



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Duvara Yakın Tandem Silindirler Etrafındaki Akış Yapıları

Engin PINAR^{*1}, Gökhan YAŞAR²

¹Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01950, Adana, Türkiye

²Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., 33450, Mersin, Türkiye

Engin PINAR, ORCID No: 0000-0002-7484-8616, Gökhan YAŞAR, ORCID No: 0009-0007-6611-363X

* Sorumlu yazar e-posta: epinar@cu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 25.01.2024
Kabul: 20.03.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1425502](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1425502)

Anahtar Kelimeler

Akış yapısı,
Ard izi,
Dairesel silindir,
Türbülans,
Yakın duvar

Öz: Bu çalışmada, ard arda yerleştirilmiş dairesel kesitli iki silindirin tabanla aralarındaki mesafenin değiştirilmesi ile oluşan akış yapısının karşılaştırmalı bir çalışması Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV) kullanılarak deneysel olarak araştırıldı. Su kanalında $h/D = 0.5$ ve 1 olmak üzere üç farklı yükseklik oranı için deneyler yapılmıştır. Yükseklik oranı, boşluk yüksekliğinin (daireSEL silindirin alt yüzeyi ile duvar yüzeyi arasındaki) silindir çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Ard arda yerleştirilen silindirler arasındaki mesafe G/D boşluk oranı olarak tanımlanmış olup, $G/D = 1$ olarak deneyler süresince sabit tutulmuştur. Silindir çapına bağlı, D , Reynolds sayısı, $Re = 2100$ 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, dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bulgular, 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 ard izi bölgesinin farklı silindir yüksekliklerinde değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, ölü akış bölgesinde oluşan vorteks büyüklüklerinin ve Reynolds kayma gerilmesi 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.

Flow Structures Around Tandem Cylinders Near Wall

Article Info

Received: 25.01.2024
Accepted: 20.03.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1425502](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1425502)

Keywords

Circular cylinder,
Flow structure,
Near wall,
Turbulence,
Wake region

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, $Re = 2100$, 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. The findings showed that the void ratio, G/D and height ratio have a significant impact on the flow structures around H/D 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 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.

1. Giriş

Akışla ilgili sorunlarla doğada ve mühendislik uygulamalarının çoğunda düzenli olarak karşılaşılmaktadır. Bunun nedeni, nesnelere bir akış ortamında var olması ve bu durumun, nesnelere çevreleyen akış üzerinde kontrol uygulanması gerekliliğiyle sonuçlanmasıdır. Bu sorunların en önemlileri akıştan kaynaklanan titreşimler ve nesnenin akış boyunca hareketine karşı direnç kuvveti olarak adlandırılan dirençtir. Akışkanlar mekaniğinin çok sayıda uygulaması kararsız akışların varlığını içerir. Bu uygulamaların bazı örnekleri arasında yüksek binalar, köprü ayakları, havacılık ve otomotiv endüstrileri, rüzgâr türbini kanatları, turbomakineler ve diğerleri yer almaktadır. Akış kontrolü yaklaşımlarının oluşturulması söz konusu olduğunda, bu akışların yapısının sağlam bir şekilde anlaşılması önemlidir. Sonuç olarak akış içerisinde 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 & Gerrard \(1966\)](#), [Lin ve ark. \(1995\)](#), [Balachandar ve ark. \(1997\)](#), [Akilli ve ark. \(2004\)](#), [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 silindireli FIV (akış kaynaklı titreşimler), hem sayısal hem de deneysel toplulukların önemli miktarda ilgi odağı olmuştur. [Williamson & Roshko \(1988\)](#), girdap saçılımının frekansı yapının (silindir) doğal frekansı ile senkronize olduğunda büyük genlikli salınımın meydana geldiğini bildirdikleri bir deney gerçekleştirdiler. "Senkronizasyon" veya "kilitlenme" gibi çeşitli isimlerle bilinen bu büyük genlikli salınım olgusu, geniş bir frekans aralığında meydana gelir ([Williamson & 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 & Govardhan \(2004\)](#) incelemelerinde, kilitlenme 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 \(1988\)](#) ve [Alam ve ark. \(2003\)](#) tarafından özetlenmiştir. [Zhou & 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 ve ark., 2019](#)). [Kim ve ark. \(2009\)](#), iki tandem silindir düzenlemesi için hem serbest akım hızının hem de silindirler arasındaki boşluk oranının akış yapıları ve titreşim üzerindeki etkisini araştırmıştır.

