

# SONLU-SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ AKIŞ YAPISININ PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜM TEKNİĞİ (PIV) İLE İNCELENMESİ

Salih ÇELİK  
Cuma KARAKUŞ  
Hüseyin AKILLI  
Beşir ŞAHİN

## ÖZET

Dairesel silindir üzerindeki akışlar son yıllarda hem deneysel hem de sayısal çalışmalar ile yoğun bir araştırma konusu olmuştur. Bu tip akış yapıları; yüksek binalar, soğutma kuleleri, bacalar, elektronik devreler gibi birçok mühendislik uygulamasında karşımıza çıkmaktadır. Bina üzerindeki akış yapısının ve fiziğinin bilinmesi, binalar üzerine etkiyen rüzgâr kuvvetlerinin belirlenmesinde, bina ve çevresi arasındaki rüzgâr etkileşiminden doğan ayrılma bölgeleri, bina ile etkileşimli çoklu girdap sistemlerinin belirlenmesinde, büyük öneme sahiptir. Son yıllarda, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), akış görselleştirme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Bu deneysel çalışmada,  $D=40\text{mm}$  çap,  $h=120\text{mm}$  yükseklik (yükseklik çap oranı,  $h/D=3$ ) değerlerine sahip sonlu-dairesel silindir üzerinde oluşan akış yapısı, serbest akış hızı ve silindir çapına bağlı Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  ile  $7000$  değerleri arasında, PIV tekniği kullanılarak incelenmiştir. Deneysel neticesinde, öncelikle anlık hız alanları  $\langle V \rangle$  elde edilmiş, bu veriler kullanılarak zaman ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  çizilmiştir. Sonuç olarak, sonsuz-silindir üzerindeki iki boyutlu akış yapısından farklı olarak, sonlu-silindir, üç boyutlu (3-D) karmaşık bir akış yapısına sahip olduğu ve sonlu-silindir üzerinde oluşan akışın; birçok girdap sistemlerinin birleşmesinden meydana geldiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu-silindir, PIV Tekniği, Akış Ayrılması, At Nalı Girdap

## ABSTRACT

In recent years, the experimental and numerical studies have been research the subject of intense on the circular cylinder flows. This type of flow structures, like tall buildings, cooling towers, chimneys, electronic circuits, such as encountered in many engineering applications. Knowledge of the flow structure and physics on building, caused in wind forces acting on buildings to determine the building and the environment arising from the interaction between the wind region of separation, the determination of building interact with multiple vortex systems, is of great importance. In recent years, Particle Image Velocimetry Measurement (PIV) is one of the most widely used methods for flow visualization techniques. In this experimental study, which has the diameter  $D = 40\text{mm}$ ,  $h = 120\text{mm}$  height (Aspect ratio; height to diameter ratio,  $h/D=3$ ) values and the development of finite-circular cylinder flow structure on the front and top of the display pictures of the event, due to the free stream velocity and cylinder diameter  $Re_d=1000$  and  $7000$  in the range of Reynolds number were investigated by using PIV technique. As a result of experiments, primarily instantaneous velocity fields were obtained, using with these data time-average velocity fields  $\langle V \rangle$ , streamlines  $\langle \Psi \rangle$  and vorticity counter  $\langle \omega \rangle$  has drawn. Finally result, unlike the infinite-cylinder on the two-dimensional flow structure, finite-cylinder has a three-dimensional (3-D) complex structure and finite-cylinder on the flow of the stream, many stayed in the merger of vortex systems.

**Key Words:** Finite Cylinder, Particle Image Velocimetry, Flow Separation, Horseshoe Vortex

## 1. GİRİŞ

Dairesel silindir; basit geometrisi ve üzerinde oluşan akış yapısının periyodik girdap sistemleri olmasından dolayı, temel ve klasik bir çalışma alanı olarak son yıllarda hem deneysel hem de sayısal çalışmalar ile birçok mühendislik uygulamalarında yoğun bir araştırma konusu olmaktadır. Sonsuz dairesel silindir üzerindeki yakın bölge de oluşan akış yapısının üç boyutluluk özelliği; girdap kopmasının periyodik ve silindir eksenine paralel oluşmasından dolayı zayıftır. Bu nedenle, silindir orta bölgesinde meydana gelen periyodik güçlü Karman girdap caddesi ile iki boyutluluk özelliği taşımaktadır [1]. Sonlu dairesel silindir serbest yüzeyi akışın üç boyutluluğuna doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Sonlu-dairesel silindir üzerinde üç boyutlu karmaşık akış yapısı; silindir serbest ucunda oluşan girdap, silindir orta bölgelerinde oluşan Karman girdap caddesi ve silindir tabanında oluşan at nalı girdabın etkileşiminden meydana gelmektedir [2] (Şekil 1). Düzlem yüzey boyunca meydana gelen sınır tabaka akışının silindirik bir yapı ile karşılaşması neticesinde silindir ön yüzeyi ile düzlem yüzey birleşme bölgelerinde ters akış yapıları oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar [3,4,5], bu tip akışlarda aynı zamanda ve aynı yerde çok çeşitli boyutlarda oluşan bu ters akış yapılarının bir konumdan diğerine hareket ettiğini ve sündüğünü belirtmişlerdir. Bu girdap elemanlarının, kütlesi ve açısallık momentununun sabit kalmak şartıyla sünmesi esnasında, boyunun uzayacağını ve çapının küçüleceğini, aynı zamanda açısal hızını ve kinetik enerjisini arttıracaklarını belirtmişlerdir. Böylece, girdap elemanının sünmesi neticesinde, enerji büyük ölçekli hareketlerden küçük ölçekli hareketlere doğru, küçük ölçekli hareketlerdeki girdap çizgilerinin büyük ölçekli hareketlerle sündürülmesi sonucu akmakta olduğunu belirtmişlerdir [6]. Ayrıca, girdap hareketlerinin duvar civarında yoğunlaşacağını, bunun neticesinde girdap elemanlarının duvar civarında rastgele yükselmesinin ani çalkantılar meydana getireceğini ve ani patlamalarla birlikte akışın dış bölgeye doğru sıçramalar yapacağını belirtmişlerdir. Aynı zamanda, bazı araştırmacılar bütün türbülans üretiminin özellikle silindir cidarı yakınlardaki patlama ve sıçramanın neticesinde meydana geldiğini belirtmişlerdir [5]. Bunun neticesinde ise akış silindir taban cidarı etrafında ve aşağı akım yönünde bir girdap oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan bu akış yapısı (Şekil 1), karakteristik şekliyle dolayı At Nalı Girdap “ANG” olarak adlandırılmaktadır [7,8]. Gerçekte, düzlem yüzey ile silindir tabanı birleşme yerinde Reynolds sayısına ve türbülanslılık değerine bağlı olarak birbirinden bağımsız birden fazla girdap yapısı meydana gelmektedir. Bu girdaplar, ikincil akış kayıplarının (sürtünme kayıpları) artmasına neden olmakla birlikte, silindir arkasındaki ayrılma bölgesinin değişmesine ve silindir üzerinde yüksek seviyeli kayma gerilmesi oluşumuna sebep olmaktadır [8].

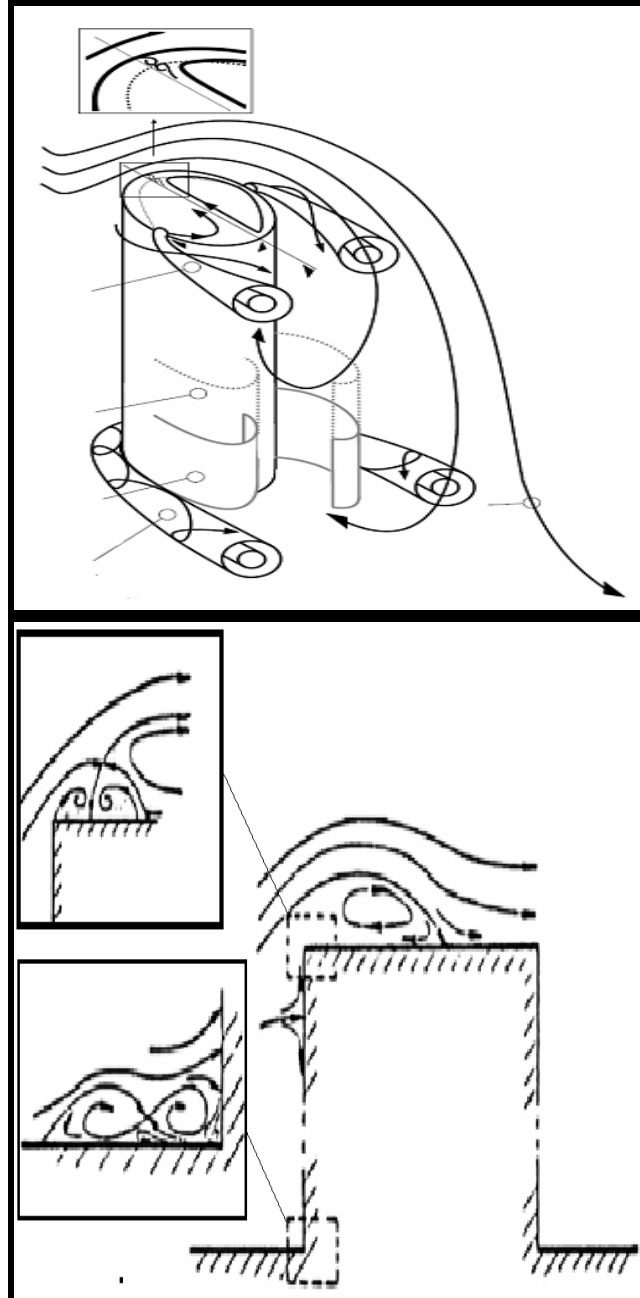
Sonsuz ve sonlu dairesel silindir üzerindeki akış ile ilgili olarak literatürde hem sayısal hem de deneysel olarak çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ancak, düşük görünüş oranına sahip ( $GO = \text{silindir yüksekliği/silindir çapı}$ ) sonlu silindir üzerindeki akış yapısının deneysel olarak Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği ile incelemesi ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıda olup bu çalışmalar [9] tarafından ayrıntılı bir şekilde derlenmiştir. İlk defa iki boyutlu (2D) olarak varsayılan iki serbest ucu bulunan dairesel silindir üzerindeki akışın üç boyutluluk etkisini [10] incelemiştir. Sonuçta silindir yüksekliğinin azaldıkça sürüklenme katsayısının azaldığını rapor etmiştir [11].

Sonlu-silindir serbest ucu etkisinin ayrıntılı çalışması [12,13,14] gibi araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Sonuç olarak silindir serbest ucunda serbest akış yönünde meydana gelen akış yapısının silindir orta bölgesinde meydana gelen iki boyutlu ölü akış bölgelerini bozması neticesinde girdap kopmalarının üç boyutluluk özelliği kazandığını belirtmişlerdir.

