

Yarık Açılan İçi Boş Silindirin Art İzindeki Akışın Farklı Geliş Açılarında Deneysel Araştırılması

Muhammed Murat AKSOY^{1,a}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-7594-9462

Makale Bilgileri

Geliş : 30.06.2025

Kabul : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1730991

Sorumlu Yazar

Muhammed Murat AKSOY

muhammedmurataksoy@osmaniye.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yarık

Akış karakteristiği

PIV

Silindir

Atıf şekli: AKSOY, M.M., (2025). Yarık Açılan İçi Boş Silindirin Art İzindeki Akışın Farklı Geliş Açılarında Deneysel Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 779-788.

ÖZ

Bu çalışmada, yarık içi boş dairesel silindirlerin art izindeki akış karakteristikleri ve sürüklenme katsayıları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, silindir çapına ($D=50$ mm) göre belirlenen Reynolds sayısı $Re = 10\ 000$ koşulunda yürütülmüş; yarık oranları ise $w/D=0,04$ (2 mm), 0,16 (8 mm) ve 0,20 (10 mm) olmak üzere üç farklı yarık genişliği olarak belirlenmiştir. Her bir yapılandırma için akışın 30° , 45° ve 60° geliş açıları için parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) tekniği kullanılarak art iz bölgesindeki akış istatistikleri ve türbülans dağılımları elde edilmiştir. Ayrıca, rüzgar tüneline yarık açılan silindirlerin sürüklenme katsayıları belirlenmiş ve yalın silindir kullanımı durumunda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hem yarık oranının hem de akışın geliş açısının art izindeki akış yapısını etkilediğini ortaya koymaktadır. Artan geliş açısı ile birlikte sürüklenme katsayısı değerleri yalın silindire göre arttığı gözlemlenmiştir.

Experimental Investigation of Wake Flow of a Hollow Cylinder with Slot at Various Angles of Incidence

Article Info

Received : 30.06.2025

Accepted : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1730991

Corresponding Author

Muhammed Murat AKSOY

muhammedmurataksoy@osmaniye.edu.tr

Keywords

Slot

Flow characteristic

PIV

Cylinder

How to cite: AKSOY, M.M., (2025). Experimental Investigation of Wake Flow of a Hollow Cylinder with Slot at Various Angles of Incidence. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 779-788.

ABSTRACT

In this study, the flow characteristics and drag coefficients in the wake of hollow circular cylinders with slots were experimentally investigated. The experiments were carried out for the Reynolds number $Re = 10\ 000$ based on the cylinder diameter ($D=50$ mm); three different slot widths were selected as slot ratios $w/D = 0.04$ (2 mm), 0.16 (8 mm), and 0.20 (10 mm). For each configuration, flow and turbulence statistics in the wake region were obtained by using particle image velocimetry (PIV) technique at 30° , 45° and 60° angles of incidence of the flow. In addition, the drag coefficients of slotted cylinders were measured in the wind tunnel and compared with the bare case. The results show that both the slot ratio and the angle of incidence of the flow affect the flow structure in the wake. It was observed that the drag coefficient values increased with increasing angle of incidence compared to the bare cylinder.

1. GİRİŞ

Temel geometrilerin özellikle silindirler etrafındaki akışın incelenmesi, hem temel akışkanlar dinamiği araştırmaları hem de uygulamalı mühendislik alanları açısından büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, dairesel kesitli silindir etrafındaki akış yapısının deneysel olarak incelenmesi, akış kontrolü, sürüklenme kuvvetinin ve türbülanslı akış yapılarının anlaşılması yaygın olarak çalışılan konulardır [1,2]. Bu tür çalışmalar, hem temel bilimsel açıdan hem de endüstriyel uygulamalarda enerji verimliliği, yapısal dayanıklılık ve akış kaynaklı titreşimlerin önlenmesi gibi kritik alanlar için önem arz etmektedir [3,4].

Küt cisimlerin arkasında, belirli Reynolds (Re) sayılarında oluşan periyodik girdap kopmaları von Karman girdap caddesi oluşumu olarak kendini gösterir. Bu girdap yapısı, cisim arkasında daimî olmayan basınç dağılımlarına ve dolayısıyla sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olur. Bu nedenle, küt cisim etrafındaki akışın kontrolü mühendislikte önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir [5].

Son yıllarda, silindir etrafındaki akış kontrolü için çeşitli pasif ve aktif yöntemler geliştirilmiştir. Pasif yöntemler arasında, silindirin yüzeyine veya çevresine yerleştirilen delikler, yarıklar, dış delikli silindirler ve çeşitli geometrik modifikasyonlar yer almaktadır. Aktif yöntemler ise, yüzeye hava üfleme, plazma aktüatörleri veya titreşimli elemanlar gibi dışarıdan enerji gerektiren uygulamaları kapsamaktadır [6,7]. Bu bağlamda, içerisine yarık açılmış içi boş dairesel silindirler etrafındaki akış yapısını incelemek önem arz etmektedir.

Silindir üzerinde akışa paralel olarak açılmış yarığın akış yapısının kontrolü üzerindeki etkinliği Gao ve arkadaşları [8] tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Parçaçık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) yöntemi ile gerçekleştirilen bu çalışmada yarık genişliği silindir çapının (D) %5'inden %15'ine kadar değiştirilerek art izindeki akış değişimi Reynolds sayısının $Re=26700$ olduğu durum için incelenmiştir. Yarıktan geçen akışın oluşturduğu jet akışın silindirin arkasında girdap kopma sürecini etkin bir şekilde manipüle ederek, silindirin sürüklenme katsayısı düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, jet akışın silindir art izinde iki durumlu (flip-flop [9]) akış yapısı oluşturduğu anlık akış yapıları ile ortaya çıkarılmıştır. Yarıktan gelen jet akışının art iz bölgesinde momentumu artırmasından dolayı silindirin kayma tabakasındaki girdap kopmalarını bozduğu ve akış kontrolünü sağlamaya yardımcı olduğu söylenebilir. Yarık açılmış içi boş dairesel kesitli silindirlerin art iz bölgesinde akış kontrolü sağladığı, başka bir çalışmada da deneysel olarak sunulmuştur [10].