[Alam & Meyer \(2013\)](#) tarafından tanımlandığı gibi, yeniden bağlanma akış rejiminde aşağı akış silindirinin 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 ve ark. \(2008\)](#) 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 & 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 kilitleme 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 ark., 2017; Alam ve ark., 2018; Wang ve ark., 2018; Huera-Huarte & Jiménez- González, 2019), araştırma aynı çaptaki iki silindirle 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.

2. Materyal ve Yöntem

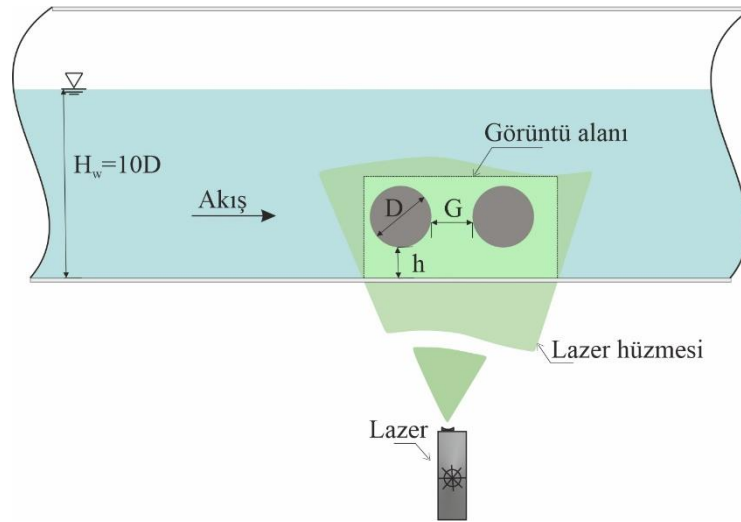
Duvar yakınındaki katı cisim etrafındaki akışa, ısı değiştiricilerinde, borularda, binalarda vb. gibi birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılmaktadır. Duvar yakınındaki katı cisimden elde edilen akış yapısı, Reynolds sayısından, Re sınır tabakası kalınlığından, δ/D 'den ve duvar ile katı cismin alt yüzeyi arasındaki yükseklik oranından, h/D değerlerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu çalışmanın amacı, parçacık görüntülü hız ölçümünü kullanarak ard arda yerleştirilen dairesel silindir çiftinin etrafında oluşan akış yapısını incelemektir. Şekil 1'de deney düzeneğinin şematik gösterimi görülmektedir. Deneyler üç farklı yükseklik oranında ($h/D = 0.5$ 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. Bu çalışmaya ait deneyler Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda kapalı devreli açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Su kanalını oluşturan iki su deposu arasına akrilikten bir bölüm konumlandırılmıştır. Su kanalının ölçüleri 8000 mm uzunluğunda, 1000 mm genişliğinde ve 750 mm yüksekliğindedir.

