5 'e kadar olan değerleri arasında silindir yüzeyindeki hız gradyanlarını ölçmek amacıyla Son ve Hanratty (1969) tarafından deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bulguları ve gözlemleri, Reynolds sayısı arttıkça silindirin akış ayrılma açısının arttığını ortaya koymuştur. 1995 yılındaki çalışmalarında Lin ve Rockwell (1995), parçacık görüntülü hız ölçümü tekniğini kullanarak bir silindir etrafındaki akış yapısının niceliksel bir araştırmasını ortaya koymuşlardır. Çalışmalarını Reynolds sayısının, $Re = 10^3$, 5×10^3 ve 10^4 olmak üzere üç farklı değeri için gerçekleştirdiler. Araştırmalarında hız, girdap ve akım çizgilerinin temsillerinin, Reynolds sayısı arttıkça girdap oluşum uzunluğunda bir azalmaya meydana geldiğini ortaya koydular. Silindirin ard izi oluşum mekaniğinin ve ona bağlı hidrodinamik kuvvetlerin geniş bir frekans aralığı için incelenmesi yaparak bu olgunun Reynolds sayısı ile değişimini ilk ortaya koyan Marris (1964) oldu. Linhard (1966) buna çok benzer bir çalışma yürütmüş ve silindirlerin akış rejimleri ve girdap frekansı üzerine odaklanmıştır. Bearman (2011), dairesel silindir izleri ve girdap kaynaklı titreşimler üzerine başka bir derinlemesine analiz daha gerçekleştirdi.

İki boyutlu katı cisimleri tarafından üretilen girdaplar, 1900'li yılların başlarından bu yana birçok deneysel çalışmanın odak noktası olmuştur. Küt cismin her iki yanında, sınır tabakasının ayrılmasından kaynaklanan ve "girdap caddelerine " doğru yuvarlanan iki girdap tabakası vardır. Yeterince yüksek bir Reynolds sayısı değerinde, silindir yüzeyinden ayrılan kayma tabakasında "geçiş dalgalanmaları" adı verilen olgu meydana gelir. Bu dalgalanmalar, küt cismin üzerindeki ayrılma noktasından büyük ölçekli Karman girdabının ilk ortaya çıkmasına kadar uzanan ard izi bölgesinde görülmektedir. Sonuç olarak, yerel basınç her seferinde değiştiğinden dolayı silindirden bir girdap kopar. Dairesel silindirden meydana gelen Karman girdap caddesinin şematik gösterimi Şekil 2.2'de görülmektedir.



8

dalgalanmaları $1000 \leq Re \leq 3000$ Reynolds sayıları aralığında gözlemlemiştir. Kayma tabakasında ki Kelvin-Helmholtz girdaplarının (şekil 2.3) oluşumu laminar akış ayrılmasından ard izinin türbülanslı akış durumuna geçişinin temel bir özelliğidir. Gerrard (1978), büyük ölçekli Karman girdap caddelerinin oluşumu ile 350–2000 Reynolds sayısı aralığındaki geçiş dalgalanmaları arasında bir etkileşim olduğunu ileri belirtmişlerdir. Akış görselleştirme deneyleri, bazı durumlarda geçiş dalgalanmaların ve toparlanmanın, büyük ölçekli Karman girdaplarının simetrik olmayan yapısının değişmeyecek şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, geçiş dalgalanmalarının (yani Kelvin-Helmholtz girdaplarının) simetrik oluşumunun aslında Karman girdaplarının oluşumunu engelleyebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.3. Küt Cisim Etrafındaki Akış (Wu Ve Diğerleri, 1996).

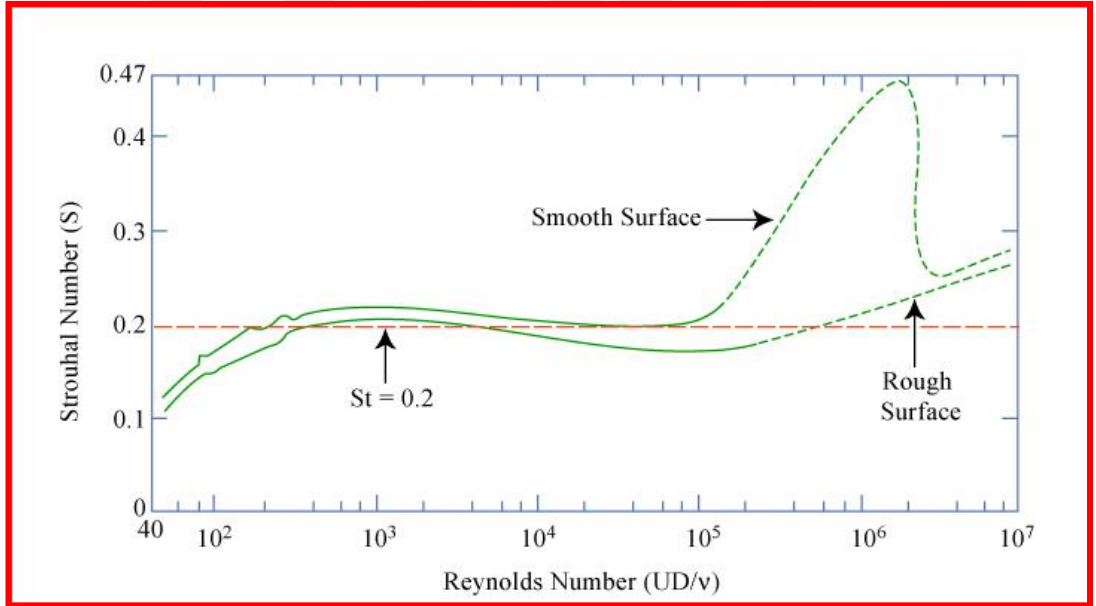
2.2 Silindir Etrafındaki Akış Yapısı

Akışkanlar mekaniğinin çok sayıda uygulaması kararsız akışların varlığını içerir. Akış kontrolü yaklaşımlarının oluşturulması söz konusu olduğunda, bu akışların yapısının sağlam bir şekilde anlaşılması önemlidir. Sonuç olarak akış içerisine yerleştirilen silindirin arkasında gelişen kararsız akış yapısının kontrol altına alınması amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara literatürde rastlamak mümkündür. Bu çalışma sayesinde, düz bir silindirin ve tabana göre farklı yüksekliklerde arka arkaya yerleştirilmesi sonucu oluşan akış yapısının, silindirlerin tabana olan mesafelerin değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun akış yapısı üzerine olan etkileri ortaya çıkarılmıştır. Silindir etrafında oluşan akış yapıları ile ilgili çalışmalar Bloor vd. (1966), Lin vd. (1995), Balachandar vd. (1997), Noca vd. (1998), Akilli vd. (2004), Ozgoren (2006), Sahin ve Ozturk (2009) tarafından yapılan araştırmalarla verilmiştir. Silindir etrafında oluşan akış yapıları ile ilgili pratik detaylı bilgiye referanslarda verilen kaynaklardan ulaşılabilir. Ard arda sıralı silindirler, girdapların saçılmasının bir sonucu olarak titreşime maruz kalacaktır. Silindirin belirli bir frekans ve genlikte titreşme durumu, girdabın parçalanmasıyla üretilen salınım kuvvetlerinden kaynaklanır. Tek silindirli FIV (akış kaynaklı titreşimler), hem sayısal hem de deneysel toplulukların önemli miktarda ilgi odağı olmuştur. Williamson ve Roshko (1988), girdap saçılımının frekansı yapının (silindir) doğal frekansı ile senkronize olduğunda büyük genlikli salınımın meydana geldiğini bildirdikleri bir deney gerçekleştirdiler. "Senkronizasyon", "kilitlenme" veya "kilitlenme" gibi çeşitli isimlerle bilinen bu büyük genlikli salınım olgusu, geniş

bir frekans aralığında meydana gelir Williamson and Govardhan, (2004). Kilitlenmeyi içeren titreşimli bir silindirden meydana gelen girdap kopmaları, aslında sabit bir silindirden meydana gelen girdap kopmalarından daha karmaşıktır. Sarpkaya (2004) ile Williamson ve Govardhan (2004) incelemelerinde, kitleme sırasında tek bir titreşimli silindirin spesifik girdap kopma özelliklerini ayrıntılı olarak tartışılmaktadırlar. Sabit tandem silindirler veya elastik olarak yerleştirilmiş tek silindirlerle karşılaştırıldığında, elastik üzerine monte edilmiş iki tandem silindir arasında meydana gelen etkileşimler bu noktada daha karmaşıktır. İki tandem silindir etrafındaki akış yapıları Zdravkovich (1988), Alam (2003) ve diğerleri tarafından özetlenmiştir. Zhou ve Alam (2016) boşluk oranı ile akış arasındaki ilişkiye dayanarak üç akış rejimi tanımlamışlardır. Aşağı yöndeki silindirin salınımının, üst yöndeki silindirin salınımından daha büyük olduğu genel olarak doğrudur; ancak yukarı yöndeki silindir salınımının, aşağı yöndeki silindir salınımından daha baskın hale geldiği belirli durumlar vardır (Qin vd., 2019). Kim vd. (2009), iki tandem silindir düzenlemesi için hem serbest akım hızının hem de silindirler arasındaki boşluk oranının akış yapıları ve titreşim üzerindeki etkisini araştırmıştır. Alam ve Meyer (2013) tarafından tanımlandığı gibi, yeniden bağlanma akış rejiminde aşağı akış silindirin izinden kaynaklı titreşimler olarak da bilinen dörtlü girdap titreşimi, boşluk kesme katmanları ile aşağı akış silindiri arasında mevcut olan güçlü temas tarafından sağlanır. Öte yandan, bu olay, boşluk girdapları ile aşağı yönde konumlanan silindir arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortak atılım rejiminde meydana gelir. Üst akış silindiri, üst akış silindiri ile alt silindirin sınır katmanları arasındaki temasın bir sonucu olarak şiddetli bir dörtlü girdap titreşimine maruz kalır. Papaioannou vd. (2008) ve meslektaşları tandem silindirlerde akış kaynaklı titreşimler üzerine sayısal bir analiz gerçekleştirdiler. Bu araştırmanın sonuçları boşluk oranının salınım genliği üzerinde etkisi olduğunu gösterdi. Araştırmacılar, boşluk oranının değeri arttığında iki silindirin sanki tek bir silindirmiş gibi salınım yaptığını gözlemlediler. Borazjani ve Sotiropoulos (2009) yaptıkları sayısal araştırmada çapraz akışa yerleştirilen iki tandem silindirin boşluk oranının 1.5 D değerinden sonra her iki silindirden kopan girdapların sıralı salınımlı bir akış yapısı meydana getirdiğini belirlediler. Her iki silindirin salınımlarının çok büyük bir genliğe sahip olduğunu ve kitleme aralığının, tek bir silindirin salınımlarının toplamından çok daha geniş olduğunu buldular. Aşağı yöndeki silindir, daha önce tartışıldığı gibi, boşluk oranı ve serbest akış hızından büyük ölçüde etkilenir ve aynı çaptaki iki silindir sisteme aynı anda eklendiğinde daha büyük bir genlikte salınım yapar. Ek olarak, farklı çaplara sahip silindirler, silindirlerin salınım genliği akış yapısı üzerinde etkiye sahiptir. Yukarıda tartışılan çalışmaların tümü, aynı çapa sahip iki tandem silindirin akış kaynaklı titreşimleri ile ilgilidir. Öte yandan tandem silindirler, endüstriyel uygulamalarda ve okyanus mühendisliğinde karşılaşılanlar da dâhil olmak üzere, çalıştıkları koşullara bağlı olarak çeşitli çaplara sahip olabilir. Bu nedenle, boşluk oranına ek olarak d/D çap oranı (burada d ve D sırasıyla üst ve alt silindirlerin çaplarıdır) akışın ve buna bağlı salınımların belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Her ne kadar çap oranının akış yapısı ve titreşim tepkileri üzerindeki etkisi geçmişte incelenmiş olsa da (Qin ve diğerleri, 2017; Wang ve

diğerleri, 2018; Alam ve diğerleri, 2018; Huera-Huarte ve Jiménez- González, 2019), araştırma aynı çaptaki iki silindire olduğu kadar kapsamlı bir şekilde yürütülmemiştir. Bu çalışma sayesinde, ard arda yerleştirilen dairesel silindir çiftinin tabana göre farklı yüksekliklerde konumlandırılması sonucu oluşan akış yapısı, silindirlerin tabana olan mesafelerin değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun akış yapısı üzerine olan etkileri ortaya çıkarılmıştır.

Yıllar boyunca çok sayıda araştırmacı, sıcak tel anemometresi kullanarak baskın girdap kopması frekanslarını ölçerek girdap kopması olgusuna ve akış görselleştirme yöntemleriyle ard izi yapılarına odaklanmıştır. Boyut analizinde Strouhal sayısı St , periyodik kararsız akış yapısını tanımlayan boyutsuz bir sayıdır. Parametre, adını 1878'de girdap kopmalarını teller etrafındaki akış yapısını inceleyen deneyler yapan Çek fizikçi Vincenc Strouhal'den almıştır. Strouhal sayısı ($St = f D / U_\infty$, burada f frekans, D silindir çapı, U_∞ serbest akış hızıdır), silindir etrafındaki akış yapısı için Reynolds sayısının, Re_D 'nin bir fonksiyonu olduğunu belirtir. Şekil 2.3 dairesel silindirler için Strouhal sayısı, St ve Reynolds sayısı, Re_D arasındaki ilişkiyi gösterir. Veriler Lienhard (1966) ve Achenbach ve Henecke'den (1981) alınmıştır. $40 < Re < 200$ için $St \sim 0,21$ ($1-24/Re$), Roshko'dan (1955). Strouhal sayısı St 'nin geniş bir Reynolds sayısı Re_D aralığında sabit ($St \approx 0,2-0,3$) olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.4. Dairesel Silindirler İçin Strouhal Sayısı, St ve Reynolds Sayısı, Re_d Arasındaki İlişki
Tchet. A (2005)

Parçacık görüntülemeli hız tekniğini yöntemini kullanarak Aköz ve ark. (2010), bir sınır levhası üzerinde yatay olarak konumlandırılan bir silindiri çevreleyen akış yapısı üzerinde deneysel bir araştırma yürütmüştür. Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak akış bölgesinin boyuna yönde boyutunun küçültüldüğü akış bölgesinde bile, yatak yüzeyi ile silindirin kesişiminin hidrodinamik gelişim süreçlerini arttırdığını ortaya koymuşlardır. Leung ve diğerleri. (1997), asimetrik bir yapıda

oluklu dairesel bir silindir boyunca meydana gelen akışın geçiş özelliklerini incelemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin gerçekleştirildiği tüm Reynolds sayısı aralığı boyunca, silindirin yivli tarafının yüksek akış rejimlerine maruz kaldığını, ancak silindirin düz tarafındaki akışın kritik altı rejimde olduğunu keşfettiler. PIV tekniğini kullanarak Kahraman ve ark. (2012), sıg suda serbest yüzeye yakın konumlandırılmış yatay bir silindirin etrafında mevcut olan akış yapısını araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Akış yapısını daha iyi anlayabilmek için Reynolds ve Froud sayılarının etkilerini araştırmışlardır. Ayrılmış akışın serbest yüzeye yeniden bağlandığı noktanın silindirin çapına bağlı olduğunu ve Froude sayısından etkilendiği sonucuna varmışlardır. Kritik Reynolds sayısı rejiminde Quintavalla ve ark. (2013), yivli silindir uygulamalarında sürtünmenin azaltılması üzerine bir araştırma yürütmüştür. Deneylerden elde edilen bulgular, olukların çok kısa oluk derinliklerinde bile kullanılmasıyla çapraz akışlarda dairesel silindirler için sürtünmede büyük azalmalar elde etmenin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Oluğun şeklini, genişliğini veya derinliğini artırarak genel oluk alanını genişletmenin, kritik Reynolds sayısını düşürmede önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. $Re_D = 5,4 \times 10^4$ sayısı için Wang ve ark. (2014), kaktüs benzeri oluklu silindirin çevresinden meydana gelen akış yapısını farklı akış konfigürasyonları için araştırmıştır. Pürüzsüz silindirle karşılaştırıldığında, yivli silindir sisteminin daha sabit bir girdap kopma frekansına sahip olduğunu ancak bunun çok daha zayıf olduğunu belirlemişlerdir. Yamagishi ve Oki (2004), olukların silindiri çevreleyen akış yapısı üzerindeki etkisini incelemek için bir çalışma yürüttüler. Silindir etrafındaki akış yapısını değerlendirmek için RNG $k - \epsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Ek olarak, yüzey akış yapısını araştırmak için akış görselleştirme tekniği olan yağ filmi metodundan yararlanılmıştır. Çalışmanın sonunda, üçgen oluklu dairesel bir silindirin sürtünme katsayısının, yay oluklu dairesel silindirin sürtünme katsayısından yaklaşık yüzde on beş daha düşük olduğu sonucuna vardılar. Zhang ve Ko (1995), yaptıkları çalışmada hem pürüzsüz hem de oluklu dairesel bir silindir etrafında meydana gelen sıkıştırılmaz akışın sayısal bir analizini gerçekleştirdi. Olukların silindir yüzeyindeki akış özelliklerinin yanı sıra ard izinde ki akış özelliklerini de etkileme yeteneğine sahip olduğu araştırmalarla kanıtlanmıştır. Spektral analizin kullanılmasıyla araştırmacılar, ayrılmış akış bölgesinde ki geçiş dalgalanmalarında ki küçük girdapların frekans değişiminden olukların etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bu, akışın kritik rejimde akarken, oluklu silindir çevresindeki sürtünme katsayısının değerinde azalma olduğunun bir işaretidir. Parçacık görüntüleme hız ölçümü tekniği Lim ve Lee (2003) tarafından U-oluklu bir silindirin arkasında bulunan akış yapısını araştırmak için kullanılmıştır. Araştırmacılar, U tipi oluklar mevcut olduğunda, silindir üzerindeki etkili sürtünme katsayısının, pürüzsüz silindirlerle karşılaştırıldığında %18,6 oranında azaldığını belirlemişleridir. El-Makdah ve Oweis (2013), kaktüs benzeyen bir oluğa sahip bir silindir etrafındaki akışı yapısını incelerler. Kaktüs modelinde girdap yeniden tutunma noktasının silindir yüzeyine daha yakın olduğu belirlendi ve bunun dairesel silindire kıyasla baskın bir girdap davranışı sergilediği gözlemlendi. Liu vd. (2011)