Birçok yüksek bina serbest yüzeyli sonlu dairesel silindir olarak basitleştirilebilmektedir. Bu yüzden silindir benzeri yapılar olan yüksek binalar ve bacalar, nükleer güç santralleri, soğutma kuleleri, köprüler, açık denizlerdeki platform yapılar ve destek ayakları gibi çok sayıdaki mühendislik uygulamaları üzerinde oluşan akışlar pratik öneme sahip olmasından dolayı araştırmacılar tarafından çok sık inceleme konusu olmuştur [15,16,17]. Ayrıca, bilgisayarın ana kartı üzerindeki elektronik devreler, deniz altı araçları, uçak-hava araçlarının iniş takımları ve fırlatma rampaları gibi birçok pratik uygulamaların yanı sıra sadece bilimsel çalışma olarak değil aynı zamanda yapısal tasarımlar ve enerji kayıpları gibi teknik problemler olarak da karşımıza çıkmaktadır. [11,18]. Bina ve yakın çevresi arasındaki rüzgar etkileşiminden doğan ayrılma bölgeleri, bina ile etkileşimli çoklu girdap sistemlerinin, binalar üzerine etkiyen rüzgar kuvvetlerinin belirlenmesinde ve uygun tasarım parametrelerinin göz önüne alınması için büyük önem arz etmektedir. Örneğin bina ve gemilerde bulunan yüksek

bacalardan çıkan atıkların hareketi, silindirin serbest ucundan dolayı bacalar üzerinde meydana gelen ters akış ve ANG yapılarından büyük oranda etkilenmektedir [15].

Bunun yanı sıra bina üzerindeki akış yapısı, bina içine ve etrafına hava kirleticilerinin yayılmasında birinci derece etkindir. Bu etkilerin bulunabilmesi açısından, bina dışındaki hava hareketleri tam olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Binanın önünde görülen akış girdap hareketleri, zemin seviyesindeki toz, toprak, yaprak, yağmur ve kar gibi tanecikleri yer seviyesinden yükselterek ortama karışmasına neden olmaktadır. Tüm bu nedenlerle bina üzerindeki akış yapısının ve fiziğinin bilinmesi hem tasarım hem de teknik problemlerin çözülmesi noktasında büyük yararlar sağlamaktadır.



Şekil 1. Dairesel Sonlu-Silindir Üzerindeki Akış Yapısı [19]

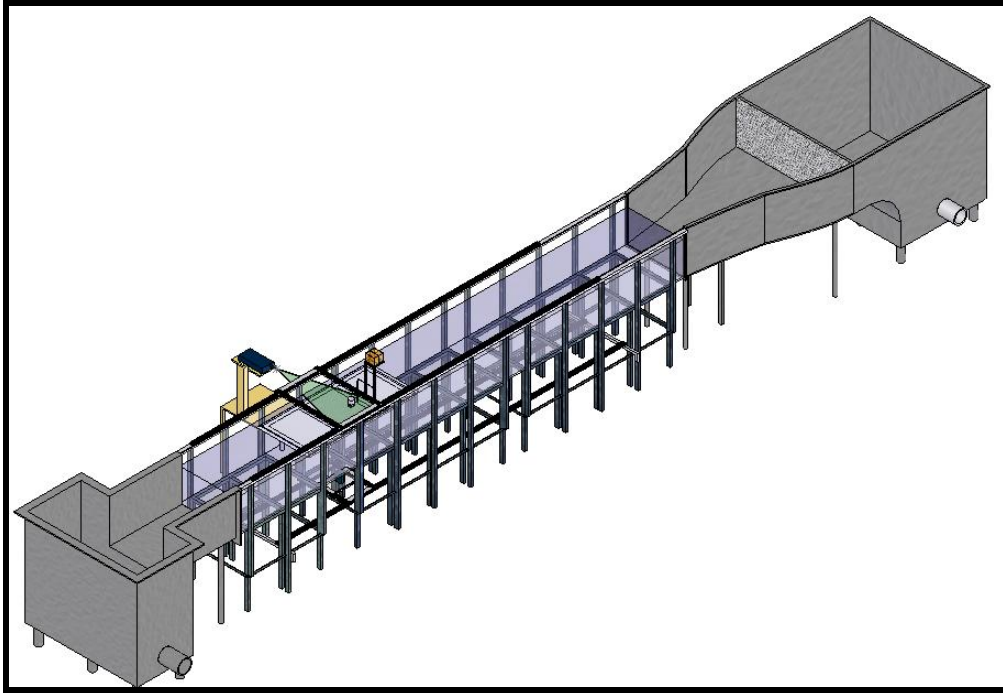
Son yıllarda, aerodinamik ve hidrodinamik araştırmalarda Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), akış görselleştirme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Bu yöntemde

bilgisayar ve elektronik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, küt cisimler üzerinde meydana gelen daimi olmayan akış yapısını noktasal olarak değil, düzlemsel bir alan içerisindeki anlık verilerin akış yapısını bozmadan yüksek hassasiyetle ölçmek mümkün olabilmektedir

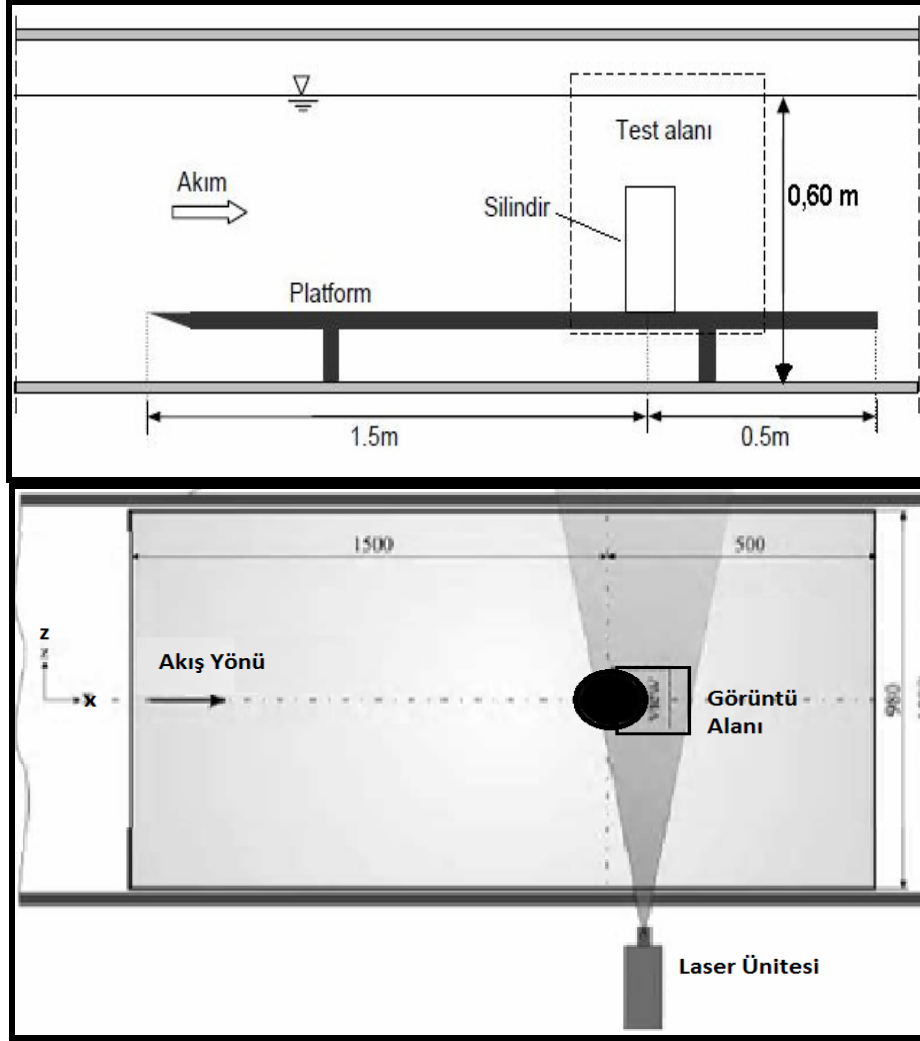
Bu deneysel çalışmada,  $D=40\text{mm}$  çap,  $h=120\text{mm}$  yükseklik (yükseklik çap oranı,  $h/D = 3$ ) değerlerine sahip sonlu-dairesel silindir (sonlu-silindir) üzerindeki oluşan akış yapısı ve gelişimi, serbest akış hızı ve silindir çapına bağlı Reynolds sayısının  $Re_d = 1000$  ile  $7000$  aralığında incelenmiştir. Sonlu-silindir önu (yukarı akım), sonlu-silindir serbest yüzeyi üzerinde ve sonlu-silindir arkasındaki (aşağı akım yönünde) görüntüleri yan görünüşleri olarak, bunun yanı sıra sonlu-silindir üst bölgesi ( $z/h=1$ ), orta bölgesi ( $z/h=0.5$ ) ve taban bölgesindeki ( $z/h=0$ ) akış yapıları ise üstten görünüş olarak PIV tekniği kullanılarak incelenmiştir.

## 2. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM SİSTEMİ

Bu deneysel çalışma Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında kurulu olan kapalı devre açık yüzeyli su kanalında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan su kanalı iki adet fiberglas malzemeden imal edilen su deposu ile bu iki depo arasında bulunan ve ebatları  $750\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 8000\text{mm}$  (yükseklik x en x boy) olan akrilik kısımdan oluşmaktadır. Girişteki su deposu ile deney kesiti arasındaki geçişi sağlamak amacıyla 2:1 oranında daralma kısmı mevcuttur (Şekil 2). Kanal içerisindeki suyun serbest akış hızı, hız kontrol ünitesi yardımıyla değişik devirlerde çalışan bir santrifüj pompa ile ayarlanmıştır. Deneylerde akış yapısını incelemek amacıyla şeffaf akrilik malzemeden imal edilen  $D=40\text{mm}$  çapa,  $h=120\text{mm}$  yükseklik (yükseklik/çap oranı,  $h/D=3$ ) değerlerine sahip bir adet dairesel sonlu-silindir modeli kullanılmıştır. Kullanılan model, boyutları (uzunluğu  $2.0\text{m}$ , genişliği  $0.98\text{m}$ ) Şekil 2'de görülen düzlem bir platform üzerine monte edilmiştir. Deneyler boyunca su kanalında su yüksekliği  $0,60\text{m}$  olarak sabit alınmıştır. Düzlem platformun ön ucu akışı bozmaması amacıyla pah kırılarak inceltilmiştir. Türbülans etkilerden sakınmak amacıyla silindir modeli düzlem platform üzerinde akım yönünden itibaren girişten  $1.5\text{m}$  uzağa monte edilmiştir. Deney alanının su kanalı içerisindeki şematik görünüşü Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 2. Deneylelerin Yapıldığı Su Kanalının Şematik Görünümü [20]



