








Investigation of interactions between a sphere wake and free surface

Sercan Doğan¹ , Muammer Özgören^{2*} , Abdülkerim Okbaz³ , Beşir Şahin⁴ , Hüseyin Akıl⁴ 

¹Konya Technical University, Engineering and Natural Science Faculty, Department of Mechanical Engineering, 42250, Konya, Turkey

²Necmettin Erbakan University, Engineering and Architecture Faculty, Department of Mechanical Engineering, 42060, Konya, Turkey

³Yıldız Technical University, Mechanical Faculty, Department of Mechanical Engineering, 34349, Istanbul, Turkey

⁴Cukurova University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 01330, Adana, Turkey

Highlights:

- Experimental investigation of turbulent flow characteristics around a sphere via PIV and dye visualization techniques
- Interpretation of interaction between free surface and a sphere from the point of flow physics
- Determination of sphere location and Reynolds number (Re) effects on the flow separation

Graphical Abstract

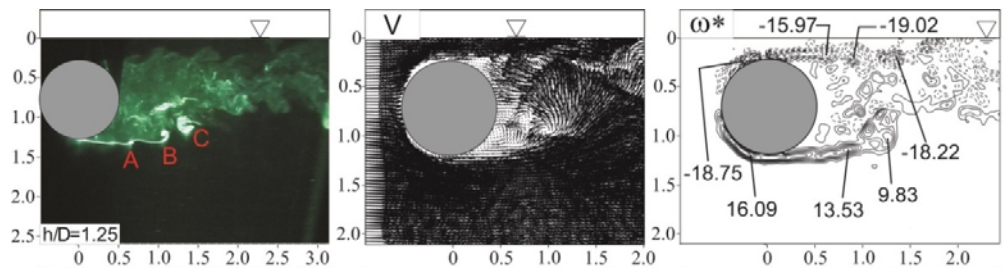


Figure A. Flow structure patterns of interactions between a sphere wake and free surface with dye visualization, instantaneous velocity vector field and vorticity contours for submersion ratio $h/D=1.25$

Keywords:

- Free surface
- PIV
- Sphere
- Turbulent flow
- Vortex

Article Info:

Received: 29.01.2016

Accepted: 21.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.453552

Acknowledgement:

The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK- Project No: 109R028), Scientific Research Projects Office of Cukurova University and Selcuk University's Scientific Research Project Office

Correspondence:

Author: Muammer Ozgoren
e-mail: muammerozgoren@gmail.com
phone: +90 555 451 7080

Purpose: The aim of the study is to present characteristics of flow-structure interaction between a sphere wake and a free water surface for different submerged elevations in an open water channel in the range of $2.5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$ by using Particle Image Velocimetry (PIV) and dye visualization techniques.

Theory and Methods:

Dye visualization and PIV experiments were performed in a large-scale open water channel with a test section length of 8000 mm and a width of 1000 mm at the Department of Mechanical Eng. at Cukurova University, Turkey. The sphere is placed from free surface partially submerged ratio to the free surface touching position to two sphere diameters below the free surface with different locations. Dye visualization, velocity vector fields and corresponding vorticity contours, streamline topology and velocity fluctuations were used to explain the characteristics of the flow. The results of the dye experiments, instantaneous vector field and vorticity contour obtained from the PIV experiments for $h/D=1.25$ are given in Fig.

Results:

The instantaneous vorticity fields and dye visualization results reveal an unsteady wavy structure of the sphere wake. Small scale vortices around the wake region designated by A to C are formed around larger vortices with a wavy appearance due to Kelvin Helmholtz instability as seen above Figure. Small-diameter vortices that formed as a result of flow separation in the wake region of sphere did not occur near region of the free surface. It has been determined that shedding from vortices around the sphere move in the downstream direction, the dimension of vortices grows and the effects in the wake decrease. As the distance between the free surface and the bottom shoulder of the sphere increases, the reattachment point to the free surface goes further upstream for $h/D=1$ and 1.1.

Conclusions:

The sphere was fixed at various submerged locations from the piercing the free surface case to the two sphere diameters beneath the free surface in the range of $0.25 \leq h/D \leq 3.0$. Depending on the sphere locations, characteristics of wake region exhibit three different flow phenomena. These are classified as; a restricted wake region between the free-surface and uniform flow stream for the submerged ratios of $0.25 \leq h/D \leq 1.0$, unsymmetrical flow patterns due to the free surface effect for the submerged ratios of $1.25 \leq h/D \leq 2.0$ and symmetrical flow structures for the submerged ratios of $2.5 \leq h/D \leq 3.0$. More detailed results for the aforementioned flow structures from the point of flow physics were comparatively presented and interpreted in the manuscript. The present results can be useful for validating numerical predictions and designers.



Serbest yüzey ve bir küre art izi arasındaki etkileşimlerin araştırılması

Sercan Doğan¹, Muammer Özgören^{2*}, Abdulkerim Okbaz³, Beşir Şahin⁴, Hüseyin Akıllı⁴

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 42250, Konya, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, 42060, Konya, Türkiye

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği, 34349, İstanbul, Türkiye

⁴Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 01330, Adana, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- PIV yöntemiyle küre çevresindeki türbülanslı akış karakteristiklerinin deneysel incelenmesi
- Serbest yüzey-küre etkileşiminin akış fiziği yönünden yorumlanması
- Akış ayrılmasına küre konumu ve Reynolds sayısının etkisinin belirlenmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 29.01.2016

Kabul: 21.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.453552

Anahtar Kelimeler:

Girdap,
küre,
parçacık görüntülemeli hız
ölçümü,
serbest yüzey,
türbülanslı akış

ÖZET

Bu çalışma, küre çapına göre tarif edilen Reynolds sayısının $2,5 \times 10^3$ ve 1×10^4 aralığında farklı daldırma yükseklikleri için açık bir su kanalında serbest su yüzeyi ve kürenin art izi bölgesi arasındaki akış yapısı etkileşimini sunmaktadır. Anlık ve zaman ortalaması alınmış hız alanı, akım çizgisi topolojisi, girdaplar ve hız konturları gibi akış modellerini göstermek için Parçacık Görüntülemeli Hız ölçme (PIV) ve boya görselleştirme teknikleri uygulanmıştır. Küre, serbest yüzeye kısmen daldırılma konumundan serbest yüzeyden iki küre çapı kadar aşağı doğru çeşitli daldırma konumlarına $0,25 \leq h/D \leq 3,0$ aralığında sabitlenmiştir. Daldırma oranı, küre alt kolunun serbest yüzey ile olan mesafesinin küre çapına oranı olarak tanımlanmıştır. Kürenin yerleştirildiği konumlara bağlı olarak, art izi bölgesinin özellikleri üç farklı akış olayı sergilemiştir. Bunlar; daldırma oranı $0,25 \leq h/D \leq 1,0$ aralığı için üniform akış bölgesi ve serbest yüzey arasındaki kısıtlı bir art izi bölgesi, daldırma oranı $1,25 \leq h/D \leq 2,0$ aralığı için serbest yüzey etkisinden dolayı simetrik olmayan akış modelleri ve daldırma oranı $2,5 \leq h/D \leq 3,0$ aralığı için simetrik akış yapıları olarak sınıflandırılmıştır. Akış fiziği açısından bahsedilen akış yapıları için daha detaylı sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Investigation of interactions between a sphere wake and free surface