çalışmasında, yivli silindirin uzay-zamansal girdap özelliklerini, yetişkin Saguaro kaktüsünün girdap özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla, deneysel olarak araştırmıştır. Karşılaştırmaların daha kolay yapılabilmesi için pürüzsüz silindirin arkasındaki girdap kopmalarının frekansı belirlendi. Verilerin incelenmesi sonucunda pik frekansının mekansal dağılım sonucundan da anlaşıldığı üzere, yivli silindir girdabının kırılmasının geciktiği, ölü akış bölgesinde ise yüksek frekanslı kayma tabakası girdaplarının hakim olduğu keşfedildi. Bu, tepe frekansının coğrafi dağılımı incelenerek keşfedildi. Alonzo-Garcia ve ark. (2015), kritik olmayan bir akış senaryosunda V ve U oluklarının dört elmas şeklindeki silindir üzerindeki etkisini incelemek için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) araştırması gerçekleştirmişlerdir. Tamamen yapılandırılmış altıgen ızgaralarda duvara yakın ayarlamalar için k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bulgular, sayısal modelin görsel olarak etkileyici akış modelini başarılı bir şekilde tahmin ettiğini ve pürüzsüz silindir dizisinin yanal silindirlerindeki itici güçlerin oluşumunu tanımladığını gösterdi. Oluklar akış hizalaması oluşturarak yanal silindirler arasında bir jet akışı oluşmasına neden olmuşlardır. Bu durum, özellikle arka silindirde etkiyen girdap kaynaklı titreşimlerin artmasına neden olmuştur. V-oluklu silindirlerin alt ve üst kısımlarındaki kesme gerilmelerinin U-oluklu silindirlere göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Ancak U-oluklarının varlığı, ayırma noktalarının silindir yüzeyinde daha büyük açılara kaymasına neden olmuştur. Zhou ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada pürüzsüz yüzeye sahip silindirik bir nesnenin ve uzunlamasına oluklara sahip başka bir silindirik nesnenin etrafındaki akış özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını Reynolds sayılarının, $Re = 7,4 \times 10^3$ ile $1,8 \times 10^4$ aralığında gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, silindir yüzeyindeki olukların varlığının hem sürüklenme katsayısını hem de akış özelliklerini nasıl etkilediğini incelemektir. Kuvvet ölçümü bulguları, yüzeydeki olukların varlığının, aynı Reynolds sayısında pürüzsüz silindirle karşılaştırıldığında sürtünme katsayısında %20'lik bir azalmaya yol açtığını ortaya koymuştur. PIV ölçüm bulguları, yivli silindirden kaynaklanan kayma tabakasının, pürüzsüz silindirle karşılaştırıldığında daha düşük büyüklük ve boyutlara sahip olduğunu göstermiştir. Bu deneyin bir başka sonucu da, yivli yüzey sayesinde silindirdeki girdap kopmasının azaldığının belirlenmesidir. Canpolat ve Şahin (2017) tarafından yapılan çalışmada, dairesel bir silindirin yüzeyindeki tek bir oluğun akışı nasıl kontrol ettiğini göstermek için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla silindirin yüzeyinde uzunlamasına 50 mm çapında kare bir oluk oluşturulmuştur. Çalışmanın sonuçları, silindirin durma noktasının 0° ile 150° arasında değişen açisal konumuyla ilişkili olarak akış yapısındaki değişimleri ortaya koymuştur. Ayrıca çalışma, girdap (w), akım çizgileri (Ψ), akış doğrultusunda (u/U_0) ve enine akım (v/U_0) hız bileşenlerinin yanı sıra türbülans kinetik enerji değerleri de dahil olmak üzere çeşitli akış parametrelerinin niceliksel sonuçlarının analizini içermektedir. Durhasan T. (2020), PIV tekniğini kullanarak yiv oranının ard izi akışı ve türbülans istatistiklerinin değerleri üzerindeki etkisini göstermek için yarıklara sahip yivli kare bir silindir kullanarak deneyler gerçekleştirdi. Çalışmanın sonuçlarına göre PIV sonuçlarından elde edilen sürüklenme katsayısı silindir modeline

göre %42'ye kadar azaltılmıştır. Özdil ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada dairesel bir silindirin akış yapısı PIV tekniği kullanılarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan dairesel silindir, daldırma oranının etkisini incelemek için silindir, taban ile serbest yüzey arasında değişen yüksekliklere yerleştirildi. Sonuç olarak daldırma oranı arttıkça jet benzeri akış hızının büyüklüğü de arttı. Najafi ve diğerleri (2016), silindir çapına bağlı olarak 5000 Reynolds sayısında 5° derecelik artışla 0° derece ile 45° derece arasında değişen oluk açılarına sahip bir silindir için deneysel bir çalışma gerçekleştirdiler. Sonuçlar, oluğun arkasındaki son derece çalkantılı ard izinin gevşediğini ve aşağı akım yönünde değiştiğini ortaya çıkardı. Özkan ve ark. (2017), sabit silindirlerden oluşan iki boyutlu girdap yapısının baskılanması için kullandıkları delikli plakaların etkinliğini belirlemek için gözenekli silindirler kullanmışlardır. Araştırmanın bulguları, geçirgen bir plaka kullanımının, silindirin aşağı akım yönünde oluşan girdap kopmalarını etkili bir şekilde bastırdığını ortaya koymuştur.

Başka bir çalışmada Tümen Özdil ve Akilli (2019), sığ suda $h = 60$ mm'de yatay tandem silindirlerin akış özelliklerini incelemiştir. Deneylerde kullanılan tandem silindirler arasındaki mesafe 15 mm aralıklarla 0 mm'den 90 mm'ye, 30 mm aralıklarla 90 mm'den 150 mm'ye çıkarılmıştır. Sonuçlar tandem silindirler arasındaki boşluğun ard izi alanının boyutunu derinleştirdiğini göstermiştir. Durhasan ve ark. yalın silindirler etrafındaki delikli içi boş silindirlerin akış özelliklerini 30° aralıklarla 120°'den 180°'ye kadar yay açısı ve 0,1 aralıklarla 0,3'ten 0,8'e kadar geçirgenlik oranlarında incelemek için bir dizi deney gerçekleştirdi. Çalışmanın sonuçları, delikli silindir kullanımının silindir etrafındaki aşağı akım yönünde oluşan girdabı baskıladığını ortaya çıkardı. Durhasan ve ark. (2016), çapın (D_s) ve gözenekli dış gömleğin (β) girdap kopma mekanizmasını nasıl etkilediğini göstermek amacıyla silindir ile delikli silindir gömleği arasındaki boşluktaki akış özelliklerini analiz etmek için PIV'i kullandı. Yalın silindir durumuyla karşılaştırıldığında gözenekli yapının silindirlerin direnç katsayısını büyük ölçüde azalttığı belirlendi. Pinar ve diğerleri (2015) sığ suda PIV yöntemi yardımıyla delikli silindirler etrafındaki akış özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler Reynolds sayısının ve serbest akış hızının sırasıyla 10.000 ve 100 mm/s değerleri için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca geçirgenlik oranının akış yapısı üzerindeki etkisini göstermek için geçirgenlik (β), 0,1 adım boyutuyla 0,1 ila 0,8 arasında değiştirilmiştir. Geçirgenliğin, silindirin aşağısındaki büyük girdapların kontrolü üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ortaya çıkardılar. Ayrıca delikli silindirlerin kullanılmasıyla kayma tabakasında meydana gelen dalgalanmalar azaltılmış, Karman Vortex Caddesi baskılanmıştır. Oruç ve ark. (2015), PIV yöntemi yardımıyla dairesel bir silindirin ard izindeki akışın pasif kontrolüne yönelik bir çalışma sunmuştur. Deneyler silindir çapına göre 3350, 6850 ve 10,200 olmak üzere üç farklı Reynolds sayısı gerçekleştirilmiştir. Pasif kontrol yöntemi olarak, ard izi bölgesinde Karman Vortex Caddelerinin oluşumunu önlemek amacıyla silindirin etrafında damla şeklinde bir ağ yapısı kullanılmıştır. Damla şeklindeki ağ yapısı ile akışın kontrol edildiği, Reynolds kayma gerilmesinin ve türbülanslı kinetik enerji dağılımının azaldığı sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (PIV)

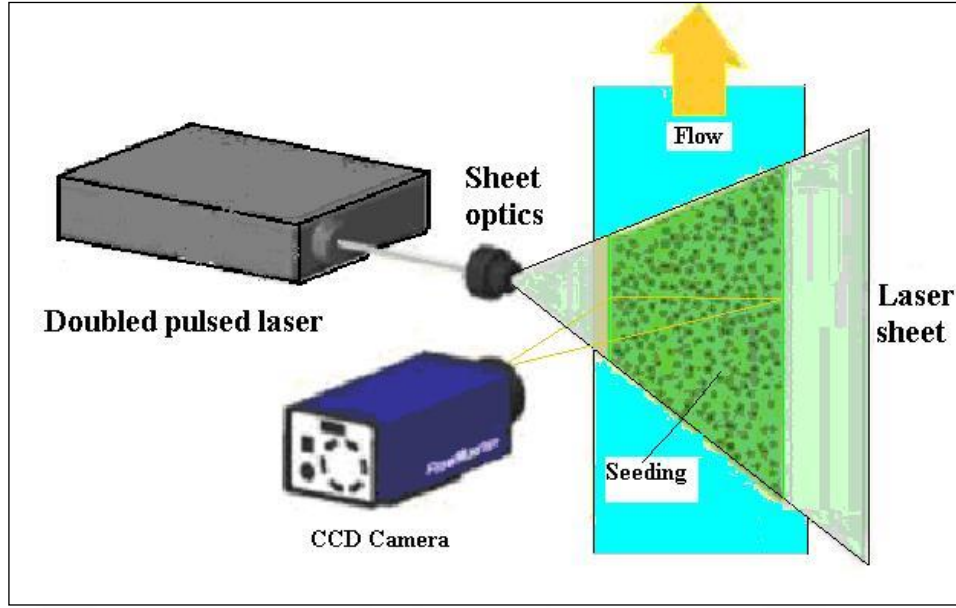
İki boyutlu akış alanının anlık, müdahalesiz ve niceliksel ölçümüne olanak tanıyan Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) tekniği, modern deneysel akışkanlar mekaniği uygulamalarının birçok alanında önemli bir başarı ve köklü bir tekniktir (Gilliot, 2004). PIV'in prensibi, akışa enjekte edilen izleyici parçacıkları bir ışık tabakasıyla aydınlatmak ve saçılan ışığı kaydetmektir (Raffel, 1998, M Riethmuller, M.L 1997). Hız ölçümlerini gerçekleştirmek için parçacıklar atımlı bir lazerle iki kez aydınlatılır, Lazer hüzmeleriyle aydınlatılan bu bölgede hareket eden parçacıkların iki adet dijital fotoğrafı arka arkaya mili-saniye mertebesindeki zaman aralığında (Δt) 1600pikselx1180piksel çözünürlüğe sahip dijital kamera ile çekilmekte ve bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. İki fotoğraf arasındaki süre tamamıyla akışın yapısına bağlıdır. Lazer kaynağı darbeli tip olduğu için lazer ile kameranın eş zamanlı olarak çalışması gerekmektedir. Yani, lazer kaynağından çıkan lazer hüzmesi ölçüm yapılan bölgeyi aydınlatıldığı anda dijital kamera ile aydınlatılmış olan bu bölgenin fotoğrafını çekmektedir. Lazer kaynağı ile dijital kamera arasındaki zamanlamayı ayarlayan alete eş zamanlayıcı (senkronizer) denmekte ve bu alet bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Yani, lazer kaynağından çıkan lazer hüzmesi ölçüm yapılan bölgeyi aydınlatıldığı anda dijital kamera ile aydınlatılmış olan bu bölgenin fotoğrafını çekmektedir. Δt aralığı boyunca, her parçacık kendi hızıyla (akışın hızı olduğu varsayılır) orantılı bir mesafe boyunca hareket eder; görüntü düzlemindeki hız bileşenleri parçacıkların yer değiştirmesinden çıkarılır. Bu amaçla PIV kaydı sorgulama penceresi adı verilen küçük alt alanlara bölünür ve her sorgulama alanındaki parçacıkların ortalama yer değiştirmesi FFT korelasyon yöntemleriyle belirlenir. Odaklama sırasında kamera karesinin lazer perdesi ile tam olarak paralel olması gerekmektedir. PIV sisteminin ölçüm öncesinde hassas olarak ölçüme hazırlanması gerekmektedir. PIV sürecinin iki adımı vardır: PIV yöntemi iki aşamada gerçekleşir: görselleştirme ve görüntü inceleme. PIV sisteminin ölçüm öncesinde hassas olarak ölçüme hazırlanması gerekmektedir. Burada şu şekilde bir işlem sırası takip edilecektir; dairesel silindirlere, su kanalına yerleştirilmeden önce PIV sisteminin lazer perdesine göre kalibre edilmesi gerekmektedir çünkü alınan fotoğrafların piksellerin ölçülen düzlemde ne kadar uzunluğa denk geldiğinin belirlenmesi gerekir. Bunun için ölçüm yapılacak düzleme lazer perdesi düşürülecektir. Lazer perdesine paralel olarak kamera karesi konumlandırılacaktır. Bu süreçte mastarlar kullanılmaktadır. Su kanalı içerisinde ışığı yansıtan mikro partiküller atılacaktır. Kanal içerisinde partiküllerin homojen olarak dağılması için kanal 20 dakika kadar yüksek hızda çalıştırılacak ve daha sonra deneyin yapılacağı Reynolds sayısını sağlayacak şekilde belirlenen akış hızına getirilecektir. Ölçümün yapıldığı laboratuarda ışık bulunmaması için ortam karanlıklaştırılacak şekilde gerekli önlemler alınacaktır. Kamera lensleri lazer perdesi içerisinde bulunan partiküllere odaklanacaktır. Daha sonra alınan görüntülerin kalitesine göre kamera ayarları son kez kontrol edilecektir. Kontrolten sonra lazer

perdesinin içerisinde uzunluk kalibresinin yapılmasında kullanılan bir master yerleştirilir. Bu masterın görüntüsü kaydedilmelidir. Fotoğraf kaydedildikten sonra PIV yazılımı içerisinde uzunluk kalibrasyon işlemi yapılarak çekilen görüntüdeki piksellerin hangi mutlak uzunluğa karşılık geldiği belirlenmektedir. İncelenecek geometri su kanalında istenilen yüksekliğe yerleştirilecektir. Geometrinin sapma açısı akış doğrultusuna göre ayarlanacaktır. Geometrinin tutturulduğu düzencek sabitlenecektir. Kanal içerisindeki su hızı deneylerin yapılacağı Reynolds sayısına göre ayarlanacaktır. Akışın hidrodinamik karakteristiklerini açığa çıkaracak yeterli imaj sayısı, yine gerekli sürede alınacaktır. Bu imaj sayısının yaklaşık olarak en az 7326 (99×74) adet olacağı öngörülmektedir. Çünkü imaj sayısı FFT analizlerinin doğal olarak yapılabilmesi için $2n$ ile belirlenmektedir ve burada n akış kararsızlığının tekerrür frekansıdır. İmajların alınacağı süre kameranın ve lazerin senkronize olarak çalışma hızını belirlemektedir. Bu hızın 15-500 Hz aralığında olacağı öngörülmektedir. Bilgisayara aktarılan bu resimler genellikle 32×32 pixel ebatlarındaki ağ olarak adlandırılan küçük bölgelere ayrılmakta ve her bir bölge içerisinde yaklaşık olarak 20-30 gümüş kaplı parçacık bulunmaktadır. 'Fast Fourier' dönüşümü kullanılarak her bir ağ bölgesindeki parçacıkların çekilen iki resim arasındaki yer değiştirmeleri bulunmaktadır. Her iki resim arasındaki Δt zaman aralığı ve parçacıkların aldıkları mesafe bilindiğinden göz önüne alınan ağ bölgelerindeki hız vektörleri hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucunda elde edilen ham vektör haritaları her zaman adımı için elde edilmektedir. Bununla çekimlerde oluşan yansımalar, ışık ve diğer gürültülerden dolayı akış alanında oluşmaması gereken hatalı hız vektörleri oluşmaktadır. Bu hız vektörlerinin çeşitli matematiksel filtreler ile temizlenmesi için yazılımlar kullanılacaktır. Prosesleri yapılan ham vektör haritaları işlenmiş vektör haritası olarak da isimlendirilmektedir. İşlenmiş vektör haritaları sonuç olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte elde edilmek istenen diğer verilerin PIV çalışmalarında kullanılan yazılımlar ile post-proses işlemleri yapılacaktır. Görüntülerin bu şekilde sorgulanması ve vektör haritasının oluşturulmasının ardından, verilerin doğrulanması ve vektör haritasının çözünürlüğünün ve doğruluğunun iyileştirilmesi için son işlemler gerçekleştirilir. Elde edilecek sonuçlar; anlık vektör alanı, ortalama vektör alanı, vektörlerin akış doğrultusundaki bileşenlerinin ortalama skaler değerlerinin eş düzey eğrileri, vektörlerin akış doğrultusundaki bileşenlerinin çalkantı skaler değerlerinin eş düzey eğrileri, akışa dik yöndeki vektör bileşenlerinin ortalama skaler değerlerinin eş düzey eğrileri, akışa dik yöndeki vektör bileşenlerinin çalkantı skaler değerlerinin eş düzey eğrileri, Reynolds gerilmesi skaler değerlerinin eş düşey eğrileri, girdap eş düzey eğrileri, ortalama girdap eş düzey eğrileri, girdap kopmalarının frekansı ve akış çizgileridir.