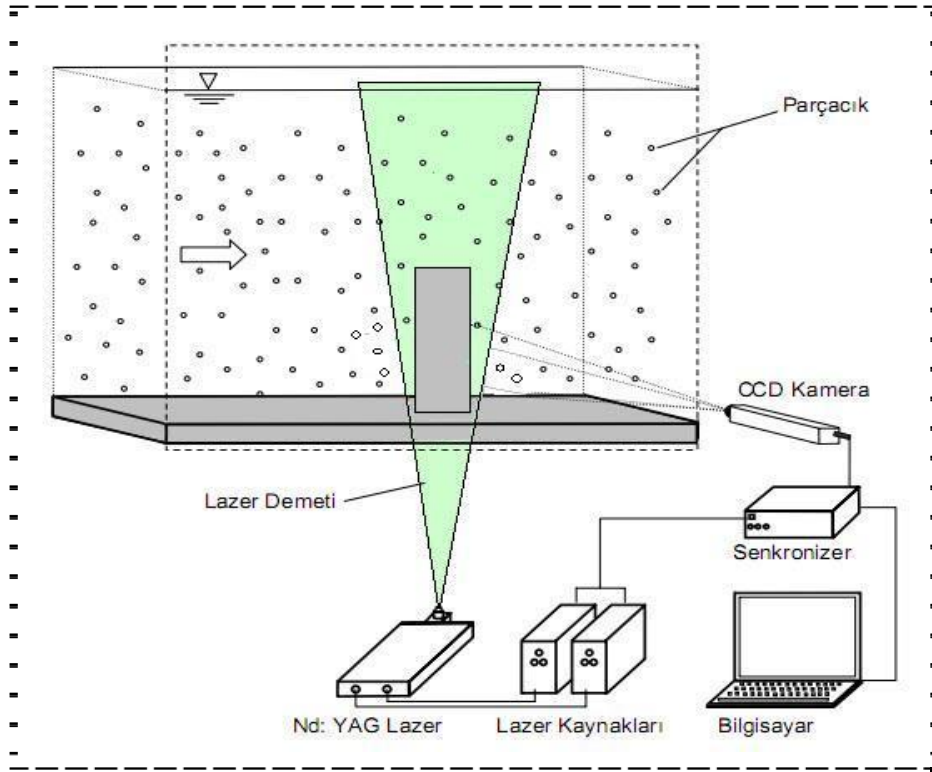
**Şekil 3.** Deney Alanının Su Kanalı İçerisindeki Şematik Görünüşü

PIV tekniği son yıllarda rüzgâr mühendisliği, uzay ve havacılık alanında, otomotiv sektöründe içten yanmalı motorlarda, nükleer santrallerde, pompa ve türbinlerde, ısı değiştiricilerinde, daimi olmayan akış uygulamalarında, karmaşık geometrileri içeren akışkanlar mekaniği uygulamalarında, jet akışlarda, sınır tabaka problemlerinde, ayrılmış akışlarda, iki fazlı akışlarda, bio-mühendislikte, sıç su akışlarında, boru ve kanal akışları gibi birçok mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan modern deneysel akış görselleştirme yöntemlerinden bir tanesidir.

Bu yöntem, akış içerisinde akışkanla aynı hızda hareket eden mikron düzeyinde küçük metal kaplı katı parçacıkların hızlarını ölçmek suretiyle akış yapısı hakkında anlık veya ortalama bilgi vermektedir. Bu teknik ile iki ve üç boyutlu hız ölçümü yapabilmek için akış (su) içerisine 10–20 mikrometre çapında, yoğunluğu suyun yoğunluğuna yakın parlak gümüş kaplı metal veya plastik parçacıklar serpiştirilmektedir. Parçacıkların yoğunlukları suyun yoğunluğundan nispeten büyük olmasına rağmen ( $1100 \text{ kg/m}^3$  aralığında değişen) boyutları mikron mertebesinde olduğu için su ile aynı hızda hareket etmektedirler. Çift darbeli 120 mJ güçteki lazer ünitesi (Nd: YAG Lazer) tarafından üretilen lazer ışını optik aletler desteğiyle 1–2 mm kalınlığında ve değişik genişliklerdeki lazer huzmesi haline getirilmektedir. Lazer ünitesi saniyede en fazla 15 lazer huzme çifti gönderebilmektedir. Lazer huzmeleri ile aydınlatılan akış alanının içinde hareket eden parçacıkların milisaniye boyutundaki ( $\Delta t$ ) zaman aralıkları ile CCD dijital kamera ( $1016 \times 1024$  çözünürlüğe sahip) vasıtasıyla çekilen iki adet fotoğrafı bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. İki fotoğraf arasındaki süre ( $\Delta t$ ) tamamıyla akışın hızına ve türbülanslılık seviyesine bağlıdır. Lazer kaynağı darbeli tip olduğu için lazer ile kameranın eş zamanlı olarak çalışması gerekmektedir. Lazer kaynağı ile dijital kamera arasındaki zamanlamayı

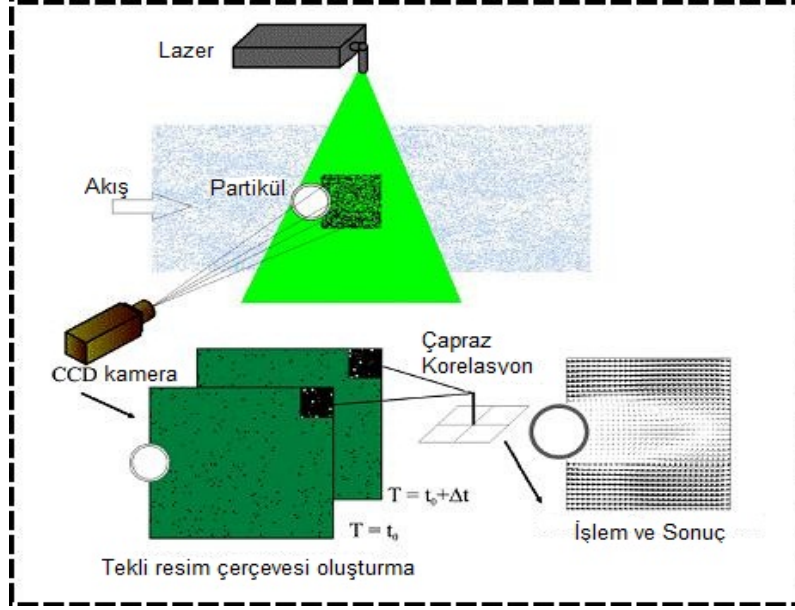
ayarlayan cihaz eş zamanlayıcı (senkronizer) olarak adlandırılmakta ve bir bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Bilgisayara aktarılan bu fotoğraflar genellikle 32x32 piksel ebatlarındaki küçük alt bölgelere bölünmekte ve Hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak her bir alt bölgedeki parçacıkların çekilen iki görüntü arasındaki yer değiştirmeleri bulunmaktadır. Bu yöntemin işleyişi ve kullanılabilirliği hakkında geniş bilgi [21,22,23] tarafından kapsamlı olarak verilmiştir.

Bu ölçme yönteminde kullanılan matematiksel ifadeler ve gerekli bilgiler [23] tarafından verilmiştir. Her iki görüntü arasındaki  $\Delta t$  zaman aralığı ve her bir alt bölgedeki parçacıkların aldıkları ortalama mesafe bilindiğinden, göz önüne alınan alt bölgelerdeki akışın hızı hesaplanmaktadır. Göz önüne alınan akış alanı içerisinde 3844 adet hız vektörü hesaplanmaktadır. Akış yapısına bağlı olarak bu hız vektörlerinden en fazla %3'ü kötü vektör olarak adlandırılan akış yapısına uymayan hız vektörlerinden oluşmaktadır. Alınan resimlerin analizleri yapılarak önce anlık iki boyutlu hız alanları  $\langle V \rangle$ , daha sonra ise zaman ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  elde edilmektedir. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Sistemi şematik olarak Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.(a). Test Alanı ve PIV Sistemi Elemanları Şematik Görünüşü [24]



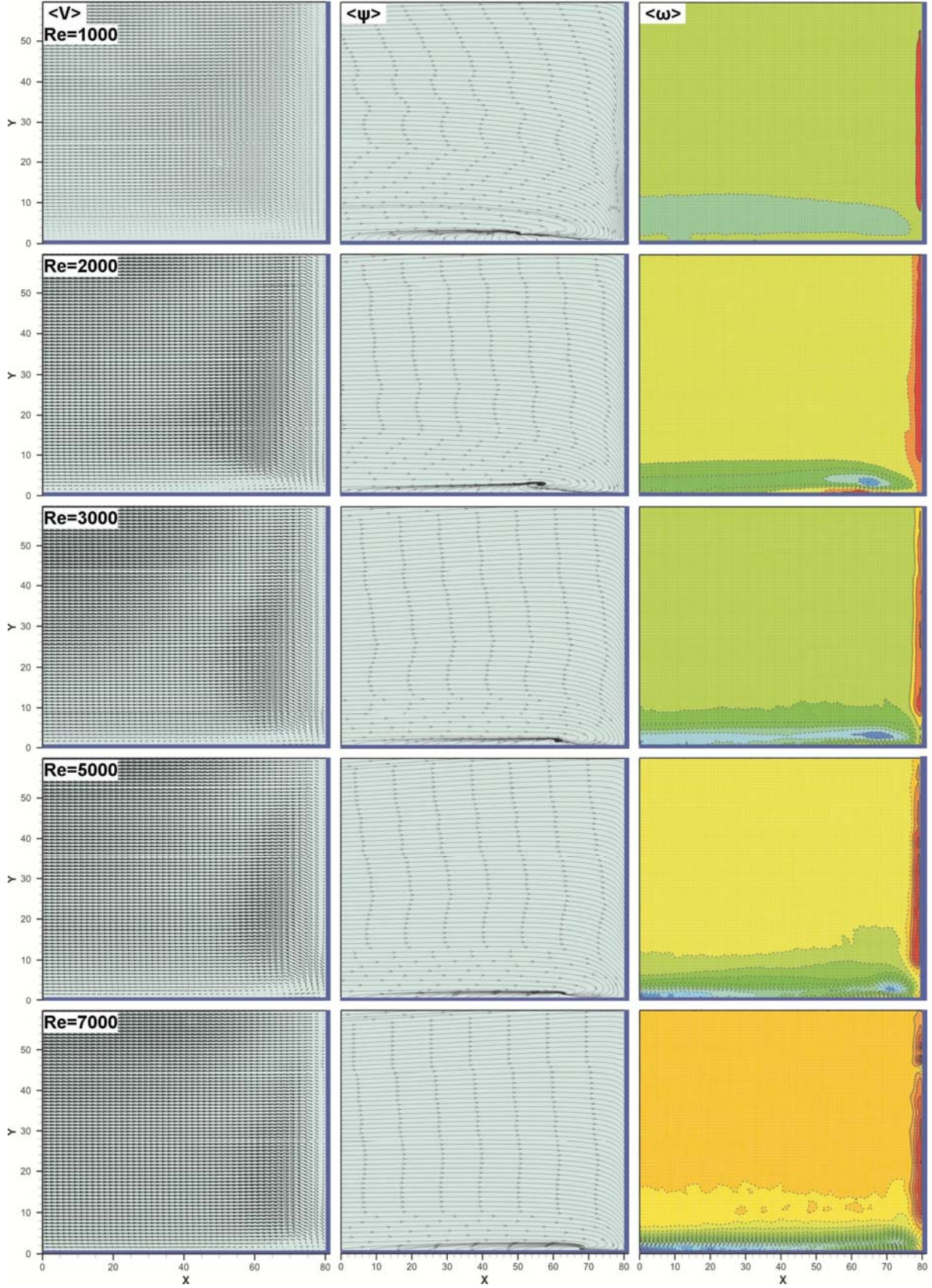


Şekil 4.(b). Test Alanı ve PIV Sistemi Elemanları Şematik Görünüşü [24]

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir düzlem platform üzerine monte edilen dairesel sonlu-silindir  $D=40\text{mm}$  çapa,  $h=120\text{mm}$  yükseklik (yükseklik/çap oranı,  $h/D=3$ ) değerlerine sahiptir. Deneyler serbest akış hızı ve sonlu-silindir çapına bağlı Reynolds sayısının  $Re_d = 1000$  ile  $7000$ , ( $Re_d=1000, 2000, 3000, 5000$  ve  $7000$ ), değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. Verilen tüm resimlerde serbest akış yönü soldan sağa doğrudur. Girdap eş düzey eğrileri  $\langle\omega\rangle$  şekillerinde kesik çizgi ile gösterilen değerler saat yönünde dönen negatif girdapları, düz çizgi ile gösterilen girdaplar ise saatin tersi yönünde dönen pozitif girdapları göstermektedir. Deneyler esnasında sonlu-silindir yukarı akım yönünde, sonlu-silindir serbest yüzeyi üzerinde ve sonlu-silindir aşağı akım yönünde olmak üzere üç farklı durumdaki akış yapısının üst görünüşleri de incelenmiştir. Deneyler neticesinde iki boyutlu anlık hız alanları PIV yöntemiyle ölçülmüş ve bu hız kullanılarak zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  elde edilmiştir.