H I G H L I G H T S

- Experimental investigation of turbulent flow characteristics around a sphere via PIV
- Interpretation of interaction between free surface and a sphere from the point of flow physics
- Determination of sphere location and Reynolds number effects on the flow separation

Article Info

Received: 29.01.2016

Accepted: 21.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.453552

Keywords:

Free surface,
particle image velocimetry,
sphere,
turbulent flow,
vortex

ABSTRACT

This paper presents flow-structure interaction between a sphere wake and a free water surface for different submerged elevations in an open water channel for Reynolds numbers in the range of $2.5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$ based on the diameter of the sphere. Particle Image Velocimetry (PIV) and dye visualization techniques were performed to demonstrate flow patterns such as instantaneous and time-averaged velocity field, streamline topology, vortices, velocity contours. The sphere was fixed at various submerged locations from the piercing the free surface case to the two sphere diameters beneath the free surface in the range of $0.25 \leq h/D \leq 3.0$. Here, submerged ratio was defined as ratio of bottom shoulder of the sphere from the free surface to the sphere diameter. Depending on the sphere locations, characteristics of wake region exhibit three different flow phenomena. These are classified as; a restricted wake region between the free-surface and uniform flow stream for the submerged ratios of $0.25 \leq h/D \leq 1.0$, unsymmetrical flow patterns due to the free surface effect for the submerged ratios of $1.25 \leq h/D \leq 2.0$ and symmetrical flow structures for the submerged ratios of $2.5 \leq h/D \leq 3.0$. More detailed results for the aforementioned flow structures from the point of flow physics were comparatively presented and interpreted.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: muammerozgoren@gmail.com / Tel: +90 555 451 7080

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küre ile ilgili literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların çoğu üniform akış şartlarında gerçekleştirilmiştir. Küre veya küresel geometriye benzeyen kıydan uzaktaki yakıt depoları, nehirlerdeki katı cisimler, küresel formdaki yüzen cisimler, spor topları, insanlı ve insansız küresel şekildeki denizaltı araştırma araçları, deniz altından gönderilen küre formundaki bombalar serbest yüzey-cisim etkileşiminin olduğu uygulama alanlarıdır. Akışkan içerisine küre gibi bir küt cisim yerleştirildiğinde, akışkanın cismi geçmesiyle oluşan dinamik akış yapısı önemli oranda değişmektedir. Küt cisimler etrafında meydana gelen bu olay, karmaşık ve türbülanslı akış yapıları oluşturmaktadır. Bu durum, cisim üzerindeki sürüklenme ve kaldırma kuvveti, titreşimler, yorulma gibi istenmeyen olaylara sebep olmaktadır. Bu nedenle, gerçek hayatta kullanılan benzer uygulamalar için akış yapısı ve bu yapının oluşturduğu etkinin detaylı olarak araştırılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada bir küre ile serbest su yüzeyi arasındaki etkileşimler deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalar, PIV ve boya ile akış görüntüleme olmak üzere iki farklı yöntemle yapılarak küre etrafındaki akış görüntülenmiştir ve farklı akış yapıları elde edilerek yorumlanmıştır. Yapılan çalışmaya; deneysel ve sayısal yöntem, küre daldırma oranı, Reynolds sayısı aralığı ve küt cisim geometrisi gibi benzer yönleri olan literatür çalışmaları araştırılarak verilmiştir. Yapılan araştırmaya benzer olarak literatürdeki en temel çalışmalarda; Achenbach [1], bir kürenin art izinin dönümlü yapısını Reynolds sayısının 1000 değerinde boya deneyi ile görüntülemiş ve Reynolds sayısının 10^5 ile 10^6 aralığında akış ayrılma açısını incelemek için yüzey sürtünmesini ölçerek deneyler yapmıştır. Taneda [2], katı bir yüzeye yakın yerleştirilen silindirin akış yapısını deneysel olarak incelemiştir. Nakamura [3], küre art izindeki akış yapısını boya deneyi ile görüntülemiştir.

Çalışmada, serbest su yüzeyinin, küre etrafında meydana gelen akış üzerindeki etkisini araştırmak için kürenin serbest yüzeye temasta olduğu, kısmen su yüzeyinin içine daldırıldığı ve tamamen daldırıldığı durum olmak üzere üç farklı etkileşim bölgesi incelenmiştir. Bu etkileşimleri incelemek için literatürde farklı deneysel ve sayısal yöntemlerle yapılmış çalışmalarda mevcuttur. Sakamoto ve Haniu [4], küre etrafında meydana gelen girdap kopmalarını $Re=300-40,000$ aralığında sıcak tel anemometresi tekniği ile üniform akış şartlarında deneysel olarak araştırmışlardır. Sheridan ve ark. [5] ile Hoyt ve Sellin [6], serbest yüzeye yerleştirdikleri bir silindir etrafındaki akış yapısını PIV tekniği ve boya görüntüleme tekniği kullanarak incelemiştir. Sheridan ve ark. [7] yapmış olduğu bir çalışmada, silindir üst yüzeyi ile serbest akış yüzeyi arasındaki mesafenin geniş bir aralığı için silindir arkasında oluşan akış yapısını PIV metodu ile deneysel olarak gözlemlemiştir. Yapılan çalışmada, Reynolds sayısı $2,5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$ aralığında ve kürenin su içerisine daldırma oranı $0,25 \leq h/D \leq 3,0$ aralığında değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Benzer çalışma aralığında yapılan

sayısal ve deneysel literatür çalışmaları da mevcuttur. Hassanzadeh ve ark. [8], Large Eddy Simulation ve Smagorinsky isimli dinamik türbülans modellerini kullanarak Reynolds sayısının 5,000 olduğu değer için $h/D=0,25, 0,5, 1,0$ ve $2,0$ olan dört farklı daldırma oranlarında serbest yüzey altındaki bir küre etrafındaki akış yapısını sayısal olarak incelemiştir. Yun ve ark. [9], bir küre üzerindeki türbülanslı akışı Large Eddy Simulation modeli ile sayısal olarak çözmüştür. Y II. ve Jang S. [10], küre art izindeki dönümlü akış yapısını PIV yöntemi ile deneysel olarak görüntülemiştir. Özgören ve ark. [11], serbest bir su yüzeyinin, pürüzsüz ve delikli küreler ile etkileşimini $Re=5,000$ değeri için boya ve PIV deneyleri ile görüntüleyerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Özgören ve ark. [12], bu çalışmada pürüzsüz, pürüzlü, delikli ve o-ring takılmış küreler ile serbest su yüzeyi etkileşimini deneysel olarak incelemiştir. Özgören ve ark. [13], dairesel silindirler ve kare silindir etrafındaki akış yapılarını DPIV yöntemiyle inceleyerek girdap kopma frekansları üzerine detaylı çalışmışlardır. Doğan [14], yaptığı tez çalışmasında serbest bir su yüzeyi ile küre etkileşimini detaylı olarak PIV yöntemiyle farklı daldırma oranları ve Reynolds sayılarında incelemiştir.