3.2 Görüntü Yakalama

PIV tekniğinin iki aşamadan oluştuğu düşünülebilir: görüntü edinme ve görüntü değerlendirme. PIV kamera, bilgisayar kontrollü senkronayızır ve görüntü yakalama ve analiz yazılımıyla birlikte, PIV görüntü yakalama ve analizi için en son teknolojiye sahip yeteneklere

sahiptir. Geliştirilen PIV enstrümantasyon serisinde, çevrimiçi görüntü haritalarının neredeyse gerçek zamanlı vektör harita işleme için bir ön koşul olması nedeniyle, PIV kameralar olarak CCD tabanlı kayıt sistemleri seçilmiştir (Tonddast-Navaei ve Sharp, 2001). Şekil 3.1, PIV ölçümlerini gerçekleştirmek için tipik bir deneysel düzenlemeyi göstermektedir. PIV sistemi hesaplamalar için fotoğraf kullanmaktadır. Dolayısıyla fotoğrafların işlenebilecek bir kalitede elde edilmesi gerekmektedir. İncelenmekte olan akışa eklenen izleyici parçacıklar bir lazer tabakasıyla aydınlatılır ve aydınlatılan akış alanının görüntüleri yakalanıp daha sonraki analiz için saklanır. Bu yöntemle iki boyutlu hız ölçümü yapmak amacıyla, 10-20 mikrometre çapında ve suyun yoğunluğuyla karşılaştırılabilecek yoğunlukta parlak gümüş kaplı metal veya plastik parçacıkları akışa serpilir (su). Taneciklerin yoğunluğu sudan oldukça yüksek olmasına rağmen (1100 kg/m³ arasında değişen), çaplarının mikron mertebesinde olması nedeniyle su ile aynı hızda akmaktadırlar. Kullanılacak partiküller şu genel özelliklere sahip olmalıdır: Lazer ışığını iyi yansıtabilmeli, korozyona neden olmamalı, akışın meydana geldiği ortamdaki kanal ekipmanlarında ve modelde aşınmaya neden olmamalıdır. Toksik olmamalı, akışkanın şeffaflığını koruyabilmesi için temiz olmalı ve çok küçük hız değerleri hesaplanabilmesi için lazer ışığının şiddeti parçacıklara çok fazla yansımamalı. Tohumlama parçacıkları sıvı akışını sadakatle takip etmelidir. Türbülanslı veya yüksek hızlı gaz akışı durumunda, yaklaşık 1 µm veya daha küçük tohumlama parçacık çapları gereklidir (Melling, 1997). (Tonddast-Navaei, 2003) Yakalanan görüntülerin çözünürlüğü saçılan ışık gücüyle doğru orantılı olduğundan takip edilen parçacıkların güçlü saçılma özelliklerine sahip olması gerekir. Ayrıca ekim materyali akışa herhangi bir 2 fazlı etki getirmemelidir. Tohumlama parçacıklarını verimli bir şekilde aydınlatmak için yüksek yoğunluklu bir ışık kaynağının (normalde bir lazer) kullanılması gerekir. Akışı iki boyutta incelemek için, kaynak ışından yüksek yoğunluklu ince bir ışık tabakası oluşturmak için farklı merceklerin bir kombinasyonu kullanılır (Raffel, M, 1998).



Şekil 3.1. PIV Deney Düzenegi (McLean, 2007)

3.3 Akışa Parçacık Ekimi

Sıvıda doğal olarak bulunan yabancı maddelerden yararlanılarak belirli durumlarda ölçümün sağlanması mümkün olsa da, başarılı tohumlama genellikle araştırmacının önemli ölçüde deneyimini ve hesaplama beceresini gerektirir. Dikkate alınması gereken faktörler şunlardır: akış ortamı (hava veya su), tohumlanacak hacim, akış hızı, ışık saçılımı, parçacık boyutu ve güvenlik hususları (yutma, patlama riski). Parçacık boyutu ve yoğunluğu ile sıvı yoğunluğu ve viskozitesi, kaldırma kuvveti ve ataletin etkilerini belirler. Tam olarak nötr kaldırma kuvveti elde etmek zordur, ancak parçacıkların deney boyunca asılı kalması gerekir. (Melling, 1997) Tohumlama genel olarak suda havaya göre daha kolaydır. Sıvının daha yüksek yoğunluğu ve viskozitesi ile birlikte daha düşük hızlar ve ivmeler, daha büyük, daha kolay tespit edilebilir parçacıkların kullanılabilmesi anlamına gelir. Hava akışları (düşük sıcaklık): yağ, 1-5 μm , hava akışları (yüksek sıcaklık): titanyum dioksit, zirkonyum dioksit, 0,5-5 μm , hava ve su akışları: lateks parçacıkları, 0,25-5 μm , su akışları - kozalaklı ağaç poleni, 30-50 μm .

Bir diğer önemli parametre küresel tohumlama parçacıkları için Stokes sayısıdır. Stokes sayısı, parçacıkların akış alanını doğru bir şekilde takip etme yeteneğinin bir ölçüsünü sağlar ve sınırlayıcı Stokes sayısı aynı zamanda akış geometrisine ve önemli hızlanma veya yavaşlamaların varlığına da bağlıdır. Stokes sayısı, bir parçacığın durma mesafesinin engelin karakteristik boyutuna oranı olarak tanımlanır.

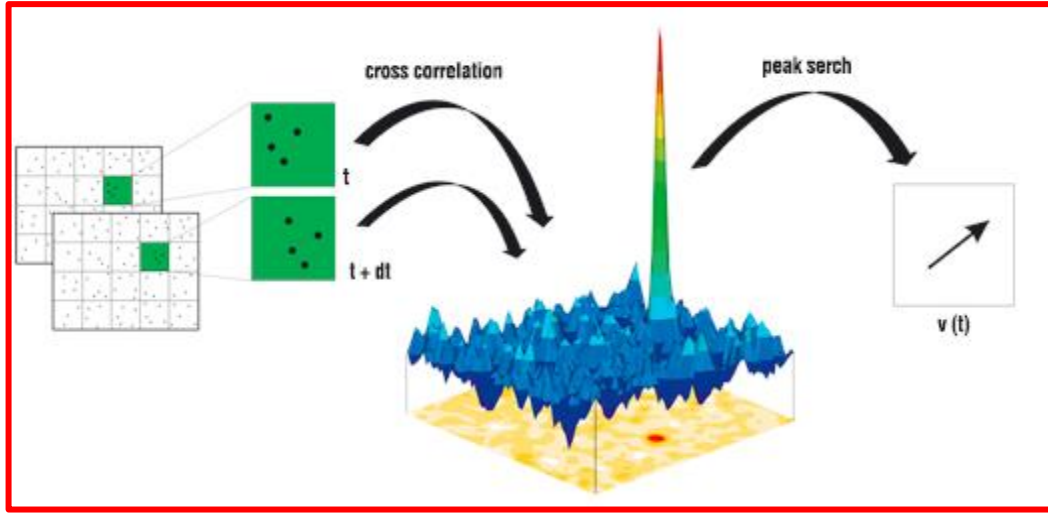
$$St = \frac{\tau_p \cdot U_\infty}{d_{parçaa}} \quad (3.1)$$

Burada τ_p parçacığın gevşeme süresi, U_∞ engelden uzaktaki akışın sıvı hızı ve $d_{parçacık}$

parçacığın çapıdır. Partikül gevşeme süresi
$$\tau_p = \frac{\rho_{particle} d_{particle}^2}{18 \rho_{fluid} \nu_{fluid}}$$
, ek olarak $\rho_{particle}$ partikül yoğunluğu ve $d_{particle}$ partikül çapı tarafından verilir. Örneğin, Stoks sayısının $St \gg 1$ durumu için, sıvı engelin etrafında dönerken parçacıklar düz bir çizgide ilerlemeye devam edecek ve dolayısıyla engele çarpacaktır. Stoks sayısının $St \ll 1$ durumu için parçacıklar sıvı akış çizgilerini yakından takip edeceklerdir (Fuchs 1989).

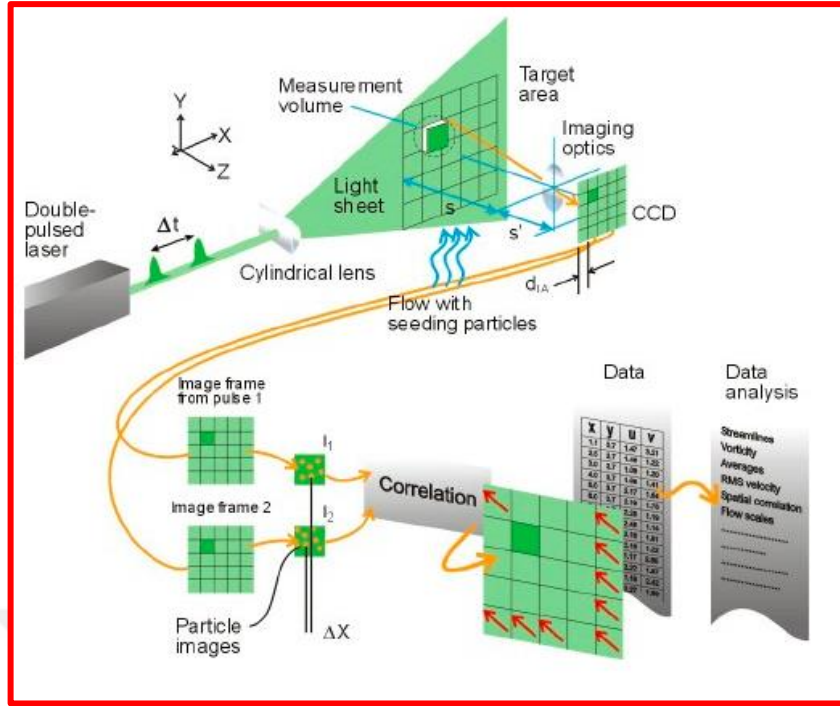
3.4 Görüntü Değerlendirme ve Çapraz Korelasyon Süreci

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü, uzayın tüm düzlemsel bölgesi için çok sayıda noktada tam bir hız alanı sağlarken LDV, tek bir noktadaki ölçümlerle sınırlıdır. PIV, belirli bir andaki hız alanının bir milisaniyenin çok küçük bir kısmı içinde yakalanmasına olanak tanıdığı için, daimi olmayan akış yapılarının incelenmesi açısından değerlidir. Bazı durumlarda PIV, anlık hız alanlarını ve skaler bir miktarın (örneğin sıcaklık veya konsantrasyon) anlık uzaysal dağılımını eşzamanlı olarak ölçmek için başka yöntemlerle birleştirilebilir ve hız-skaler korelasyonların belirlenmesine olanak tanır. İlk PIV görüntü değerlendirme yöntemlerinin piyasaya sürülmesinden bu yana, PIV yönteminin hızını ve doğruluğunu artırmak için tasarlanan hata düzeltme ve işlem sonrası prosedürlerin yanı sıra alternatif analiz algoritmaları da geliştirildi. Ancak klasik PIV analiz yöntemi halen en sık kullanılan yöntemdir ve diğer birçok algoritmanın temelini oluşturur (Şekil 3.2). Otomatik korelasyon tekniğinin aksine, en iyi doğruluk çapraz korelasyondan elde edilir. Otomatik korelasyon için yalnızca bir görüntü kullanılır ve iki kez pozlanır. Görüntüde zamanlamayla ilgili herhangi bir bilgi bulunmadığından hangi parçacık görüntüsünün birinci, hangisinin ikinci lazer darbesinden kaynaklandığı bilinmemektedir. İki kareye uygulanan çapraz korelasyon, bir parçacığın hareketinin yönü hakkında kesin bilgi verir çünkü hangi karenin önce, hangisinin ikinci çekildiği bilinmektedir. Bu yöntemin avantajı, yüksek sinyal-gürültü oranı dikkate alınmasıdır. Genel koşullar altında doğruluğun 0,1 piksel civarında olması beklenebilir. Bilinen piksel boyutu ve büyütme (lens ve mesafe) ile bu, bir deneyde kolaylıkla gerçek ölçeğe dönüştürülebilir.



Şekil 3.2. Parçacık Görüntülemeli Hız Tekniği Süreç Analizi (Lavision, 2024)

PIV analizinin kalbi, o kısımdaki akışın yer değiştirme vektörünü belirlemek için girdi görüntülerinin bölgelerinin (sorgulama alanları olarak bilinir) birbirleriyle korelasyonudur. Yakalanan görüntüler arasındaki zaman aralığının bilinmesi, yer değiştirme vektöründen bir hız vektörünün hesaplanmasına olanak sağlar. Bu mesafeyi belirlemenin en yaygın yöntemleri parçacık takibi veya korelasyondur. Yöntemin avantajları; Ölçüm tekniği akışı rahatsız etmez (saldırgan değildir) ve akışı takip eden mikron boyutundaki parçacıkların hızlarını ölçer. Hız sıfırdan sesüstüne kadar değişir. Anlık hız vektörü akışın bir kesitini haritalandırır. Her üç bileşen de stereoskopik bir düzenleme kullanılarak elde edilebilir. Hız vektör haritaları dizileri, istatistikler, uzaysal korelasyonlar ve diğer ilgili veriler mevcuttur. Sonuçlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak elde edilenlerle karşılaştırılabilir; bu, büyük girdap simülasyonlarının ve gerçek zamanlı hız haritalarının akışkanlar dinamiği alanında çalışan araştırmacılar için çok yararlı araçlar olduğu anlamına gelir.

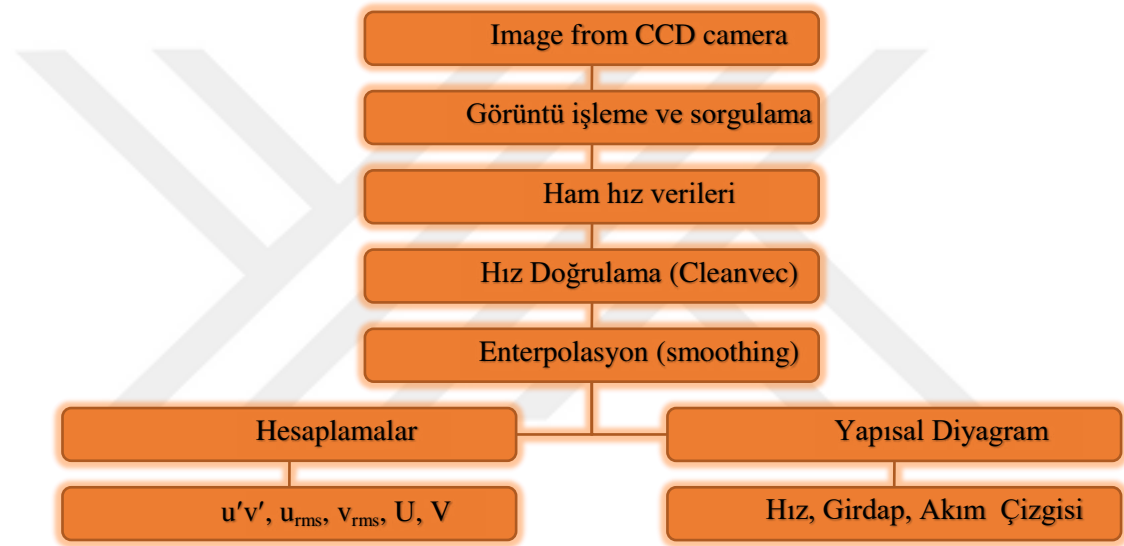


Şekil 3.3. Temel PIV analiz süreci (Dantec Dynamics, 2024)

Bu korelasyon teknikleri arasındaki farklar, birinci ve ikinci parçacık görüntülerine ilişkin görüntü penceresi alanlarıdır. Otokorelasyonda, hem birinci hem de ikinci görüntü pencereleri için aynı görüntü penceresi kullanılır. 1 karelik çapraz korelasyonda, ikinci görüntü penceresi aynı karedeki birinci görüntü penceresinden kaydırılır. İki kare çaprazlamada, ilk görüntü penceresi çerçeve 1'de, ikinci görüntü penceresi ise çerçeve 2'dedir. Bu işleme tekniklerinin her birinin bazı uygulamalar için avantajları vardır. Otomatik korelasyon, parçacık hareketi ve görüntü kaymasının birlikte sorgulama noktası görüntü yer değiştirmesinin $1/4$ 'ünden daha azını sağladığı çoklu pozlama görüntüleri içindir. Bu klasik PIV işleme tekniğidir. Tek kare çapraz korelasyon aynı zamanda çoklu pozlama tekniğidir. Görüntü kaydırma yer değiştirmesi parçacık hareketi yer değiştirmesine göre büyük olduğunda kullanılır. İkinci görüntü penceresinin ortalama parçacık görüntü yer değiştirmesi ile birinciden kaydırılmasıyla yüksek çözünürlüklü ölçümler yapılabilir. Aksi takdirde, otokorelasyon işlemi için aşırı derecede büyük sorgulama noktası boyutları gerektirecektir. İkinci görüntü penceresinin ortalama parçacık görüntüsü yer değiştirmesi ile dengelenmesiyle, sorgulama noktası boyutu azaltılabilir ve otokorelasyona göre daha az kayıp çift elde edilir. İki kare çapraz korelasyon, iki görüntü karesindeki pozlar arasında hareket eden parçacıkların mesafesini ölçer. Bu çerçevelerin her biri yalnızca bir ışık darbesine sahiptir. Birinci darbe görüntülerinin ve ikinci darbe görüntülerinin sırasının bilinmesiyle, tek kare tekniklerine göre işlem sinyali-gürültü oranı iyileştirilir. İki çerçeveli çapraz korelasyon, görüntü kayması olmadan sıfır yer değiştirmeyi ve ters akışları ölçebilir. İki kare çapraz korelasyon, birbirini takip eden iki karedeki parçacık görüntülerinin ölçülebilir aralıkta parçacık görüntü yer değiştirmeleri vermesini sağlayacak kadar yüksek etkili kare hızına sahip görüntü yakalama sistemleriyle kullanılabilir.

3.5 Sürtünme Momenti (Ms)

Ham hız alanının sonradan işlenmesi, vektör doğrulamasını ve sahte vektörlerin kaldırılmasını, kaldırılan vektörlerin değiştirilmesini ve veri yumuşatma ve filtrelemeyi içerir. Vektör alanları belirlendikten sonra zaman ortalaması ve faz ortalaması kullanılabilir. Görüntü işlemenin genel prosedürü Şekil 3.4'de sunulmaktadır (Öztürk, 2006). Son işlemlerde vektörler komşu vektörlerle karşılaştırılır. Komşuluk ortalamasından doğrulama toleransından daha fazla farklılık gösteren vektörler kaldırılır. Soldaki boşluklar, o noktadaki hızın en iyi tahminini elde etmek için komşu vektörlerin enterpolasyonu ile doldurulabilir. Vektör doğrulandıktan ve eksik noktalar doldurulduktan sonra akışın anlık hız alanı hesaplanabilir. Bu hesaplamaların ardından anlık hız alanı verilerinden akışların diğer özellikleri hesaplanabilir.