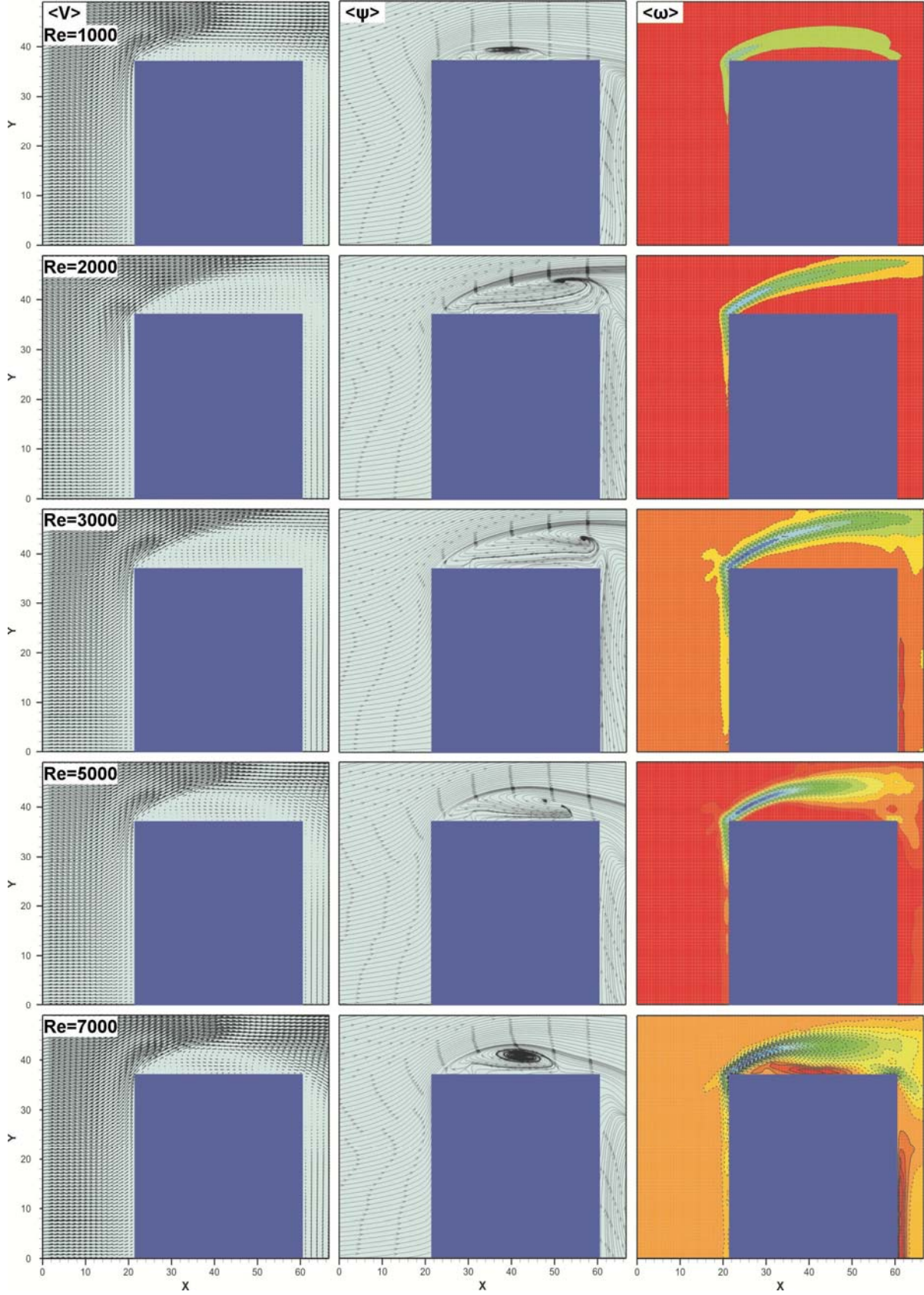
Beş farklı Reynolds sayısındaki ( $Re_d=1000, 2000, 3000, 5000$  ve  $7000$ ), silindir önünde meydana gelen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  ilk sütunda, akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ikinci sütunda ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  üçüncü sütunda olmak üzere Şekil 5'de verilmiştir. İlk sütunda gösterilen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  resimlerinden yüksek yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu bölgeler hızların arttığı alanları gösterir iken düşük yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu alanlar hızların azaldığı veya durduğu yerleri göstermektedir. Aynı zamanda düzlem yüzey ile silindir birleşme bölgelerinde saat yönünde dönen bir adet girdabın varlığı açık bir şekilde görülmektedir. İkinci sütunda verilen zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resimlerinden ilk satırda Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerindeki durumu görülmektedir. Resimde, soldan sağa doğru akan akış sonlu-silindir önü ile düzlem plaka birleşme bölgesinde yukarı akım yönünde negatif yönde dönen bir adet spiral girdabın meydana getirmektedir. Reynolds sayısının artması ile oluşan bu spiral girdabın çapı küçülmekte ve boyuna doğru sünmekte, aynı zamanda sonlu-silindir ön taban cidarına doğru yaklaştığı görülmektedir. Üçüncü sütunda verilen, zaman-ortalama girdap eş düzey eğrilerinde  $\langle \omega \rangle$  Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinden  $Re_d=7000$  değerine yükselmesi ile sonlu-silindir ve düzlem plaka birleşme yerinde negatif yönde dönen spiral girdapların eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  artmaktadır. Aynı zamanda, Reynolds sayısının  $Re_d=1000-7000$  değerleri arasında sonlu-silindir düzlemi orta noktasından aşağı düzlem plaka yönüne doğru oluşan pozitif yönlü spiral girdapların varlığı sonlu-silindir yüzeyinde açık bir şekilde görülmekte olup Reynolds sayısının artması ile birlikte oluşan pozitif yönlü dönen spiral girdapların değerleri de artmaktadır.



**Şekil 5.** Sonlu-Silindir Önünde Meydana Gelen Akış Yapısının  $Re_d = 1000-7000$  Sayılarındaki, Zaman-Ortalama Hız Alanları  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$  Yan Görünüşleri