Yapılan çalışmaya benzer olarak küt cisim ile serbest su yüzeyinin etkileşimini içeren sayısal ve deneysel karşılaştırmalar ve PIV yöntemi ile akış karakteristiklerinin incelendiği literatür araştırmalarından bazıları da özetlenmiştir. Triantafyllou ve Dimas [15, 16] yaptıkları çalışmalarda, silindirin yarıçapı akış içerisinde kalacak şekilde ($h/D=0,5$) yerleştirilerek akış yapısını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Ayrıca, cisim arkasında oluşan sirkülasyon bölgesi uzunluğunun Reynolds sayısına bağlı olduğu Fornberg [17] tarafından yapılan çalışmada doğrulanmıştır. Yu ve Tryggvason [18], serbest su yüzeyine yerleştirilmiş bir silindir arkasında oluşan akış yapısını sayısal olarak incelemiştir. Hem deneysel hem sayısal olarak serbest akış yüzeyi ile silindir etkileşimi Miyata ve ark. [19] tarafından araştırılmıştır. Reichl ve ark. [20], serbest yüzey ile bir silindir etkileşimini Reynolds sayısının 180 değeri için sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarını Froude sayısının, 0-0,7 aralığında ve 0,1-5 arasındaki boşluk oranları için yapmışlardır. Zhu ve ark. [21], serbest yüzeye yakın yerleştirilen silindir çevresinde oluşan akış yapısını daldırma oranına bağlı olarak PIV yöntemi ile araştırmışlardır. Tunçer ve ark. [22], yanma odalarındaki alev stabilizasyonu içindeki girdap yapısını oluşturmak için, akışı bir girdap vanesinden geçirmişler ve PIV yöntemi ile hız vektörlerini incelemiştir. Aküzüm ve Aygün [23], örnek bir mermi modeli için farklı geometrilerdeki mermilerin sürüklenme katsayılarını minimize etmek amacıyla deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Zafer ve Coşgun [24], yaptıkları çalışmada 2 ve 3 boyutlu kavite profili boyunca sıkıştırılmaz, zamana bağlı akış alanı ve aerodinamik kaynaklı aeroakustik gürültüleri farklı türbülans modelleri kullanarak incelemiştir. Zhao ve ark. [25], bir kürenin sınır tabaka etkileşimi sonucu ortaya çıkan art izi akış yapısı ve girdap karakteristiklerini sayısal olarak

çözümlemişlerdir. Bu çalışmada da Reynolds sayısı $2,5 \times 10^3$ ile 1×10^4 arasında olacak şekilde dört farklı durum için daldırma oranı, $0,25 \leq h/D \leq 3,0$ aralığında değiştirilerek PIV ve boya deneyleri ile araştırmalar yapılmıştır. Serbest akış yüzeyi ile bir kürenin etkileşimi sonucu ortaya çıkan akış yapısı görsel ve sayısal olarak sunulmuştur.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneyler, 8000 mm uzunluğa ve 1000 mm genişliğe sahip büyük ölçekli açık bir su kanalında Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır. Küre ile serbest su yüzeyi arasındaki etkileşim sonucu oluşan akışın PIV ile görüntülenmesi için kurulan deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir. Küre çapına göre tarif edilen deneylerdeki Reynolds sayısı aralığında serbest akım türbülans yoğunluğu %0,5' den daha az olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısını hesaplamak için Eş. 1'de verilen denklem kullanılmıştır.

$$Re = \frac{U_{\infty} D}{\nu} \quad (1)$$

Serbest akım hızı U_{∞} , deneylerde 58,8-235,2 mm/s aralığında değiştirilmiştir. Çapı, 42,5 mm olan ve D ile ifade edilen küre, lazer ışığını daha kolay bir şekilde geçiren akrilik malzemeden üretilmiştir. Küre, 2 mm kalınlıkta ve içi boş olarak imal edilmiştir. Ayrıca, kürenin 38,5 mm boş olan kısmı lazerin yansımadan geçmesini sağlamak için saf su ile doldurulmuştur. Tüm deneylerde su yüksekliği h_w , 450 mm olarak ayarlanmıştır. Su derinliğine, h_w bağlı olarak hesaplanan Froude sayısı değişik hız değerleri için 0,0279 ile 0,1119 arasında değiştirilmiştir ve tüm durumlarda 1'den küçük olduğu için akış kritik altı akıştır. Froude sayısını hesaplamak için Eş. 2'de verilen denklem kullanılmıştır.

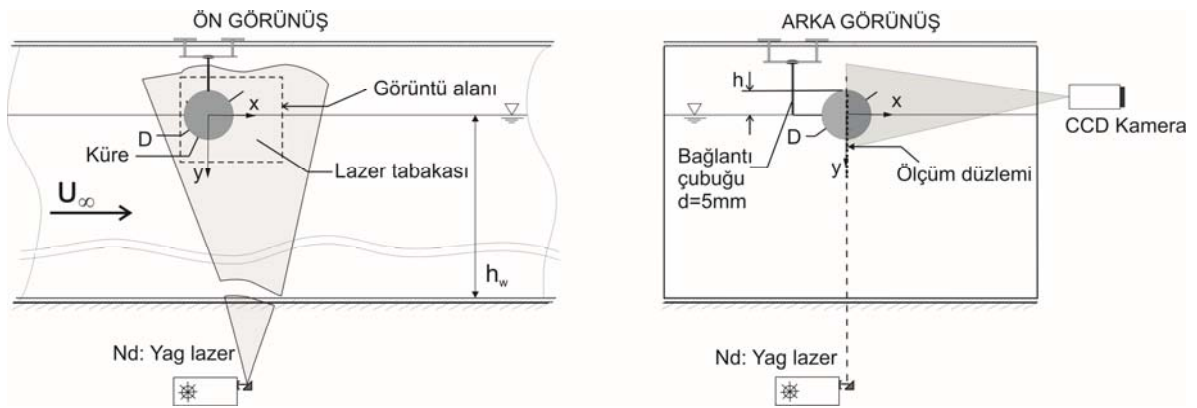
$$Fr = \frac{U_{\infty}}{\sqrt{g h_w}} \quad (2)$$