Başka benzer bir çalışma da ise, Gao ve arkadaşları [11] tek bir yarık oranını (%7,5D) kullanarak 0° den 90° dereceye kadar farklı akış geliş açılarındaki akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Açı arttıkça iki durumlu akış örüntü modellerinin kaybolduğu ve art izindeki girdap odak noktalarının silindire yaklaştığı gözlemlenmiştir. Yalın silindire kıyasla geliş açısı 45° olduğu durum en az etki göstermiştir. Ayrıca, geliş açısı 30° den sonra sürüklenme katsayısı doğrusal bir eğilim ile artış göstermiş ve her zaman yalın silindire göre yüksek değer almıştır. Böylelikle, geliş açısının farklı olması durumları geliş açısının 0° ile kıyaslandığında akış karakteristiklerinde değişiklik olmasına rağmen sürüklenme kuvvetini artırdığı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmalara ek olarak, Kim ve arkadaşları [12] hem yarık açıklığının hem de eksenel olarak düzenlenmiş deliklerin sürüklenme kuvveti ve silindir art izindeki akış yapıları üzerine etkileri farklı geliş açılarındaki irdelemiştir. Dairesel silindir üzerinde açılan eksenel deliklerin, aynı boyuttaki yarık oranına kıyasla daha geniş bir geliş açısı aralığında sürüklenme katsayısının azalmasını sağlamıştır. Sürüklenme oranı yarık açılan silindirde maksimum %24 azalmışken; delikli silindirde bu azalma %19 ile sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak delikli ve yarıklı silindirler kıyaslandığında, yüksek rijitliğin kritik olmadığı sınırlı geliş açısı aralıklarında yarıklar tercih edilebilirken; daha geniş geliş açısı aralığında güçlü dayanıklılık gerektiren uygulamalarda eksenel delikli sistemin daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmakta olduğu sunulmuştur.

Literatürdeki bu çalışmalar doğrultusunda delik açılmış içi boş dairesel silindirlerin art izindeki akış yapısı da ayrı bir araştırma konusu olmuştur [13,14]. İki sıra delikli boş silindirlerin art izi bölgesindeki akış karakteristiği, $Re=6900$ için delik çapı (d), delikler arası mesafe ve açı gibi farklı parametrelerin etkisi Firat ve arkadaşları [13] tarafından incelenmiştir. Delik çapı ve aralarındaki mesafeden bağımsız olarak, 0° yönlendirmesinde çıkan jet akışı büyük ölçekli girdap oluşumunu engellemiştir. Girdap kopmaları tamamen bastırılamasa bile, silindir kaynaklı kayma tabakalarının etkileşimi önemli ölçüde azalmıştır. En yüksek

delik çapı (0,2D) ve delikler arasındaki mesafe en düşük durumda (2d) iken girdap oluşumu en etkili şekilde silindirden uzağa taşımıştır. Ayrıca, 0° ile 45° arasındaki geliş açılarında akış karakteristiğinin silindir açısına duyarlı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Böylelikle, Firat ve arkadaşları [14] delik çapı 0,2D ve delikler arasındaki mesafe 7d olan durumda, içi boş dairesel silindirin 0° ve 90° geliş açıları için art iz bölgesindeki akış yapısını ve sürüklenme katsayılarını analiz etmişlerdir. Geliş açısının 0° (akış yönünde) durumunda deliklerden çıkan akış, girdap oluşum uzunluğunu artırırken; 90° geliş açısında (enine yönlü delikler) bu uzunluğun azaldığı gözlemlenmiştir. Sürüklenme katsayısı açısından yalın silindirle kıyaslandığında, 0° geliş açısında yerleştirilen deliklerin avantajlı olduğu; buna karşın, 90° geliş açısında yerleştirilen deliklerde sürüklenme katsayısının arttığı belirlenmiştir.

Dairesel kesitli silindirin etrafına eşmerkezli olarak yerleştirilen ve farklı geçirgenlik oranlarında oluşturulan perfore silindirin etkisi hem deneysel hem de nümerik olarak detaylı şekilde incelenmiştir. Durhasan ve arkadaşları [15] yaptığı çalışmada yalın silindirin arkasında oluşan girdap kopmalarını, üzerine gömlek şeklinde yerleştirilen perfore silindir aracılığıyla incelemişlerdir. Geçirgenlik oranının %60'ın üzerinde olduğu durumlarda, silindirin çevresinde oluşan kayma tabakasının akış yönünde uzadığı tespit edilmiştir. Kuvvet ölçümleri, geçirgenlik ve çap oranına bağlı olarak sürüklenme katsayısının yalın silindire kıyasla %21 ile %87 arasında azaldığını göstermiştir. Ancak sürüklenme katsayısı, silindir çapı baz alınarak hesaplandığında, yalın silindire kıyasla daha yüksek; perfore silindirin çapı kullanıldığında ise benzer düzeyde bulunmuştur. Sun ve arkadaşları [16] ise dört farklı geçirgenlik oranına sahip perfore silindirler ile yalın silindirin art izinde oluşan akış yapısını incelemişlerdir. Geçirgenlik oranı arttıkça, perfore silindirin akış üzerindeki olumlu etkisinin de arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %48 ve %67 geçirgenlik oranına sahip silindirlerde, maksimum türbülans kinetik enerjisi sırasıyla yalın silindirin %60'ı ve %20'si kadar ölçülmüştür. Bu sonuçlar, perfore silindirin gömlek şeklinde yalın silindirin üzerinde kullanıldığında girdap yapılarını oluşumunu engellerken aynı zamanda da gücünü zayıflattığı söylenebilir. An ve arkadaşları [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada girdap kaynaklı titreşimi azaltmak için perfore silindirin gömlek olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini, farklı geçirgenlik oranları için göstermişlerdir. Bununla birlikte, eğimli yerleştirmelerin bu titreşimleri daha karmaşık hale getirdiği de vurgulanmıştır. Ayrıca, yarım daire biçiminde kullanılan perfore silindirin de yalın silindirin arkasındaki girdap kopmalarını kontrol etmede etkili olduğu belirtilmiştir. Nitekim belirli geçirgenlik oranlarında ve yarım perfore silindirin uygun yay açılarıyla, maksimum Reynolds kayma gerilmesini yalın silindire kıyasla %96 oranında azaldığı ve kararsız akışın tamamen kontrol altına alındığı rapor edilmiştir [18]. Deneysel çalışmaların yanı sıra, yapılan bir sayısal çalışmada perfore silindirlerin akış kontrolü açısından etkili bir yöntem olduğu sunulmuştur [19].