Şekil 3.4. Görüntü İşlemeye Yönelik Genel Prosedür (Öztürk, 2006)

Parçacık çiftlerinin uyumsuzluğu nedeniyle PIV ölçümlerinin hız vektör alanında hatalı vektörler görünebilir. Bu durum ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle görüntü işleme öncesinde hatalı vektörler tespit edilir, kaldırılır ve doğru olanlarla değiştirilir. Son olarak, dijital görüntüler komşuluk ortalama tekniği ile iyileştirilir ve yumuşatılır (Westerweel, 1994). Yanlış olan hatalı vektörleri ortadan kaldırmak için CLEANVEC adı verilen vektör doğrulama yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign Türbülanslı ve Karmaşık Akışlar Laboratuvarı'ndan temin edilebilir. CLEANVEC yazılımı, hatalı vektörlerin çıkarılması için tasarlanmış Fourier istatistiksel filtreleri içerir:

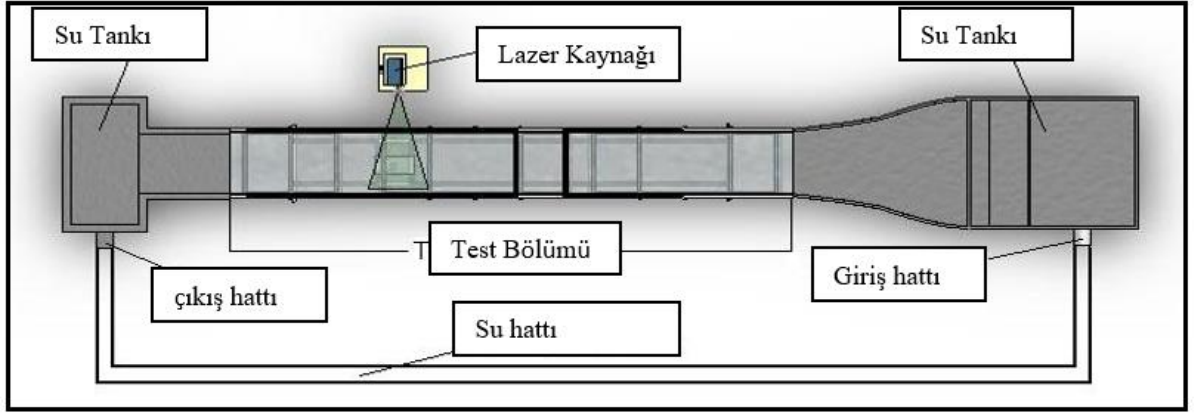
- Mutlak aralık filtresi
- RMS tolerans filtresi
- Büyüklük farkı filtresi
- Kalite filtresi

Bu dört filtreden üçü hatalı vektörleri ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmıştır. Yanlış vektörlerin çıkarılması işleminden sonra, Cleanvec kullanılarak vektörler ve yanlış vektörlerin olduğu alanlar arasında çift doğrusal en küçük kareler fit tekniği kullanılarak enterpolasyon yapılmıştır. Enterpolasyonlu ve ölçeklendirilmiş hız alanı, 1.3'lük bir yumuşatma parametresinin kullanıldığı çalışmaya (Landreth ve Adrian, 1989) dayanan Gauss ağırlıklı ortalama tekniği ile de yumuşatılmıştır.

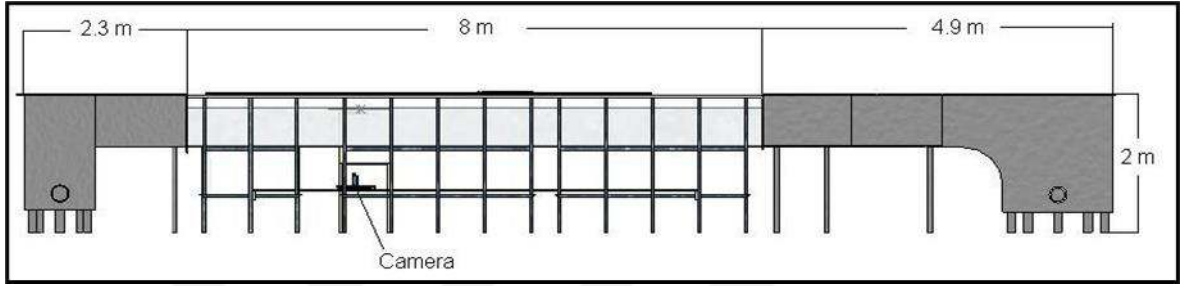
Son olarak girdaplar yeniden hesaplanmıştır. Düzleştirme işlemi ve girdap hesaplaması sonrasında katı cismini içeren bölgede hız ve girdap verileri filtrelenmiştir ve sıfıra ayarlanmıştır. Sabit girdap konturları, yumuşatma işlemi için 0,13 gerilim faktörlü Spline fit tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Ortalama kare hız ve girdap dalgalanmalarının modelleri, örneklenmiş ortalama hız alanı bilgileri kullanılarak hesaplanmıştır. İki tür ortalama alma yöntemi vardır. Bunlardan biri Zaman ortalama yöntemler iken diğeri faz ortalama yöntemlerdir.

3.6 Su Kanal Sistemi ve Deney Düzeneği

Deneyler Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan büyük ölçekli bir su kanalında gerçekleştirilmiştir. Uzunluğu 8m, genişliği 1m ve yüksekliği 0.75 m boyutlarında olan su kanalı (bkz. Şekil 3.5 ve 3.6), üst ve alt trafta fiberglas rezervuarları olan 15 mm kalınlığında şeffaf pleksiglas levhadan yapılmıştır. Değişken hız kontrol ünitesine sahip 15 kW'lık bir santrifüj su pompası, su akış hızlarının kontrol edilmesinden sorumludur. Su, test odasına ulaşmadan önce bir çökeltme odasına pompalanarak bal peteği bölümünden ve ikiye bir daralmalı kanaldan geçmektedir. Akış türbülansı seviyesini %1'den aza indirmek amacıyla daralmanın girişine akış düzenleyici sistem yerleştirilmiştir (Karakuş, 2007). Su kanalı tesisinde test bölümündeki akış bozukluklarını azaltmak için çeşitli elemanlar kullanılmıştır. Petek kesitli akış düzenleyici ve ikiye bir kanal daralmasının yanı sıra çökeltme odasında bulunan yatay delikli silindirik boru, pompadan gelen suyun tüm derinlik boyunca dağılmasına olanak sağlar. Bu amaçla silindirik boru, tanka basılan suyu basınçlandırmak ve böylece çıkış hızını eşitlemek için başka bir boruyla sarılmıştır. Gelen suyun dikey momentumunu absorbe etmek için delikli silindirin içine bir piston yerleştirilmiştir. Türbülans değerlerini etkileyen kinematik viskozitenin deneyler süresince sabit kalması için Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nın sıcaklığı deneyler boyunca 22°C'de sabit tutulmuştur.



Şekil 3.5. Deney Düzenineğin Üstten Şematik Görünümü (Pınar, 2009)



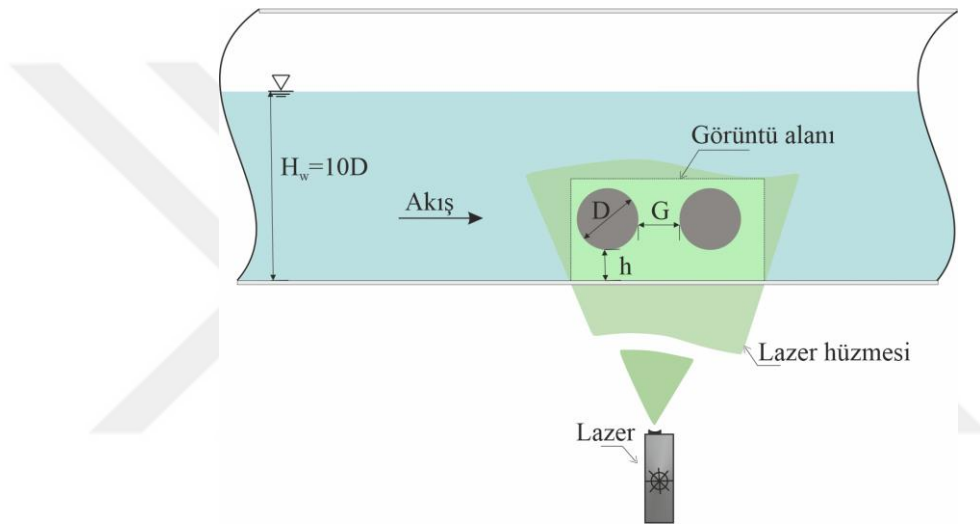
Şekil 3.6. Deney Düzenineğin Yandan Şematik Görünümü (Pınar, 2009)

3.7 Deneysel Model

Duvar yakınındaki katı cisim etrafındaki akışa, ısı değıştircilerinde, borularda, binalarda vb. gibi birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılmaktadır. Duvar yakınındaki katı cisimden elde edilen akış, yapısı, Reynolds sayısından, Re sınır tabakası kalınlığından, δ/D 'den ve duvar ile katı cismin alt yüzeyi arasındaki yükseklik oranı, h/D , değerlerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu çalışmanın amacı, parçacık görüntülü hız ölçümünü (PIV) kullanarak ard arda yerleştirilen dairesel silindir çiftinin etrafında oluşan akış yapısını incelemektir. Şekil 3.7'de deney düzeneğinin şematik gösterimi görülmektedir. Deneyler üç farklı yükseklik oranında ($h/D=0, 0,5$ ve 1), boşluk oranının $G/D= 1$ değeri için silindir çapına bağlı Reynolds sayısının, $Re= 2100$ değerinde ve test modellerinin bulunduğu bölgede sınır tabakası kalınlığının $\delta/D=0.4$ değerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca Reynolds sayısının, $Re_D=2100$ değerine karşılık gelen serbest akış hızı $U=71$ mm/s olarak sabit tutulmuştur. Test modellerinin bulunduğu bölgede sınır tabakası kalınlığı $\delta/D=0,4$ 'tür.

Plexiglas, kare silindirin malzemesidir. Kanalin türbülans yoğunluğu %0.5 civarındadır. Deneylerde kullanılan silindir akrilik malzemeden imal edilmiş olup, çapı $D=30$ mm'dir ve test modelleri üç farklı yükseklik oranında tabana yatay olarak monte edilmiştir. Silindirin akışta oluşturduğu kesit daralması ise yaklaşık %3 olarak ayarlanmıştır. Kanalin genişliği, yan duvarların gözlenen akış alanı üzerindeki etkisini önleyecek kadar geniştir. Tüm deneyler Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 2300 mm uzunluğunda bir platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu platformun uzunluğu genişliği 980mm ve platformun tabanının su kanalının tabanından yüksekliği ise üsteki

pleksi-glass tabaka ile birlikte 220mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler sırasında oluşturulan, tamamen gelişmiş bir sınır tabakası elde etmek için platformun ön kenarından silindire olan mesafe 1800 mm olarak ayarlanmıştır. Kanaldaki suyun toplam derinliği kanal alt yüzeyinden itibaren 520 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Su tünellerinde model imalatının rüzgar tüneline göre daha kolay olması ve akış fiziği ile ilgili PIV yöntemi ile ölçülen akış alanı karakteristiklerinin özellikle girdap oluşumunun daha detaylı elde edileceğine dair literatürde çalışmalar vardır. Lazer ışığının geçeceği silindir düzleminde mercek etkisini minimize etmek için silindirin içinde su ile doldurulan boş bir hazne oluşturulmuştur. Işığın geçtiği yerin cidar kalınlığı yaklaşık 1.5 mm'dir. Deneyler boyunca su derinliği platformun üzerinden $H_s = 300$ mm'de sabit tutulmuştur. Akış özelliklerini herhangi bir hasara yol açmadan gözlemlemenin bir yolu PIV yaklaşımını kullanmaktır.



Şekil 3.7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 3.8. İstenilen Reynolds Sayısında Derin Su Akışı Oluşturmak İçin Kanala Yerleştirilen Platformun Şematik Gösterimi.

Bu araştırmanın amacı doğrultusunda, suya yatay olarak yerleştirilen aynı çapa sahip iki silindir arasındaki boşluk oranı 1D olacak şekilde sabit tutulup, silindirlerin etrafındaki kararsız akışın yapısı, silindirlerin tabandan uzaklıkları (yüksekliğe oran) değiştirilerek deneysel olarak araştırıldı.

Bu ölçüm tekniğinde kullanılan matematiksel denklemler ve temel veriler Westerweel ve diğerlerinin (1993). Alt bölgelerdeki bir akışkan parçacığının hızı, görüntüler arasındaki bilinen zaman aralığı Δt ve her bir alt bölgedeki parçacıkların kat ettiği ortalama mesafe kullanılarak

belirlenir. Analiz edilen akış alanı içinde toplam 7326 hız vektörü hesaplanır Bu hız vektörlerinin %3'e kadarının akış yapısıyla uyumsuz olduğu kabul edilir ve hatalı vektörler olarak adlandırılır. . Hız vektörleri CLEANVEC programı kullanılarak hesaplanır ve etrafındaki diğer 9 tane ile uyumlu olmayan hız vektörleri akış alanından alınır. En küçük kareler yaklaşımı (çift doğrusal enterpolasyon), düşük kaliteli vektörler kullanmak yerine çevredeki ağırlardan gelen vektörleri kullanarak yeni vektörleri hesaplamak için kullanılır. Ayrıca, akış alanındaki vektörlere Gauss düzeltme yaklaşımı uygulanarak, ağıdaki herhangi bir yerdeki hız vektörü, çevredeki vektörlerle daha iyi hizalanacak şekilde ayarlanır.

Düzeltilmiş yeni hız alanı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$u(x_i, y_j) = \sum_{m=-4}^4 \sum_{k=-4}^4 w_{km} u(x_{i-k}, y_{j-m}) \quad (3.2)$$

burada

$$w_{km} = \frac{\omega_{km}}{\sum_{k=-4}^4 \sum_{m=-4}^4 \omega_{km}} \quad (3.3)$$

ve

$$\omega_{km} = e^{-\frac{2(k^2+m^2)}{\sigma^2}} \quad (3.4)$$

En son formülde σ sembolü ile gösterilen parametre düzeltme parametresi olarak adlandırılmakta olup hesaplamalarda 1.3 olarak alınmıştır.

Akış alanındaki anlık hız vektörlerinin belirlenmesi ile girdap, akım çizgisi ve sirkülasyon gibi akışın yapısı hakkında bilgi veren anlık parametreler ile bu anlık parametrelerin ortalamasının alınması neticesinde elde edilen ortalama değerler ve türbülans istatistikleri bulunabilmektedir. Çalışmanın her bir deneyinde 1000 adet anlık hız vektörü ölçülmüş olup saniyede 15 veri (15 Hz) alındığından bir deney 66.66 saniye sürmüştür. Ayrıca her deney üçer defa tekrarlanmıştır. Anlık ve ortalama akış parametreleri ile türbülans istatistikleri aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmaktadır;

Anlık girdap değerleri iki farklı yaklaşımla hesaplanabilmektedir. Birincisi;

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

formülü ile anlık girdap değerleri her bir ağ noktası için bulunmaktadır. Bu formüldeki türev ifadeleri için merkezi farklar yöntemi kullanıldığında herhangi bir ağ noktasındaki girdap ifadesi

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{v(i+1, j) - v(i-1, j)}{2\Delta x} - \frac{u(i, j+1) - u(i, j-1)}{2\Delta y} \right) \quad (3.6)$$

formülü ile hesaplanabilir. Her bir ağ noktasındaki girdap ifadesi ayrıca sirkülasyon metodu ile de bulunabilir:

$$\omega = \frac{1}{4\delta_x\delta_y} \oint \vec{u} d\vec{l} \quad (3.7)$$

Ortalama hız vektörleri

$$\langle V \rangle \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n(x, y) \quad (3.8)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada N ölçülen toplam anlık hız alanı sayısını göstermektedir. Ortalama girdap değerleri ise yukarıdaki formüle benzer şekilde

$$\langle \omega \rangle \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega_n(x, y) \quad (3.9)$$

formülü ile hesaplanır. Hızın x yönündeki bileşenine ait çalkantıların karelerinin karekökü

$$u_{rms}^2 \equiv \langle \overline{u'u'} \rangle \equiv \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(x, y) - \langle u(x, y) \rangle]^2 \right] \quad (3.10)$$

Benzer olarak hızın y yönündeki bileşenine ait çalkantıların karelerinin karekökü

$$v_{rms}^2 \equiv \langle \overline{v'v'} \rangle \equiv \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [v_n(x, y) - \langle v(x, y) \rangle]^2 \right] \quad (3.11)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

Son olarak Reynolds gerilmesi ise

$$\langle u'v' \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(x, y) - \langle u(x, y) \rangle] [v_n(x, y) - \langle v(x, y) \rangle] \quad (3.12)$$

formülü yardımıyla belirlenmektedir. Hız çalkantılarının karelerinin karekökü serbest akım hızına bölünerek boyutsuzlaştırılmaktadır. Reynolds gerilmesi ise serbest akım hızının karesine bölünerek boyutsuzlaştırılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Tek Silindir Etrafındaki Akış Yapısı