Boya deneylerinde kullanılan küre için küre yüzeyine 0,7 mm çapında ve akış yönüne göre 0° , 70° , 90° , 110° , 180° , 250° , 270° ve 290° açılarında olmak üzere delikler açılmıştır. Deneylerde 100mJ kapasiteli, 15 Hz darbeli Nd:YAG lazer

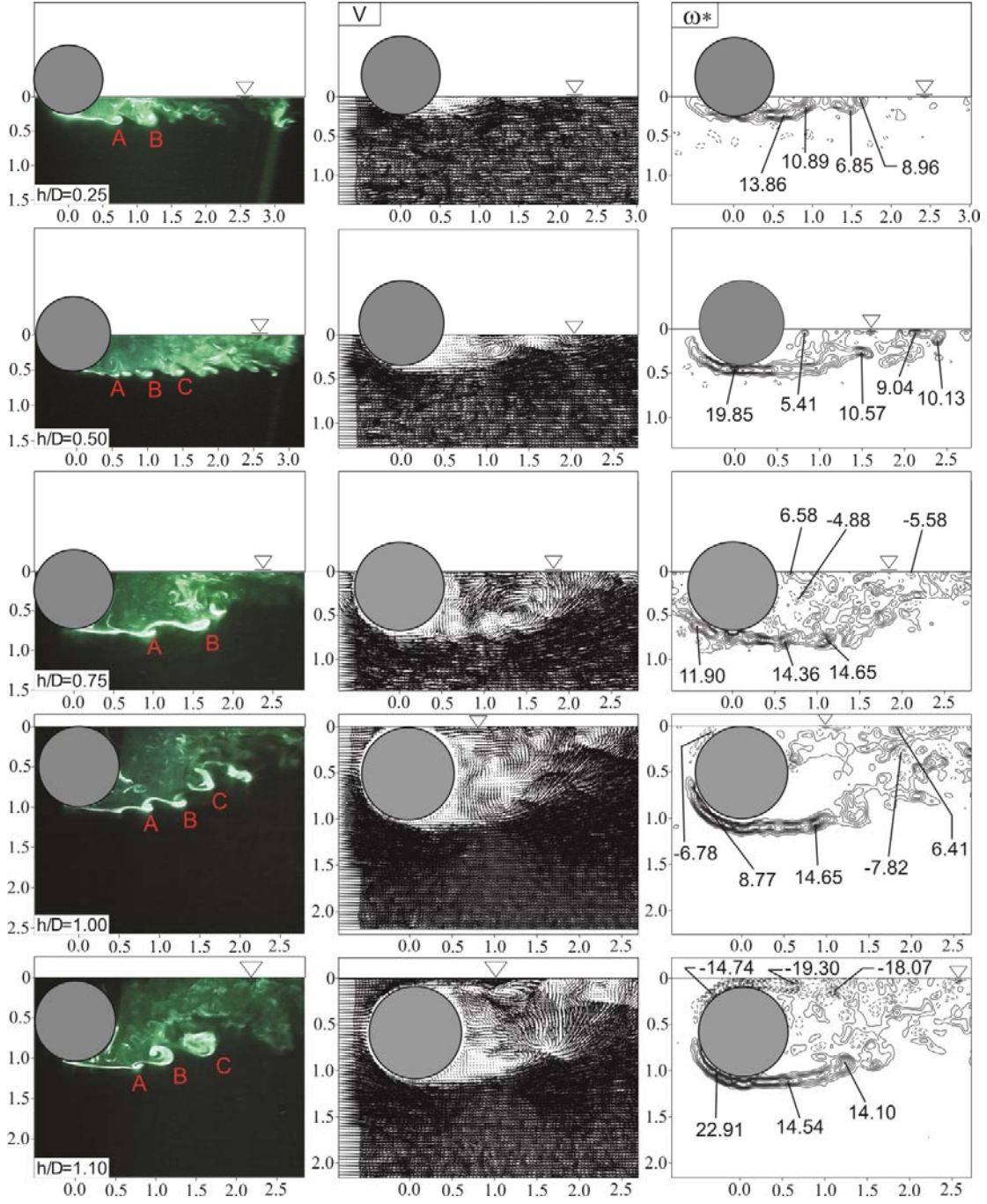
kullanılmış ve lazer, küre merkezinden dik olarak geçecek şekilde ayarlanmıştır. Akış alanındaki lazer tabakası kalınlığı yaklaşık olarak 1,5 mm'dir. Deneylerden elde edilen resimleri kaydetmek için 1600x1186 piksel değerinde çözünürlüğe sahip bir adet CCD kamera kullanılmıştır. Gümüş ile kaplanmış ve 10 μ m çapa sahip kürelerden oluşan partiküller akışkana (su) karıştırılmıştır. Yoğunlukları suya yeterince yakın olan partiküller birkaç saat üniform bir şekilde su içinde askıda kalmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi kamera su kanalı altına sabit bir şekilde monte edilmiştir. Anlık hız vektörleri, her durum için iki adet Partikül resim verileri dikkate alınarak Dantec PIV yazılımında çapraz korelasyon algoritması uygulanarak hesaplanmıştır. PIV'den elde edilen hız datalarının belirsizliğinin hesaplanmasında partikül boyutu, partiküllerin homojen dağılmaması, partiküllerin akış esnasında üst üste gelmesi, korelasyondaki partiküllerin eşleşmemesi, partiküllerin görüntü alınması esnasında lazer düzleminden çıkması, hız vektörlerinin hesaplanmasında oluşturulan girdi yapısının boyutu, elektronik ve optik cihazlardan oluşan gürültüler, imaj görüntüleme büyüklüğünün etkili olduğu ve bunların toplamda $\pm\%2-5$ arasında belirsizlik değeri oluşturduğu literatürde verilen çalışmalarda belirtilmiştir [14].

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Boya ile akış görselleştirme ve PIV deneylerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2' de $0,25 < h/D < 1,10$ daldırma oranı aralığında ve Şekil 3'de $1,25 < h/D < 3,00$ daldırma oranı aralığında $Re=5000$ değeri için boya deney sonuçları, anlık hız vektörleri ve anlık girdap eş değer eğrileri yan yana sütunlarda olacak şekilde sırasıyla verilmiştir. Boya deneyleri için küre yüzeyinde açılmış çok küçük deliklerden düşük hızda akan boya akış içerisine enjekte edilmiştir. Boya deneylerinde nitel olarak görülen girdapların büyüklük değerleri PIV deneylerinde nicel olarak görülmesi için anlık girdap resimlerinin üzerine yazılmıştır. Anlık girdap değerlerinde sürekli çizgi saat yönünün tersinde dönen pozitif girdapları ve kesikli çizgi ise saat yönünde dönen negatif girdapları temsil etmektedir.