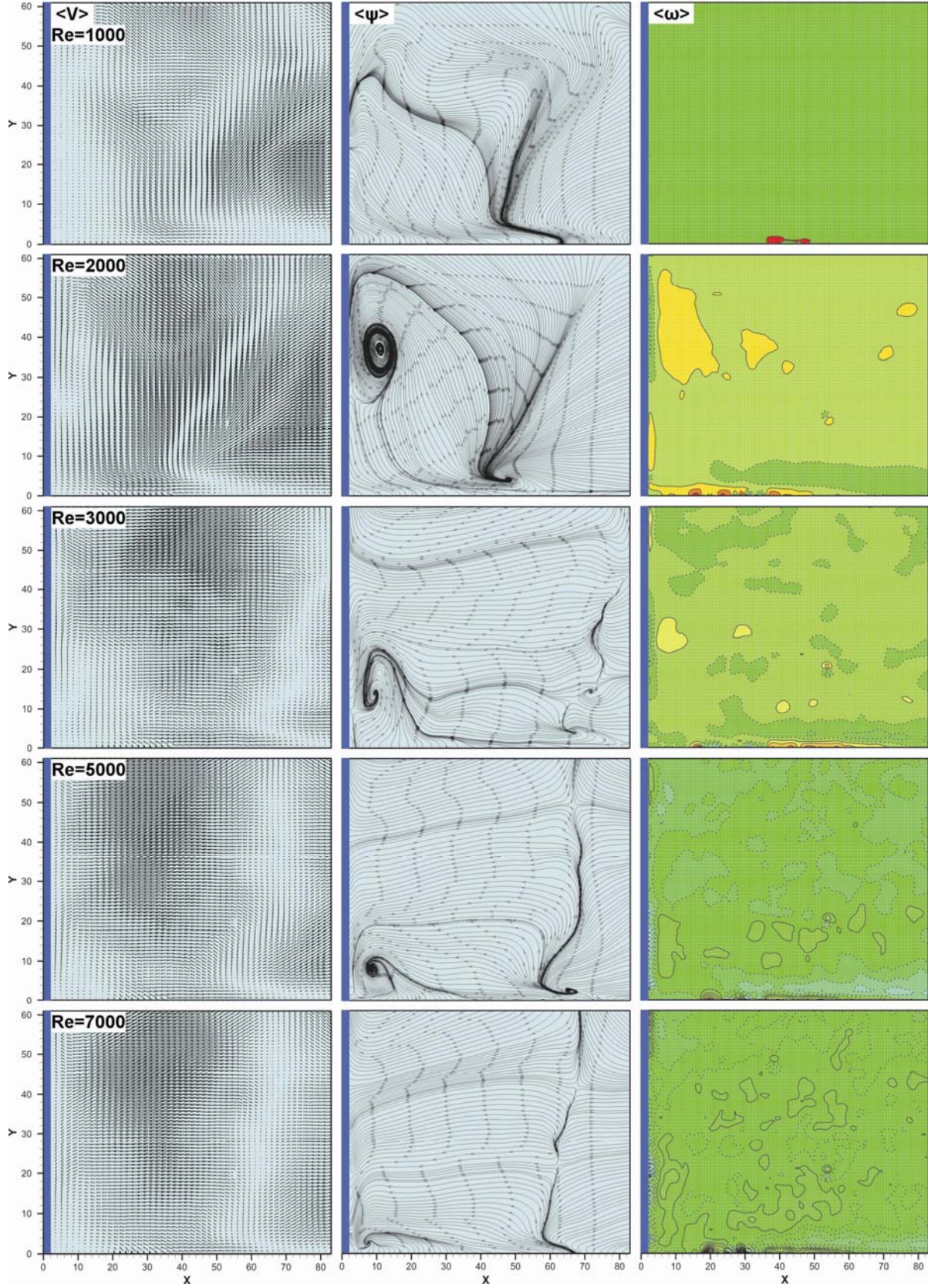
Beş farklı Reynolds sayısındaki ( $Re_d=1000, 2000, 3000, 5000, 7000$ ), sonlu-silindir serbest ucu üzerinde meydana gelen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  ilk sütunda, akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ikinci sütunda ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  üçüncü sütunda olmak üzere Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde ilk sütunda gösterilen hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden, sonlu-silindir serbest ucu hücum kenarı tarafında yüksek yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu bölgeler hızların arttığı alanları gösterir iken silindir üst yüzeyine yakın bölgedeki düşük yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu alanlar ise hızların azaldığı veya durduğu bölgeleri göstermektedir. İkinci sütunda verilen zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resimlerinden Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerindeki akış yapısı birinci satırda görülmektedir. Burada, sonlu-silindir serbest ucu hücum kenarı tarafında, silindir üst yüzeyi boyunca meydana gelen basınç artışı nedeniyle, akış ayrılmasının başladığı görülmektedir. Bu akışın sonlu-silindir serbest ucu yüzeyinde düşey düzlem orta noktası aşağı akım yönüne doğru silindir yüzeyine tekrar yapışarak "Ayrılma baloncuğu" (Separation bubble) ve negatif yönlü dönen ters akış bölgelerinin (Re-circulating regions) oluştuğu görülmektedir. Oluşan akış ayrılmasının sonlu silindir firar kenarında tekrar silindir yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Aynı zamanda, sonlu-silindir serbest üst yüzeyinde meydana gelen ayrılma baloncuğu ile serbest akış bölgesi arasında kayma tabakaları ve ters akış bölgesinin merkezinde durma (Foci) noktası görülmektedir. Üçüncü sütunda verilen girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  resminde ise sonlu-silindir serbest ucu hücum kenarında başlayan ve sonlu-silindir üst yüzeyi aşağı akım boyunca devam eden negatif yönlü dönen ters akış yapısının oluştuğu ve sonlu silindir firar kenarında tekrar silindir yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Reynolds sayısının  $Re_d=2000$  değerindeki zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden sonlu silindir hücum kenarı tarafındaki akış ayrılması açık bir şekilde görülmektedir. Sonlu silindir üst yüzeyi tarafında ters akış bölgesinin oluştuğu, fakat oluşan ters akış bölgesinin sonlu silindir üst yüzeyine yapışmayarak sonlu silindir firar kenarı aşağı akım yönünde ters akış bölgesinin devam ettiği görülmektedir. Zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden, sonlu-silindir serbest ucu hücum kenarı tarafında, akış ayrılmasının başladığı görülmektedir. Bu akışın sonlu-silindir serbest ucu yüzeyinde başlayıp firar kenarından aşağı akım yönünde devam ettiği, ayrıca, firar kenarı üst tarafında bir adet durma noktası karakteristiği göstermektedir. Bunun yanı sıra, sonlu-silindir serbest üst yüzeyinde meydana gelen ters akış bölgesi ile serbest akış bölgesi arasında kayma tabakaları görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinde  $\langle \omega \rangle$  ise Reynolds sayısının artması ile birlikte sonlu-silindir üst tarafında oluşan girdap eş düzey eğri değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda oluşan negatif yönlü dönen girdabın sonlu silindir üst yüzeyine yapışmayıp aşağı akım yönüne doğru genişlediği görülmektedir. Reynolds sayısının  $Re_d=3000$  değerindeki zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve Girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$ , Reynolds sayısının  $Re_d=2000$  değerindeki akış yapısına genel anlamda benzer özellik göstermektedir. Ancak,  $Re_d=3000$  değerindeki zaman-ortalama akım çizgilerinde  $\langle \Psi \rangle$  sonlu silindir üst tarafında oluşan durma (Foci) noktasının bir miktar aşağı akım yönünde ve sonlu silindir firar kenarına doğru yaklaştığı görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinde  $\langle \omega \rangle$  ise aynı şekilde artan Reynolds sayısı ile girdap eş düzey eğri değerlerinin arttığı ve aşağı akım yönüne doğru genişlediği görülmektedir. Reynolds sayısının  $Re_d=5000$  değerindeki zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden yüksek yoğunluklu hız alanları hızların arttığı bölgeleri gösterir iken düşük yoğunluklu bölgeler düşük olduğu veya sıfır olduğu bölgeleri göstermektedir. Hız alanlarından aynı zamanda ters akış bölgeleri ve yeniden yapışma bölgeleri de görülmektedir. Zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden sonlu silindir üst tarafında oluşan durma noktasının silindir üst yüzeyine ve yukarı akım yönüne doğru kaydığı görülmektedir. Ters akış bölgesi ile serbest akış bölgesinin ayıran kayma tabakası da görülmektedir. Girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  resminden artan Reynolds sayısı ile negatif yönlü dönen girdap eş düzey eğrinin değerleri arttığı ve aşağı akım yönünde sonlu silindir firar kenarı ile temas halinde olduğu görülmektedir. Reynolds sayısının  $Re_d=7000$  değerindeki zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden yüksek ve düşük yoğunluklu hız alanları, aynı zamanda ters akış bölgeleri ve yeniden yapışma bölgeleri de açık ve net bir şekilde görülmektedir. Zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden sonlu silindir üst tarafında oluşan durma noktasının silindir üst yüzeyine ve yukarı akım yönüne doğru bir miktar daha kaydığı görülmektedir. Ters akış bölgesi ile serbest akış bölgesinin ayıran kayma tabakası da görülmektedir. Aynı zamanda ters akış yapısının sonlu silindir üst yüzeyine yeniden yapışma bölgesi de görülmektedir. Girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  resminden artan Reynolds sayısı ile negatif yönlü dönen girdap eş düzey eğri değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda negatif yönlü dönen girdap ile sonlu silindir üst yüzeyi arasında kalan bölgede pozitif yönlü dönen girdapların varlığı görülmektedir.



**Şekil 6.** Sonlu-Silindir Serbest Ucu Üzerinde Meydana Gelen Akış Yapısının  $Re_d = 1000-7000$  Sayılarındaki, Zaman-Ortalama Hız Alanları  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$  Yan Görünüşleri

Beş farklı Reynolds sayısındaki ( $Re_d=1000, 2000, 3000, 5000, 7000$ ), sonlu-silindir arkasında tabanda düzlem plaka ile birleşme bölgelerinde meydana gelen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekildeki ilk sütunda PIV deneylerinden elde edilen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , ikinci sütunda akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve üçüncü sütunda ise zaman-ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  gösterilmiştir. İlk sütunda gösterilen hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden, sonlu-silindir arkasında yüksek yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu bölgeler hızların arttığı alanları gösterir iken sonlu-silindir arka bölgesinde düşük yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu alanlar hızların azaldığı veya durduğu yerleri göstermektedir. İkinci sütunda verilen zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resimlerinden, Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinde, zemin düzleminde sonlu silindir arkasında, silindir arka cidarından yaklaşık  $1.5D$  mesafede bir durma noktası olduğu görülmektedir. Sonlu silindir ön yüzeyinde oluşan ANG girdap yapısının etkisinden dolayı oluşan bu durma noktasından itibaren akış üç farklı istikamete doğru yönelmektedir. Birincisi durma noktasından itibaren sağa doğru aşağı akım yönünde, ikincisi sola silindir arka duvar düzlemine doğru, üçüncüsü ise bu iki akış doğrultularının tam ortasından düşey yöne sağa ve sola doğru yönelmektedir. Aynı zamanda, durma noktasından sola doğru yönelen akış silindir arkası düşey düzlem orta noktası civarında bir durma noktası oluşturmaktadır. Üçüncü sütunda verilen zaman-ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  resminden ise düşük Reynolds sayısında herhangi bir girdaplılık değeri elde edilememiştir. Reynolds sayısının artması ile sonlu silindir arkasında oluşan akış yapısı üç boyutlu ve karmaşık bir hal aldığından düzgün periyodik bir girdap yapısı elde edilememiştir. Reynolds sayısının  $Re_d=2000$  değerinde zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden zemin düzleminde sonlu silindir arkasında oluşan durma noktasının sonlu silindir arka cidarına doğru yaklaştığı, yaklaşık  $1.25D$  mesafede, aynı zamanda zemin yüzeyinden düşey yönde yer değiştirerek yukarı doğru hareket ettiği belirlenmiştir. Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinde akış yapısına benzer şekilde durma noktasından itibaren akış, üç farklı istikamete doğru yönelmektedir. Birincisi durma noktasından itibaren sağa doğru aşağı akım yönünde, ikincisi sola silindir arka duvar düzlemine doğru, üçüncüsü ise bu iki akış doğrultularının tam ortasından düşey yönde sağa ve sola doğru yönelmektedir. Aynı zamanda, durma noktasından sola silindir arka cidarına doğru yönelen akış yapısı; bu bölgede ters akış bölgesi oluşturmaktadır. Oluşan bu ters akış bölgesi silindir arkası düşey düzlem orta noktası civarında bir girdap ve Foci oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, sonlu silindir ön tarafından oluşan ANG yapısı sonlu silindir taban bölgesi ile düzlem plaka birleşme bölgesinde dördüncü bir aşağıdan yukarı hareket eden, akış yapısı oluşturmaktadır. Oluşan bu akış yapısı girdap yapısı ile kesişerek bir adet semer (Saddle) noktası oluşturmaktadır. Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  ve  $2000$  değerlerindeki akışın; sonlu silindir serbest yüzeyinden oluşan akış yapısından etkilenmeyip, tabanda oluşan ANG yapısından etkilendiği görülmektedir. Reynolds sayısının  $Re_d=3000$  değerinde zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden sonlu-silindir arkasında oluşan ters akış yapılarının; hem sonlu silindir serbest yüzeyinden, hem sonlu silindir orta düzleminden oluşan Karman Girdap kopmasından etkilendiği, hem de tabanda oluşan ANG yapısından etkilenerek üç boyutlu karmaşık bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Zemin düzleminde sonlu silindir arkasında oluşan durma noktasının sonlu silindir arka cidarından aşağı akım yönünde uzaklaşarak yaklaştığı, yaklaşık  $1.625D$  mesafede, aynı zamanda zemin yüzeyinden düşey yönde yer değiştirerek yukarı doğru hareket ettiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra ikinci bir durma noktası; birinci durma noktasının üst tarafında ve yaklaşık  $1.75D$  mesafede oluşmuştur. Birinci ve ikinci durma noktaları arasında akışın silindir arka cidarına doğru yol kat ederek silindir arka cidarına yakın bölgede bir adet girdap yapısı oluşturmuştur. Bunun yanı sıra  $Re_d=2000$  değerindeki akış yapısına benzer şekilde, sonlu silindir ön tarafından oluşan ANG yapısı sonlu silindir taban bölgesi ile düzlem plaka birleşme bölgesinde, aşağıdan yukarı hareket eden, akış yapısı oluşturmaktadır. Reynolds sayısının  $Re_d=5000$  değerinde zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden sonlu-silindir arkasında oluşan ters akış yapılarının; hem sonlu silindir serbest yüzeyinden, hem sonlu silindir orta düzleminden oluşan Karman Girdap kopmasından etkilendiği, hem de tabanda oluşan ANG yapısından etkilenerek üç boyutlu karmaşık bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Kesişen bu akış yapılarının sonlu silindir arkasından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.625D$  mesafesinde bir adet semer noktası oluşturduğu belirlenmiştir. Semer noktası bölgesinde akışın dört kola ayrıldığı açık bir şekilde görülmektedir. Zemin düzleminde sonlu silindir arkasında bir adet durma noktasının aynı bölgede, yaklaşık  $1.625D$  mesafede olduğu, aynı zamanda zemin yüzeyinden düşey yönde yer değiştirerek aşağı doğru hareket ettiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra  $Re_d=3000$  değerindeki akış yapısına benzer şekilde, sonlu silindir ön tarafından oluşan ANG yapısı sonlu silindir taban bölgesi ile düzlem plaka birleşme bölgesinde, aşağıdan yukarı hareket eden, akış yapısı oluşturmaktadır. Oluşan bu girdap yapısının artan Reynolds sayısı ile silindir arka düzleminden düşey yönde aşağıya doğru düzlem plaka birleşme bölgesine doğru kaydığı tespit edilmiştir.