Diğer taraftan dairesel silindirlere ek olarak, kare ve diyagonal kesitli silindirler üzerine farklı oranlarda açılan yarıklar da akış kontrolü perspektifinden detaylı olarak incelenmiştir [20,21]. Ayrıca, pasif yöntemlerle gerçekleştirilen akış kontrolü, yalnız silindir üzerindeki yüzey modifikasyonları ile sınırlı kalmamış [22], aynı zamanda kanat profillerine de başarıyla uygulanmıştır [23,24]. Böylelikle, literatür incelemesinden görüldüğü üzere, içi dolu silindire kontrol yöntemi olarak delik veya yarık uygulanması durumunda silindir sürüklenme katsayısının azaltılmasında ve silindir art izinde girdapların bastırılmasında etkili olduğu görülmektedir. Ancak içi boş silindir üzerine etkileri bilinmemektedir. Bu çalışma kapsamında ise, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla, üç farklı yarık oranına ($w/D=0,04, 0,16$ ve $0,20$) sahip içi boş dairesel kesitli bir silindirin art iz bölgesindeki akış karakteristikleri, üç farklı akış geliş açısı ($\alpha=30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) için deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, silindir çapına göre hesaplanan $Re=10000$ değerinde gerçekleştirilmiş ve yarıklı silindirlerin sonuçları yalın silindirle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile hem akış geliş açısının hem de yarık oranının akış yapısı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, içi boş silindirlerde yarık açılması durumunda akış kontrolü ve ısı transferi uygulamalarında, farklı akış geliş açıları için önemli katkılar sağlayacaktır [25-27].

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, su kanalında parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) yöntemi ile akış karakteristikleri ayrıca silindirler üzerine etki eden sürüklenme katsayıları ise rüzgar tüneline gerçekleştirilen kuvvet ölçüm deneyleri yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 50 mm dış çapı (D) olan paslanmaz çelikten üretilmiş içi boş dairesel silindirler kullanılmıştır. Silindirler, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelik levha kullanılarak imal edilmiştir. Yalın silindir (yarıksız) referans model olarak kullanılmakla birlikte, su jeti yardımıyla silindirlerin merkez hattı boyunca kesilerek yarık açılmış ve farklı yarık oranlarına sahip modeller hazırlanmıştır. Silindirlerin toplam uzunluğu 400 mm olup, yarıkların uzunluğu ise 390 mm olarak

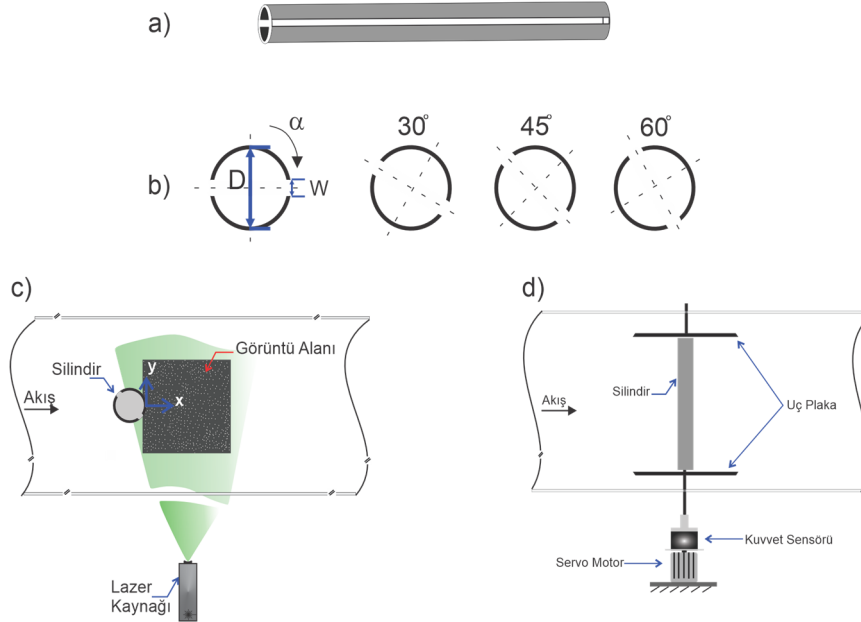
belirlenmiştir. Test edilen üç farklı durum için yarık genişlikleri (w) sırasıyla 2 mm, 8 mm ve 10 mm olarak seçilmiştir. Bu değerlerin ve silindir çapı ile boyutsuzlaştırılması ile tüm deneyler $w_1/D = 0,04$, $w_2/D = 0,16$ ve $w_3/D = 0,20$ oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, bu yarıklı silindirler üç farklı akış geliş açısı (ya da akışa göre hücum açısı), $\alpha = 30^\circ$, 45° ve 60° olacak şekilde akışa konumlandırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1a ve 1b’de sırası ile yarık açılmış içi boş silindirin ve farklı geliş açısı oryantasyonlarının şematik gösterimi sunulmuştur.

Şekil 1c’de ise su kanalı üzerine kurulan PIV düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, sistemin orijini silindirin uç noktasına yerleştirilmiştir. Görüntü alanı $145 \times 145 \text{ mm}^2$ ($2,9D \times 2,9D$) olacak şekilde ayarlanmıştır. PIV deneyleri sırasında türbülans şiddeti %1’in altında olacak şekilde silindir çapına göre Reynolds (Re) sayısının 10000 değeri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için, silindir çapına göre su kanalında serbest akım hızı $U_\infty = 0,23 \text{ m/s}$ ve rüzgar tüneline serbest akım hızı $U_\infty = 3,07 \text{ m/s}$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, seçilen Reynolds sayısı, alt kritik akış rejimindeki gerçek koşulları yansıtmak amacıyla belirlenmiştir [28–30].

Akış karakteristiklerinin belirlenmesinde, su içerisine karıştırılan gümüş kaplı parçacıklar çift darbeli Nd:YAG lazer kaynağı (100 mJ, 532 nm) ile aydınlatılmış; görüntüler ise 4 MP çözünürlüğe sahip CMOS kamera (2048×2048 piksel) ve Nikon 50 mm f/1.8 lens kullanılarak elde edilmiştir. Her deneyde 15 Hz frekansıyla 1000 görüntü alınmış, iki ardışık görüntü arası zaman farkı 1,75 ms olarak belirlenmiştir [31,32]. Görüntüler 32×32 piksel çözünürlükte ve %50 örtüşme oranı ile işlenmiş; böylece her alan için 127×127 vektörlük bir çözünürlük elde edilmiştir. Vektör alanlarının doğruluğu, FFT korelasyon yöntemi, Gauss fonksiyonu, yerel medyan filtresi ve yerel ortalama teknikleriyle sağlanmıştır. Görüntü işleme ve veri analizleri TSI tarafından geliştirilen Insight 4G yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 1d’de kuvvet ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Kuvvet ölçümleri, 1000 Hz örnekleme frekansı ile 20 saniye süresince veri toplayan bir rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, 50 N kapasiteli, 50 mN çözünürlüğe sahip bir kuvvet sensörü kullanılmıştır. Rüzgar tüneli deneyleri, PIV deneyleri ile tutarlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için aynı Reynolds sayısında yürütülmüştür.

