

## Girdap yaratıcıların dairesel silindir etrafındaki akışa etkisi

Uğur Oral ÜNAL\*, Ömer GÖREN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Dairesel silindir etrafındaki akım, son derece karmaşık yapısı ve mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan bir akım tipi olması nedeniyle, yaklaşık bir asırdır hidro-aerodinamik alanda araştırmacıların temel konularından birisi olmuştur. Öte yandan, sınır tabaka ayrılması özellikle dolgun cisimler etrafındaki akışı değiştirerek büyük miktarda enerji kaybına yol açan bir olaydır. Buna bağlı olarak, hidro-aerodinamik pek çok aracın performansı akım ayrılmasının yeri tarafından kontrol edilmektedir. Akım ayrılmasının engellenmesi ya da geciktirilmesi için kullanılan en etkili yöntemlerden biri pasif girdap yaratıcılarıdır. Girdap yaratıcılar, neden oldukları sınır tabaka içine gömülen girdaplardan dolayı oluşan makro ölçekteki hareketler ile duvar yakınındaki akışın yeniden düzenlenmesini sağlamaktadır. Çalışmadaki amaç, girdap yaratıcıların dairesel silindir etrafındaki akışa ve girdap oluşma mekanizmasına olan etkilerinin deneysel olarak ortaya konmasıdır. Çalışmada, dairesel silindirin yakın iz bölgesi DPIV ile görüntülenmiştir. Deneyler, Newcastle Üniversitesi Emerson Kavite Tüneli'nde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1.6 mm yüksekliğinde, akış yönüne  $\pm 10$  derece açı yapacak şekilde kullanılan girdap yaratıcıların silindir çevresine dört farklı açıda yerleştirildikleri vakalar ve girdap yaratıcı içermeyen yalın silindir vakası yer almaktadır. Çalışmadaki Reynolds sayısı 41300 ve buna karşılık gelen silindir akış rejimi ise kritik-altı rejimdir. Ölçümlenen akış alanlarının analizi, Reynolds Ayrıştırması ve POD olmak üzere, iki ayrı türbülanslı akış alanı ayrıştırma tekniği ile gerçekleştirilmiştir. İz bölgesindeki girdaplılık, gerilme dağılımı, salınım frekansı gibi pek çok akış özelliği ortaya konmuştur. Yalın silindir vakası için yapılmış olan ölçümler literatür ile karşılaştırılmıştır. Girdap yaratıcıların etkisi, vakaların kendi aralarında ve yalın silindir ile karşılaştırmaları ile belirlenmiş, sonuçlar tartışılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Dairesel silindir etrafındaki akış, girdap yaratıcılar, DPIV.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Uğur Oral ÜNAL. [ounal@itu.edu.tr](mailto:ounal@itu.edu.tr); Tel: (212) 285 64 25.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Girdap yaratıcıların dairesel silindir etrafındaki akışa etkisinin deneysel ve hesaplamalı olarak incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 26.07.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 01.11.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Effect of vortex generators to the flow around circular cylinder

### Extended abstract

Flow around a circular cylinder has been one of the basic research subjects in hydro-aerodynamics area in almost a hundred years. Related to its complex flow characteristics there are many aspects that make this topic most interesting including surface curvature of the cylinder, severe adverse pressure gradient, massive flow separation, oscillation of the separation point, unstable wake and hence vortex shedding, high sensitivity to free stream properties, aspect ratio, blockage, vortex street formation and completely variable flow pattern between flow regimes. Besides, boundary layer separation causes large energy losses especially by changing the flow pattern around bluff bodies. Accordingly, the performance of many hydro-aerodynamic vehicles is controlled by the location of the separation point. Thus, besides the importance of the separation control as a basic research subject, it can be regarded as an important engineering problem. One of the most effective methods used for preventing and delaying flow separation is the use of passive vortex generators. The macro scale motions of the vortices embedded in the boundary layer caused by the vortex generators provide over tuning of the flow in the vicinity of the wall. Thus, two important subjects of the fluid mechanics are considered in this study. The aim of the study is to experimentally investigate the effect of the streamwise vortex generators on the flow around circular cylinder and vortex formation mechanism. Wake oscillations of the circular cylinder and vortex shedding is visualized with digital PIV system which is the most suitable measurement system for determination of the general flow topology such as vortex structures and stress distribution. The experiments are conducted at Emerson Cavitation Tunnel, School of Marine Science and Technology, Newcastle University. The study consists of five cases including bare cylinder and four cases with vortex generators in which the generators are located at 50, 60, 65, and 70 degrees angles from the first stagnation point. The bare cylinder and vortex generators cases are coded as VG0000, VG1650, VG1660, VG1665, and VG1670, respectively. Vane type vortex generators which are 1.6 mm in height are paced with  $\pm 10$  degrees sweep angles on the cylinder. The Reynolds number investigated is 41300,

which corresponds to the sub-critical flow state. All the measurements were conducted at the midspan of the cylinder and the measurement area according to the cylinder diameter was  $2.6D \times 0.9D$ , in  $X$  and  $Y$  directions, respectively. The free stream velocity was 0.588 m/s and the inlet turbulence intensity and turbulence length scale of the free stream at this velocity were 1.73% and  $0.22D$ , respectively. The analysis of the flow fields extracted from the PIV images are processed with two different turbulent flow field decomposition techniques including Reynolds decomposition, and Proper Orthogonal Decomposition (POD). The flow properties such as vorticity, stress distribution and oscillation frequency are derived from the analysis. The results of the measurements conducted for the bare cylinder are compared with the data in the open literature. These indicate that the results are in good agreement with the results of the similar studies in literature. Experimental results show that the vortex generators highly affect the near wake and hence the boundary layer of the cylinder. First of all, Reynolds averaged flow fields indicate that the shear layers get closer to each other, bend towards the centerline, and the width of the near wake decreases. These events clearly indicate that the flow separation is delayed on the measurement plane. One can observe that the vortex formation length and the wake closure length are increased considerably with the downstream motion of the separation location as shown in the literature. The amount of the global mean circulation in the flow fields is also increased because of the vortex generators while the width of the shear layers is decreased. The more concentrated pattern of the shear layers provide the vortex formation process to occur at a longer distance from the cylinder. It is expected that the increase in the vortex formation length causes the low pressure area behind the cylinder to move with the vortices and hence decreases the suction at the rear side of the cylinder. With the displacement of the shear layers towards the wake centerline and the thinning of the shear layers, the Strouhal number is increased approximately 41% at VG1650, and then is decreased slowly probably due to the reduction of strength of the forming vortex. It is obvious that the strength of the stresses due to both turbulent and coherent motions decreases because of the vortex generators.