Şekil 1. PIV deney sisteminin şematik gösterimi (Schematic view of the experimental setup of PIV system)

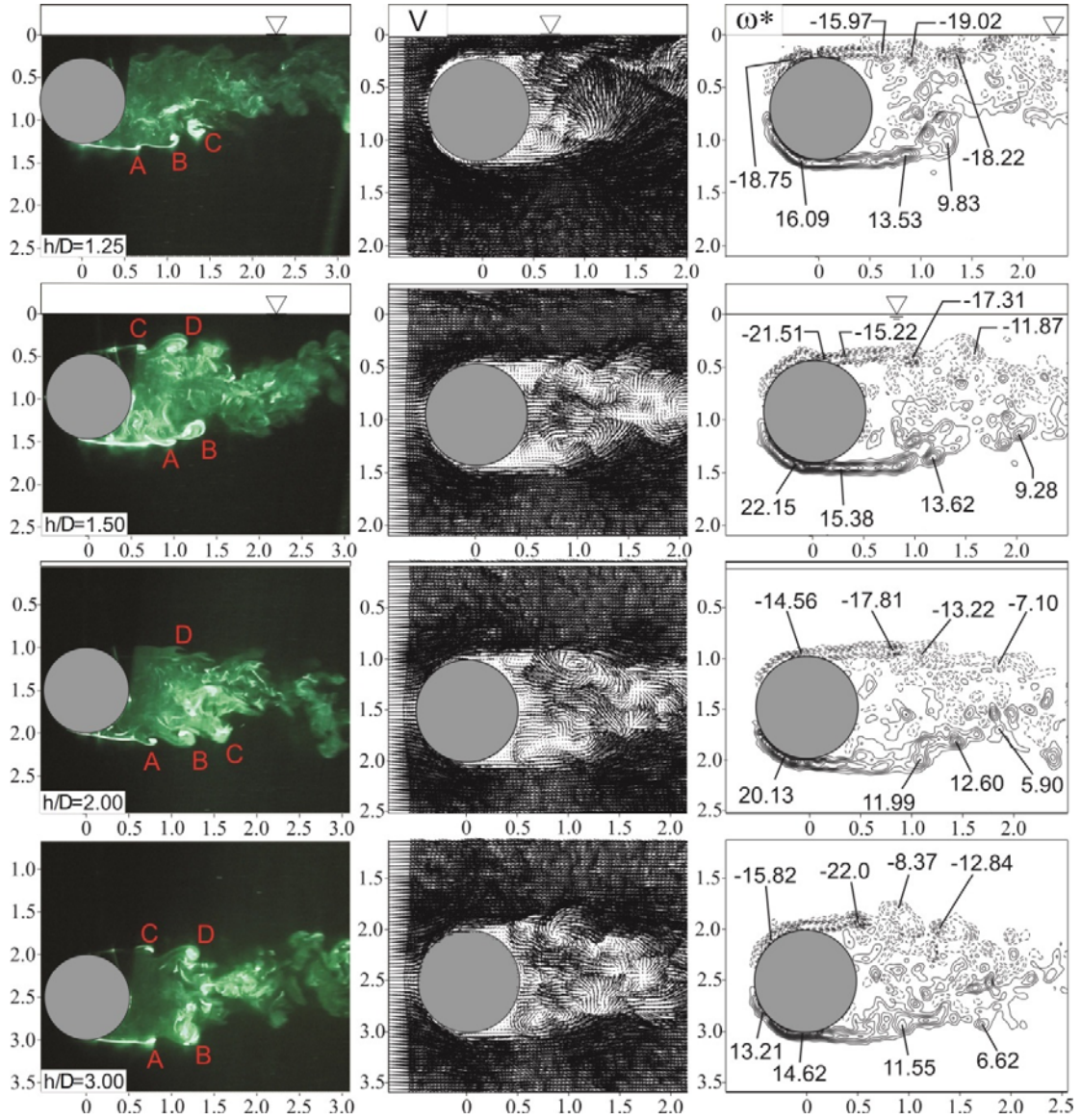


Şekil 2. Anlık boya, hız vektörü (V) ve girdap (ω^*) akış yapılarının $Re=5 \times 10^3$ değeri ve $0,25 \leq h/D \leq 1$ aralığı için karşılaştırılması

(Comparison of instantaneous dye, velocity vector (V) and vorticity (ω^*) flow structures around the sphere for $0,25 \leq h/D \leq 1$ at $Re=5 \times 10^3$)

Tüm şekillerde boyutlar x/D ve y/D şeklinde küre çapına bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Küre arkasında meydana gelen akışın çok karmaşık ve farklı boyutlarda girdaplardan oluştuğu boya deneylerinden elde edilen anlık sonuçlarda görülmektedir. Boya deneylerinde, serbest akım hızı ile art izi bölgesindeki düşük hıza sahip akış arasındaki hız farkından meydana gelen Kelvin Helmholtz girdapları, A-D arasındaki harflerle alfabetik olarak isimlendirilmiştir. Oluşan bu girdaplar aşağı akım yönünde ilerledikçe boyut

olarak büyümekte ancak sayısal değerleri genelde azalarak devam etmektedir. Şekil 2' de görüldüğü gibi kürenin alt kısmından kopan girdaplar $h/D=1,10$ daldırma oranı da dâhil olmak üzere serbest su yüzeyi ile etkileşime girmektedir. Su yüzeyi ile etkileşen girdaplar serbest akış yüzeyi tarafından sönmelenmektedir. Başlangıç olarak A harfi ile isimlendirilen Kelvin-Helmholtz girdapları aşağı akım yönünde dönerek ilerlerken çalkantılı ve düzensiz bir akış yapısının oluşmasına neden olmaktadır. B ve C ile