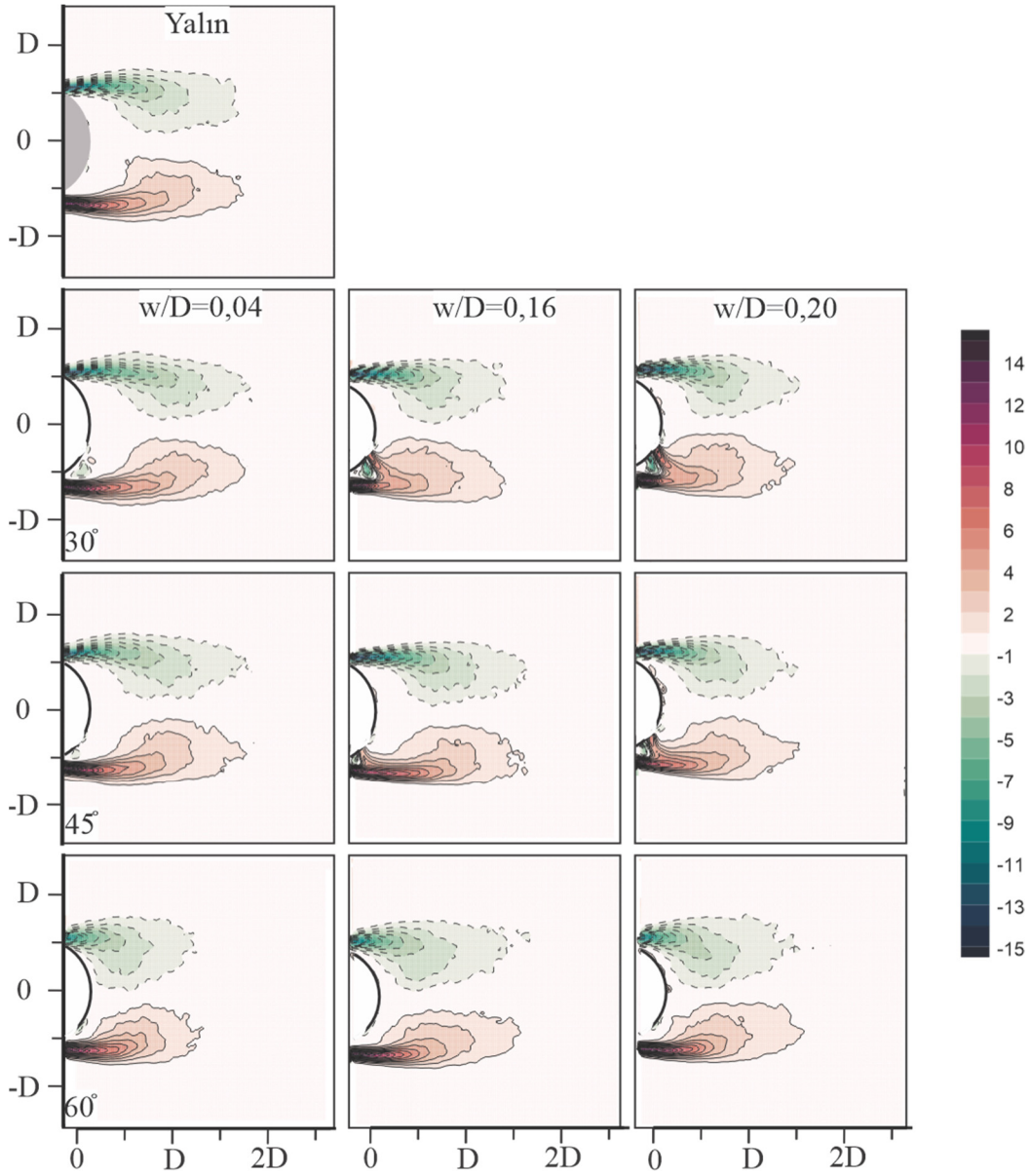


Şekil 1. Şematik deney düzeneği (a) yarık açılan içi boş silindir, (b) geliş açılarının gösterimi, (c) PIV düzeneği ve (d) kuvvet ölçüm sistemi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

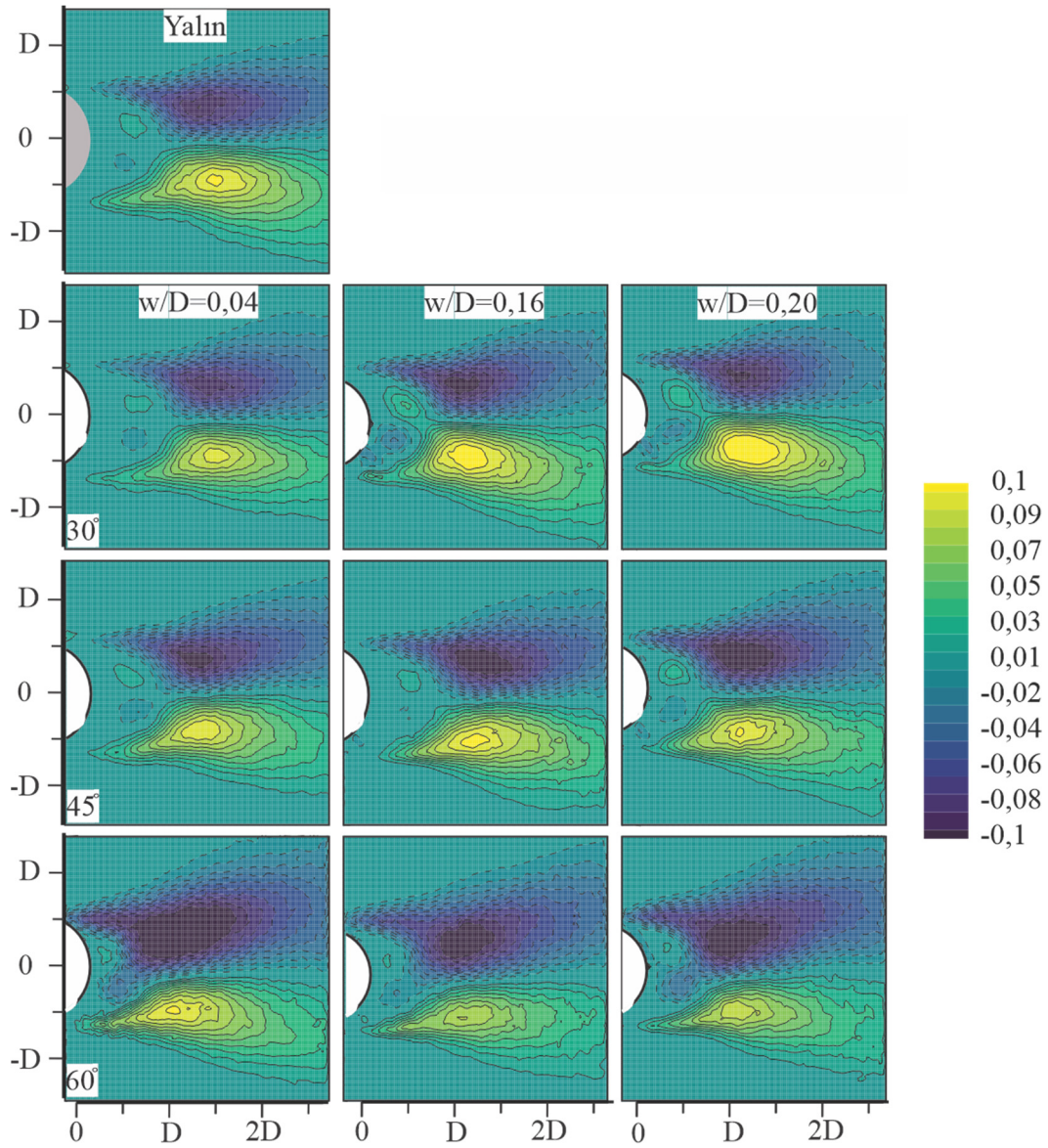
Bu kısımda, PIV ve kuvvet ölçümleri sonucu elde edilen bulgular silindirin art izindeki akış karakteristiklerini detaylı bir şekilde ortaya koymak amacıyla sunulmaktadır.