Kanaldaki suyun akışını kontrol eden pompa, hız kontrol ünitesi ile birlikte çalışarak değişken su debileri sağlar. Deneyler boyunca Reynolds sayısının, $Re_D = 2100$ değerine karşılık gelen serbest akış hızı $U = 71$ mm/s olarak sabit tutulmuştur. Deneyler Froude sayısının $Fr = 0.035$ değeri için gerçekleştirilmiştir. Test modellerinin bulunduğu bölgede sınır tabakası kalınlığı $\delta/D = 0.4$ 'tür. Plexiglas, dairesel silindirin malzemesidir. Kanalın türbülans yoğunluğu %0.5 civarındadır. Deneylerde kullanılan silindirin 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. 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 $H_w = 400$ mm'de sabit tutulmuştur. Akış özelliklerini herhangi bir hasara yol açmadan gözlemlenmenin bir yolu PIV yaklaşımını kullanmaktır. PIV yöntemi iki aşamada gerçekleşir: görselleştirme ve görüntü inceleme. Akışı incelemeye başlamak için akış karakteristiğiyle uyumlu bir parçacık tanıtılır. Darbeli lazer ışını belirtilen bölgeyi aydınlatır. 1. ve 2. kareler, anlık görüntüler yakalamak için yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılarak yakalanır. Bu iki üst üste bindirilmiş çerçeve görüntüsü, parçacık konumunu ve hareketliliğini değerlendirmeye olanak tanır (Caliskan ve ark., 2021). PIV ile hız ölçümü yönteminde, suyun içerisine, üzerine gelen lazer ışığını yansıtan ve ortalama 10 mikrometre çapa yoğunluğu yaklaşık 1100 kg/m³ olan gümüş kaplı parçacıklar serpiştirilmektedir. Bu parçacıklar, çok küçük çapa sahip olduklarından ve yoğunlukları suyun yoğunluğuna çok yakın olduğundan içinde buldukları su ile aynı hızda hareket etmektedir. Ölçüm süresince de homojen bir şekilde su içinde askıda kalmaktadırlar. Ölçüm yapılacak alan darbeli lazer ışık kaynağı ile aydınlatıldığında bu parçacıklar parlamaktadır. Mevcut lazer ışık kaynağı ile

saniyede en çok 15 hız ölçümü alınabilmektedir. Lazerin, ölçüm yapılan akış alanını aydınlattığı anda dijital bir kamera ile akış alanında parlayan katı parçacıkların fotoğraf çekimi yapılmakta ve bilgisayara aktarılmaktadır. Çekim yapan kameranın çözünürlüğü yüksek olup, 1.600 x 1.186 piksel boyutundadır.

Kameranın örnekleme sayısı ise 15 Hz dir. Ard arda çok kısa zaman aralığında iki adet resim çekilir ve fotoğraflardaki partiküllerin yer değiştirilmesine iki resim arasındaki zaman aralığı ve ölçek değerine bölünerek hız değerleri hesaplanır. Anlık hız değerlerini hesaplamak için ard arda çekilen iki resim arasındaki zaman farkı 1 ile 10 milisaniye alınmıştır. Hız hesaplanmasında çapraz korelasyon tekniği kullanılmıştır. Hızların belirlenmesinde Fast Fourier analizi yapılmıştır. Vektör sayısını arttırmak ve Nyquist kriterini sağlamak için hızı vektörü hesaplanacak ağ yapısı %50 üst üste bindirilerek kaydırılmıştır. Bilgisayara aktarılan bu resimlerin prosesi neticesinde anlık hız vektörleri hesaplanmaktadır. Prosesler Dantec firmasına ait bilgisayar programıyla kısmen yapılmıştır. Hız vektörlerini kullanarak girdap eş düzey eğrileri ve akım çizgilerini hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, her bir deney seti için 350 adet anlık hız alanı ölçülmüş ve bu anlık hız alanlarından her bir deney seti için ortalama hız, Reynolds gerilmeleri ve çalkantı hızları hesaplanmıştır. Deneyler boyunca lazer kaynağı silindir çiftinin merkezinden geçecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