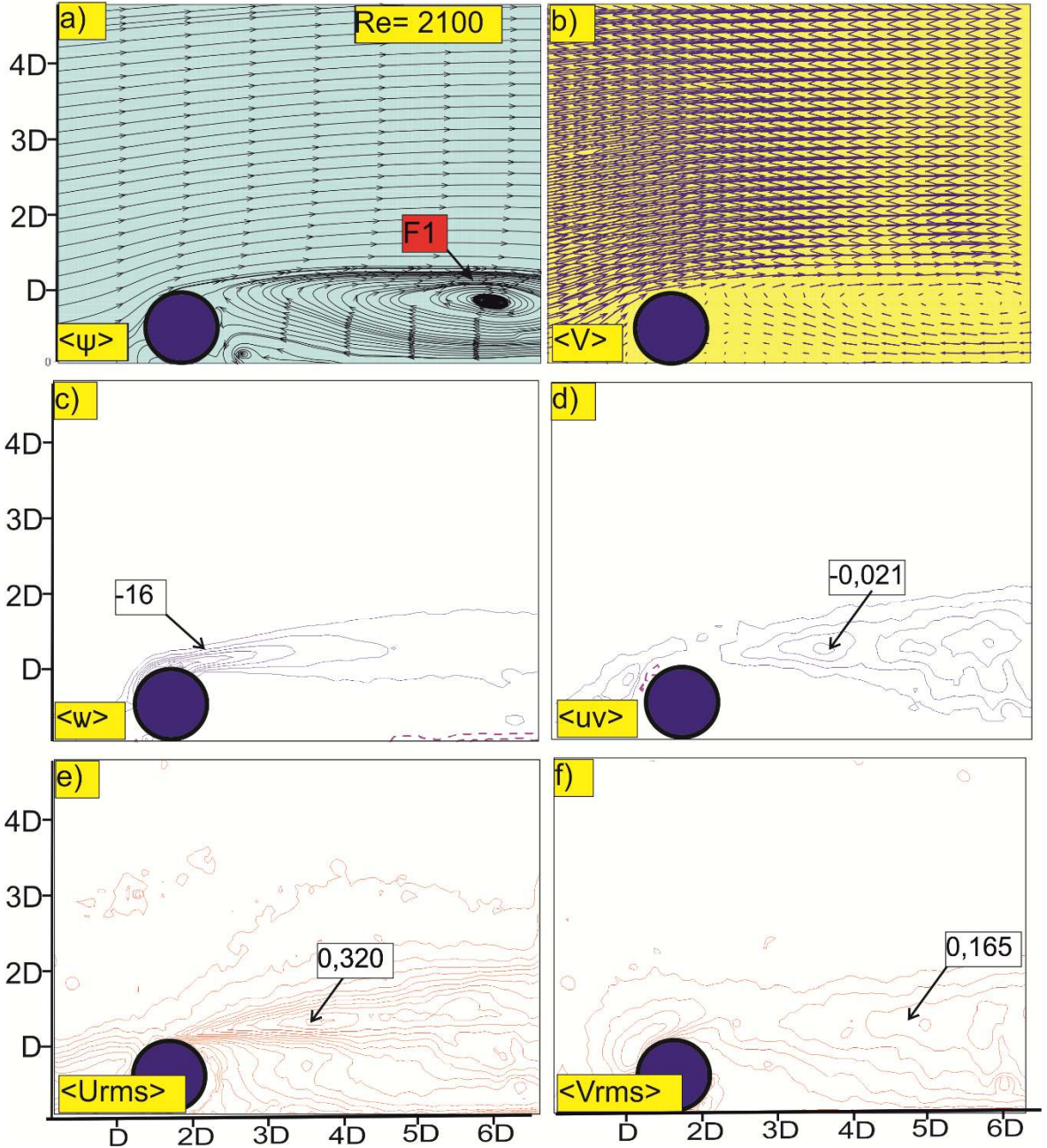
Bu çalışma kapsamında, PIV yöntemi ile tek silindir ve ard arda yerleştirilmiş aralarında boşluk oranının $G/D=1$ olarak sabit tutulduğu iki silindirin tabandan itibaren yükseklik oranının $h/D=0, 0.5$ ve 1 değerleri için akış yapısının temel karakteristikleri olan anlık hız vektörleri, girdap konturları, Reynolds gerilmeleri, ortalama hızlar, hız bileşenlerin çalkantı hız ve girdap konturları (rms), türbülans kinetik enerji yoğunluğu, akım çizgilerinin dağılımı ve girdap kopmalarının frekansının incelenmesi üzerine deneyler yapılmıştır.

Küt cisimlerin iyi bir örneği olan dairesel silindirin aerodinamik performansın iyileştirilmesi amacıyla yatay konumda yerleştirilen tek silindirin akış yapısı ve oluşan akış yapısının kontrolü için tek akış literatürde önemli miktarda araştırma yapılmıştır Tantekin vd., (2021), Ozgoren vd. (2013) . Bu çalışmada kullanılan yatay olarak ard arda yerleştirilen dairesel silindirin etrafındaki akış yapısı ve silindirlerin tabandan olan mesafeleri olan $H/D=0, 0.5$ ve 1 konumları için tek silindirle karşılaştırılması amacıyla Caliskan vd., (2021) tarafından yapılan çalışma referans alınmıştır. Caliskan vd. (2021) yaptıkları çalışmada sıg suda yatay olarak konumlandırılmış çıplak ve üçgen yivli silindirleri çevreleyen akış özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) kullanılmışlardır. Sıg suda yatay olarak konumlandırılmış çıplak ve üçgen yivli silindirleri çevreleyen akış özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde PIV tekniğinden elde edilen sonuçlara ilişkin kapsamlı detaylara yer verilmektedir.

Şekil 4. 1’de, parçacık görüntülemeli hız tekniği ile elde edilmiş sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Dairesel silindirin tabana temas etmesi durumunu gösteren yükseklik oranının $h/D=0$ değeri için şekil 1a’da zaman ortalama akım çizgileri $\langle\psi\rangle$, b’de zaman ortalama hız vektörleri $\langle V \rangle$, c’de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle\omega\rangle$, d’de zaman ortalamalı Reynolds gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, e’de zaman ortalamalı akım yönündeki u hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ f’de zaman ortalamalı akıma dik yönündeki v hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ gösterilmiştir. Akım çizgisi topolojisi verileri F1 ile sembolize edilen iyi tanımlanmış bir odak noktası oluşur. Yukarı yönde ayrılma nedeniyle ikincil aşağı yönde F2 ile sembolize edilen silindirin hemen yüzeyinde odak noktasının oluşumuna yol açmıştır. Ek olarak tabanın etkisi ile F1 ile gösterilen odak noktasının oluşum yeri aşağı akım yönünde 3D mesafe sonra oluşmaktadır. Literatürdeki verilerle kıyaslandığı zaman sınır tabakanın etkisinin dışına yerleştirilen silindirler için odak noktalarının oluşum uzunluğu yaklaşık 1D dir. PIV ölçüm sonuçlarından elde edilen iki boyutlu Zaman ortalamalı hız vektörü verileri incelendiği zaman silindir çevresinden ayrılan akışın, silindirin arkasındaki düşük hıza sahip bölgeye doğru hareket ettiği görülmektedir. Art izi bölgesiyle serbest akış bölgesinde ki hız vektörleri kıyaslandığı zaman

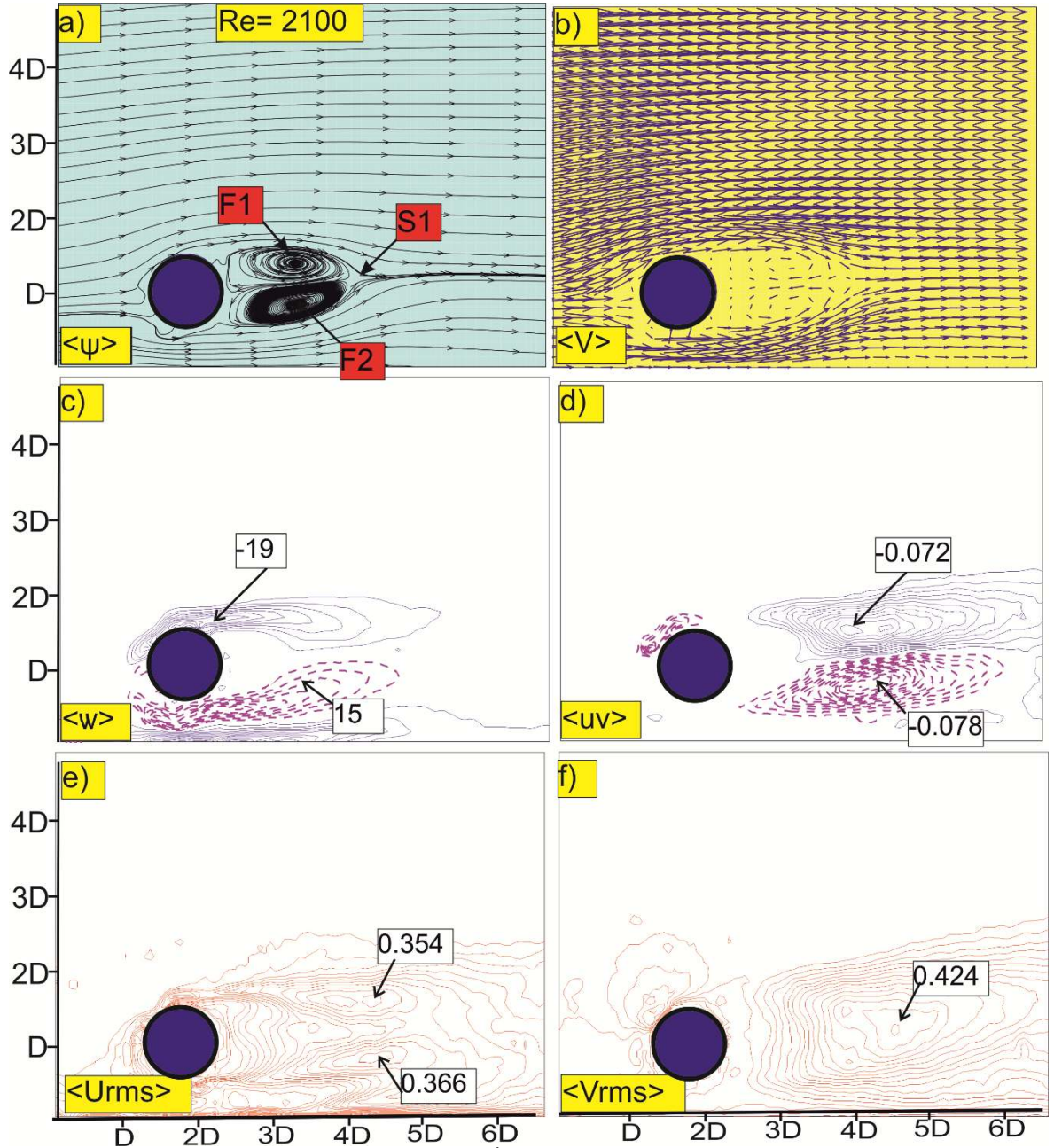
ölü akış bölgesindeki hız vektörlerinin silindirin yüzeyine çarparak yeni girdapların oluşmasına katkı sağladığı görülmektedir. Zaman ortalamalı girdap konturları incelendiği zaman taban etkisinden dolayı sadece mavi renkle gösterilmiş pozitif girdaplar oluşmaktadır. Maksimum girdap şiddetinin değeri ise -16 1/s olarak belirlenmiştir. Bu değer silindirin taban etkisinde olmadığı durumla karşılaştırıldığı zaman neredeyse % 50 daha azdır. Yükseklik oranının $h/D = 0$ değeri için zaman ortalamalı Reynolds gerilmeleri konturları incelendiği zaman girdap konturlarında olduğu gibi sadece mavi renkli pozitif girdaplar oluşmaktadır. Maksimum Reynolds gerilmeleri değeri ise -0.022 olarak belirlenmiştir. Bu değer yine taban etkisinden dolayı literatürde ki değerlerden daha düşüktür. Şekil 1e ve 1f de akış alanından elde edilen u ve v hız bileşenlerinin karesinin karekök ortalaması olan $\langle U_{rms}/U \rangle$ ve $\langle V_{rms}/U \rangle$ eş değer eğrileri verilmiştir. Taban etkisinden dolayı maksimum boyutsuz çalkantı değeri 0.320 iken $\langle V_{rms}/U \rangle$ çalkantı 0.165 olarak belirlenmiştir.





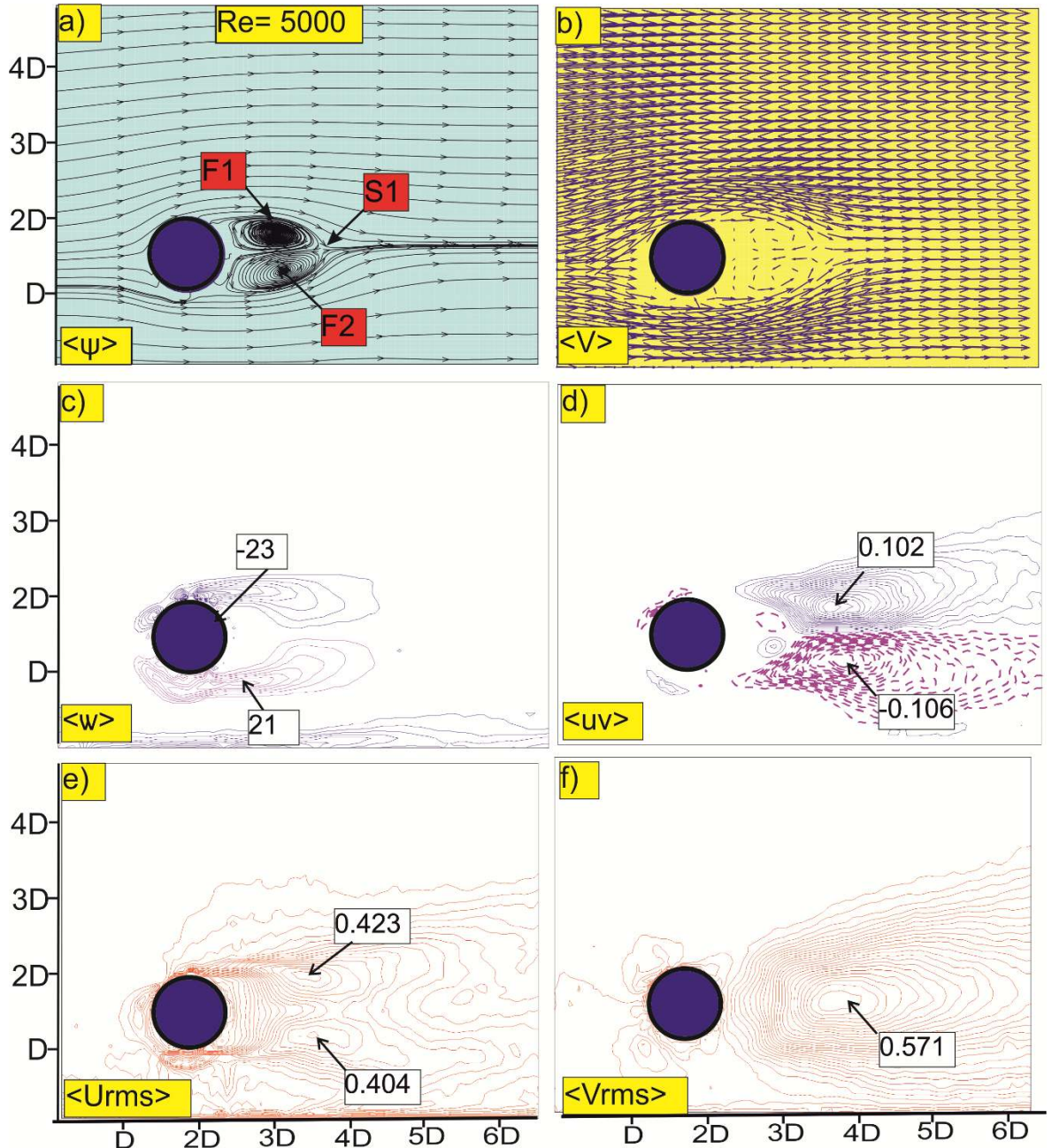
Şekil 4.1. Yükseklik Oranın $H/D=0$ Değeri İçin 4.1 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir.

Şekil 4.2'de yükseklik oranının $h/D=0.5$ değeri için şekil 2a'da zaman ortalama akım çizgileri $\langle \psi \rangle$, b'de zaman ortalama hız vektörleri $\langle V \rangle$, c'de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$, d'de zaman ortalama Reynolds gerilmeleri $\langle \overline{u'v'} \rangle$, e'de zaman ortalama akım yönündeki u hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ f'de zaman ortalama akıma dik yönündeki v hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ gösterilmiştir. Akım çizgisi, $\langle \psi \rangle$ verilerinden açıkça görüldüğü üzere yükseklik oranının $h/D=0.5$ değerinde taban etkisinin azalması ile birlikte neredeyse simetrik F1 ve F2 ile gösterilen neredeyse simetrik iki adet odak noktası oluşmaktadır. Ayrıca bu odak noktalarının oluşum yeri literatür ile uyumlu şekilde silindir yüzeyinden yaklaşık 1D uzakta aşağı akım yönünde oluşmaktadır. Zaman ortalama hız vektörü $\langle V \rangle$, verileri incelendiği zaman silindirin hem üst hem de alt çevresinden ayrılan akışın, silindirin arkasındaki düşük hıza sahip bölgeye doğru hareket ettiği görülmektedir. Şekil 2c de zaman ortalama girdap konturları sunulmuştur. Burada minimum girdap konturunun değeri ± 2 1/s ve artım ise yine 2 1/s'dir. Ayrıca mavi çizgiler negatif konturları (saat ibresi yönünde dönen) gösterirken pembe çizgiler de pozitif girdapları (saat ibresinin tersi yönde dönen) göstermektedir. Tabandan uzaklaştığı için silindirin hem alt kısmından hem de üst kısmından akış ayrılması oluşmakta bunun sonucunda da -21 1/s ve +15 1/s şiddetinde girdaplar oluşmaktadır. Reynolds gerilme konturlarından $\langle \overline{u'v'} \rangle$, da açıkça görüldüğü üzere maksimum değerler sırası ile -0.072 ve +0.078 olarak neredeyse bir birine yakın değerler almıştır. Bu durum taban etkisinin azalmasının bir sonucu olarak yorumlana bilir. Silindir ile taban arasındaki mesafenin açılmasıyla birlikte oluşan jet akışın etkisinden ötürü silindirin alt kısmında maksimum $\langle U_{rms}/U \rangle$ çalkantı değeri silindirin alt kısmında 0.366, üst kısmında ise 0.354 olarak belirlenmiştir. Maksimum $\langle V_{rms}/U \rangle$ çalkantı değeri u yönündeki hız çalkantı değerinden farklı olarak tek bir maksimum değere sahiptir.