**Keywords:** Flow around circular cylinder, vortex generators, DPIV.

## **Giriş**

Akışkanlar mekaniğinde klasikleşmiş problemlerden biri, dolgun cisimler etrafındaki akışın belirlenmesidir. Dolgun cisimler, gerilerinde oluşan daimi olmayan iz bölgesi ve buna bağlı girdap salgılanma süreci gibi ilginç yanları ile uzun yıllardan beri araştırmacıların ilgisini çekmektedirler. Dolgun cisimlere muhtemelen en iyi örneği dairesel silindir geometrisi teşkil etmektedir. Dairesel silindir, yüzey eğriselliği, yüksek ters basınç gradyanı, kuvvetli akım ayrılması, ayrılma noktasının salınımı, kararsız iz bölgesi ve girdap salgılanması, serbest akım türbülansı, yan oranı, boy/çap oranı gibi akış parametrelerine yüksek duyarlılık, girdap caddesi oluşumu, rejimden rejime bütünüyle değişen akış yapısı gibi kompleks bir akıştan beklenen tüm nitelikleri sunmasına bağlı olarak yaklaşık bir asırdır hidro-aerodinamik alanda araştırmacıların temel konularından birisi olmuştur. Bunun yanı sıra, dairesel silindir köprü ayakları, baca, payanda, elektrik kabloları, gemi ve anten direkleri, açık deniz platform taşıyıcıları ve petrol / gaz sondaj boruları gibi pek çok mühendislik uygulamasında da yer alan bir geometridir. Böylece söz konusu durum da, dairesel silindirin bu denli popüler yapan etkenlerden birisi olmaktadır. Dairesel silindir etrafındaki akışın temelde Reynolds sayısına bağlı olarak pek çok farklı ve kompleks rejim yapısı sergilemesinden dolayı karakteri hakkında genel bir kabulden söz edilmesi mümkün değildir. Bu durum akış rejimlerinin ve birbirleriyle olan ilişkilerinin ayrı ayrı değerlendirilmelerini gerektirmektedir. Basu (1985), Zdravkovich (1990), Williamson (1996) ve Zdravkovich (1997), dairesel silindir etrafındaki akış rejimlerinin temel karakteristiklerini ve rejimler arası geçişleri etkileyen Reynolds sayısı dışındaki faktörleri geniş kapsamlı biçimde ele almaktadırlar.

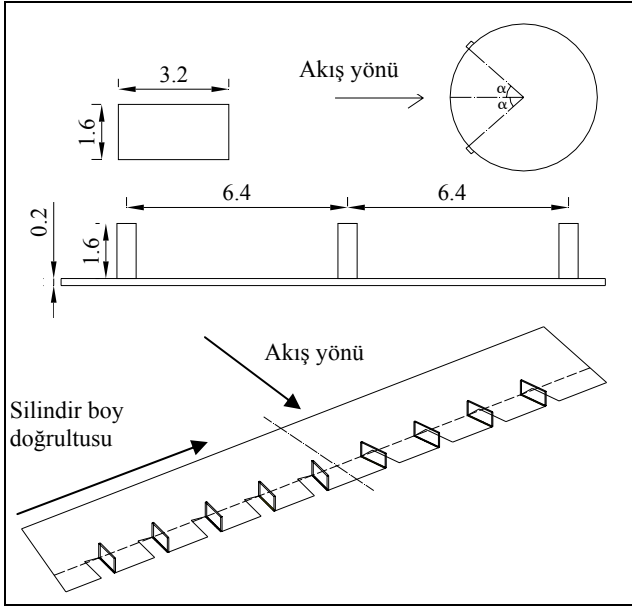
Öte yandan sınır tabaka ayrılması özellikle dolgun cisimler etrafındaki akışı değiştirerek büyük miktarda enerji kaybına yol açan bir olaydır. Buna bağlı olarak, hidro-aerodinamik pek çok aracın performansı akım ayrılmasının yeri tarafından kontrol edilmektedir. Böylece akım ayrılmasının kontrolü temel bir araştırma konusu

olmasının yanı sıra ekonomik anlamda da önemli bir mühendislik problemi olarak görülmektedir. Akım ayrılmasının çeşitli aktif ya da pasif yöntemlerle kontrol edilebilmesi mümkündür. Gad-el-Hak ve Bushnell (1991) akım ayrılması ve kontrol teknikleri hakkında geniş bir inceleme sunmaktadır. Akım ayrılmasının engellenmesi ya da geciktirilmesi için kullanılan en etkili yöntemlerden biri pasif girdap yaratıcılarıdır. Girdap yaratıcılar, neden oldukları sınır tabaka içine gömülen girdaplardan dolayı oluşan makro ölçekteki hareketler ile duvar yakınındaki akışın yeniden düzenlenmesini sağlamaktadırlar. Basit geometrilerden oluşan girdap yaratıcılar uygulanabilirliklerinin yüksek ve maliyetlerinin düşük olması sayesinde oldukça avantajlı ve yaygın biçimde kullanılan akış araçlarıdır. Lin (1999), Lin (2002) girdap yaratıcılar ile ilgili kapsamlı bir inceleme sunmaktadır.

Bu çalışmada akış yönündeki pasif girdap yaratıcıların dairesel silindir etrafındaki akışa etkisi incelenerek, akışkanlar mekaniğindeki iki önemli alan bir araya getirilerek ele alınmaktadır. Böylece girdap yaratıcıların dolgun bir cisim ile etkileşim mekanizması hakkında bilgi birikimi edinilmesi ve hidrodinamik alanda gemiler etrafındaki akışın girdap yaratıcılar vasıtasıyla iyileştirilmesine yönelik dizayn çalışmalarına temel teşkil etmesi amaçlanmıştır.

## **Deney düzeneği ve koşulları**

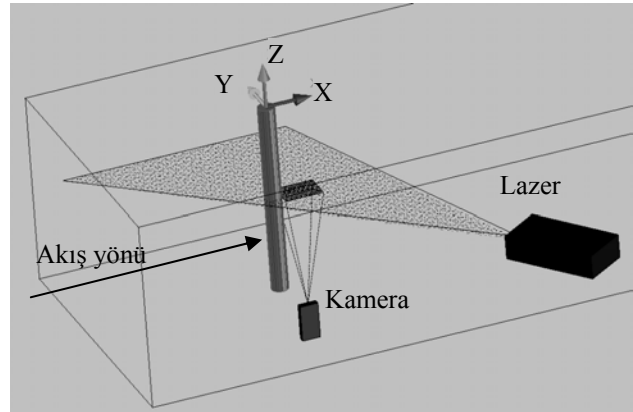
Silindirler tüm deneylerde, test edildikleri kavite tünelinin tabanına dik doğrultuda, merkezleri tünelin ölçüm bölümünün akımın geliş yönündeki başlangıcından 1.6 m uzaklığa ve tünelin eni doğrultusunda tam ortaya gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Tüm ölçümler silindirin yüksekliği doğrultusunda tam ortada, tabandan 0.4 m yükseklikte gerçekleştirilmiştir. Kamera üzerindeki objektif, maksimum ışık geçirgenliğinin sağlanabilmesi için f:2.8 diyafram açıklığına ayarlanarak lazerin aydınlatmakta olduğu düzleme netleştirilmiştir. Ölçüm alanının boyutları silindir çapına göre, X ve Y doğrultusunda sırasıyla, 2.6D ve 0.9D'dir. Şekil 1'de ölçüm düzeneğinin şematik bir görünüşü ve kullanılan koordinat sistemi görülmektedir.



Şekil 1. Girdap yaratıcıların şematik görüntüsü (Ölçüler milimetredir.)