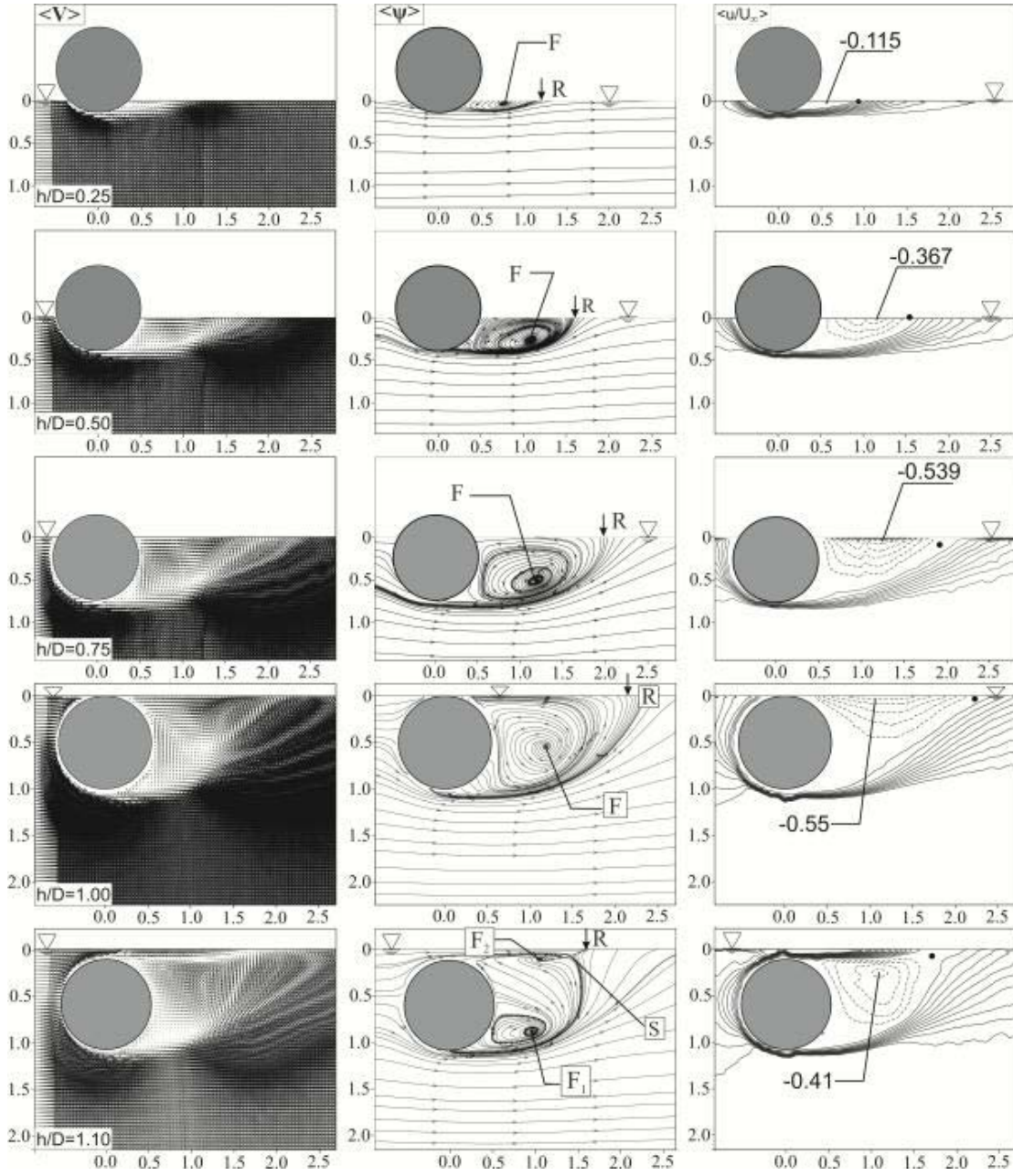


Şekil 3. Şekil 2' de verilen sonuçların $1,25 \leq h/D \leq 3,0$ aralığı için karşılaştırılması
(Continuation of Figure 2 in the range of $1,25 \leq h/D \leq 3,0$)

isimlendirilen girdaplar ise ilerledikçe boyutları büyümektedir ve art izi bölgesindeki etkileri azalmaktadır. Üst yüzey olarak bahsedilen $h/D=0,25$, $0,50$ ve $0,75$ daldırma oranları için kürenin sadece belli bir kısmı su kanalı içerisine daldırılarak deneyler yapılmıştır. Kürenin üst kısmından akış geçmediği için kürenin sadece alt kolundan pozitif girdap kopmaları ve akış ayrılmasının olduğu görülmüştür. Özellikle $h/D=0,75$ daldırma oranı için küre art izinin y eksenı yönündeki boyutu, $h/D=0,25$ ve $h/D=0,50$ daldırma oranlarına göre daha büyük bir yapıdadır. Üst yüzey bölgesinde yapılan deneyler için tüm daldırma oranlarında kürenin alt kolundan kopan pozitif girdaplar daha sonra aşağı akım yönünde ilerleyerek serbest su yüzeyi ile birleşmektedir. Küre üst noktasının serbest su yüzeyine tam temas ettiği $h/D=1,0$ durumunda üst yüzey deneylerinde olduğu gibi kürenin sadece alt kolundan akış ayrılması olmuştur. Bu daldırma oranında serbest su yüzeyi, katı bir

cidar gibi davranış gösterdiği için küre art izindeki hareketliliğin yavaşlamasına neden olmuştur ve yine bu durumdan dolayı, daldırma oranı $h/D=1,10$ ve $h/D=1,25$ olduğunda serbest yüzey ile kürenin üst noktası arasında jet formunda akış oluştuğu görülmektedir. Her iki daldırma durumu içinde kürenin alt kolundan kopan pozitif girdapların değerleri aşağı akım yönünde ilerledikçe azalmaktadır. Kürenin her iki kolundan da kopan girdaplar ve akış ayrılması net olarak boya ve PIV deneylerinden elde edilen Şekil 3'te ki sonuçlarda görülmektedir.