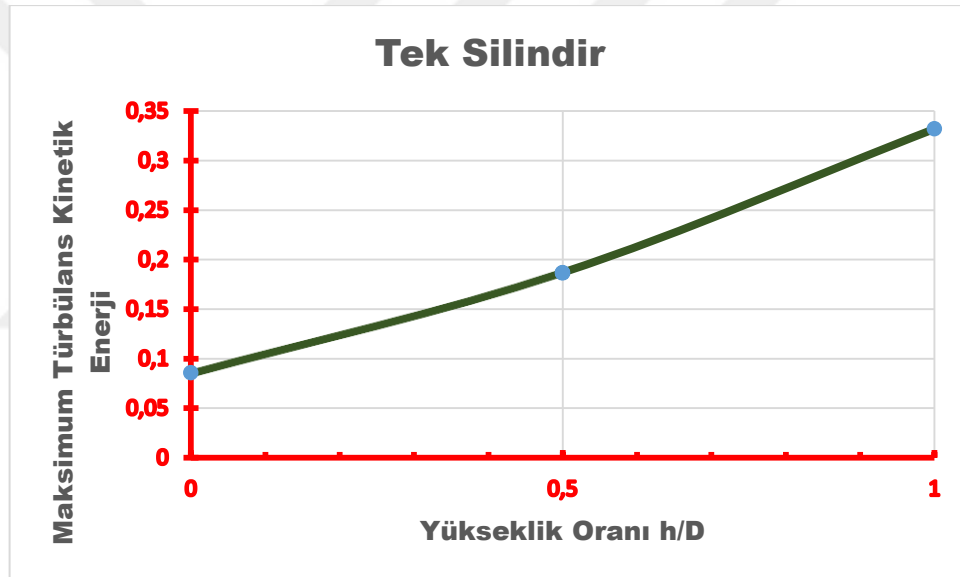
Şekil 4.2. Yükseklik Oranın $H/D=0.5$ Değeri İçin 4.2 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle \overline{u'v'} \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir.

Şekil 4.3'te yükseklik oranının $h/D=0.1$ değeri için şekil 3a'da zaman ortalama akım çizgileri $\langle \psi \rangle$, b'de zaman ortalama hız vektörleri $\langle V \rangle$, c'de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$, d'de zaman ortalama Reynolds gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, e'de zaman ortalama akım yönündeki u hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ f'de zaman ortalama akıma dik yönündeki v hızlarının karelerinin karekök ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ gösterilmiştir. Akım çizgisi topolojisi incelendiği zaman silindir taban etkisinden uzak bir konuma yerleştirildiği için F1 ve F2 ile gösterilen iki adet odak noktası oluşmaktadır. Oluşan akış yapısının tam simetrik olması taban etkisinden çıkıldığının bir göstergesidir. Zaman ortalama hız vektörü $\langle V \rangle$, verilerinden de görüldüğü üzere yükseklik oranının $h/D=0.5$ değerinde olduğu gibi silindirin hem üst hem de alt çevresinden ayrılan akışın, silindirin arkasındaki düşük hıza sahip bölgeye doğru hareket ettiği görülmektedir. Ard izi bölgesinde küçük ölçekli hız vektörlerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum ard izinde hızın oldukça düşük olduğunun bir kanıtıdır. Şekil 3c de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$ görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinden açıkça görüldüğü üzere taban etkisinin ortadan kalmış olmasına bağlı olarak hem pozitif hem de negatif basınç bölgesi oluşmuştur. Oluşan pozitif ve negatif basınç bölgelerinin girdap değerleri sırası ile $+21 \text{ 1/s}$ ve $+23 \text{ 1/s}$ olarak belirlenmiştir. Zaman ortalama Reynolds gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, yani türbülans kayma gerilmesinin negatif ve pozitif maksimum değerlerinin bir birleri ile hemen hemen aynı olması, oluşan akış yapısının simetrik olduğunun bir göstergesidir. Maksimum minimum kayma gerilmesi değerleri sırası ile $+0.106$ ve -0.102 olarak bulunmuştur. Akım yönündeki çalkantı hızlarının $\langle U_{rms} \rangle$, maksimum değeri sırası ile $+0.423$ ve 0.404 olarak belirlenmiştir. Bulunan bu değerler literatür ile uyumludur. Akıma dik yöndeki hız çalkantı bileşeni olan $\langle V_{rms} \rangle$ in maksimum değeri 0.571 değerine yükselmektedir.



Şekil 4.3. Yükseklik Oranın $H/D=1$ Değeri İçin 4.3 A'da Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \Psi \rangle$, B'de Zaman Ortalama Hız Vektörleri $\langle V \rangle$, C'de Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \Omega \rangle$, D'de Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilmeleri $\langle u'v' \rangle$, E'de Zaman Ortalamalı Akım Yönündeki U Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle U_{rms} \rangle$ F'de Zaman Ortalamalı Akıma Dik Yönündeki V Hızlarının Karelerinin Karekök Ortalaması $\langle V_{rms} \rangle$ Gösterilmiştir.

Şekil 4.4’de ki grafikte tek silindir için farklı yükseklik oranlarında silindirden oluşan maksimum TKE değerleri görülmektedir. Yükseklik oranının $h/D=0$ değeri için yani silindirin tabana temas etmesi durumunda silindirin ard izinde tek bir odak noktası oluşmaktadır. Silindirin bu konumu için tabanın türbülans çalkantılarını sönmüleme etkisinden dolayı maksimum TKE değeri 0.086 olarak belirlenmiştir. Maksimum Türbülans Kinetik Enerji, TKE, değeri artan yükseklik oranı ile birlikte $h/D = 0.5$ için 0.187 ve $h/D = 1$ için ise 0.332 değeri olarak bulunmuştur. Artan yükseklik oranı, h/D , ile birlikte elde edilen maksimum TKE değeri taban etkisinin olmadığı durumda elde edilen literatürdeki Türbülans Kinetik Enerji değeri olan 0.406 ile uyumludur. Yükseklik oranının $h/D = 0.5$ ve $h/D = 1$ değerinde TKE konturları incelendiği zaman yükseklik oranının $h/D=0$ durumundan farklı olarak iki adet odak noktasının oluştuğu belirlenmiştir. Yükseklik oranının $h/D = 1$ değeri için artık tabanın çalkantı değerlerini sönmüleme üzerindeki etkisinin neredeyse kalmadığı söylenebilir.

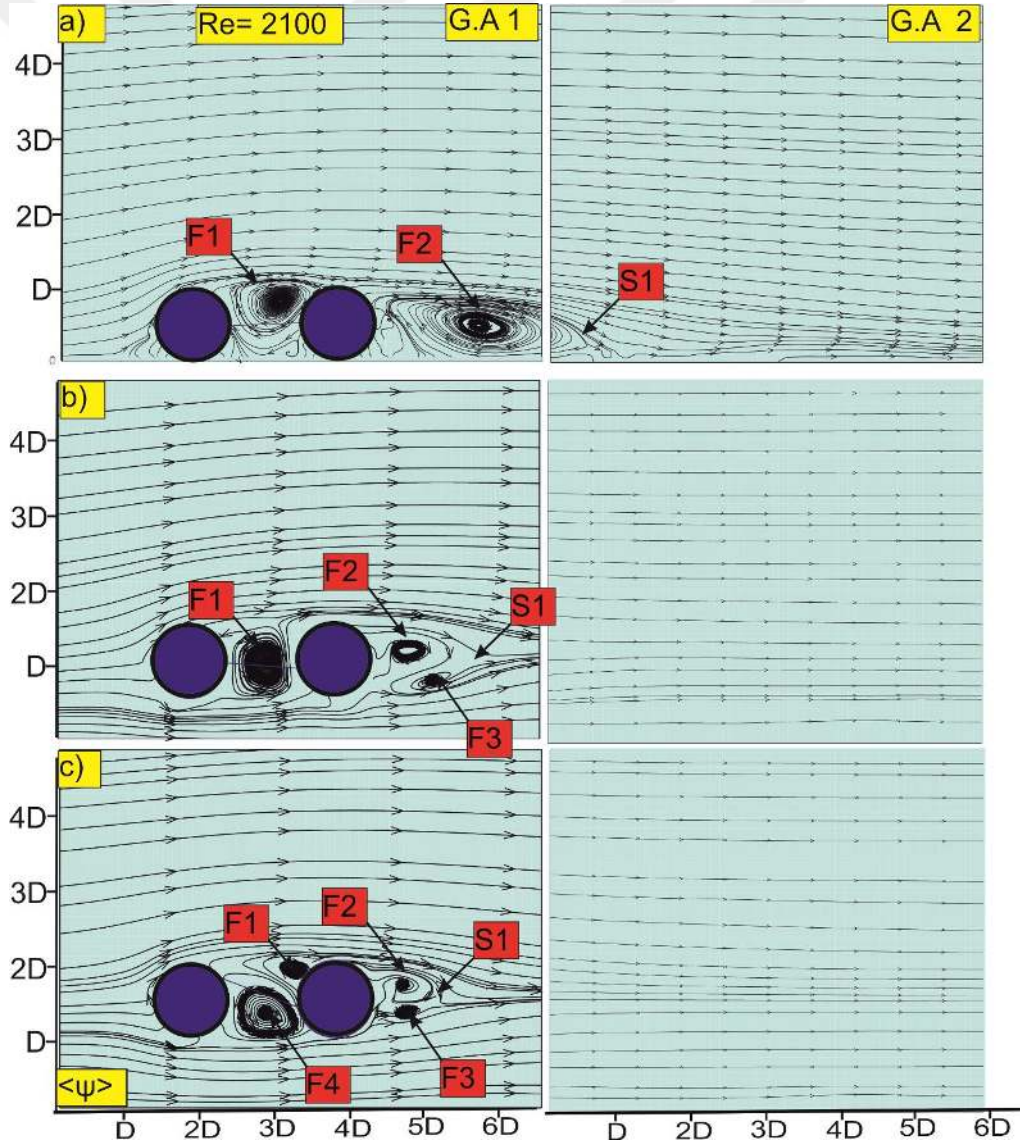


Şekil 4.4. Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ Ve 1 Değeri İçin Tek Silindirin Ard İzinde Maksimum Türbülans Kinetik Enerji Değerleri

4.2 Ard Arda Yerleştirilmiş Silindirler Etrafındaki Akışa Taban Etkisi

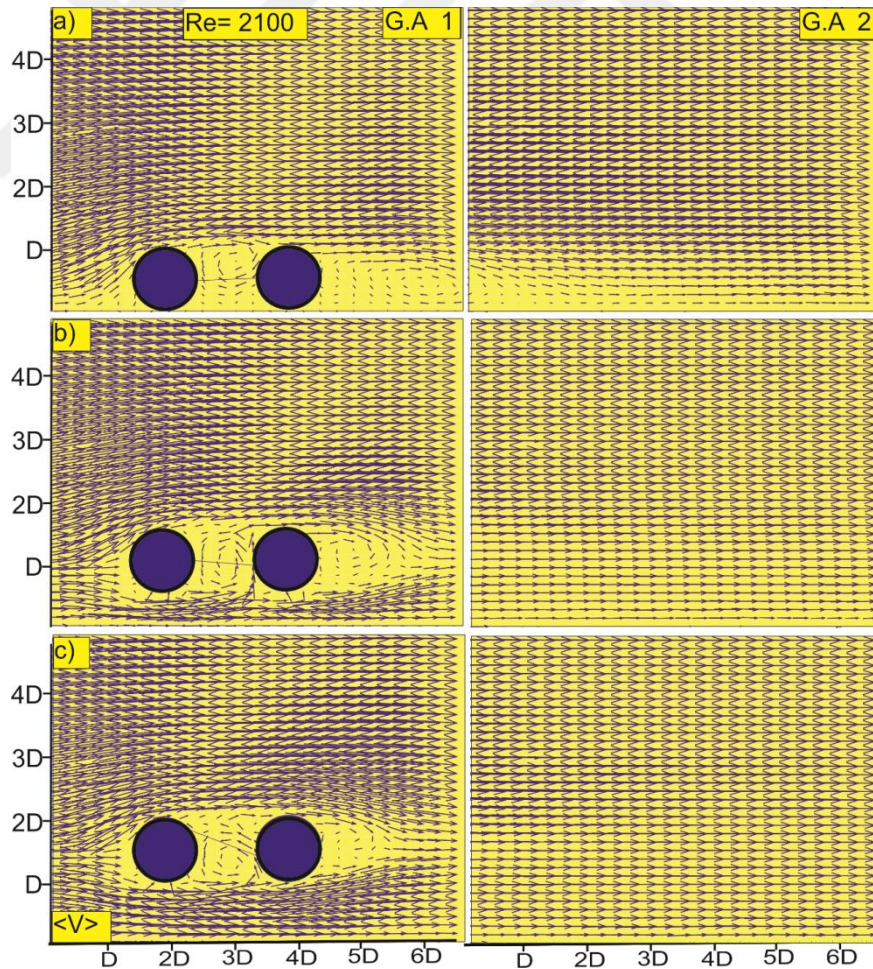
Şekil 4.5, tüm yükseklikler için yalın silindire ait zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, görülmektedir. Zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, art izi bölgesinin boyutu hakkında da bilgi vermektedir. Ayrıca, silindirlerin ard izinde ki ve akışta oluşan serbest durma noktası ve girdap odak noktalarının yerlerini de göstermektedir. Akım çizgisi resimlerinde silindirin çevresinden ayrılan akım çizgilerinin birleştiği yer S simgesi ile gösterilmiştir. Bu düğüm noktası olarak adlandırılan serbest durma noktası (saddle point) “S” akışta durma noktasının oluştuğunu da göstermektedir. Şekil 4.5a $H/D=0$ durumu için her iki silindirin ard izinde tabanın etkisinden dolayı sadece bir adet girdap odak noktası oluşmaktadır. F ile gösterilen akım çizgilerinin sirkülasyonu silindirin üst tarafından merkeze doğru saat yönünde bir noktada toplanmaktadır. Bu

durum Tantekin vd., 2021 yaptıkları çalışmadan elde etikleri sonuçlar ile uyumludur. Şekil 4.5b ve 4.5c'de $H/D= 0.5$ ve 1 yükseklik oranları için ise silindirlerin alt kısımlarından gelen serbest akım merkeze doğru saatin tersi yönde dönerek bir noktada toplanacak şekilde girdap odak noktalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu odak noktalarının oluşmasına silindirin çevresinden ayrılan akışın, art izi ile serbest akım bölgesi arasındaki hızlarının farklı olmasıdır. Bu sebepten dolayı hem silindirlerin arasında hem de 2 numaralı silindirin ard izinde odak noktaları olmuştur. Şekil 4.5a'da $F1$ ve $F3$ ile gösterilen, Şekil 4.5b'de $F1$, $F3$ ve $F4$ ile gösterilen, Şekil 4.5c'de ise akış yönündeki silindir için $F1$ ve $F2$, aşağı akım yönünde ki silindir için ise $F3$ ve $F4$ ile gösterilen girdap odak noktaları oluşmaktadır. Şekil 4.5a da tabanın etkisi ile aşağı akım yönündeki silindire ait art izi bölgesi daha büyüktür. H/D yükseklik oranı arttıkça S ile gösterilen durma noktası aşağı akım yönündeki silindire yaklaşmaktadır. Tüm yükseklik oranları için silindir çiftinin ara bölgesinde bir durma noktasının oluşmadığı belirlenmiştir.



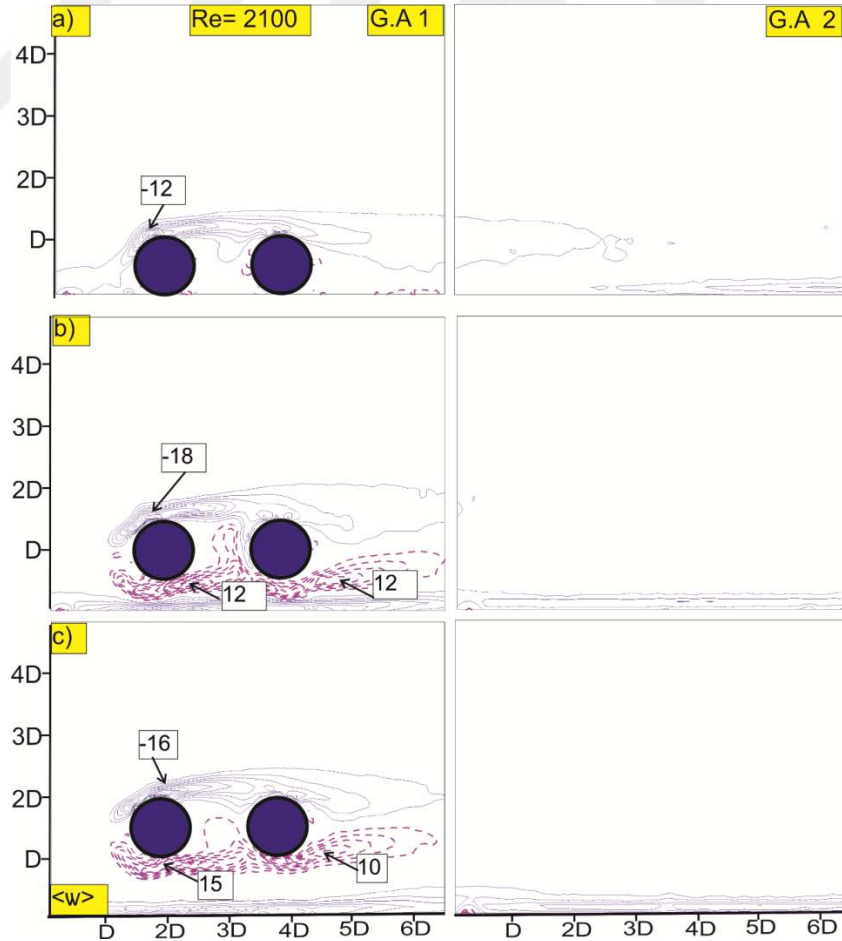
Şekil 4.5. Ard Arda Yerleştirilen Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalama Akım Çizgileri $\langle \psi \rangle$

Şekil 4.6a, 4.6b ve 4.6c’de sabit boşluk oranı, $G/D=1$ için sırası ile yükseklik oranının $h/D=0, 0.5$ ve 1 değerleri için zaman ortalamalı hız vektörleri $\langle V \rangle$, sunulmuştur. Şekillerde silindirler ile temas eden serbest akışın silindirlerin çevresinden ayrıldıktan sonra silindirler arkasındaki düşük hıza sahip bölgeye doğru hareket ettiği görülmektedir. Art izi bölgesindeki ayrılmış akışın silindirlerin ara bölgesinde daimi olmayan girdapların oluşmasına sebep olduğu hız vektörlerinden $\langle V \rangle$, de açıkça görülmektedir. Serbest akış bölgesi ile ard izi bölgesi arasındaki hız farkından oluşan düzensiz girdapların ölü akış bölgesine doğru hareket edip yukarı akım yönünde konumlandırılmış olan silindirin yüzeyine çarparak yeni girdapların oluşmasına neden olduğu belirlenmiştir. Akım çizgileri topolojisi sonuçlarında olduğu gibi $h/D=0$ değeri için ölü akış bölgesindeki düşük hıza sahip vektörlerin çekim alanı 2’de oluşturduğu belirgin döngüler görülmektedir. Yükseklik oranının artmasına bağlı olarak bu döngüler literatür ile uyumlu bir şekilde görüntü alını 1’de sonlanmaktadır. Yükseklik oranının $h/D= 0.5$ ve 1 değerleri için silindirlerin ard arda yerleştirilmesinden kaynaklı olarak oluşan iki boyutlu akış yapısının tabana temas halindeki durumda elde edilen akış yapısından farklı olarak birçok girdap sistemlerinin birleşmesinden oluştuğu ve daimi olmayan düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.