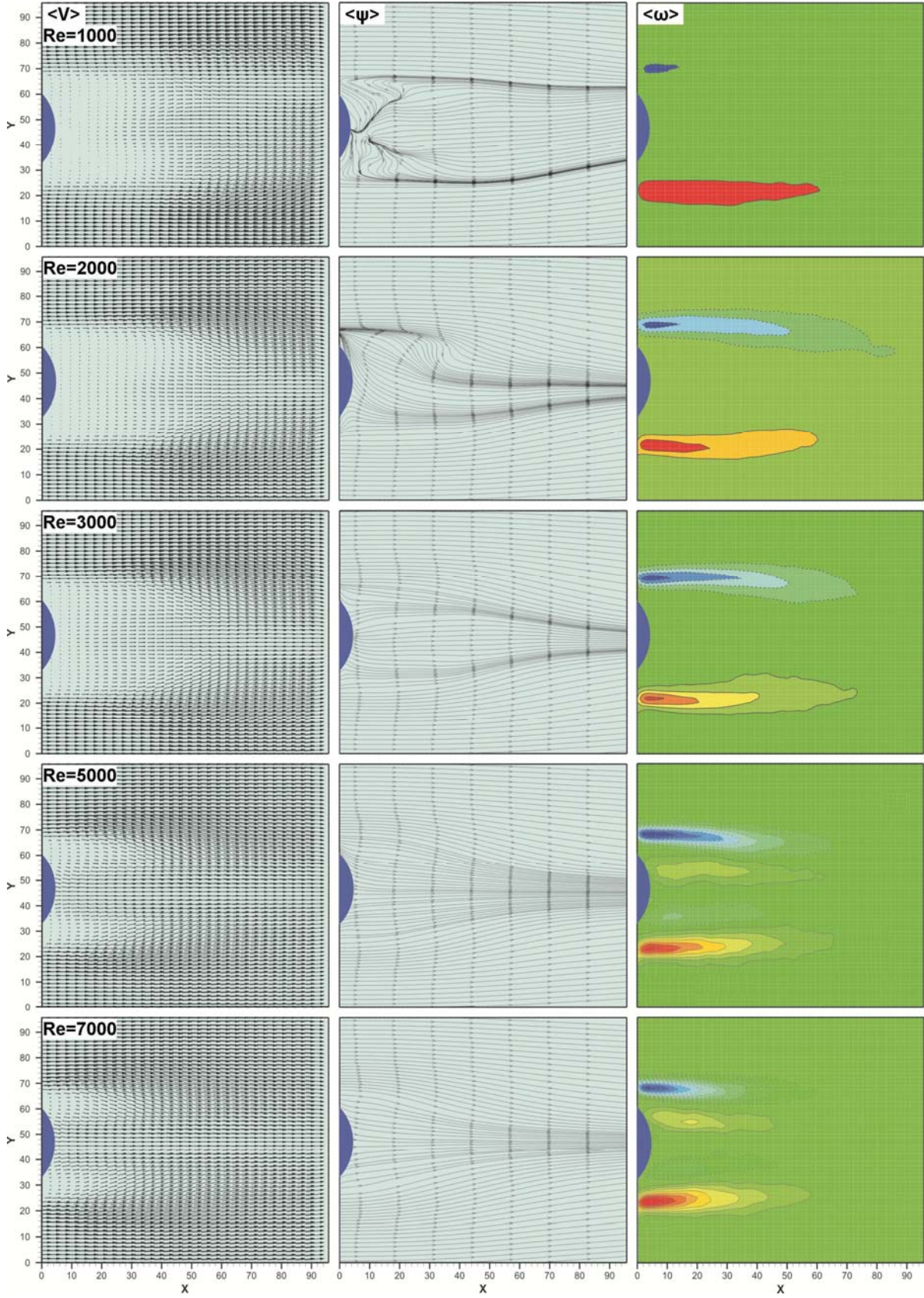
**Şekil 7.** Sonlu-Silindir Arkasında Meydana Gelen Akış Yapısının  $Re_d = 1000-7000$  Sayılarındaki Hız Vektörleri  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$  Yan Görünüşleri



Reynolds sayısının  $Re_d=7000$  değerinde zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden sonlu-silindir arkasında oluşan ters akış yapılarının; hem sonlu silindir serbest yüzeyinden, hem sonlu silindir orta düzleminden oluşan Karman Girdap kopmasından etkilendiği, hem de tabanda oluşan ANG yapısından etkilenerek üç boyutlu karmaşık bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Kesişen bu akış yapılarının sonlu silindir arkasından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.5D$  mesafesinde ve  $1.625D$  mesafesinde olmak üzere toplam iki adet semer noktası oluşturduğu belirlenmiştir. Semer noktası bölgelerinde akışın dört kola ayrıldığı açık bir şekilde görülmektedir. Zemin düzleminde sonlu silindir arkasında bir adet durma noktasının, yaklaşık  $1.75D$  mesafede olduğu, durma noktasından itibaren sağa ve sola doğru yönlendiği görülmektedir. Bunun yanı sıra  $Re_d=5000$  değerindeki akış yapısına benzer şekilde, sonlu silindir ön tarafından oluşan ANG yapısı sonlu silindir taban bölgesi ile düzlem plaka birleşme bölgesinde, artan Reynolds sayısı ile boyutunu küçülterek Reynolds sayısının  $Re_d=7000$  değerinde bir adet durma noktası halini almıştır.

Sonlu-silindir üst yüzeyinde ( $z/h=1.0$  mesafesinde) meydana gelen akış yapısının  $Re_d =1000-7000$  sayılarındaki hız vektörleri  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  üstten görünüş resimleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekildeki ilk sütunda PIV deneylerinden elde edilen zaman-ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , ikinci sütunda akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve üçüncü sütunda ise zaman-ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  gösterilmiştir. İlk sütunda gösterilen hız alanları  $\langle V \rangle$  resminden, yüksek yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu bölgeler hızların arttığı alanları gösterir iken sonlu-silindir arka bölgesinde düşük yoğunluklu hız vektörlerinin bulunduğu alanlar hızların azaldığı yerleri göstermektedir. Resimden de görüldüğü gibi serbest akışın düşük Reynolds sayılarında yüzeyden etkilendiği,  $Re_d=1000$  değerinden  $Re_d=7000$  değerine artması ile bu etkinin azalarak devam ettiği açık bir şekilde görülmektedir. İkinci sütunda verilen zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resimlerinden, Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinde serbest akışın sonlu silindir serbest yüzeyinden etkilenen simetrik olmayan bir akış yapısı olduğu, Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinden  $Re_d=7000$  değerine artması ile oluşan bu simetrik olmayan akış yapısının simetrik bir yapı aldığı görülmüştür. Aynı zamanda serbest akış ile serbest yüzeyden etkilenen bölge arasındaki kayma tabakası bölgesi de görülmektedir. Üçüncü sütunda verilen zaman-ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  resminde Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  değerinde sonlu silindir serbest yüzeyi arka tarafında; silindir serbest yüzeyinden oluşan, pozitif ve negatif yönlü dönen iki adet girdabın varlığı görülmektedir. Girdaplardan negatif yönlü dönen girdabın boyutunun küçük, pozitif yönü dönen girdabın boyutunun büyük olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısının  $Re_d=2000$  değerinde zaman-ortalama akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  resminden pozitif ve negatif yönlü dönen girdapların varlığı devam etmekte, Reynolds sayısının artması ile birlikte girdaplılık değerinin arttığı, negatif yönlü dönen girdabın da boyutunun büyüdüğü belirlenmiştir.

Reynolds sayısının  $Re_d=3000$  değerindeki zaman-ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$ ,  $Re_d=2000$  değerindeki duruma benzerlik göstermekte, sadece Reynolds sayısının artmasından dolayı girdaplılık değeri artmaktadır. Reynolds sayısının  $Re_d=5000$  ve  $7000$  değerlerinde ise diğer durumlardan farklı olarak dört adet girdap yapısı görülmektedir. Bunlardan iki tanesi pozitif yönlü iken diğer ikisi negatif yönlü girdap olup negatif yönlü dönen girdabın iç tarafında pozitif yönlü dönen girdabın varlığı, pozitif yönlü dönen girdabın iç tarafında ise negatif yönlü dönen girdabın varlığı görülmektedir.