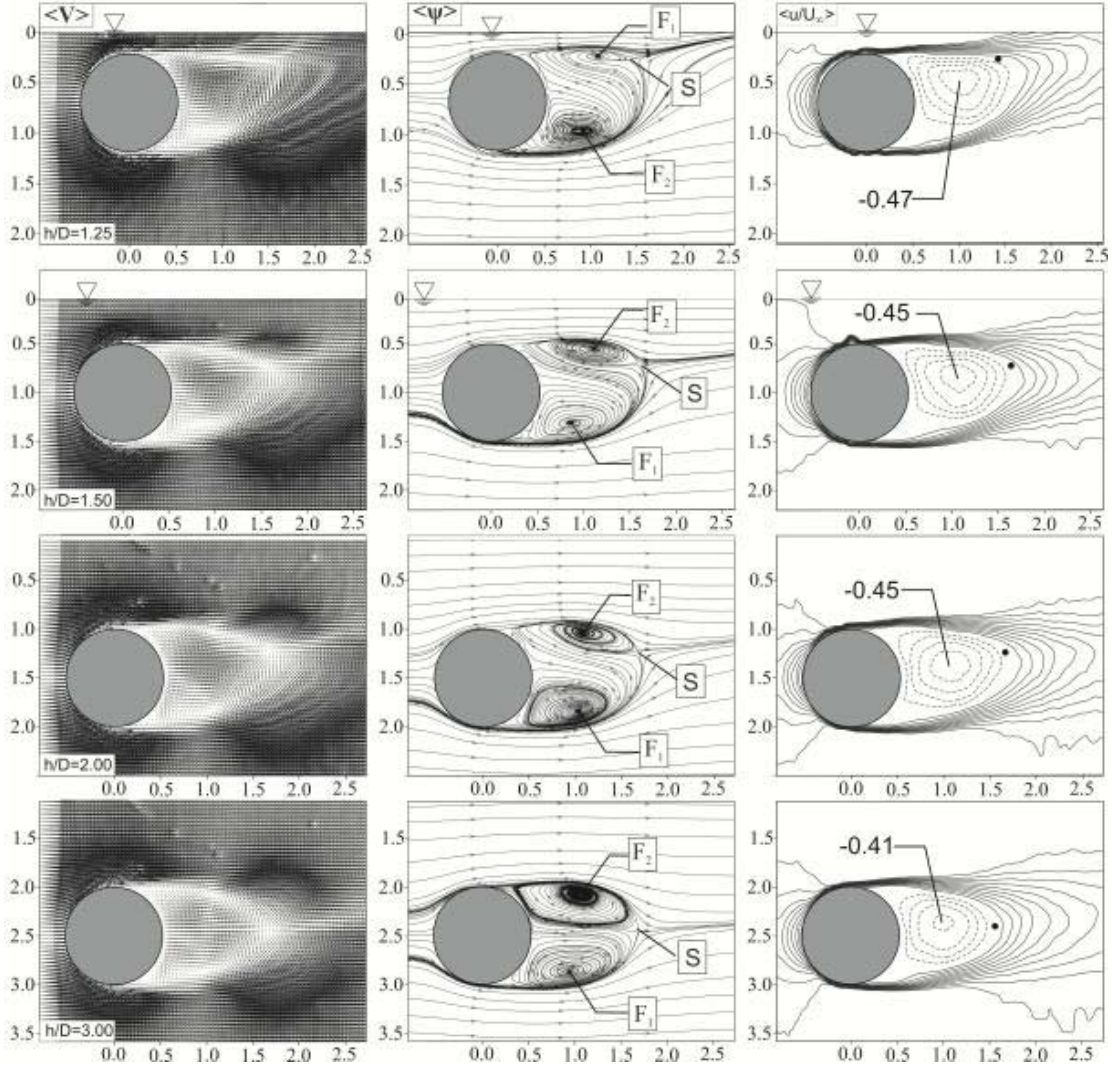
Daldırma oranı $h/D=1,25$ 'den sonra düzenli bir şekilde ve kürenin her iki kolundan kopan girdaplar serbest yüzey etkisinin azaldığını ve neredeyse hiç olmadığını göstermektedir. Daldırma oranı $h/D=1,25$ 'den sonra küre arkasında oluşan karmaşık ve çalkantılı art izi bölgesinin x eksenı yönündeki uzunluğunun kısaldığı görülmektedir.



Şekil 4. Zaman ortalaması alınmış hız vektör alanı $\langle V \rangle$, akım çizgisi modelleri $\langle \Psi \rangle$ ve zaman ortalamalı x yönündeki hız bileşenlerinin $\langle u \rangle$ $Re=5 \times 10^3$ değeri ve $0.25 \leq h/D \leq 1, 1$ aralığı için karşılaştırılması
(Comparison of time-averaged velocity vector field $\langle V \rangle$, streamline patterns $\langle \Psi \rangle$ and streamwise velocity component in x directions $\langle u \rangle$ at $Re=5 \times 10^3$)

Daldırma oranı $h/D=1,5, 2,0$ ve $3,0$ durumları için kürenin etrafından ayrılan akışın dalgalı bir şekilde "S" şeklinde Karman Girdap Caddesi oluşturduğu boya deneylerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4 ve Şekil 5'te zaman ortalaması alınmış hız vektörleri $\langle V \rangle$, akım çizgisi modelleri $\langle \Psi \rangle$ ve akım yönündeki $\langle u \rangle$ hız konturları $Re=5000$ değeri için karşılaştırılması olarak verilmiştir. Zaman ortalaması hız vektörleri $\langle V \rangle$, ve akım çizgisi $\langle \Psi \rangle$, dağılımında görüldüğü gibi kürenin daldırma oranı $h/D=1,5$ olduğu durumda serbest yüzeyin akış yapısı üzerine etkisinin yok denecek kadar azaldığı küre art izinde oluşan simetriğe yakın akış

yapısından anlaşılmaktadır. Ortalaması alınmış akım çizgilerinde $\langle \Psi \rangle$, görüldüğü gibi üst yüzeydeki tüm daldırma oranlarında küre etrafından ayrılan akış serbest yüzeye birleştiği görülmektedir ve birleşmenin gerçekleştiği durumlarda birleşme noktaları akım çizgisi modelleri üzerinde "R" harfi ile gösterilmiştir. Art izi bölgesinin boyutu ve oluşan akışın simetrikliği hakkında bilgi veren oluşan odak noktaları akım çizgisi modellerinde "F" sembolü ile ifade edilmiştir ve daldırma oranı $h/D=1,10$ olana kadar cisim art izinde sadece birer adet odak noktası F, meydana gelmektedir. Diğer tüm daldırma oranlarında iki adet odak



Şekil 5. Şekil 4' de verilen sonuçların $1,25 \leq h/D \leq 3,0$ aralığı için karşılaştırılması
(Continuation of Figure 4 in the range of $1,25 \leq h/D \leq 3,0$)