Tüm vakalarda silindir çapına göre Reynolds sayısı  $Re=41300$  olarak belirlemiştir. Söz konusu Reynolds sayısı dairesel silindir etrafında sınır tabakanın laminar olduğu –genel tanımlamaya göre– kritik-altı akış durumuna karşılık gelmektedir (Zdravkovich, 1990). Boş tünel ölçümleri sırasında elde edilen sonuca göre, serbest akım türbülansı %1.73 ve entegral boy ölçüğü 0.016 m (0.22D)'dir. Her bir vaka için toplam 1910 adet fotoğraf çifti kaydedilmiştir. Kamerasının fotoğraf çifti modundaki ölçüm frekansı olan 4.5 Hz tüm vakalar için sabittir. Böylece her vaka için yaklaşık 425 sn süreyle ölçüm yapılmıştır. Bu süre,  $Re=41300$  için yalın silindir vakasında yaklaşık 650 girdap salgılanma periyoduna eşdeğerdir. Deneylerde tohumlama için 14  $\mu$ m parçacık çapına sahip ışığı yansıtma özellikleri yüksek gümüş kaplı cam tozlar kullanılmıştır. DPIV görüntülerinden hız alanlarına geçebilmek için çapraz korelasyon prosedürü uygulanmıştır. Çapraz korelasyonun hassasiyetini yakalayabilmek amacıyla her sorgu alanının içinde en az 15 adet tohum görüntüsü bulunması sağlanmıştır. Çapraz korelasyon teorisi ve dijital PIV ile ilgili ayrıntılı bilgileri Keane ve Adrian (1992), Willert ve Gharib (1991)'de bulmak mümkündür. Kameranın 1280x1024 olan piksel çözünürlüğü, inceleme alanları

32x32 piksel olarak belirlenip %50 üst üste binmelerinin sağlanmasıyla yatay eksen üzerinde 79 ve dikey eksen üzerinde 63 adet olmak üzere her akış alanı için toplam  $63 \times 79 = 4977$  adet hız vektörü elde edilmiştir. Bu da yaklaşık olarak her iki yönde de, her 2 mm mesafede bir vektör elde edilmesi anlamına gelmektedir. Silindir boyutuna göre elde edilen çözünürlük 0.028D değerindedir. Çalışmada, 70 mm çapında bir dairesel silindir ve sınır tabaka kalınlığı mertebesinde 1.6 mm yüksekliğinde konvansiyonel tipte dörtgen kesitli girdap yaratıcılar kullanılmıştır. Girdap yaratıcıların yükseklik/boy (h/L) oranları ile girdap yaratıcılar arasındaki mesafe ile yükseklik oranı (S/h) sırasıyla 0.5 ve 4 olarak belirlenmiştir. Girdap yaratıcılar belirli bir eksene göre simetrik olarak Şekil 2'de görüldüğü gibi akış yönüne  $\pm 10$  derece açı yapacak şekilde seçilmişler ve 0.2 mm et kalınlığına sahip, 50 mm genişliğindeki şerit halinde paslanmaz çelik malzemeden kesip katlama biçiminde üretilmişlerdir.



Şekil 2. Ölçüm düzeneğinin şematik görüntüsü

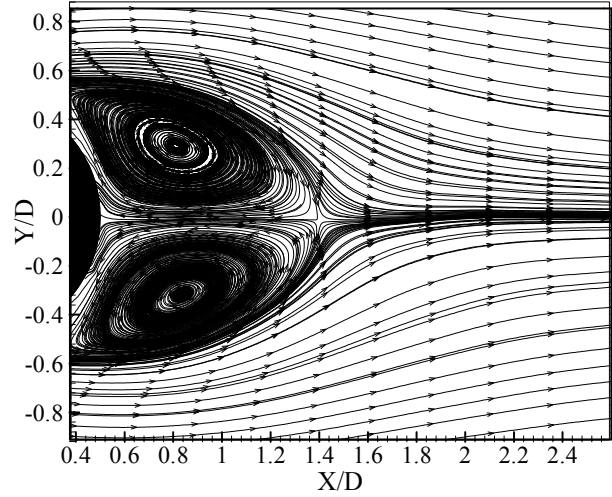
Farklı vakalar için, girdap yaratıcılar silindirin boyu doğrultusunda ilk durma noktasıyla  $\alpha$  derece açı yapacak şekilde Şekil 2'de en üstte sağda görüldüğü gibi akış yönünde, simetrik biçimde yerleştirilmişlerdir. Girdap yaratıcıların yerleştirileceği  $\alpha$  açıları, ayrılma çizgisine olan mesafe göz önüne alınarak sırasıyla 50, 60, 65 ve 70 derece olarak belirlenmiş ve söz konusu vakalar, sırasıyla, VG1650, VG1660, VG1665 ve VG1670 olarak kodlanmıştır. Yalın silindir vakası ise VG0000 biçiminde geçmektedir.

## Deneysel çalışma sonuçları

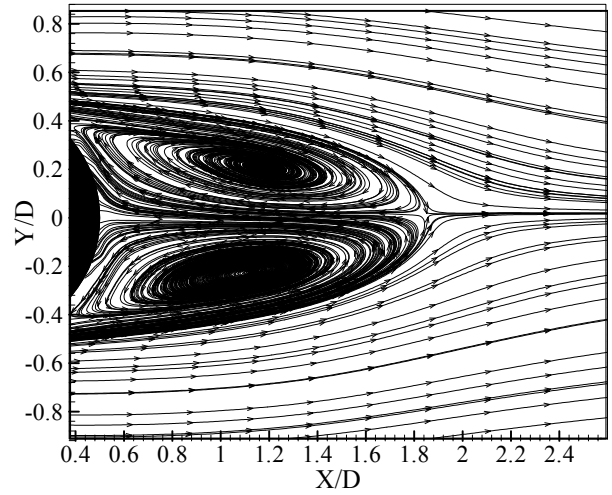
### Reynolds ayrıştırması analizi

Şekil 3 ve Şekil 4'te, sırasıyla VG0000 ve VG1670 vakaları için Reynolds ortalaması alınarak elde edilen akım hatları yer almaktadır. Yalın silindir için elde edilen kısa ve kalın iz bölgesi literatür ile uyumludur (Djeridi vd., 2004). Akım hatları, girdap yaratıcıların, silindirin yakın iz ve girdap oluşum bölgesinde yapmış oldukları etkinin nitelik olarak çok açık bir görüntüsüdür. Girdap yaratıcılı vaka da iz bölgesinin bariz biçimde uzadığı ve kalınlığının ciddi miktarda azaldığı görülmektedir. Ayrılma noktasından nispeten daha uzağa yerleştirilmiş girdap yaratıcıların etkileri arasında büyük farklar görülmezken girdap yaratıcıların yerleştirildikleri açının artarak ayrılma noktasına yaklaşması ile etki ani bir artış göstermektedir.