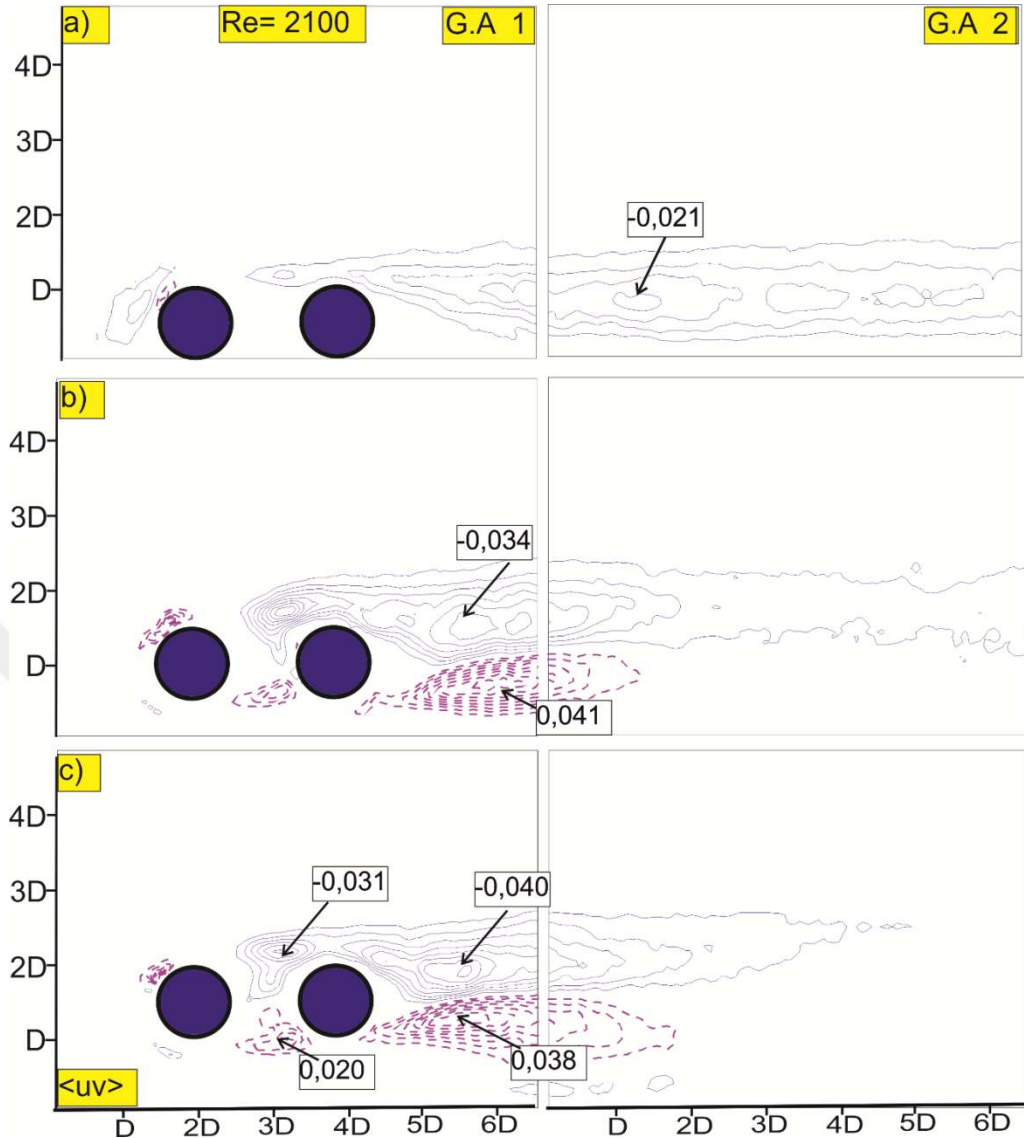
Şekil 4.6. Ard Arda Yerleştirilen Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalamalı Hız Vektörleri $\langle V \rangle$

Şekil 4.7a, 4.7b ve 4.7c' de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$ görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinde, $\langle \omega \rangle$ mavi düz çizgi, saat yönünde dönen negatif girdapları gösterirken, pembe kesikli çizgi, saatin tersi yönünde dönen pozitif girdapları göstermektedir. Şekil 4.7a'da gösterilen silindir çiftinin tabana temas etmesi durumunda pozitif yönde dönen girdapların oluşmadığı görülmektedir. Bu duruma ait maksimum girdap şiddeti ise akış yönünde ki silindirin hemen üzerinde -13 1/s değerinde oluşmaktadır. Aynı durumda tek silindirin bulunması durumunda ise bu değer -16 1/s olarak belirlenmiştir. Yükseklik oranının $H/D=0.5$ değeri için hem negatif hem de pozitif girdaplar oluşmaktadır. Negatif girdapların değeri akış alanında aynı yükseklikte tek silindir bulunması durumunda elde edilen değerlerle hemen hemen aynıdır ve sırası ile -18 1/s ve -19 1/s olarak belirlenmiştir. Taban etkisinin en belirgin etkileri bu yükseklik oranında görülmektedir. Tabanın silindir çiftinden elde edilen akış yapısına etki etmekte, saatin tersi yönde dönen pozitif girdapların sönümlenmesine neden olmaktadır. Girdap eş düzey eğrilerinden de açıkça görüldüğü üzere pozitif girdapların değeri negatif girdapların değerine göre daha küçük olmakta ve $+12 \text{ 1/s}$ değerine azalmaktadır. Yükseklik oranının $H/D=1$ değeri taban etkisi azalmakta yukarı akım yönünde ki silindire ait girdap çifti hemen hemen simetrik bir yapı oluşturmaktadır. Pozitif ve negatif girdap çiftinin değeri sırası ile -16 1/s ve 15 1/s değerlerini almaktadır.



Şekil 4.7. Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranının $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalama Girdap Eş Düzey Eğrileri $\langle \omega \rangle$

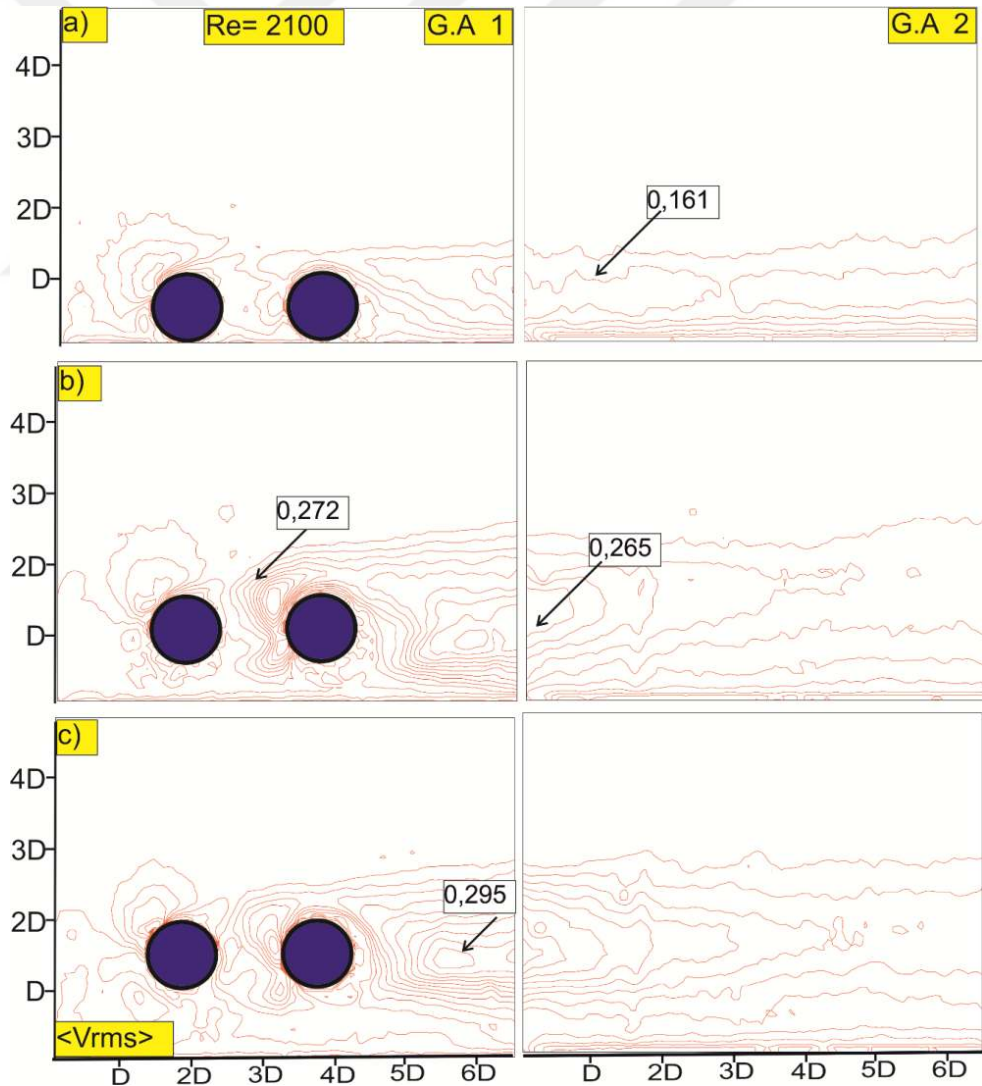
Şekil 4.8’de yükseklik oranının $h/D=0, 0.5$ ve 1 değerleri için zaman ortalama Reynolds gerilme konturları $u'v'/U_\infty^2 >$ görülmektedir. Şekil 4a’da girdap eş düzey eğrilerinde olduğu gibi silindir çiftinin tabana temas etmesi durumunda pozitif Reynolds gerilme konturları oluşmamaktadır. Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri ise tek silindir bulunması durumunda yaklaşık -0.21 değeri ile birinci görüntü alanında (G.A.1) oluşurken silindir çifti için bu değer sabit kalmakta ancak maksimum noktanın olduğu yer ikinci görüntü alanına (G.A.2) kaymaktadır. Yükseklik oranının $h/D= 0.5$ değeri için akış alanında tek silindir bulunması durumunda Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri tabanın etkisi ile birlikte -0.072 ve $+0.078$ değerlerine ulaşmaktadır. Aynı yükseklik oranında, iki silindirin $L/D= 1$ açıklık oranı ile ard arda yerleştirilmesi durumunda Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri -0.032 ile $+0.041$ değerlerine kadar düşmektedir. Bu durumun aşağı akış yönünde yerleştirilen silindirden kaynaklandığı söylenebilir. Reynolds gerilme konturlarından $u'v'/U_\infty^2 >$ görüldüğü gibi tek silindire göre tam simetrik bir akış yapısının oluşmadığı bunun nedeni olarak iz bölgesindeki çalkantının fazla olması olarak söylenebilir. Reynolds gerilmelerinin eş düzey eğrilerindeki değişimler silindirlerin ard arda dizilmesiyle artmakta ve simetrisi de bozulmaktadır. $h/D=0.5$ durumunda negatif gerilmelerin değeri pozitif gerilmelere göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Diğer yükseklik oranlarında ise negatif ve pozitif gerilmelerin değeri hemen hemen aynıdır. Yükseklik oranının $h/D=1$ değerine çıkması ile birlikte tabanın etkisi azalmakta, Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri yukarı akım yönündeki silindir için -0.031 ve 0.020 , aşağı akım yönünde ki silindir için ise -0.040 ve 0.038 değerlerini almaktadır. Ek olarak $h/D= 0$ durumundan farklı olarak $h/D=0.5$ durumunda olduğu gibi maksimum Reynolds gerilme konturları birinci görüntü (G.A.1) alanında oluşmaktadır.



Şekil 4.8. Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Zaman Ortalamalı Reynolds Gerilme Konturları $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$

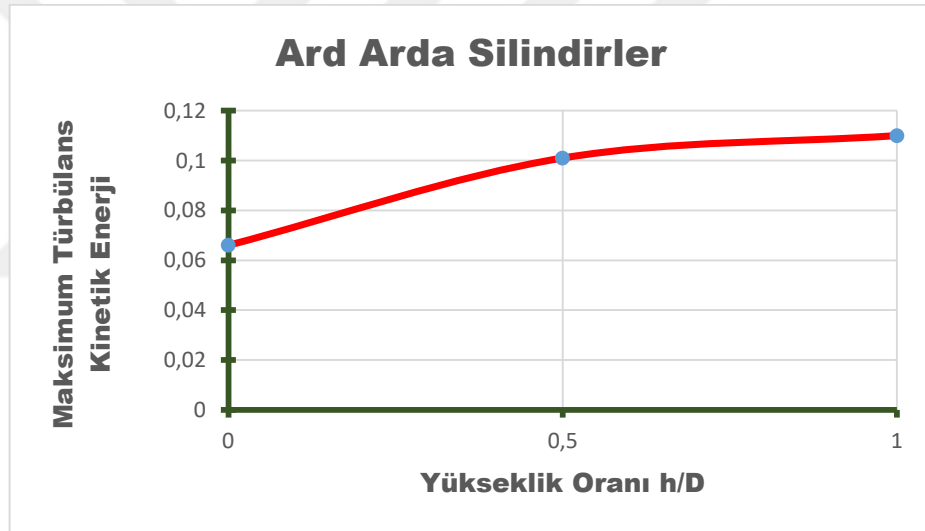
Şekil 4.9' da farklı yükseklik oranlarında, $h/D= 0, 0.5$ ve 1 yerleştirilmiş silindir çevresinde oluşan akım yönüne paralel $\langle U_{rms} \rangle$ hız bileşeni çalkantı değerleri Reynolds sayısının 2100 değerinde sabit açıklık oranında ki değişimleri sunulmuştur. Yükseklik oranının $h/D= 0$ değeri için akım yönüne paralel $\langle U_{rms} \rangle$ hız bileşeni çalkantıları eş düzey eğrilerine bakıldığında bir adet maksimum nokta olduğu görülmektedir. Ek olarak oluşan bu maksimum nokta silindir çiftinden uzakta aşağı akım yönünde ikinci görüntü alanında oluşmaktadır. Bu yükseklik oranı için elde edilen maksimum değerler, taban etkisi ile literatürde ki sınır tabakanın etkisinin olmadığı konuma yerleştirilen silindirlere elde edilen değerlerden yaklaşık % 37 daha azdır. Yükseklik oranı, $h/D= 0.5$ ten sonra iki adet maksimum nokta olduğu görülmektedir. Oluşan bu noktalar simetrik bir hal almaktadır. Yükseklik oranının $h/D=1$ değerinde taban etkisini tamamen kaybettiği için hem yukarı akım yönündeki silindirin hemde aşağı akım yönündeki silindirin ard izlerinde ikiye adet odak noktası oluşmaktadır. Bu odak noktalarına ait belirlenen maksimum değerler literatürde ki

mesafesi arttıkça tabanın akış üzerindeki sönümleyici etkisinin azalmasından dolayı h/D 'nin 0 dan farklı bütün oranları için daha yüksek bulunmuştur. Akış, rotası boyunca her biri benzersiz değerlere sahip iki farklı noktada türbülans hızlarıyla karşılaştı. Akış yönüne dik çalkantı hızları $\langle V_{rms} \rangle$, silindirin simetri eksenine yakın bir eksen üzerinde tek bir tepe noktası oluşturur. Yükseklik oranı, h/D arttıkça maksimum noktaların yerleri silindir çiftinin arkasına daha yakın olur. Şekil X ve Y ye göre h 'ın D 'ye oranı 0.5 ve 1 değerlerinde olduğunda silindirin tabanından çıkan akış ile silindirin üst kısmından ayrılan akışın birbiriyle daha kısa mesafe sonra birleştiği belirlenmiştir. Genel olarak türbülans özelliklerin zaman ortalama ağırlıklı etkileri RMS değerleri ile ölçülür. Her bir yükseklik oranı için türbülans çalkantılarının yatay ve düşey doğrultulardaki kare sel ortalama değerleri (RMS) elde edilmiştir. Türbülans oluşumunda Yatay ve düşey doğrultulardaki çalkantı bileşenleri karşılaştırıldığı zaman hızın akışa paralel olan bileşeninin (u hızının) baskın bir rol üstlendiğini belirlenmiştir. Türbülans kayma gerilmesi değerleri de çalkantı bileşenlerine benzer bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4.10. Ard Arda Yerleştirilen Silindirler İçin Yükseklik Oranın $H/D=0, 0.5$ ve 1 Değerlerinde Akım Yönüne Dik Hız Bileşeni Çalkantıları $\langle V_{rms} \rangle$ Hız Bileşeni

Şekil 11’de ki grafikte yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 kadar değişimi için ard arda yerleştirilen silindirlerden oluşan maksimum Türbülans Kinetik Enerji değeri görülmektedir. Yükseklik oranın $h/D = 0$ değeri için elde edilen TKE değeri, akış alını içerisinde aynı yükseklik oranında tek silindir durumunda elde edilen maksimum TKE değerinden yaklaşık %18 daha düşüktür. Ek olarak elde edilen bu değer ikinci görüntü alanında oluşmaktadır. Akış alanı içerisinde tek silindir bulunması durumuna benzer olarak tek odak noktası oluşmaktadır. Yükseklik oranının, h/D artması ile birlikte maksimum TKE değeri artmakta ve $h/D = 0.5$ için 0.101 , $h/D = 1$ için ise 0.111 olarak belirlenmiştir. Taban etkisinin artan h/D oranı ile azaldığı belirlenmiştir. Bu değerler tek silindir durumu ile karşılaştırıldığında zaman sırası ile % 38 ve % 65 daha düşük olarak belirlenmiştir. Bu durumda türbülans çalkantı değerlerini söndürmede yükseklik oranının, h/D etkisi olduğu kadar boşluk oranı, G/D nin de etkili olduğu sonucuna varılabilir. Türbülans Kinetik Enerji konturları incelendiğinde zaman tek silindir ile benzer şekilde $h/D = 0$ için tek odak noktası, $h/D = 0.5$ ve 1 değerleri için ise iki adet odak noktası oluşmaktadır.