Şekil 2’de farklı yarık oranları ($w/D=0,04, 0,16$ ve $0,20$) ve akış geliş açıları ($30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) için normalize edilmiş zaman ortalamalı girdap (ω) konturları sunulmuştur. Yalın silindir durumunda, silindir art izinde karakteristik von Karman girdap yapısının net bir şekilde oluştuğu ve pozitif-negatif girdaplı bölgelerinin simetrik bir dağılım sergilediği görülmektedir. İçi boş yarık açılmış silindirler saat yönünde döndürülerek $30^\circ, 45^\circ$ ve 60° olan durumların girdap konturları incelenmiştir. Yarıklı silindir konfigürasyonlarında, akış geliş açısı ve yarık oranının girdap yapısı üzerinde belirgin etkileri gözlenmektedir. Belirli yarık oranlarında, yarığın olduğu $y = -0,5D$ civarında (silindirin alt tarafı) oluşan jet etkisiyle hem pozitif hem de negatif girdap konturlarının oluşumu gözlemlenmiştir. 30° akış geliş açısında, $w/D=0,04$ oranı için girdap konturları yalın silindire benzer karakteristik gösterirken, yarık oranının artmasıyla ($w/D=0,16$ ve $0,20$) girdap yoğunluğunda azalma ve art iz bölgesinde simetrik olmayan bir yapı ortaya çıkmaktadır. 45° akış geliş açısında, yarık etkisi $w/D=0,04$ ve $0,16$ durumları için yalın silindire benzer bir durum gösterirken; $w/D=0,20$ oranında girdap konturları silindire yaklaşımaya başlamış ve konturların genişliği azalmıştır. 60° akış geliş açısında ise, tüm yarık oranları için girdap yapısının en fazla değişime uğradığı görülmektedir. Bu durumda, yarığın akışa etkisi maksimum seviyeye ulaşmış olup girdap konturları bütün durumlar için silindir yüzeyine yaklaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, yarıklı silindirlerin saat yönünde dönmelerinden dolayı negatif girdap konturlarının genişliği pozitif olanlara göre daha fazla olduğu bu açı değeriinde daha net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2. Zaman ortalamalı girdap (ω) konturları

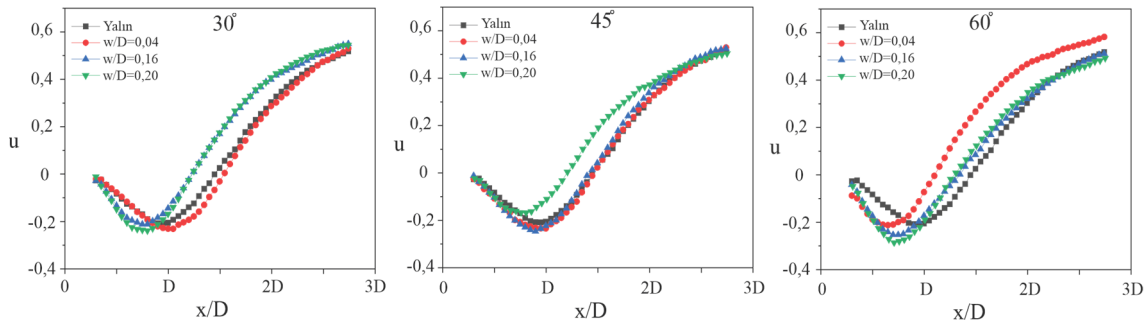
Şekil 3'te bütün yarık oranları ve akış geliş açıları için normalize edilmiş Reynolds kayma gerilmesi ($u'v'/U_\infty^2$) konturları gösterilmiştir. Yalın silindir durumunda, silindir art izinde yoğun Reynolds kayma gerilmesi bölgelerinin oluştuğu ve bu bölgelerin simetrik bir dağılım sergilediği görülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi değerleri silindir yakın art iz bölgesinde ($x/D \approx 1,5$) yoğunlaşmıştır. 30° akış geliş açısında, $w/D = 0,04$ oranı için Reynolds kayma gerilmesi dağılımı yalın silindire benzer karakteristik göstermekte ancak yarık varlığının etkisiyle kayma gerilmesi yoğunluğunda bir azalma gözlenmektedir. Yarık oranının $w/D = 0,16$ ve $0,20$ değerlerine artmasıyla, kayma gerilmesi bölgelerinin genişlemeye başladığı ve yarığın yönlenme durumundan dolayı pozitif $u'v'$ değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yarıktan geçen akışın momentum transferini etkilediğini ve türbülans yapısını modifiye ettiğini göstermektedir. 45° akış geliş açısında, yarıktan oluşan momentum transferinin etkisi bütün yarık oranları için yalın silindire benzer sonuçlar göstermesine rağmen; tüm durumlarda maksimum $u'v'$ lokasyonu silindir yüzeyine yaklaşmıştır. 60° akış geliş açısında ise, artan yarık oranları için pozitif Reynolds kayma gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, negatif kayma değerleri jetin etkisiyle hem silindir yüzeyine yaklaşmışlardır hem de genişlik oranları artmıştır.