Girdap yaratıcıların ayrılmayı geciktirme mekanizmaları momentum transferine dayanmaktadır. Akış yönünde belirli bir açıyla durmakta olan girdap yaratıcılar uç kısımlarından itibaren akış yönünde helisel bir hız dağılımına neden olurlar (Gad-el-Hak ve Bushnell, 1991). Bu hareket, sınır tabakanın içerisinde, ters basınç gradyanı ve duvar kayma gerilmesi nedeniyle yavaşlamış ve enerjisini kaybetmiş akışkan zerrecilerinin dışarıdan gelen ve serbest akım hızına ve dolayısıyla yüksek momentuma sahip akışkan zerrecileri ile yer değiştirmelerini sağlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak sınır tabakadaki momentum seviyesinde yükselme olmaktadır. Böylece sınır tabaka içerisindeki akışın, ters etkilere karşı daha dayanıklı olması ve akış yönünde daha uzun süre hareket edecek enerjiyi bulabilmesi sağlanmış olur. Bunun bir sonucu olarak akım ayrılması hadisesi gecikmektedir. Girdap yaratıcı konum açısının artması, ilk açılar için girdap yaratıcıların akımın daha hızlı olduğu bölgeye yerleştirilmeleri anlamına gelmektedir. Bu da, açı arttıkça daha kuvvetli girdaplar üretmeleri demektir. Girdaplar akış yönünde ilerledikçe viskozitenin etkisiyle güç kaybedeceklerinden ayrılmaya yakın olmaları etkilerinin artmasına daha da katkı sağlamaktadır.



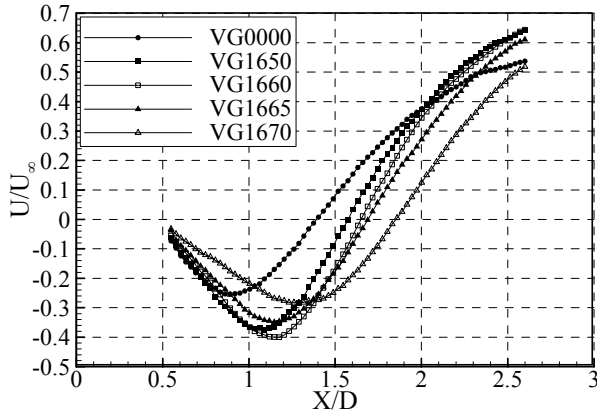
Şekil 3. VG0000 vakası Reynolds ortalaması ile elde edilmiş akım hatları



Şekil 4. VG1670 vakası Reynolds ortalaması ile elde edilmiş akım hatları

Şekil 5'te merkez yatay eksen üzerindeki akış yönünde global ortalama hız eğrileri tüm vakalar için karşılaştırmalı olarak görülmektedir. VG0000 vakasında  $X/D \approx 2.2$ 'den sonra sabit bir değere doğru yakınsama başlamışken, eğrilerin formundan girdap yaratıcılı vakaların  $X/D \approx 3$ 'ten gerideki bölgelerde daha yüksek hızlara sahip olacakları öngörülebilir. Girdap yaratıcılı vakalarda, eğrilerin sıfır hızı temsil eden ekseni kestiklerini noktanın silindir merkezinden uzaklığını ifade eden iz kapanma boyunun, girdap yaratıcıların konum açılarının artırılarak ayrılma noktasına (veya çizgisine) yaklaştırılmaları sonucunda büyük ölçüde uzadığı

gözlenmektedir. Benzer şekilde minimum hızların da -VG1660 ile VG1665 vakalarında çok net olmamakla beraber- girdap yaratıcı konum açılarının artması sonucunda pozitif X yönünde ötelenmeleri görülmektedir. Ters akım bölgesindeki minimum hız değerlerinin ise VG1650, VG1660 vakalarında VG0000 vakasına göre azalmakta, diğer iki girdap yaratıcılı vakada ise yükselişe geçmekte olduğu gözlenmektedir. Grafikten elde edilen kritik değerler Tablo 1'de derlenmektedir. Yalın silindir için ölçümlenen iz kapanma boyu 1.393 Norberg (1998) ile uyum içerisindedir. Girdap yaratıcı konum açısının 70 dereceye yükseltildiği VG1670 vakasında iz kapanma boyu  $l_c$ , %33 ve merkez yatay eksen üzerinde hızların minimum oldukları noktanın silindir merkezine olan uzaklığı  $l_U$ , %45 civarında artış göstermektedir.



Şekil 5. Merkez yatay ekseninde Reynolds ortalaması ile elde edilmiş hız profilleri

Akış yönündeki hız salınımlarının maksimum değerine ulaştığı noktanın silindir merkezine olan uzaklığı girdap oluşma boyu ( $l_f$ ) olarak tarif edilmektedir (Bloor ve Gerrard, 1966). Buna göre, ölçülen  $l_f$  değerlerinin, girdap yaratıcı konumlarının ayrılma çizgisine yaklaştırılmaları sonucunda iz kapanma boyuna uyumlu şekilde artış gösterdikleri görülmektedir.  $l_f$ 'in tüm vakalardaki değerleri Tablo 1'de mevcuttur. Girdap oluşma noktası, VG1670 vakasında VG0000 vakasına göre %44 kadar akış yönünde ötelenmektedir.  $l_f$ , tüm vakalarda  $l_c$ 'nin önünde, silindire daha uzak bir noktada yer almaktadır.

Buna ek olarak, girdap yaratıcıların konum açılarının artması sonucunda iki boy ölçeği arasındaki fark da giderek artmaktadır. Bu durum, girdap yaratıcıların etkisi ile büyümekte olan girdabın formunun değişmesi sonucunda çekirdeği ile merkez yatay eksenini kestiği nokta arasında belirli mesafe oluşarak, daha yayvan, iz eksenine paralel olmaya yakın biçimde oluştuğunu akla getirmektedir.

Tablo 1. Merkez yatay ekseninde karakteristik boy ölççekleri

	$l_U$	$l_c$	$l_f$
VG0000	0.891	1.393	1.403
VG1650	1.091	1.576	1.660
VG1660	1.176	1.649	1.688
VG1665	1.146	1.69	1.718
VG1670	1.289	1.853	2.030

Girdap oluşma boyunun uzamasını kayma tabakasındaki sirkülasyon ile de ilişkilendirmek mümkündür. Silindirin arkasındaki girdaplılık bölgesinden sınır tabaka sorumludur. Sirkülasyon, ilk durma noktasından itibaren yaratılmaya başlanarak tam ayrılma noktasından iz bölgesine yayılmaktadır. Tablo 2'de Reynolds ortalaması alınmış akış alanından hesaplanan girdaplılık değerlerinin, girdaplılığın, belirlenen bir değerden büyük olması kriteriyle tüm akış alanında integre edilmesiyle elde edilen ortalama sirkülasyon miktarları görülmektedir. Tabloya göre, kayma tabakasındaki sirkülasyon miktarının %20'ye varan oranlarda arttığı görülmektedir. Ayrıca girdaplılığın 4'den büyük olduğu bölgede bu oranın %70'e vardığı tespit edilmiştir. Tablo 3 boyutsuz girdaplılığın 1'den büyük olduğu durumlarda farklı kesitler için ölçülen kayma tabakası kalınlıklarını göstermektedir. Girdap yaratıcı açılarıyla kayma tabakaları giderek incelme eğilimindedir. Dolayısıyla sonuçlar, girdap yaratıcılı vakalarda kayma tabakasının daha yoğun ve dayanıklı olduğuna işaret etmektedir. Girdap oluşumu kayma tabakasının karşıdaki kayma tabakasının etkisiyle dağılmaya başladığı yerde meydana geldiğine göre, girdap yaratıcılı vakalarda daha uzun bir girdap oluşma bölgesi beklenmesi normaldir.