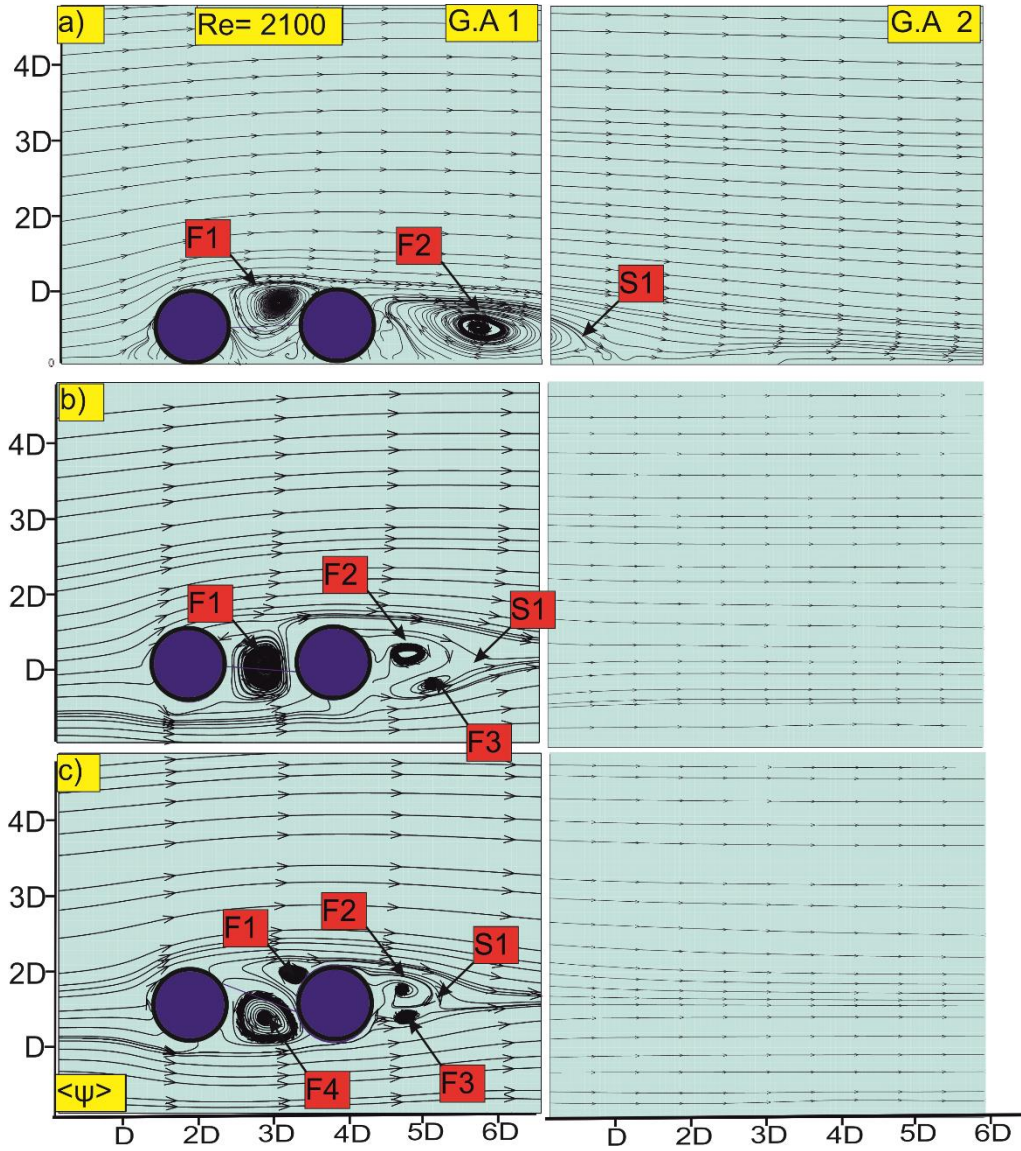
3. Bulgular

Küt cisimlerin iyi bir örneği olan dairesel silindirin aerodinamik performansının iyileştirilmesi amacıyla yatay konumda yerleştirilen tek silindirin akış yapısı ve oluşan akış yapısının kontrolü için tek akış literatürde önemli miktarda araştırma yapılmıştır (Tantekin ve ark., 2021; Ozgoren ve ark., 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 ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışma referans alınmıştır. Caliskan ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada sıg suda yatay olarak konumlandırılmış çıplak ve üçgen yivli silindirleri çevreleyen akış özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü kullanmışlardır. Bu bölümde PIV tekniğinden elde edilen sonuçlara ilişkin kapsamlı detaylara yer verilmektedir.