Şekil 3. Reynolds kayma gerilmesi ($u'v'$) konturları

Farklı akış geliş açıları için silindir orijininin akış yönü normalize edilmiş hız dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur. Bu şekil sayesinde, art iz bölgesindeki hız profilinin yarık oranına bağlı değişimini açıkça ortaya koymaktadır. Yalın silindir durumunda hız profili art izinde ters akış bölgesinden dolayı önce negatif

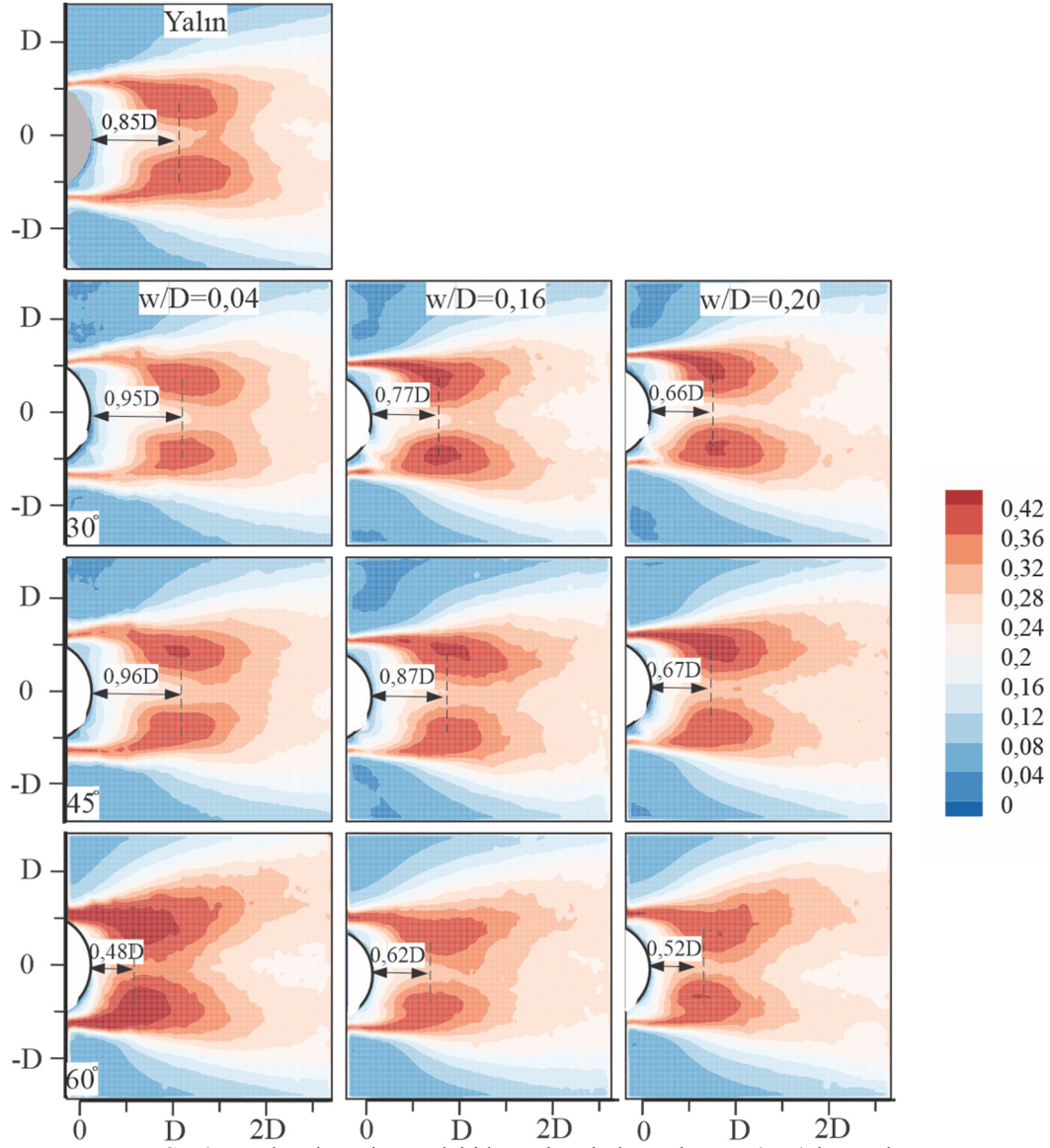
değerler aldığı daha sonra pozitif değerler olarak art izinin toparlandığı görülmektedir. 30° akış geliş açısında, $w/D=0,04$ konfigürasyonu, yalın silindire benzer bir davranış sergilemektedirler. Yarık oranının artmasıyla, hız profilleri art iz bölgesinde daha hızlı toparlandığı gözlemlenmektedir. 45° akış geliş açısına geldiğimizde, $w/D=0,04$ ve 0,16 yarık oranlarının hız profilleri yalın silindir ile yakın bir eğilim içinde oldukları gözlemlenmiştir. $w/D=0,20$ oranında minimum hız değerinin iyileşme olduğu görülürken, art izinin silindire daha yakın konumda toparlandığı gözlemlenmiştir. 60° akış geliş açısında ise, yarıklı silindirlere minimum hız daha düşük değerler almakla birlikte konumu silindir yüzeyine doğru kaymıştır. En düşük yarık oranı olan $w/D=0,04$ minimum hız değerleri artarak silindir art izinin toparlanması hızlanmıştır. Buna karşılık $w/D=0,16$ ve 0,20 profilleri daha düşük minimum değerler alması sonucu art izi daha yavaş bir toparlanma sergilemiştir. Dikkat çekici olan, bu akış geliş açısında yarıklı silindirlere hız profillerinin çok daha hızlı toparlanması olarak not düşülebilir. Sonuç olarak, yarıklı silindirlere hem yarık oranının hem de akış geliş açısının art izde oluşan ters akış bölgesinin büyüklüğü ve toparlanma mesafesi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya konmuştur. Küçük yarık oranlarında özellikle yüksek açılarda, ters akış bölgesinin kısalması silindir yüzeyine yaklaştığı, büyük yarık oranlarında ise ters akış bölgesinin büyük geliş açıları için uzadığı gözlemlenmiştir.