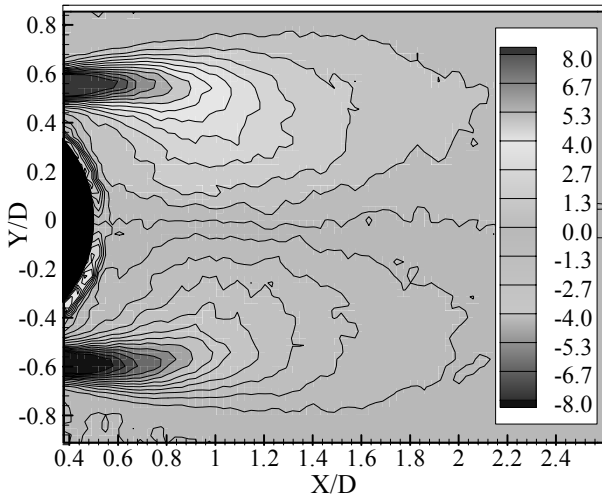
Şekil 6 ve Şekil 7’de görülen VG0000 ve VG1670 vakaları için girdaplılık konturlarından, özellikle  $\zeta \cdot D / U_\infty \geq 4 \sim 5$  olan boyutsuz değerlerin daha ince ancak daha uzun bir alana yayıldığı görülmektedir. Girdaplılık, açı arttıkça daha uzun süre kendini korumakta ve silindirden daha uzak noktalarda yaygınlaşmaya başlamaktadır.

Tablo 2. Reynolds ortalaması ile elde edilmiş sirkülasyon miktarı ( $Y/D > 0$ )

	$\Gamma$		
	$(\frac{\zeta \cdot D}{U_\infty} > 0)$	$(\frac{\zeta \cdot D}{U_\infty} > 1)$	$(\frac{\zeta \cdot D}{U_\infty} > 4)$
VG0000	2.269	1.711	1.173
VG1650	2.471	2.062	1.641
VG1660	2.529	2.134	1.762
VG1665	2.558	2.192	1.811
VG1670	2.707	2.407	1.978

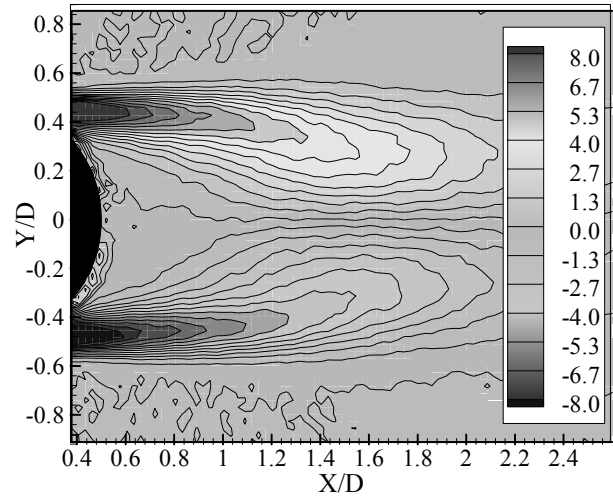
Tablo 3. Kayma tabakası kalınlıkları ( $\zeta > 1$ )

	$\frac{X}{D} = 0.6$	$\frac{X}{D} = 0.8$	$\frac{X}{D} = 1.0$	$\frac{X}{D} = 1.5$
	VG0000	0.502	0.617	0.658
VG1650	0.310	0.410	0.546	0.511
VG1660	0.261	0.394	0.535	0.500
VG1665	0.255	0.351	0.477	0.467
VG1670	0.271	0.338	0.424	0.488



Şekil 6. VG0000 vakası global ortalama girdaplılık konturları

Reynolds sayısının mevcut değerin üzerine çıkarılması ve giderek yükseltilmesi sonucunda sınır tabakada türbülansa geçiş ayrılma noktasına kadar varmaktadır (Basu, 1986). Reynolds sayısının daha da yükselmesi, sınır tabakada türbülansa geçişi başlatmış olur. Sınır tabakanın türbülansa geçmesi ile birlikte ayrılma noktasının yavaşça akış yönünde ilerlemeye başladığı bilinmektedir (Zdravkovich, 1997). Bununla birlikte girdap oluşma boyunda da artış görülmektedir. Tablo ve grafiklerden elde edilen sonuçlar bu olay ile benzerlik sergilemektedir. Girdap oluşma boyunun artması ve global ortalama akım hatlarında görüldüğü gibi iz bölgesinin narınlaşması net biçimde akım ayrılmasının gecikmesine işaret etmektedir.



Şekil 7. VG1670 vakası global ortalama girdaplılık konturları

Girdap yaratıcıların iz bölgesi nominal frekansına ve dolayısıyla da Strouhal sayısına etki etmesi beklenen bir durumdur. Zira girdap yaratıcıların etkisiyle iz bölgesinin yapısı büyük ölçüde değişmektedir. İz bölgesinin frekansı, girdapların oluşma ve salgılanma periyotlarına bağlıdır. Frekansı belirleyen mekanizma aslında oldukça karmaşıktır. Kayma tabakasındaki içine çekme ve buna bağlı olarak kayma tabakasındaki türbülans, kayma tabakası oluşma noktası, kayma tabakasının genişliği, ayrılma noktasından saçılan sirkülasyon ve başka yan etkenler iz bölgesi nominal frekansına toplu halde etki eden unsurlardan bazılarıdır. Bunların bir veya birkaçının çeşitli nedenler ile değişmesi neticesinde iz böl-



gesi de frekansını değiştirir. Bazense, bu bileşenlerin etkilerinin birbirlerine zıt olduğu durumlarda frekans değeri çok az değişir ya da hiç değişmez.

Tablo 4’te girdap yaratıcılı hallerin Strouhal sayısı üzerine yapmış olduğu etki yalın silindir ile birlikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yalın silindir vakası için elde edilen  $St = 0.186$  değeri Norberg (2003) ile uyumludur. Tablodan Strouhal sayısının %40 gibi büyük bir miktarda artarak, sonra giderek tekrar azaldığı ve VG1670 için VG0000’a göre %22 civarında bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu davranış Gerrard (1966a)’nın anlatmış olduğu pek çok frekans belirleyici niteliğin birlikte işleyişinden kaynaklandığını düşündürmektedir. VG1650’de kayma tabakası yoğunlaşmakta yani difüzyon azalmaktadır. Difüzyonun azalması ile oluşmakta olan girdabın ters tarafında bulunan kayma tabakasının da iz bölgesine girebilmesi kolaylaşacaktır (Gerrard 1966a). Aynı zamanda silindirin kesitinin her iki yanında oluşan kayma tabakalarının birbirlerine daha yakın hale geldikleri ve aralarındaki mesafenin azaldığı görülebilir. Buna göre her iki etkinin birlikte hareketinden kaynaklanan bileşkedeki dolayısı Strouhal sayısı ani bir artış göstermiştir. Daha sonraki durumlarda ise girdaplılık konsantrasyonu artarken kayma tabakaları da birbirlerine bir miktar daha yaklaşmışlardır. Ancak, türbülans bileşenlerinden de salınımın giderek söndüğü, dolayısıyla da meydana gelen girdapların daha güçsüz oldukları sonucu çıkartılabilir. Buna bağlı olarak bir girdabın salgılanması ve diğer taraftan zıt işaretli girdaplılığı içine çekebilmesi için gereken süre artacaktır. Strouhal sayısının giderek az da olsa azalması, bu mekanizmaların birbirlerine ters biçimde etkimiş olduklarını akla getirmektedir