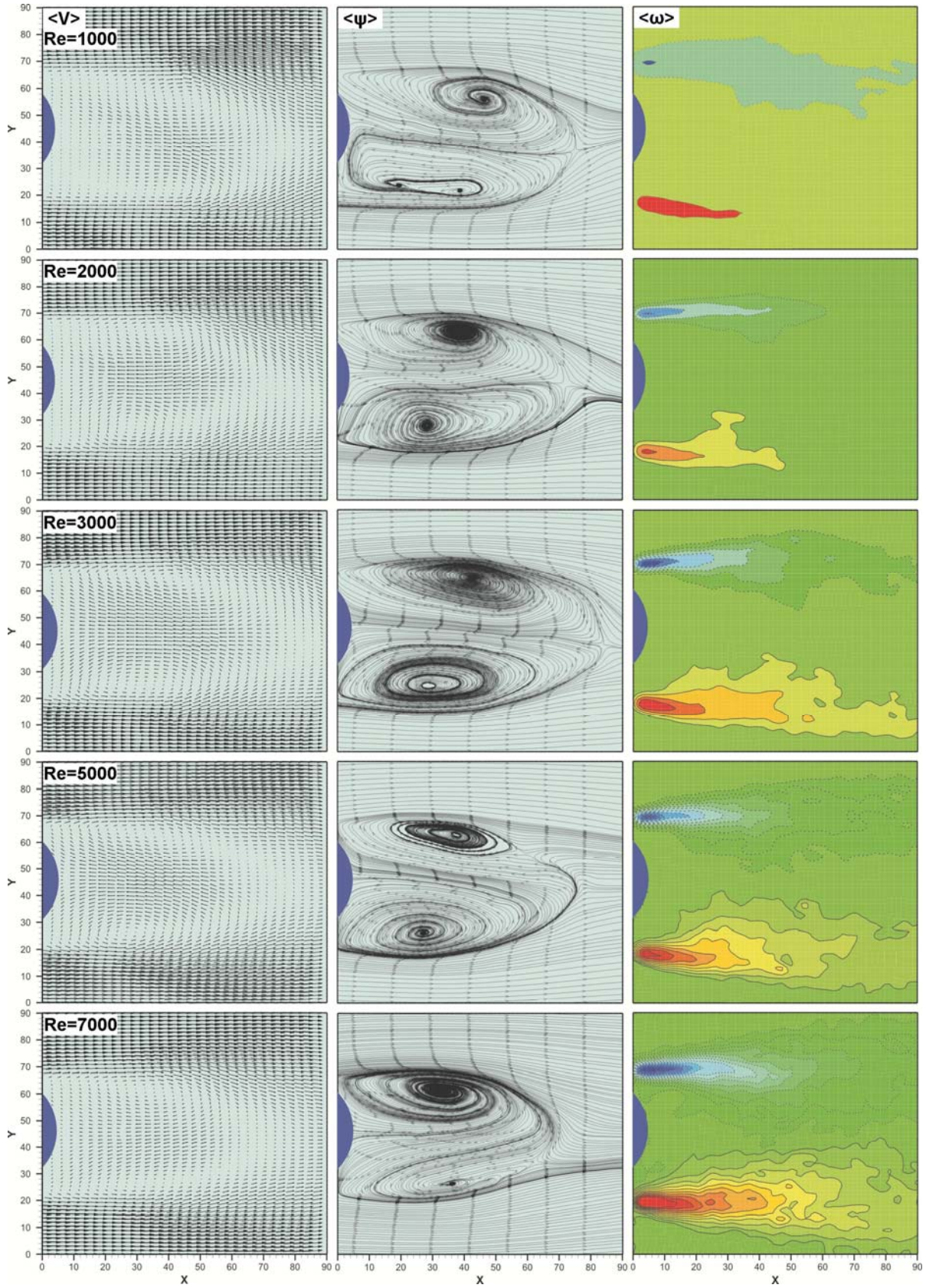


**Şekil 8.** Sonlu Dairesel Silindir Arkasında  $Z/H=1.0$  Mesafesinde Aşağı Akım Yönünde Oluşan Akış Yapısının  $Re_d=1000$  İle 7000 Değerleri İçin PIV Deneylerinden Elde Edilen Zaman Ortalama Hız Alanları  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$

Sonlu dairesel silindir arkasında  $z/h=0.5$  mesafesinde aşağı akım yönünde oluşan akış yapısının  $Re_d=1000$  ile  $7000$  değerleri için PIV deneylerinden elde edilen zaman ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilde hız alanlarını  $\langle V \rangle$  gösteren ilk sütunda yüksek yoğunluk hız vektörleri hızların arttığı bölgeleri gösterir iken silindir arkasındaki düşük yoğunluklu hız vektörleri saat yönünde ve saatin tersi yönünde dönen ters akış bölgeleri ile ölü akış bölgesini göstermektedir. Ayrıca, oluşan akış yapısının düşük Reynolds sayısında simetrik olmadığı, Reynolds sayısının artması ile akışın simetrik yapıya döndüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra sonlu silindir arka bölgesinde ölü akış bölgesi içerisinde serbest akışın tersi yönde hızlar olduğu ve bu bölge içerisinde birbirine ters yönde dönen iki adet alt akış bölgesi olduğu anlaşılmaktadır. Şekildeki ikinci sütunda akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  görüntüleri birinci satırda ise  $Re_d=1000$  değerindeki durum gösterilmektedir. Şekilde silindir geometrisini üst tarafından ayrılan ve saat yönünde dönen girdabın varlığı ve merkezinde oluşan Foci noktası açık bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda silindir alt ucundan ayrılan ve saatin tersi yönünde dönen girdap ve iki adet foci durma noktası görülmektedir. Ayrıca, bu iki akış bölgesi kesişme düzleminde oluşan kayma tabakası ile serbest akış bölgesi ile ters akış bölgelerini birbirinden ayıran kayma tabakaları ve silindir arka cidarından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.5D$  mesafesinde oluşan durma noktası görülmektedir.  $Re_d=2000$  değerindeki akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  görüntüsünden silindir arka cidarından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.5D$  mesafesinde oluşan durma noktasının bir miktar silindire doğru yaklaştığı ve silindir alt ucundan ayrılan ve saatin tersi yönünde dönen girdabın merkezinde bulunan iki adet foci durma noktasının bir adet olduğu görülmektedir.  $Re_d=3000$  değerindeki akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  görüntüsünden silindir arka cidarından aşağı akım yönünde yaklaşık  $2.0D$  mesafesinde oluşan durma noktasının bir miktar silindirden uzaklaştığı görülmektedir.  $Re_d=5000$  değerinde silindir arka cidarından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.375D$  mesafesinde durma noktasının olduğu görülmekte olup silindir alt düzleminde oluşan pozitif yönlü dönen girdabın negatif yönlü dönen girdaba göre daha baskın olduğu görülmektedir.  $Re_d=7000$  değerinde silindir arka cidarından aşağı akım yönünde yaklaşık  $1.375D$  mesafesinde durma noktasının olduğu görülmekte olup negatif yönlü dönen girdabın pozitif yönlü dönen girdaba göre daha baskın olduğu görülmektedir. Sonsuz dairesel silindir üzerindeki aynı bölgede oluşan girdap kopmalarının simetrik bir yapı oluşturmasına rağmen sonlu dairesel silindir üzerindeki akış yapısının silindir serbest ucunda oluşan akıştan ve tabanda oluşan ANG yapılarından etkilenerek simetriğin bozulduğu üç boyutlu bir akış yapısının olduğu görülmektedir.

Üçüncü sütunda sonlu silindir üzerinde meydana gelen zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  gösterilmektedir. Şekillerde kesikli çizgiler negatif yönlü (saat yönünde hareket eden girdaplar) girdapları, düz çizgiler pozitif yönlü (saat yönünün tersi istikamette hareket eden girdaplar) girdapları göstermektedir. Her ne kadar silindir arkasında oluşan anlık akış özellikleri simetrik olmayan bir yapı arz ediyorsa da zaman ortalama akış karakteristikleri simetrik bir yapıda ortaya çıkmaktadır. Reynolds sayısının  $Re_d=1000$ 'den  $Re_d=7000$  değerine artmasına paralel olarak pozitif ve negatif girdaplar, akış istikametinde uzamakta ve girdaplılık değerleri artmaktadır. Ayrıca, tüm Reynolds sayılarında pozitif ve negatif yönlü dönen girdapların maksimum değerlerinin yaklaşık aynı bölgede olduğu belirlenmiştir.





**Şekil 9.** Sonlu Dairesel Silindir Arkasında  $Z/H=0.5$  Mesafesinde Aşağı Akım Yönünde Oluşan Akış Yapısının  $Re_d=1000$  İle  $7000$  Değerleri İçin PIV Deneylerinden Elde Edilen Zaman Ortalama Hız Alanları  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$



Sonlu dairesel silindir arkasında tabanda düzlem plaka ile birleşme bölgesinde,  $z/h=0$  mesafesinde, aşağı akım yönünde oluşan akış yapısının  $Re_d=1000$  ile 7000 değerleri için PIV deneylerinden elde edilen zaman ortalama hız alanları  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilde hız alanlarını  $\langle V \rangle$  gösteren ilk sütunda yüksek yoğunluk hız vektörleri hızların arttığı bölgeleri gösterir iken silindir arkasındaki düşük yoğunluklu hız vektörleri ters akış bölgeleri ile ölü akış bölgesini göstermektedir. Şekilde ikinci sütundaki akım çizgileri  $\langle \Psi \rangle$  görüntüsünün  $Re_d=1000$  değerindeki durumunda; silindir geometrisini üst tarafından ayrılan ve saat yönünde dönen ters akış yapısının varlığının yanı sıra alt tarafta saatin tersi yönünde dönen akış yapısının bir noktada kesişerek durma noktası meydana getirdiği görülmektedir. Diğer tüm akım çizgileri görüntülerinde olduğu gibi serbest akış ile ters akış bölgesini ayıran kayma tabakaları açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, tabanda oluşan ters akış yapılarının boyutunun  $z/h=0.5$ 'de oluşan akış yapısı boyutundan daha büyük olduğu görülmüştür. Reynolds sayısının artması ile silindir arkasında oluşan ters akış bölgelerinin boyutunun küçüldüğü, daha simetrik bir yapı aldığı ve arkada oluşan durma noktalarının yukarı akım tarafında silindirin arka cidarına doğru yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, Reynolds sayısının  $Re_d=3000$  değerine kadar arkada oluşan bir adet durma noktası, iki adet Foci noktası olarak oluşmaktadır. Üçüncü sütunda sonlu silindir üzerinde meydana gelen zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri  $\langle \omega \rangle$  gösterilmektedir. Sonlu silindir tabanında oluşan bu akış durumunda, taban etkisinden dolayı simetrik bir yapı oluşmayıp karmaşık bir akış yapısı durumu ortaya çıkmaktadır.