Şekil 4.11. Ard Arda Yerleştirilmiş Silindirler için Yükseklik Oranın $h/D=0, 0.5$ ve 1 Değişim ile Maksimum Türbülans Kinetik Enerji Değerleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Silindir gibi katı bir cismin etrafındaki diğer bir küt cismin varlığı akış yapısının genel özelliklerini değiştirir. Özellikle küt cisimlerin yakınında bulunan katı yüzeyler cisim akışkan etkileşimi bakımından önemli etkilere sahiptir. Bu etkileşim, rezonans ve yüksek genlikli değişken kuvvetlerin ortaya çıkması gibi karmaşık ve kararsız akış özelliklerinin oluşmasına neden olur. Bu olayların akış kaynaklı titreşim ve gürültünün gelişimi üzerinde önemli etkileri vardır. Reynolds sayısı belirli bir değere ulaşıldıktan sonra meydana gelen, silindire etkileyen titreşimler ve değişken kuvvetler, akış ayrılmasına bunun sonucu olarak da girdap kopmalarına neden olur. Bu senaryo, bacalar, uzun açıklıklı köprüler, deniz inşaatları, yüksek binalar ve kuleler dâhil olmak üzere çeşitli mühendislik alanlarında pratik öneme sahiptir. Bu etkilerden dolayı bilim insanları bu konuyu sürekli olarak araştırmışlardır. Duvar yakınlığının dairesel bir silindirin akış özellikleri üzerindeki etkisi Bearman ve Zdravkovich (1978), Grass ve diğerleri tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. (1984), Taniguchi ve Miyakoshi (1990), Price ve ark. (2002) ve Wang ve Tan (2008). Bu araştırmalar girdap kopmalarının bastırılması için kritik bir G/D boşluk oranı değerine ulaşılabilirliğini ortaya koymuştur. Ancak silindir çapına bağlı Reynolds sayısının değeri ve sınır tabakasının kalınlığı bu optimum boşluk oranının değerini etkilemektedir.

Bu araştırmanın amacı doğrultusunda, suya yatay olarak yerleştirilen silindirlerin etrafındaki kararsız akışın yapısı, silindirlerin tabandan uzaklıkları (yüksekliğe oran) değiştirilerek deneysel olarak araştırılmıştır. Anlık akış karakteristikleri art izi bölgesinde kararsız ve dalgalı bir akış formu oluşturmaktadır. Zaman ortalama akış yapılarının karşılaştırılması sonunda akış yapısının oldukça simetrik olduğu gözlenmiştir. Kayma tabakası içindeki çalkantılardan dolayı Reynolds gerilme yapıları silindir arkasına çok yakın bölgede daha zayıf gerilme değeri oluşturduğu bulunmuştur. Bunun nedeni kayma tabakasında meydana gelen türbülansdır. Bu çalışma sayesinde, düz bir silindirin ve arka arkaya tabana göre farklı yüksekliklerde yerleştirilmiş silindir çiftinin çevresindeki akış yapısının yüksekliğe bağlı değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun etkileri ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra, silindirin taban yüzeyine yakın olduğu yüksekliklerde yüzey etkisi oldukça fazla hissedilmiştir.

Tek silindirin yükseklik oranı $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değerleri için parçacık görüntülemeli hız tekniği ile elde edilmiş sonuçlar incelendiği zaman tüm PIV sonuçları birlikte değerlerle dirilecek olursa bu bölüme ait sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir. Yükseklik oranının $h/D=0$ değeri için tabanın akış üzerindeki etkisinden dolayı silindirden ayrılan akış tek bir odak noktasının oluşmasına neden olmaktadır. Ek olarak ayrılmış akış bölgesi, taban etkisinden yeterince uzak bir konuma yerleştirilen silindire ait ayrılmış akış bölgesi ile kıyaslandığı zaman yeniden dolanımlı akış bölgesinin yaklaşık 4 kat arttığı belirlenmiştir. Tabaanın akış üzerindeki sönümleyici etkisinden dolayı maksimum girdap şiddeti, Reynolds kayma gerilmesi ve çalkantı hızları gibi türbülans istatistik değerleri sınır tabakadan yeterince uzak bölgeye yerleştirilen silindirden elde edilen

değerler ile kıyaslandığı zaman önemli ölçüde azalmıştır. Son olarak yükseklik oranı, h/D nin artması ile birlikte tabanın akış üzerindeki sönümleyici etkisi azalmaktadır. Yükseklik oranının $h/D=1$ değeri için belirlenen türbülans istatistik değerleri literatürde ki değerler ile uyumludur. Deney sonuçları yükseklik oranı h/D nin değişimlerine bağlı olarak türbülans şiddetinin dağılımında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Gözlemler, tek bir silindir içindeki küçük girdapların zamansal gelişiminin oldukça düzgün ve simetrik bir akış yapısının oluşumuyla sonuçlandığını göstermektedir. Bu, pozitif ve negatif girdapların karşılıklı olarak sönümlemesi sağlanır.

Hem tek hem de silindir çifti için yapılan deneysel çalışma sonuçları akış yapısı ve türbülans istatistikleri bakımından incelendiği zaman yükseklik oranı, h/D ve G/D , boşluk oranının daimi olmayan akış yapısı üzerine önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Sayısal çalışmaların doğrulanması amacıyla, bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar, nispeten güvenilir deneysel verilerin elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlara dayanarak üretilen hesaplamalı üç boyutlu akışkanlar dinamiği modellerinin doğrulanmasının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programlarının karşılaştırılabilir çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenli kullanımına katkıda bulunması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akilli, H., Akar, A., & Karakus, C. (2004). Flow characteristics of circular cylinders arranged side-by-side in shallow water. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 187–197.
- Aköz, M.S., Şahin, B., Akıllı, H. 2010. “Flow characteristic of the horizontal cylinder placed on the plane boundary”, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, 476-487.
- Alam, M. M., Elhimer, M., Longjun, W., Jacono, D. L., & Wong, C. W. (2018). Vortex shedding from tandem cylinders. *Experiments in Fluids*, 59(3), 1-17.
- Alam, M. M., Meyer, J. P., & Thompson, M. C. (2013). Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross-flow. *Journal of Fluids and Structures*, 41, 135-145.
- Alam, M. M., Moriya, M., & Sakamoto, H. (2003). Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, 18(3–4), 325-346.
- Alonzo-Garcia A., Gutierrez-Torres C.C., Jimenez B.J.A., Mollinedo-Ponce L.H.R., Martinez-Delgadillo S.A., Barbosa-Saldana J.G. “RANS simulations of the U and V grooves effect in the subcritical flow over four rotated circular cylinders”, *Journal of Hydrodynamics*, 27(4), 569-578
- Balachandar, S., Mittal, R., & Najjar, F. M. (1997). Properties of the mean recirculation region in the wakes of two-dimensional bluff bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 351, 167–199.
- Barakos, G. ve Mitsoulis, E. (2015). Yüzey pürüzlülüğünü kullanarak dairesel bir silindirden geçen akış kontrolü: Bir inceleme. *Rüzgar Mühendisliği ve Endüstriyel Aerodinamik Dergisi*, 142, 1–19.
- Bearman, P.W., 2011. Circular Cylinder Wakes and Vortex-Induced Vibrations, *Journal of Fluids and Structures*, 27: 648–658.
- Bloor, M. G., & Gerrard, J. H. (1966). Measurements of turbulent vortices in a cylinder wake. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294, 319–342.
- Borazjani, I., & Sotiropoulos, F. (2009). Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity - wake interference region. *Journal of Fluid Mechanics*, 621, 321-364.
- Caliskan, M., Tantekin, A., Tumen Ozdil, N. F., & Akilli, H. (2021). Investigation of flow characteristics for triangular grooved shape cylinder at different heights in shallow water. *Ocean Engineering*, 225, 108788.
- Canpolat, C., Sahin, B. 2017. “Influence of single rectangular groove on the flow past a circular cylinder”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 64, 79-88.
- Choi, K.-S. ve Choi, H. (2015). Pasif kontrol cihazlarıyla dairesel silindirler etrafında akış kontrolü: Bir inceleme. *Mekanik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 29(9), 3637–3649.

- Çengel, Y.A., 3. Baskı, Ocak 2012 ısı ve kütle transferi pratik bir yaklaşım, çeviri editörü Vedat Tan Yıldızı, Güven bilimsel yayın evi.
- Durhasan, T., 2020. Flow topology downstream of the hollow square cylinder with slots. *Ocean Eng* 209, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107518>.
- Durhasan, T., Aksoy, M.M., Pinar, E., Ozkan, G.M., Akilli, H., Sahin, B., 2016. Vortex street suppression of a circular cylinder using perforated semi-circular fairing in shallow water. *Exp. Therm Fluid Sci.* 79, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.001>.
- Durhasan, T., Aksoy, M.M., Pinar, E., Ozkan, G.M., Akilli, H., Sahin, B., 2019. The effect of shroud on vortex shedding mechanism of cylinder. *Appl. Ocean Res.* 84, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.007>.
- Fuchs, N. A., 1989. The mechanics of aerosols. New York: Dover Publications. ISBN 0-486-66055-9.
- Gerrard, J.H., 1966. The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 25: 401-413.
- Gilliot, A., Delery, J., Kompenhans, J., Schwamborn, D., 2004. Deliverable D4.4. State of the art data on experimental methods, ONERA, DLR
- Huera-Huarte, F. J., & Jiménez-González, J. I. (2019). Effect of diameter ratio on the flow-induced vibrations of two rigidly coupled circular cylinders in tandem. *Journal of Fluids and Structures*, 89(May), 96-107.
- Kahraman A., Ozgoren M., Sahin B. 2012. “Flow structure from a horizontal cylinder coincident with a free surface in shallow water flow”, *Thermal Science*, 16-1, 93-107.
- Karakus, C., 2007. Investigation Of Tip Vortex Formation, Development And Merging Using Particle Image Velocimetry (PIV) Technique. Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, ADANA, Ph.D. Thesis.
- Kim, S., Lee, S., & Kim, Y. (2009). Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem arrangement. Part 1: Characteristics of vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5–6), 304-311.
- Leung, Y.C., Wong, C.H., Ko, N.W.M. 1997. “Characteristics of flows over an asymmetrically grooved circular cylinder in transitional regimes”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69-71, 169-178.
- Lienhard, J.H., 1966. Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders. Washington State University College of Engineering Research Division Bulletin, 300:3.
- Lim, H.C., Lee, S.J. 2003. “PIV measurements of near wake behind a U-grooved cylinder”, *Journal of Fluids and Structures*, 18, 119-130.
- Lin, J.C., and Rockwell, D., 1995. Evolution of a Quasi-Steady Breaking Wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 302, 29-44.

- Lin, J.-C., Towfighi, J., & Rockwell, D. (1995). Instantaneous structure of near-wake of a cylinder: on the effect of Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 9, 409–418.
- Liu, Y.Z., Shi L.L., Yu, J. 2011. “TR-PIV measurement of the wake behind a grooved cylinder at low Reynolds number”, *Journal of Fluids and Structures*, 27, 394-407.
- Marris, A.W., 1964. A Review on Vortex Streets, Periodic Wakes, and Induced Vibration Phenomena. *Journal of Basic Engineering*, 86(2), 185-193.
- Melling, A., 1997. Tracer particles and seeding for particle image Velocimetry. *Measurement Science Technology*, 8:1406-1416.
- Najafi, L., Fırat, E., Akıllı, H., 2016. Time-averaged near wake of yawed angle. *Ocean Eng* 113, 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.045>.
- Noca, H. G., Park, M., & Gharib, M. (1998). Vortex formation length of a circular cylinder ($300 < Re < 4000$) using PIV. *Proceedings of FEDSM'98*, June 21-25, Washington, DC, 1–7.
- Noorani, A. ve Akdağ, V. (2018). Dairesel silindirlerde pasif ve aktif akış kontrol tekniklerinin gözden geçirilmesi. *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, 81(Bölüm 1), 190–205.
- Oruç, V., Akıllı, H., Şahin, B., 2016. PIV measurements on the passive control of flow past a circular cylinder. *Exp. Therm Fluid Sci.* 70, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.09.019>.
- Ozdil, N.F.T., Akıllı, H., 2015. Investigation of flow structure around a horizontal cylinder at different elevations in shallow water. *Ocean Eng* 96, 56–57. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.033>.
- Ozgoren, M. (2006). Flow structure in the downstream of square and circular cylinders. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 225–235.
- Ozgoren, M., 2006. Flow structure in the downstream of square and circular cylinders. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17:225–235.
- Ozgoren, M., Okbaz, A., Dogan, S., Sahin, B., & Akilli, H. (2013). Investigation of flow characteristics around a sphere placed in a boundary layer over a flat plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44(8), 62–74.
- Ozturk, N.A. 2006 ,Investigation of flow characteristics in heat exchangers of various geometries, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, ADANA, Ph.D. Thesis.
- Papaioannou, G. V., Kassinos, S. C., & Georgiou, G. C. (2008). On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 24, 833-854.
- Pınar, E., 2009. Experimental Investigation Of The Flow Structure Around Spheres Placed Side By Side, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, ADANA, Ms.C Thesis.

- Pınar, E. (2013) Flow Control Of A Cylinder In Shallow Water Using Perforated Cylinder Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, ADANA, PhD. Thesis.
- Pınar, E., Ozkan, G.M., Durhasan, T., Aksoy, M.M., Akilli, H., Sahin, B., 2015. Flow structure around perforated cylinders in shallow water. *J. Fluids Struct.* 55, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.01.017>.
- Qin, B., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2017). Two tandem cylinders of different diameters in cross-flow: flow-induced vibration. *Journal of Fluid Mechanics*, 829, 621-658.
- Qin, B., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2019). Free vibrations of two tandem elastically mounted cylinders in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 861, 349-381.
- Quintavalla, S.J., Angilella, A.J., Smits, A.J. 2013. “Drag reduction on grooved cylinders in the critical Reynolds number regime”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48, 15-18.
- Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., 1998. Particle Image Velocimetry. A practical Guide. Springer-Verlag.
- Rayleigh, L., 1896. Theory of Sound. 2nd edition, London, Macmillan.
- Revell, A. ve Porteous, R. (2017). Kayalık cisimlerde sürtünmeyi azaltmak için aktif akış kontrolü. *Havacılık ve Uzay Bilimlerinde İlerleme*, 91, 1–29.
- Riethmuller, M. L., 1997. Vélocimétrie par images de particules ou PIV. Summer school of the Association Francophone de Vélocimétrie Laser, Saint-Pierre d'Oléron.
- Roshko, A. 1954. On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets. NACA Rep. 1191.
- Sahin, B., & Ozturk, N. A. (2009). Behaviour of flow at the junction of cylinder and base plate in deep water. *Measurement*, 42, 225–240.
- Sarpkaya, T. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 19(4), 389-447.
- Sheridan J., Lin J.C., Rockwell D. 1997. “Flow past a cylinder close to a free surface”, *Journal of Fluid Mechanics*, 330, 1-30.
- Son, J.S., Hanratty, T. J., 1969. Velocity Gradients at the Wall for around a Cylinder at Reynolds Number From 5000 To 100000. *Journal Of Fluids Mechanics*, 35(2): 353-368.
- Strouhal, V. 1878. Ueber eine besondere Art der Tonerregung. *Annual Review of Physical Chemistry (Wied. Ann. Phys.)*, 5:216-251.
- Tantekin, A., Tumen Ozdil, N. F., & Caliskan, M. (2021). Flow investigation of circular cylinder having different cavities in shallow water. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 92, 108864.
- Techet A 2005 Vortex induced vibration MIT OpenCourseWare (USA: Massachusetts Institute of Technology)

- Tonddast-Navaei, A. and Sharp, D. B., 2001. The Use of Particle Image Velocimetry in the Measurement of Sound Fields, Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, 379-382.
- Tumen Ozdil, N.F., Akilli, H., 2019. Flow comparison around horizontal single and tandem cylinders at different immersion elevations. Ocean Eng 189, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106352>.
- Wang, L., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2018). Two tandem cylinders of different diameters in cross-flow: effect of an upstream cylinder on wake dynamics. Journal of Fluid Mechanics, 836, 5-42.
- Wang, S.F., Liu, Y.Z., Zhang, Q.S. 2014. "Measurement of flow around a cactus-analogue grooved cylinder at $Re_D = 5,4.104$: Wall-pressure fluctuations and flow pattern", Journal of Fluids and Structures, 50, 120-136.
- Westerweel, J., 1993. Digital particle image Velocimetry - theory and application, Delft University Press.
- Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. Annual Review of Fluid Mechanics, 36, 413-455.
- Williamson, C. H. K., & Roshko, A. (1988). Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. Journal of Fluids and Structures, 2(4), 355–381.
- Yamagishi, Y., Oki, M. 2004. "Effect of groove shape on flow characteristics around a circular cylinder with grooves", Journal of Visualization, 7-3, 209-216.
- Zdravkovich, M. M. (1988). Review of interference-induced oscillations in flow past
- Zhang, H.L., Ko, N.W.M. 1995. "Numerical analysis of incompressible flow over smooth and grooved circular cylinders", Computers & Fluids, 25-3, 263-281.
- Zhou, B., Wang, X., Guo W., Zheng J., Tan S.K. 2015. "Experimental measurements of the drag force and the near- wake flow patterns of a longitudinally grooved cylinder", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", 145, 30- 41.
- Zhou, Y., & Alam, M. M. (2016). Wake of two interacting circular cylinders: a review. International Journal of Heat and Fluid Flow, 62, 510-537.



ÖZGEÇMİŞ

Gökhan YAŞAR. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 2011 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği bölümünden 2016 yılında mezun oldu. 2018 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği bölümünden 2020 yılında mezun oldu. 2019 yılından bu yana Mersin Koluman Otomotiv Endüstri firmasında Kıdemli Tedarik Zinciri Uzmanı olarak çalışmaktadır.