Tablo 4. Strouhal sayısı ( $St$ ) karşılaştırması

	St	Artış (%)	Bağıl artış (%)
VG0000	0.186	-	-
VG1650	0.262	~ 41	~ 41
VG1660	0.250	~ 34	~ -5
VG1665	0.243	~ 31	~ -3
VG1670	0.226	~ 22	~ -7

### POD analizi

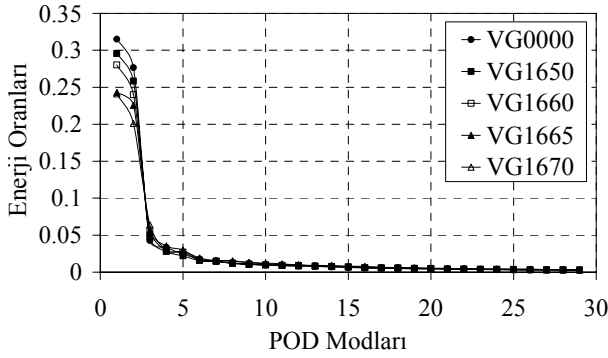
POD analizi, hareketin, periyodik ve rastgele bileşenlerine efektif bir biçimde ayrıştırılmasını sağlayan bir tekniktir. POD yaklaşımı hareketin salınan kısmını enerji seviyelerine göre ayrıştırmaktadır. POD analizinin içerdiği matematiksel temellere ilişkin detaylı bilgi Berkooz ve diğerleri (1993) ve Sirovich (1987a, b, c)’de bulunabilir. POD ile anlık hızların,  $\bar{U}(\bar{x}, t)$ , sırasıyla ortalama,  $\bar{\bar{U}}(\bar{x})$ , periyodik,  $\bar{\tilde{U}}(\bar{x}, t)$  ve rastgele,  $\bar{U}'(\bar{x}, t)$  bileşenlerine ayrıştırılması,

$$\bar{U}(\bar{x}, t) = \bar{\bar{U}}(\bar{x}) + \bar{\tilde{U}}(\bar{x}, t) + \bar{U}'(\bar{x}, t) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil 8’de tüm vakalar için POD modlarına karşılık gelen enerji seviyeleri yer almaktadır. Enerji düzeyleri  $\lambda_n / \sum \lambda_n$  şeklinde ifade edilen özdeğerlerin, özdeğerlerin toplamına olan oranından elde edilmişlerdir. Grafiklerden özellikle ilk iki mod olmak üzere ilk 5-6 modun girdap yaratıcıların varlığına ve konum açılarına göre farklılık göstermiş oldukları barizdir. Konum açıları arttıkça periyodik, büyük ölçekli hareketi ifade etmekte olan ilk birkaç modun toplam salınım enerjisine oranının azaldığı gözlenmektedir. Buna göre girdap yaratıcılar büyük ölçekli hareket ile rastgele hareket arasındaki dengeyi değiştirerek genel salınım türbülansın katkısını artırmaktadır. Hareketin periyodik ve rastgele bileşenlerine ayrılması yine aynı grafiklerin incelenmesi ile mümkündür. Eğer her vaka için aynı miktarda enerji yüzdesi periyodik hareketi temsil etmek üzere kullanılacak olursa ilk modlardaki hızlı düşüşün gözlenmesi daha güç olacaktır. Zira aynı enerji seviyesinin sağlanabilmesi için periyodik hareketi oluştururken daha fazla POD modu kullanılması gerekecektir. Böylece rastgele hareketin etkisinin bir kısmı periyodik hareketi güçlendirecektir. Dolayısıyla salınım hareketi ayrıştırılırken, enerji düzeyinin yaklaşık olarak %1 civarına düştüğü ilk 8 mod, periyodik büyük ölçekli hareket olarak kabul edilmiştir. POD ile tüm vakalar için organize hareketten dolayı oluşan global ortalama  $\bar{\tilde{U}} / U_\infty^2$ ,  $\bar{\tilde{V}} / U_\infty^2$ ,  $\bar{\tilde{U}}' / U_\infty^2$  gerilmeleri ve rasgele hareket global ortalama

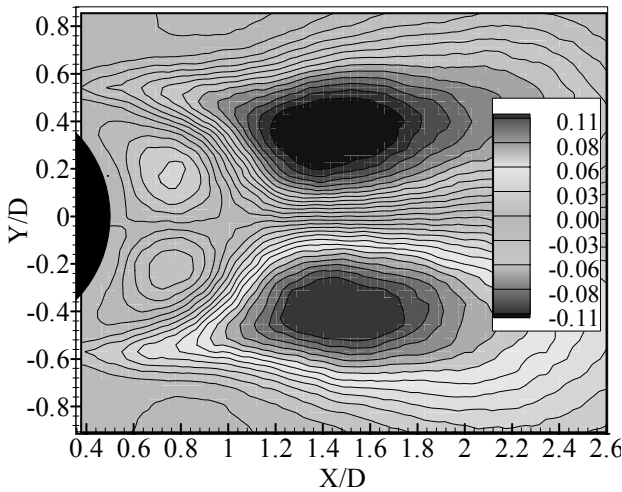


$\overline{U'U'}/U_\infty^2$ ,  $\overline{V'V'}/U_\infty^2$ ,  $\overline{U'V'}/U_\infty^2$  gerilmelerini ayırıştırmak mümkün olmuştur.

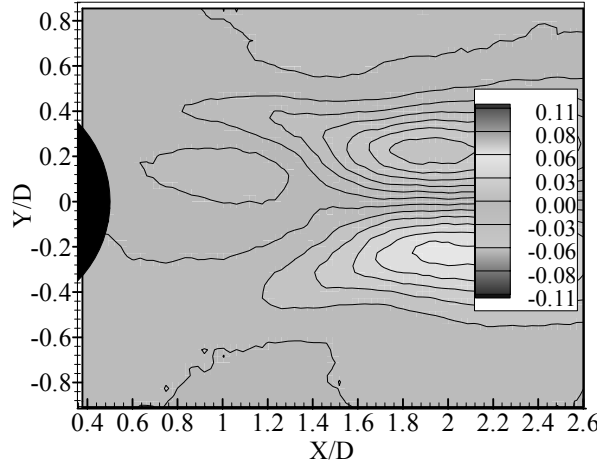


Şekil 8. Farklı vakalar için POD modlarına karşılık gelen enerji oranları

Şekil 9 ve 10'da VG0000 ve VG1670 vakaları için organize hareketten dolayı oluşan kayma gerilmeleri konturları görülmektedir. Yalın silindir vakası için elde edilen genel akış topolojisinin Cantwell ve Coles (1983) ile uyumlu olduğu söylenebilir. Kayma gerilmesi alanı, merkez yatay eksenin her iki yanında ekstrem değerler kümesi oluşturmaktadır. Konturların merkezleri girdap oluşma boyu civarında olup silindir tarafındaki uçları kayma tabakasına doğru incelenerek uzamaktadır. Silindirin hemen arkasındaki bölgede yine çok küçük de olsa zayıf kayma gerilmeleri alanı yapısı göze çarpmaktadır.