## SONUÇ

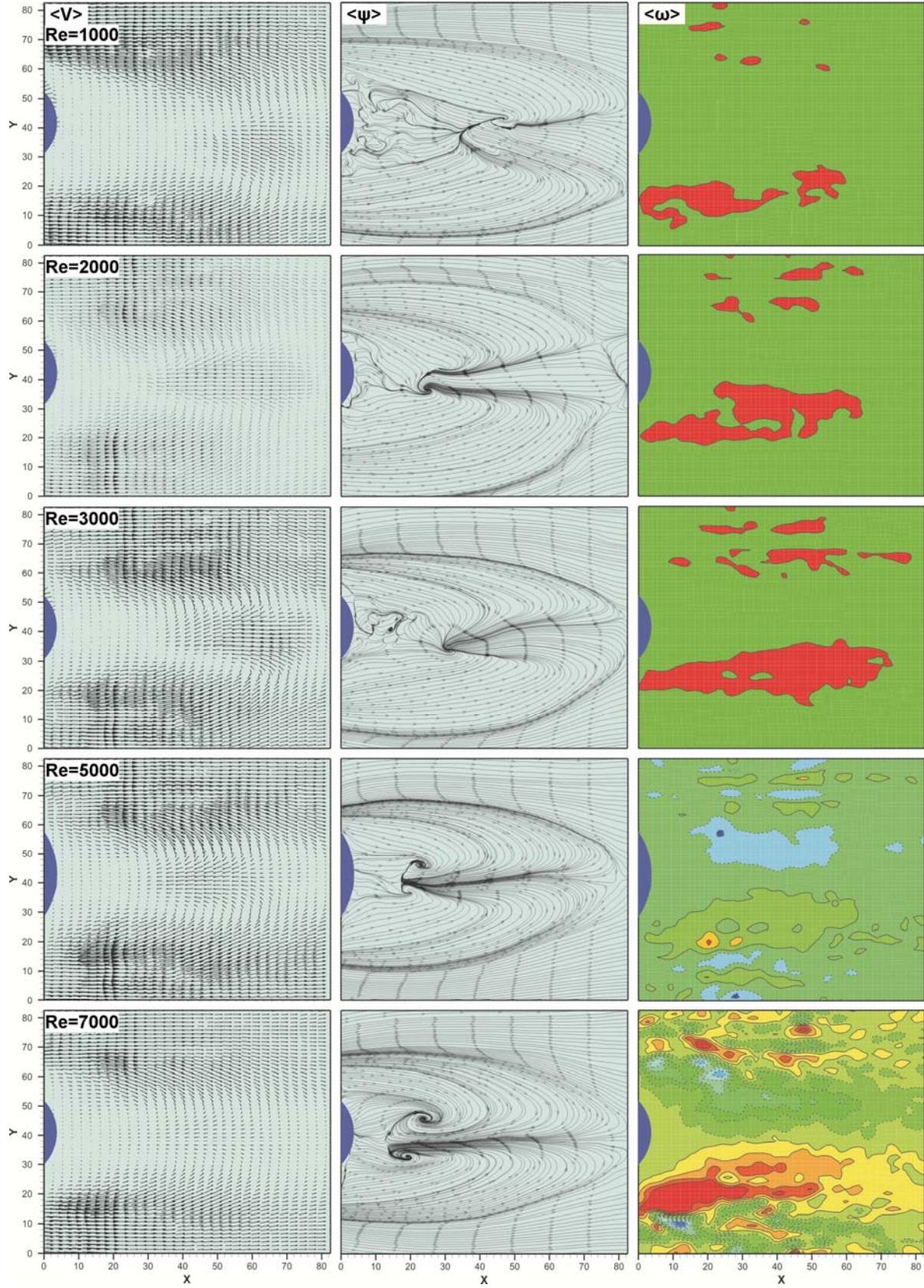
Bu çalışmada, serbest yüzeyli sonlu-silindir üzerindeki akış yapısı, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği (PIV) kullanılarak kapalı devre açık yüzeyli su kanalında deneysel olarak incelenmiştir. Dairesel sonlu-silindir modeli  $D=40\text{mm}$  çapa,  $h=120\text{mm}$  yükseklik (yükseklik çap oranı  $h/D=3$ ) değerine sahiptir. Deneyler, serbest akış hızı ve sonlu-silindir çapına bağlı Reynolds sayısının  $Re_d=1000$  ile 7000 aralığında gerçekleştirilmiştir.

Sonlu-silindir önündeki (yukarı akım) akış durumunda tüm Reynolds sayılarında; akışın, sonlu-silindir ile düzlem plaka birleşme bölgelerinde bir adet negatif yönlü dönen girdap oluştuğu, artan Reynolds sayısı ile girdabın boyutunun küçüldüğü, boyuna doğru sündüğü ve silindir ön yüzeyinde doğru yanaştığı görülmektedir.

Sonlu-silindir serbest ucu üzerindeki akış durumunda tüm Reynolds sayılarında hücum kenarında akış ayrılmasının oluştuğu; düşük Reynolds sayısında ( $Re_d=1000$ ) sonlu-silindir serbest yüzeyi üzerinde ayrılma baloncuğu ve yeniden yapışma bölgesinin oluştuğu; artan Reynolds sayısı (Reynolds sayısının 7000 değerine kadar) ile yeniden yapışma bölgesinin oluşmadığı görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinde ise tüm Reynolds sayılarında sonlu silindir serbest yüzeyi üzerinde negatif yönlü dönen girdapların oluştuğu, artan Reynolds sayısı ile girdaplılık değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Sonlu silindir arkasındaki akışlar, tabanda oluşan ANG yapısı, sonlu silindir orta bölgesinde oluşan girdap kopmaları ve serbest yüzey üzerinde oluşan akış yapılarından etkilenen üç boyutlu karmaşık bir yapı ortaya çıkarmaktadır.

Sonuç olarak deneysel çalışma sonucunda, sonsuz-silindir üzerindeki iki boyutlu akış yapısından farklı olarak sonlu-silindir üzerindeki akışın birçok girdap sistemlerinin birleşmesinden oluştuğu ve daimi olmayan karmaşık bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra sonsuz silindir üzerindeki akış yapısından farklı olarak akışın sonlu-silindir serbest ucundan etkilenerek, sonlu-silindir arka bölgesinde, silindir serbest yüzeyinden aşağı doğru oluşan karmaşık bir akış yapısının meydana geldiği gözlenmiştir.



**Şekil 10.** Sonlu Dairesel Silindir Arkasında Tabanda  $Z/H=0.0$  Mesafesinde Aşağı Akım Yönünde Oluşan Akış Yapısının  $Re_d=1000$  İle 7000 Değerleri İçin PIV Deneylerinden Elde Edilen Zaman Ortalama Hız Alanları  $\langle V \rangle$ , Akım Çizgileri  $\langle \psi \rangle$  ve Girdap Eş Düzey Eğrileri  $\langle \omega \rangle$



**KAYNAKLAR**

- [1] Szepessy, S, Bearman P.W., Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol:234, pp:191–217, 1992
- [2] Williamson, C.H.K., Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 579–628, 1989
- [3] Kline S. J., Robinson S. K., Quasi-coherent structures in the turbulent boundary-layer 1. status-report on a community-wide summary of the data. *Proceedings Of The International Centre For Heat And Mass Transfer*, Vol. 28, pp: 200-217, 1990
- [4] Ayoub, A., Karamcheti, K., An experiment on the flow past a finite circular cylinder at high subcritical and supercritical Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.118, pp.1–26, 1982
- [5] Kim, H. T., Kline, S. J. ve Reynolds, W. C., The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.50, pp.133–160, 1971
- [6] Yükselen, M.A., Sınır tabaka ders notları, <http://www3.itu.edu.tr/~yuksele/uzb386>, (23 Temmuz 2010 tarihli), İstanbul,
- [7] Park, C. W. and S.J. Lee, Flow structure around two finite circular cylinders located in an atmospheric boundary layer : side-by-side arrangement., *Journal of Fluids and Structures* 17, pp. 1043–1058, 2003.
- [8] Marakkos, K., Turner, J. T., Vortex generation in the cross-flow around a cylinder attached to an end-wall. *Optics and Laser Technology* vol. 38, pp. 277–285, 2006
- [9] Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Zhang, X., Measurements of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plane, *Experiments in Fluids*, 39: 10–21, 2005
- [10] Wieselberger, C., Weitere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes., *Physik. Zeitschr.*, vol.23, pp.219-224, 1922
- [11] Sumner, D., Hesseltine, J. L., Dansereau, O. J. C., Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio. *Exp. Fluids*, 37, 720–730, 2004
- [12] Farivar, D.J., Turbulent uniform flow around cylinders of finite length. *AIAA J.*, vol.19, pp.275-281, 1981
- [13] Kareem, A., Cheng, C.M. and Lu, P.C., Pressure and force fluctuations on isolated circular cylinders of finite height in boundary layer flows. *J.Fluids Structure.*, 3, 481-508, 1999
- [14] Zdravkovich, M. M., Brand, V. P., Matthew, G. And Weston, A. Flow past short circular cylinders with two free ends. *J. Fluid Mech.*, 203, 557-575. 1989
- [15] Park, C. W. and S.J. Lee, Effects of free-end corner shape on flow structure around a finite cylinder, *Journal of Fluids and Structures* 19, pp. 141–158, 2004
- [16] Uematsu, M. Yamada and K. Ishii,, Some effects of free-stream turbulence on the flow past a cantilevered circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 33, pp. 43–52, 1990
- [17] T.A. Fox, C.J. Apelt and G.S. West, The aerodynamic disturbance caused by the free-ends of a circular cylinder immersed in a uniform flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 49 (1993), pp. 389–400. 1993
- [18] A Salvador, G.P., Stoesser, T., Fröhlich, J., Kappler, M., Rodi, W., Large eddy simulation and experiment around finite-height cylinder, *Flow Turbulence Combustion*, 84:239-275, 2010
- [19] Holscher, N. und Niemann, H. J. Some aspects about the ow around a surface-mounted circular cylinder in a turbulent shear flow *Proc. 6th Int. Sym. on Turbulent Shear Flows*, Toulouse 1987
- [20] Paydaş, K., Flow structure behind a perforated circular cylinder in shallow water. Yüksek Lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 2008
- [21] Adrian, R. J., Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.23, pp.261-304, 1991
- [22] Westerweel, J., Digital particle image velocimetry. Theory and Application. Delft University Press, 1993
- [23] Rockwell, D., Magness, C., Towfighi, J., Akın, O. & Corcoran, T. High image-density particle image velocimetry using laser scanning techniques. *Experiments in Fluids* 14, 181-192, 1993
- [24] Oztürk NA., Investigation of flow characteristics in heat exchangers of various geometries. Ph.D. thesis. Adana (Turkey): Cukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering Division, 2006

## ÖZGEÇMİŞ

### Salih ÇELİK

1983 yılı Manisa doğumludur. 2009 yılında MKÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitede 2009 yılında başlamış olduğu yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Akışkanlar Mekaniği, Isıtma-Soğutma Uygulamaları, Isı Transferi ve Enerji Sistemleri konularında çalışmaktadır.

### Cuma KARAKUŞ

1971 yılı Adıyaman Besni doğumludur. 1992 yılında ÇÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversiteden 1996 yılında Yüksek Mühendis, 2007 yılında Doktor unvanını almıştır. 1994–2001 yılları arasında MKÜ’ de Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2007 yılından beri MKÜ Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü Enerji Anabilim Dalı’nda Yrd. Doç. Dr. Olarak görev yapmaktadır. Akışkanlar Mekaniği, Isıtma-soğutma Teknolojileri ve Enerji Sistemleri konularında çalışmaktadır.

### Beşir ŞAHİN

1954 yılı Hatay doğumludur. 1977 yılında Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. 1985 yılında doktorasını Brunel Üniversitesinde tamamlamış, 1987 yılında Yrd. Doç. Dr, 1991 yılında Doç. Dr ve 1997 yılında Profesör olmuştur. Halen ÇÜ’ de Profesör olarak çalışmakta olup Mühendislik Fakültesinde dekanlık görevini yürütmektedir. Akış Ölçme Teknikleri, Boru ve Kanallarda Akışlar, Engelli Akışlar, Girdaplı Akışlar, Sığ Sularda Girdaplı Akış, Çeşitli Hidrolik Güç İletim Sistemlerinin Tasarımı ve İmalatı, Hidrolik Sistemler konularında çalışmaktadır.

### Hüseyin AKILLI

1971 yılı Adana Doğumludur. 1991 yılı İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. 1993 yılında ÇÜ’ nde araştırma görevlisi, 2000 yılında Yrd. Doç. Dr ve 2005 yılında Doç. Dr. olmuştur. Halen ÇÜ’ nde Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Akışkanlar Mekaniği, Aerodinamik, Girdaplı Akışlar, Sığ Sularda Girdaplı Akış, İki Fazlı Katı-Gaz Akışı İle İlgili Konularda çalışma yapmaktadır.