Şekil 2, tüm yükseklikler için yalın silindire ait zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, görülmektedir. Zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, ard izi bölgesinin boyutu hakkında da bilgi vermektedir. Ayrıca, silindirlerin ard izindeki 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. Alam & Zhou (2007a), Reynolds sayısı 3000 için yalın silindirin girdap odak ve durma noktası oluşumunun $1.07D$ ve $1.95D$ 'de meydana geldiğini göstermektedir." Reynolds sayısı 2500 değerinde yalın bir silindir için

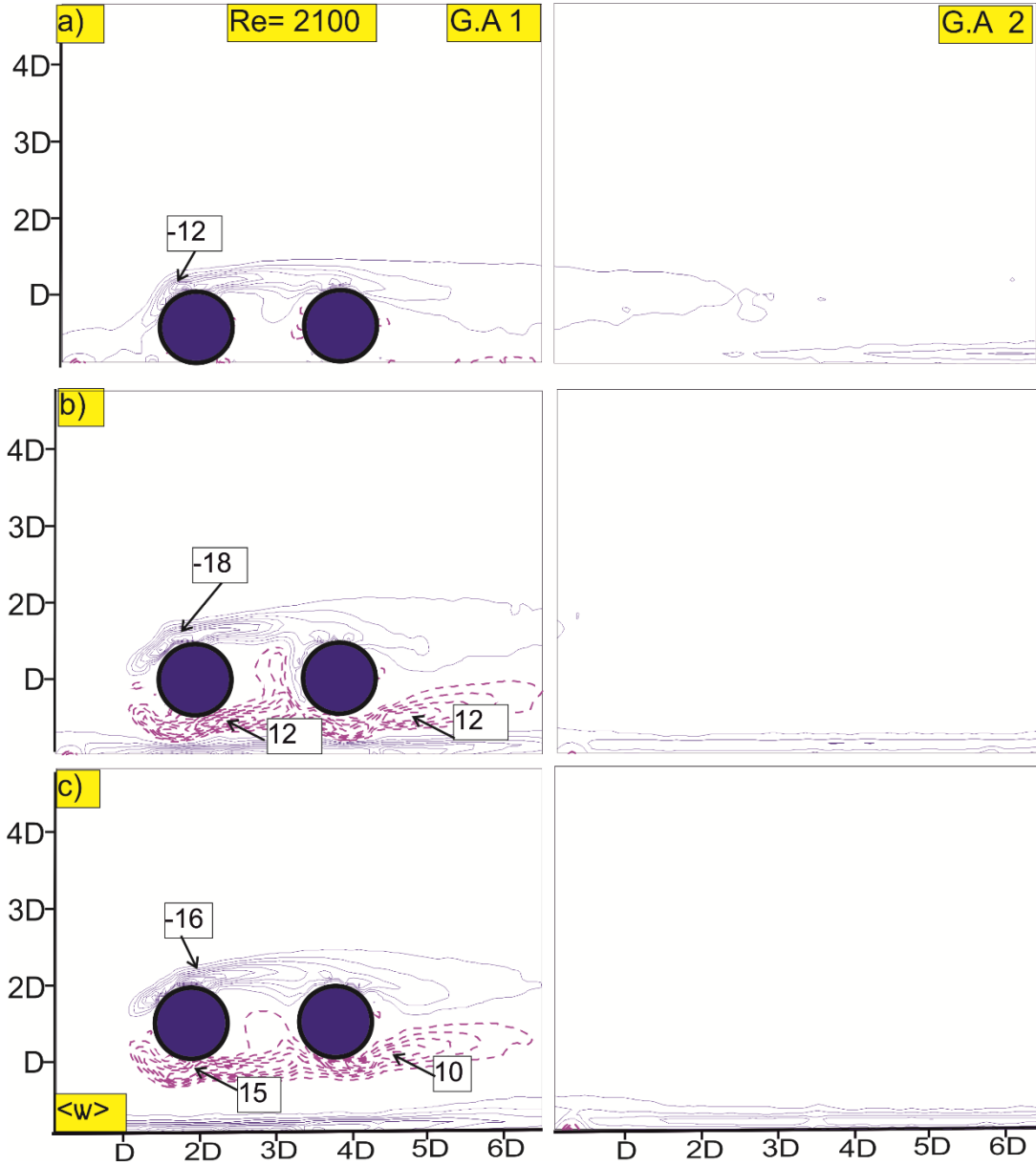
Alam & Zhou (2007b), girdap oluşum uzunluğu olarak da adlandırılan durma noktasının konumunun silindirin tabanından $1.4 D$ uzakta olduğunu belirledi. Şekil 2a $h/D = 0$ durumu için her iki silindirin ard izinde tabanın etkisinden dolayı sadece bir adet girdap odak noktası oluşmaktadır. F ile gösterilen akım çizgilerinin sirkülasyonu silindirin üst tarafından merkeze doğru saat yönünde bir noktada toplanmaktadır. Bu durum Tantekin ve ark. (2021)'in yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçlar ile uyumludur.