Şekil 9. VG0000 vakası büyük ölçekli hareketten dolayı oluşan global ortalama kayma gerilmesi konturları



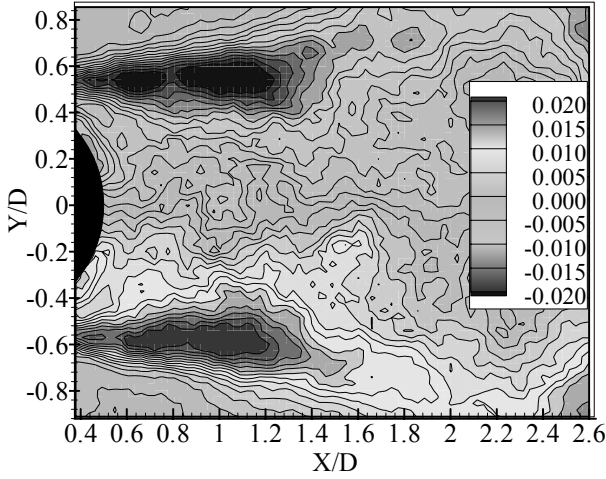
Şekil 10. VG1670 vakası organize hareketten dolayı oluşan global ortalama kayma gerilmesi konturları

Kayma gerilmeleri, diğer bileşenlerde olduğu gibi (şekilleri verilmemiştir) girdap yaratıcıların varlığı ve konum açılarından ciddi miktarda etkilenmektedirler. Yalın silindirde ölçüm bölgesinde oldukça geniş bir alana yayılmış olan kayma gerilmesi değerleri girdap yaratıcılı durumlarda giderek sönükleşmekte ve konturlar incelmektedirler. Yalın silindir ile VG1670 arasında kayma gerilmesi yaklaşık %50 oranında azalma göstermiştir. Silindirin hemen arkasında bulunan zayıf gerilme bölgesi VG1670'de hemen hemen tamamen kaybolmuştur. Yine daha önceki bileşenlere benzer şekilde gerilme bölgeleri girdap yaratıcıların konum açılarına bağlı olarak -VG1665 istisna olmak üzere- giderek silindirden uzaklaşmaktadırlar. Ölçüm bölgesindeki minimum kayma gerilmeleri ve meydana geldikleri noktalar Tablo 5'te sunulmuştur. Girdap yaratıcılı vakalarda periyodik hareketten dolayı oluşan tüm gerilmelerin ciddi miktarda azaldığı ve gerilme bölgelerinin çok daha dar alanlara yayıldığı ve aynı zamanda girdapların silindirden uzaklaşmalarına bağlı olarak gerilme bölgelerinin de benzer şekilde akış yönünde hareket ettikleri sunulan tablo ve grafiklerden görülebilir.

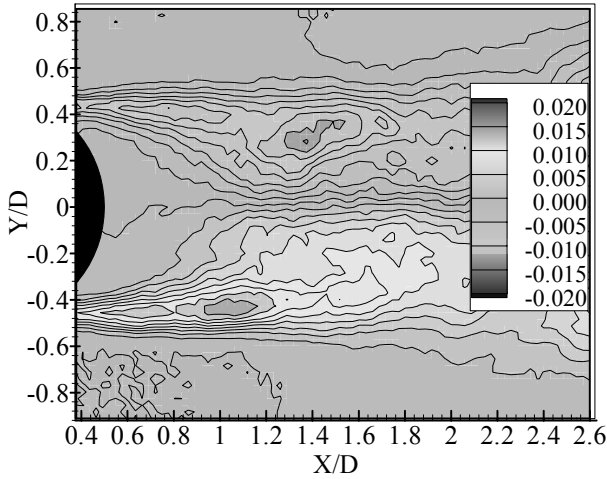
Rastgele hareketten dolayı oluşan Reynolds kayma gerilmeleri Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur. Şekillerde, kayma gerilmesinin Reynolds analizinde bulunandan çok farklı olarak, beklediği üzere tamamıyla kayma tabakaları üzerinde yoğunlaştığı net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5. POD ile hesaplanan ortalama periyodik gerilme bileşenleri kritik değerleri

Vaka	$\overline{\tilde{U}\tilde{U}}/U_\infty^2$		$\overline{\tilde{V}\tilde{V}}/U_\infty^2$		$\overline{\tilde{U}\tilde{V}}/U_\infty^2$	
	Maks.	(X; Y)	Maks.	(X; Y)	Min.	(X; Y)
VG0000	0.196	1.13; 0.41	0.420	1.52; 0	-0.130	1.33; 0.36
VG1650	0.135	1.33; 0.30	0.231	1.63; 0	-0.094	1.57; 0.26
VG1660	0.116	1.45; 0.30	0.207	2.00; 0	-0.079	1.73; 0.27
VG1665	0.095	1.42; 0.27	0.161	1.87; 0	-0.070	1.67; 0.25
VG1670	0.076	1.79; 0.24	0.132	2.13; 0	-0.060	1.92; 0.23



Şekil 11. VG0000 vakası rastgele hareketten dolayı oluşan global ortalama kayma gerilmesi konturları



Şekil 12. VG1670 vakası rastgele hareketten dolayı oluşan global ortalama kayma gerilmesi konturları

Kayma tabakasındaki gerilme VG1670 vakasında VG0000'a göre yaklaşık % 50 oranında

azalmıştır. Yalın silindirde daha kalın ve merkez eksenenden dışarıya dönük olan gerilme konturları girdap yaratıcı konum açıları arttıkça incelerken merkez eksene doğru yönelmiştir. Bu hareket girdaplılık konturlarının hareketine uyumludur.

Girdap yaratıcılı vakalarda rastgele hareket bileşenlerinin, periyodik bileşenlerde olduğu gibi düşüş göstermekte oldukları ortaya çıkmaktadır. Rastgele gerilmelerin azalması girdap yaratıcıların meydana getirmiş olduğu kuvvetli üç boyutluluk ile ilişkilendirilebilir. Zira üç boyutlu hareketlerde girdap uzamasının (vortex stretching) tüm türbülans alanına hakim olduğu bilinmektedir (Davidson, 2003). Girdap uzamasının sonucunda kayma tabakalarında türbülans boy ölçeklerinin azalmış olması gerekir. Türbülans boy ölçeğinin azalması, türbülansın en küçük ölçeklerde sönmülenerken ısı açığa çıkarması ile ilişkili olarak türbülans enerjisini azaltan bir durumdur. Gerrard (1966b) türbülansı artan bir kayma tabakasının daha çok dağılan bir yapıda olduğunu belirtmiştir. Gerçekten de türbülans ve türbülans viskozitesinin artması ile difüzyon da artış gösterir. Buna göre, girdap yaratıcılı vakalarda difüzyonun çok daha az olması rastgele hareketin azalmış olması ile ilişkilendirilebilir. Gerilme büyüklükleri incelendiğinde Reynolds ayrıştırmasında türbülans olarak adlandırılan gerilmelerin gerçekte pek çok kısmının büyük ölçekli girdap salgılanmasına bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır.