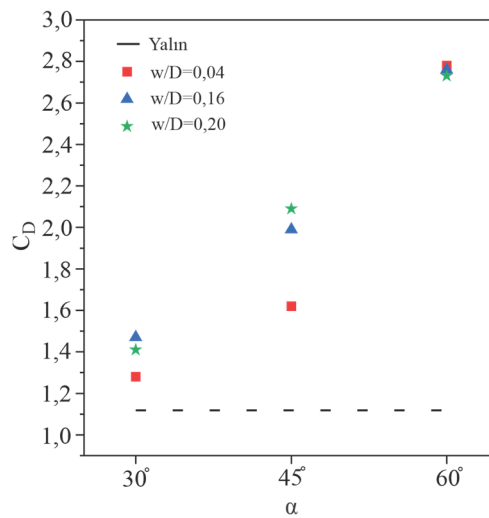
Şekil 4. Ortalama akış hızı (u) dağılımının 30°, 45° ve 60° geliş açıları için gösterilmesi

Şekil 5'te ise normalize edilmiş akış doğrultusundaki hızın karekök ortalaması (u_{rms}/U_∞) sunulmuştur. Ayrıca, şekil üzerinde maksimum u_{rms} lokasyonların uzunluğu girdap oluşum uzunluğunu göstermektedir [33]. Yalın silindir durumunda, maksimum u_{rms} değerlerinin konumu silindirin uç noktasında 0,85D mesafede yer almaktadır. u_{rms} konturları, silindir art izinde yoğun türbülans bölgelerinin simetrik dağılımını göstermektedir. 30° ve 45° akış geliş açılarındaki yarık etkisinin girdap oluşum uzunluğu üzerinde belirgin etkileri gözlemlenmektedir. 30° ve $w/D=0,04$ oranı için girdap oluşum uzunluğu 0,95D'ye artarken, $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında sırasıyla 0,77D ve 0,66D'ye azalmaktadır. Bu durum, artan yarık oranının girdap oluşumunu silindire daha yakın bölgelerde oluşmasına neden olduğunu ve akış yapısını önemli ölçüde modifiye ettiğini göstermektedir. 45° için ise $w/D=0,04$ oranında girdap oluşum uzunluğu 0,96D seviyesinde kalırken, $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında sırasıyla 0,87D ve 0,67D değerlerine ulaşmaktadır. Bu akış geliş açısında yoğun u_{rms} değerlerinin de yarığın pozisyonlanmasından dolayı silindirin üst tarafına doğru yöneldiği ve türbülans yoğunluğun belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. 60° geliş açısında ise, yarık etkisinin en dramatik sonuçları ortaya çıkmaktadır. $w/D=0,04$ oranında girdap oluşum uzunluğu 0,48D'ye düşerek yalın silindire göre %42 oranında silindir yüzeyine yaklaştığını göstermektedir. $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında ise sırasıyla 0,62D ve 0,52D değerleri elde edilmiştir. Bu akış geliş açısında, maksimum u_{rms} değerlerinin artan yarık oranı ile azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 6'da ise sürüklenme katsayısı (C_D) değerleri yalın silindir ve yarık açılan silindirlere farklı akış geliş açıları için sunulmuştur. Yalın dairesel silindir için kesikli çizgi ile gösterilen değer literatürde benzer şartlar için görülmektedir [34–36]. Yarıklı silindir konfigürasyonlarında ise akış geliş açısı ve yarık oranına bağlı olarak belirgin değişimler gözlemlenmektedir. Artan akış geliş açısı ile birlikte C_D değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. 60° akış geliş açısında ise, yarık geometrisinin akış üzerindeki etkisinin maksimum seviyeye çıktığını ve yarık oranından bağımsız olarak benzer sürüklenme karakteristiği sergilendiğini göstermektedir. Benzer şekilde literatürde, artan akış geliş açısı ile birlikte C_D değerinin arttığı gözlemlenmektedir [11]. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen C_D değerlerinin, yarık pozisyonun akışa göre dik ya da paralel konumlanmasından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [10]. Bunun nedeni, yarık aracılığıyla içi boş silindirlere daha fazla akış nüfuz etmesi sonucu silindir üzerinde ek bir basınç kaybına yol açmakta ve momentum transferindeki değişim nedeniyle artan açı ile birlikte C_D değerinin bir plato seviyesine ulaşmasıdır.



Şekil 5. Akış doğrultusundaki hızın karekök ortalaması (u_{rms}) konturları



Şekil 6. Sürüklenme katsayısı (C_D) dağılımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında yarık açılmış içi boş dairesel silindirin art izindeki akış yapısı akışın geliş açısına göre 30° , 45° ve 60° durumları deneysel olarak Reynolds sayısının (Re) 10000 olduğu durum için incelenmiştir. Yarıklar saat yönünde döndürülerek bu açı dereceleri elde edilmiş ve akış karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar:

- Yarıklı silindirler, silindirin alt tarafında oluşturdukları jet etkisiyle ek girdap konturları meydana getirmişlerdir. Küçük yarık oranlarında ($w/D=0,04$) girdap genişliği yalın silindire yakın kalırken, yüksek oranlarda ($w/D=0,16 - 0,20$) genişlik azalmış ve girdap konturlarının simetrik yapısı düzensizleşmiştir.
- Hız profillerine baktığımızda, 30° ve 45° akış geliş açılarında daha büyük yarık oranları için minimum hız değerlerinde iyileşme olduğu belirlenirken, art izinin silindire daha yakın konumda toplanmasına neden olmuş ve 60° 'de $w/D=0,04$ için minimum hız değerleri artarak silindir art izinin toplanması hızlanmıştır.
- Artan yarık oranı, Reynolds kayma gerilmesi konturlarının genişliği artmış ve u_{rms} maksimum lokasyonunu silindir yüzeyine yaklaştırmıştır. Girdap oluşum uzunluğu, $w/D=0,04$ için 30° ve 45° akış geliş açılarında yalın silindire göre artarken, $w/D = 0,20$ 'de belirgin biçimde kısalmıştır. 60° akış geliş açısı için ise tüm yarık oranlarında girdap oluşum uzunluğu yalın silindire göre azalmış olduğu gözlemlenmiştir.
- Yarıktan içeri nüfuz eden akıştan dolayı içi boş silindir üzerine sürüklenme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. C_D değerleri akış geliş açısıyla birlikte artmış; 60° 'de yarık oranından bağımsız olarak benzer sürüklenme seviyeleri elde edilmiştir.