Şekil 2b ve 2c'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, ard 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 2a'da F1 ve F3 ile gösterilen, Şekil 2b'de F1, F2 ve F3 ile gösterilen, Şekil 2c'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 2a'da tabanın etkisi ile aşağı akım yönündeki silindire ait ard izi bölgesi daha büyüktür. Yükseklik oranı artıktıkça S ile gösterilen durma noktası aşağı akım yönündeki silindire yaklaşmaktadır. Tüm yükseklik oranları için silindir çiftinin ara bölgesinde bir durma noktasının oluşmadığı belirlenmiştir.



Şekil 2. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değeri için zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$.

Şekil 3a, 3b ve 3c'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 3a'da gösterilen silindir çiftinin tabana temas etmesi durumunda pozitif yönde dönen girdapların oluşmadığı görülmektedir. Bu duruma ait maksimum girdap şiddeti ise akış yönündeki 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 yönündeki 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 3. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değeri için zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$.

Şekil 4’de yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değerleri için zaman ortalamalı 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 $G/D = 1$ 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.

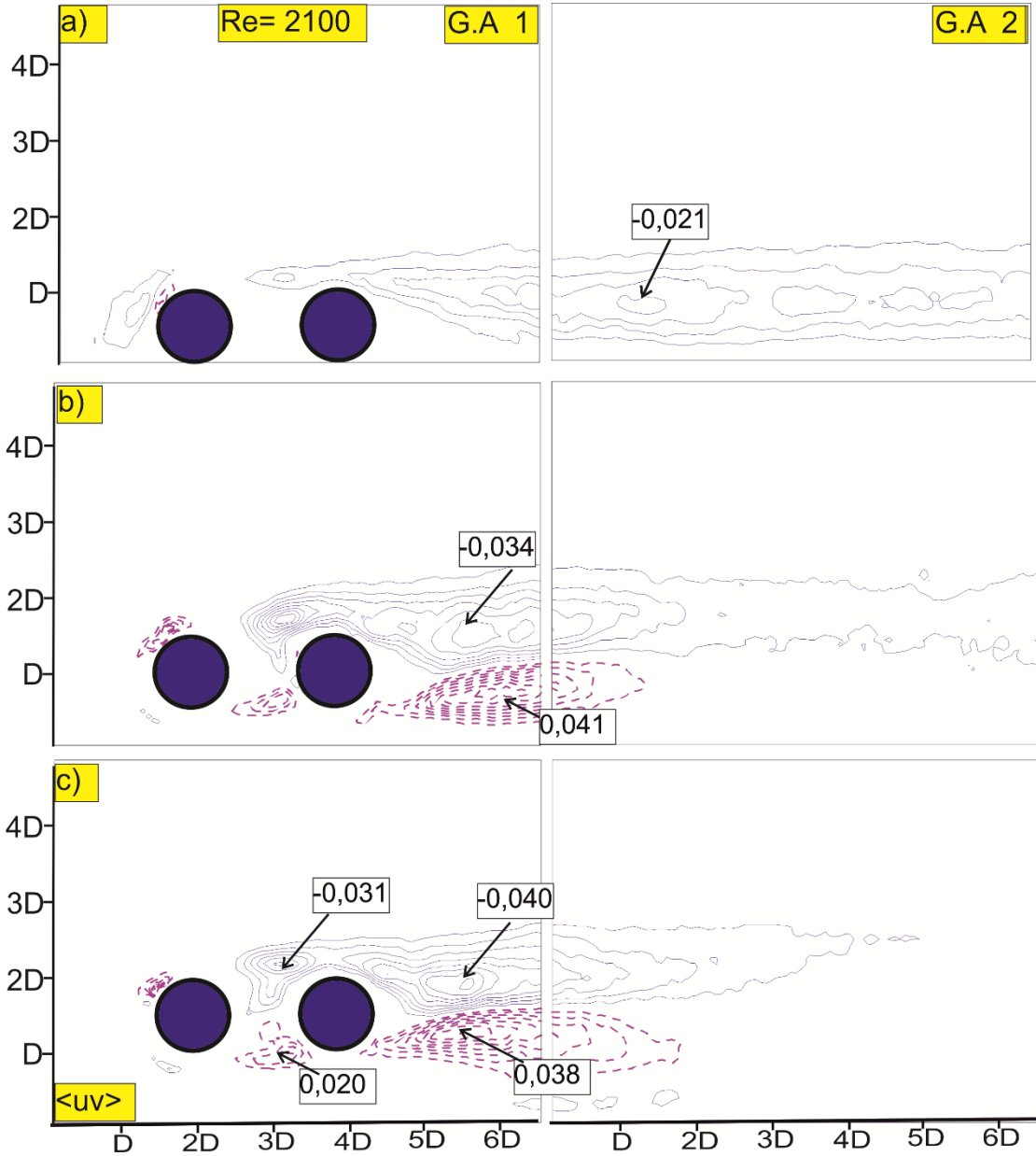
Şekil 5’de ki grafikte yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 kadar değişimi için ard arda yerleştirilen silindirlerden oluşan maksimum Türbülans Kinetik Enerji değeri görülmektedir. Yükseklik oranının $h/D = 0$ değeri için elde edilen Türbülans Kinetik Enerji, TKE, değeri, akış alanı içerisinde aynı 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 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 karşılaştırıldığı zaman sırası ile % 38 ve % 65 daha düşük olarak belirlenmiştir. Bu durumda türbülans çalkantı değerlerini sönmülemeye yükseklik oranının, h/D etkisi olduğu kadar boşluk oranı, G/D ’nin de etkili olduğu sonucuna varılabilir. Türbülans Kinetik Enerji konturları incelendiği 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.