## Sonuçlar

Deneysel sonuçlardan girdap yaratıcıların silindirin yakın iz bölgesine ve dolaylı olarak da sınır tabakadaki akışa büyük ölçüde etki ettikleri

ortaya çıkmıştır. Öncelikle, global ortalama değerlerden kayma tabakalarının birbirlerine doğru yaklaştıkları ve merkez yatay eksene doğru kapandıkları ve iz bölgesinin kalınlığının azalarak narinleştiği tespit edilmiştir. Bu olay net biçimde ölçüm yapılan düzlemde akım ayrılmasının geciktiğine işaret etmektedir. Akım ayrılmasının gecikmesi ile birlikte, literatürde Reynolds sayısının yükselişi durumunda görüldüğü gibi, girdap oluşma ve iz kapanma boyunda ciddi bir artış olduğu gözlenmiştir. Girdap yaratıcıların etkisiyle akış alanındaki global ortalama sirkülasyon miktarında da artış olmuş, ayrıca kayma tabakaları kalınlıkları azalmıştır. Kayma tabakalarının daha konsantre hale gelmeleri girdapların da silindirden daha uzak noktalarda oluşmasını sağlamıştır. Girdapların silindirden uzaklaşmaları ile birlikte silindir gerisindeki alçak basınç bölgesinin de girdaplarla birlikte hareket etmesi ve o bölgedeki basıncın yükselmesi olasıdır. Buna bağlı olarak girdap yaratıcılı vakalarda ciddi bir direnç düşüşü beklenmektedir (Johnson ve Joubert 1969). Kayma tabakalarının merkez yatay eksene doğru hareket etmeleri ve aynı zamanda incelmeleri sonucunda Strouhal sayısı VG1650 vakasında %41 yükseliş göstermiş, daha sonra muhtemelen oluşan girdapların giderek güç kaybetmesiyle bağlantılı olarak yavaşça azalmıştır. Akıştaki organize ve rasgele hareketten dolayı oluşan gerilme grubunun her ikisinin de şiddetinin, girdap yaratıcıların ve konum açılarının etkisiyle ciddi miktarda düştüğü gözlenmektedir. POD ayrıştırması, yalın ve girdap yaratıcılı dairesel silindir arkasındaki türbülanslı akışın büyük ölçekli ve organize periyodik hareket ve rastgele türbülanslı hareket olarak efektif biçimde ayrıştırılmasını sağlamıştır. Yakın iz bölgesindeki gerilmelerin asıl nedeninin büyük ölçekli ve düzenli yapı olduğu belirlenmiştir. Akıştaki organize ve rastgele hareketten dolayı oluşan gerilme grubunun her ikisinin de şiddetinin, girdap yaratıcıların etkisiyle ciddi miktarda düştüğü gözlenmektedir. Bu etki girdap yaratıcıların konum açıları akım ayrılması noktasına doğru yaklaştıkça daha da artmaktadır.

Deneysel çalışma girdap yaratıcıların etkisinin ortaya konmasının yanı sıra, kritik-altı rejimde dairesel silindirin yakın iz bölgesine odaklanıla-

rak detaylı bir incelemeyi kapsamakta ve böylece her iki anlamda da mevcut literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışma ayrıca, girdap yaratıcıların gemiler etrafındaki akım ayrılmasını kontrol etmek üzere gerçekleştirilecek dizayn süreci gibi, hidrodinamik alanda büyük önem taşıyan bir hususa önemli katkılar yapabilecek deneysel bir altyapı hazırlamıştır.

## Kaynaklar

- Basu, R.I., (1985). Aerodynamic forces on structures of circular cross-section. Part 1. Model-Scale data obtained under two-dimensional conditions in low turbulence streams, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **21**, 273-294.
- Basu, R.I., (1986). Aerodynamic forces on structures of circular cross-section. Part 2. The influence of turbulence and three-dimensional effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **24**, 33-59.
- Berkooz, G., Holmes, P. ve Lumley, J.L., (1993). The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **25**, 539-575.
- Bloor, M.S. ve Gerrard, J.H., (1966). Measurements on turbulent vortices in a cylinder wake, *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, **294**, 319-342.
- Cantwell, B. ve Coles, D., (1983). An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, **136**, 321-374.
- Davidson, L., (2003). *An Introduction to Turbulence Models*, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Djeridi, H., Braza, M., Perrin, R., Harran, G., Cid, E. ve Cazin, S., (2004). Near-Wake turbulence properties around a circular cylinder at high Reynolds number, *Flow, Turbulence and Combustion*, **71**, 19-34.
- Gad-el-Hak, M. ve Bushnell, D.M., (1991). Separation Control: Review, *Journal of Fluids Engineering*, **113**, 5-30.
- Gerrard, J.H., (1966a). The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, **25**, 2, 401-413.
- Gerrard, J.H., (1966b). The Three-dimensional structure of the wake of a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, **25**, 1, 143-164.

- Johnson, T.R. ve Joubert, P.N., (1969). The influence of vortex generators on the drag and heat transfer from a circular cylinder normal to an airstream, *Journal of Heat Transfer*, **91**, 91-99.
- Keane, R.D. ve Adrian, R.J., (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images, *Applied Scientific Research*, **49**, 191-215.
- Lin, J.C., (1999). Control of turbulent boundary layer separation using micro-vortex generators, 30<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference, A99-33593, Norfolk, VA.
- Lin, J.C., (2002). Review of research on low-profile vortex generators to control boundary layer separation, *Progress in Aerospace Sciences*, **38**, 389-420.
- Norberg, C., (1998). LDV- Measurements in the Near Wake of a Circular Cylinder, *Advances in Understanding of Bluff Body Wakes and Vortex Induced Vibration*, Washington DC, USA, June 1998, 1-12.
- Norberg, C., (2003). Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements, *Journal of Fluids and Structures*, **17**, 57-96.
- Sirovich, L., (1987a). Turbulence and the dynamics of coherent structures Part 1: Coherent structures, *Quarterly of Applied Mathematics*, **3**, 561-571.
- Sirovich, L., (1987b). Turbulence and the dynamics of coherent structures Part 2: Symmetries and transformations, *Quarterly of Applied Mathematics*, **3**, 573-582.
- Sirovich, L., (1987c). Turbulence and the dynamics of coherent structures Part 3: Dynamics and scaling, *Quarterly of Applied Mathematics*, **3**, 583-590.
- Willert, C.E. ve Gharib, M., (1991). Digital particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, **10**, 181-193.
- Williamson, C.H.K., (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **28**, 477-&.
- Zdravkovich, M.M., (1990). Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **33**, 53-62.
- Zdravkovich, M.M., (1997). *Flow Around Circular Cylinders Volume 1: Fundamentals*, Oxford University Press, New York, USA.