Elde edilen bulgular, art iz akış karakteristiğini inceleme de yarık oranı ve akışın geliş açısının eşzamanlı optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan PIV ölçümleri için laboratuvar imkânı sağlayan Sakarya Üniversitesi'nden Doç. Dr. Nehir Tokgöz'e ve rüzgar tüneli deneyleri için laboratuvar desteği veren Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nden Doç. Dr. Tahir Durhasan'a teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

1. Rockwell, D. (1998). Vortex-body interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 199-229.
2. Karasu, İ. & Tümse, S. (2021). The turbulence intensity effect on the flow characteristics and aerodynamics of a circular cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 901-912.
3. Rashidi, S., Hayatdavoodi, M. & Esfahani, J.A. (2016). Vortex shedding suppression and wake control: A review. *Ocean Engineering*, 126, 57-80.
4. Feshalami, B.F., He, S., Scarano, F., Gan, L. & Morton, C. (2022). A review of experiments on stationary bluff body wakes. *Physics of Fluids*, 34(1), 011301.
5. Thompson, M.C., Lewke, T. & Hourigan, K. (2021). Bluff bodies and wake-wall interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53(1), 347-376.
6. Choi, H., Jeon, W.-P. & Kim, J. (2008). Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 113-139.
7. Ran, Y., Deng, Z., Yu, H., Chen, W. & Gao, D. (2023). Review of passive control of flow past a circular cylinder. *Journal of Visualization*, 26(1), 1-44.
8. Gao, D.-L., Chen, W.-L., Li, H. & Hu, H. (2017). Flow around a circular cylinder with slit. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 287-301.
9. Viets, H. (1975). Flip-flop jet nozzle. *AIAA Journal*, 13(10), 1375-1379.
10. Aksoy, M.M. (2025). Experimental investigation of wake flow characteristics of slotted hollow circular cylinder. *Ocean Engineering*, 341, 122584.

11. Gao, D.-L., Chen, W.-L., Li, H. & Hu, H. (2017). Flow around a slotted circular cylinder at various angles of attack. *Experiments in Fluids*, 58(10), 132.
12. Kim, J., Chae, S. & Kim, J. (2023). Flow control over a circular cylinder using a slot and axially arranged holes. *Ocean Engineering*, 287, 115794.
13. Firat, E., Ozkan, G.M. & Akilli, H. (2017). PIV measurements in the near wakes of hollow cylinders with holes. *Experiments in Fluids*, 58(5), 39.
14. Firat, E., Ozkan, G.M. & Akilli, H. (2019). Flow past a hollow cylinder with two spanwise rows of holes. *Experiments in Fluids*, 60(11), 163.
15. Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G.M., Akilli, H. & Sahin, B. (2019). The effect of shroud on vortex shedding mechanism of cylinder. *Applied Ocean Research*, 84, 51-61.
16. Sun, C., Azmi, A.M., Zhu, H., Zhou, T. & Cheng, L. (2021). Experimental study on wake structures of a circular cylinder enclosed in a screen shroud using PIV. *Ocean Engineering*, 230, 109056.
17. An, M., Li, S., Sorokin, V., Chen, Z. & Flay, R.G.J. (2024). Experimental study of vortex-induced vibration of stay cables installed with two types of perforated shroud light devices. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 253, 105882.
18. Özkan, G.M., Durhasan, T. & Pinar, E. (2020). Kavisli delikli plaka ile girdap kaynaklı türbülanslı akışın kontrolü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1021-1030.
19. Tunay, T. (2023). Numerical investigation of the passive flow control around a circular cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 243-252.
20. Karasu, İ. (2020). Flow control over a diamond-shaped cylinder using slits. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112, 109992.
21. Durhasan, T. (2020). Flow topology downstream of the hollow square cylinder with slots. *Ocean Engineering*, 209, 107518.
22. Ekinci, F., Durhasan, T. & Akilli, H. (2023). Silindir art izindeki daimi olmayan girdapların kılavuz plakalar yardımı ile bastırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 593-601.
23. Güler, E., Pinar, E. & Durhasan, T. (2024). The effect of riblets on the aerodynamic performance of NACA 0018 airfoil. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 119-132.
24. Eroğlu, A.E., Durhasan, T., Jafari, J.R. & Karasu, İ. (2025). Experimental investigation of local flexible surface on Aerodynamic Effects for Finite Wing with NACA0018 Section. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 61-68.
25. Hsu, L.-C. (2021). Heat transfer of flow past a cylinder with a slit. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106582.
26. Anh, D.T., Dan, T.C., Thanh, P.N., Tanim, A.H., Wright, D., Pham, N.T. & Nguyen Anh, T. (2025). Hydraulic performance and wave transmission through nature-inspired perforated hollow-base piles breakwater. *Ocean Engineering*, 322, 120423.
27. Taj, Z.U.D., Bista, S. & Balachandar, R. (2025). Passive flow control in the wake of bed-mounted cylinders: A review and new experimental insights. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, 1595832.
28. Lin, J.-C., Towfighi, J. & Rockwell, D. (1995). Instantaneous structure of the near-wake of a circular cylinder: On the effect of Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 9(4), 409-418.
29. Derakhshandeh, J.F. & Alam, M.M. (2019). A review of bluff body wakes. *Ocean Engineering*, 182, 475-488.
30. Lekkala, M.R., Latheef, M., Jung, J.H., Coraddu, A., Zhu, H., Srinil, N., Lee, B.-H. & Kim, D.K. (2022). Recent advances in understanding the flow over bluff bodies with different geometries at moderate Reynolds numbers. *Ocean Engineering*, 261, 111611.
31. Tokgoz, N. (2019). Experimental and numerical investigation of flow structure in a cylindrical corrugated channel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157-158, 787-801.
32. Durhasan, T. (2020). Passive flow control over an airfoil by control rod at low Reynolds number. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(06), 1819-1933.
33. Zhu, H., Zhao, H. & Zhou, T. (2019). Direct numerical simulation of flow over a slotted cylinder at low Reynolds number. *Applied Ocean Research*, 87, 9-25.
34. Breuer, M. (2000). A challenging test case for large eddy simulation: High Reynolds number circular cylinder flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(5), 648-654.
35. Yuce, M.I. & Kareem, D.A. (2016). A numerical analysis of fluid flow around circular and square cylinders. *Journal AWWA*, 108(10), 546-554.
36. Najafi, L., Firat, E. & Akilli, H. (2016). Time-averaged near-wake of a yawed cylinder. *Ocean Engineering*, 113, 335-349.