4. Tartışma ve Sonuç

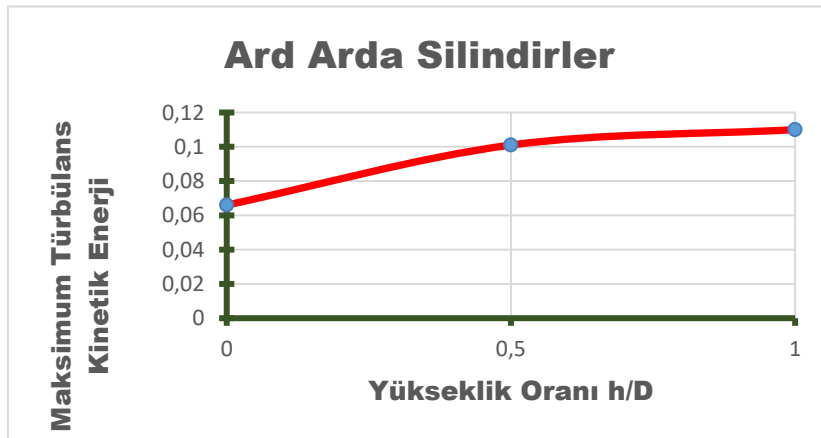
Bu araştırmanın amacı doğrultusunda, suya yatay olarak yerleştirilen silindirlerin etrafındaki kararsız akışın yapısı, silindirlerin tabandan uzaklıkları (yüksekliğe oran) değiştirilerek deneysel olarak araştırıldı. Anlık akış karakteristikleri ard izi bölgesinde kararsız ve dalgalı bir akış formu oluşturmaktadır. Zaman ortalamalı 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 türbülanstır. 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.

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.



Şekil 4. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0,5$ ve 1 değeri için zaman ortalamalı Reynolds gerilme konturları $u' v' / U_{\infty}^2 >$.



Şekil 5. Maksimum Türbülans Kinetik Enerji değerinin yükseklik oranı ile değişimi.

Kaynakça

- Akilli, H., Akar, A., & Karakus, C. (2004). Flow characteristics of circular cylinders arranged side-by-side in shallow water. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(4), 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2004.04.003>
- Alam, M. M., Elhimer, M., Wang, L., Jacono, D. L., & Wong, C. W. (2018). Vortex shedding from tandem cylinders. *Experiments in Fluids*, 59(3), 60. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2501-8>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.03.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.07.005>
- Alam, M. M., & Zhou, Y. (2007a). Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 23(5), 799-805. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>
- Alam, M. M., & Zhou, Y. (2007b). Phase lag between vortex shedding from two tandem bluffbodies. *Journal of Fluids and Structures*, 23(2), 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.11.003>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007179>
- Bloor, M. S., & Gerrard, J. H. (1966). Measurements on turbulent vortices in a cylinder wake. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294, 319-342. <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0210>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0022112008004850>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108788>
- 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, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.04.006>
- Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H., & Zhou, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.07.004>
- 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(4), 409-418. <https://doi.org/10.1006/jfls.1995.1023>
- Ozgoren, M. (2006). Flow structure in the downstream of square and circular cylinders. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(4), 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.11.005>
- 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, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.014>
- Papaioannou, G. V., Yue, D. K. P., Triantafyllou, M. S., & Karniadakis, G. E. (2008). On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 24(6), 833-854. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.11.006>
- 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. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.510>

- 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. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.913>
- Sahin, B., & Ozturk, N. A. (2009). *Behaviour of flow at the junction of cylinder and base plate in deep water*. *Measurement*, 42(2), 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.06.003>
- Sarpkaya, T. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 19(4), 389-447. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.02.005>
- Tantekin, A., Tumen Ozdil, N. F., Akilli, H., & Caliskan, M. (2021). Flow investigation of circular cylinder having different cavities in shallow water. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 92, 108832. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108832>
- 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. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.735>
- Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 413-455. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8)
- Zdravkovich, M. M. (1988). Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28(1-3), 183-199. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90115-8](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90115-8)
- Zhou, Y., & Alam, M. M. (2016). Wake of two interacting circular cylinders: a review. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62, 510-537. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.08.008>