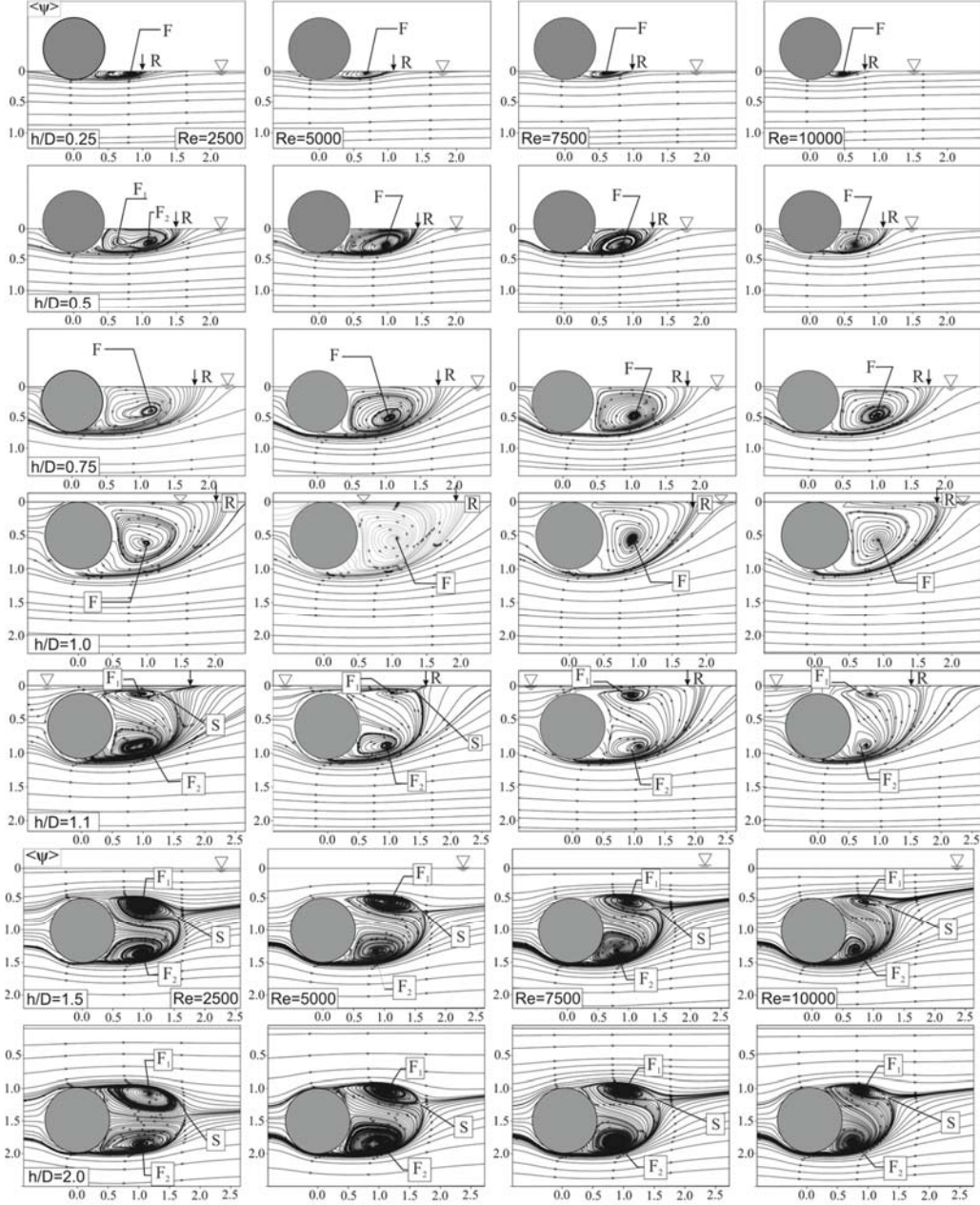
noktası F, oluşmaktadır. Sonuç olarak $h/D=1,5$ olan daldırma oranından sonra akışın üniform akış şartlarına çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Negatif hız değerlerine sahip hız konturları kesikli çizgi ve pozitif hız değerlerine sahip konturlar sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Şekil üzerindeki değerler serbest akım hızı olan $117,6 \text{ mm/s}$ değeri ile boyutsuz yapılmıştır. Akım yönündeki hız konturları $\langle u^* \rangle$, küre arkasında negatif değerler almaktadır. Hız değerlerinin sıfır olduğu yerler, Şekil 4 ve Şekil 5'te siyah nokta ile gösterilmiştir ve bu noktaların akım çizgisi modellerinde "S" ile gösterilen düğüm noktaları ile aynı yerde olduğu belirlenmiştir. En düşük negatif hız değerleri üst yüzeye yakın daldırma oranı olan $h/D=0,25$ durumunda $-0,115$ olarak tespit edilmiştir. Daldırma oranı $h/D=1,1$ 'de küre üst noktasından oluşan jetin etkisiyle negatif hız değerlerindeki bu artış azalmaya başlamaktadır. Hız değerlerinde daldırma oranının $h/D=1,10$ oranına kadar bir artış olduğu görülmektedir. Ancak bu daldırma oranından sonra hız değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir ve $h/D=3,0$ seviyesine kadar negatif hız değerleri birbirine yakın

değerler almaktadır. Küre su içerisine daldırıldıkça, simetri ekseninin üst kısmında oluşan negatif hız değerlerinin yerleri küre simetri merkezine doğru kaymaktadır. Serbest yüzeyin etkisinin azaldığı $h/D=1,5, 2,0$ ve $3,0$ daldırma oranlarında hız değerlerinde çok fazla bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Tüm Reynolds sayıları ve $0,25 \leq h/D \leq 1,10$ daldırma oranı aralığı için serbest yüzeyle birleşme noktası R'nin küre çapıyla boyutsuzlaştırılmış değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Reynolds sayısının 5000 değeri için $h/D=0,25, 0,50, 0,75$ ve $1,0$ daldırma oranlarında serbest yüzeyle birleşme noktası olan R'nin küre merkezinden olan uzaklığı küre çapı ile boyutsuzlaştırılarak sırasıyla $1,06D, 1,56D, 1,97D$ ve $2,16D$ olarak hesaplanmıştır. Bu durum aynı zamanda küre su kanalı içerisine daldırıldıkça art izinde de genişleme meydana geldiğini göstermektedir. Birleşme noktası R, artan Reynolds sayısı ile küre merkezine daha da yaklaşmaktadır. Daldırma oranı $h/D=0,25$ için Reynolds sayısının $2,5 \times 10^3, 5 \times 10^3, 7,5 \times 10^3$ ve 1×10^4 değerlerinde birleşme noktası R sırasıyla $1,12D, 1,06D, 0,95D$ ve $0,79D$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da zaman ortalaması alınmış

Tablo 1. Şekil 6'da verilen serbest yüzeye birleşme noktası R' in küre merkezinden uzaklığı L/D'nin farklı Reynolds değerleri için karşılaştırılması

(Comparison of the distance L/d of the reattachment point R with free surface for different Reynolds number in Figure 6)

Daldırma Oranı	Re=2500 (L/D)	Re=5000 (L/D)	Re=7500 (L/D)	Re=10000 (L/D)
h/D=0,25	1,12	1,06	0,95	0,79
h/D=0,50	1,67	1,56	1,43	1,19
h/D=0,75	2,02	1,97	1,94	1,90
h/D=1,00	2,00	2,16	1,96	1,94
h/D=1,10	1,74	1,57	1,85	1,49

**Şekil 6.** Zaman ortalaması alınmış akım çizgisi modellerinin $\langle \Psi \rangle$ Reynolds sayısının $2,5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$ aralığı için $0,25 \leq h/D \leq 2,0$ daldırma oranlarında karşılaştırılması(Comparison of time-averaged streamline patterns $\langle \Psi \rangle$ in the range of different submerged ratios $0,25 \leq h/D \leq 2,0$ and Reynolds numbers $2,5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$)

akım çizgisi modelleri $\langle \Psi \rangle$ için $Re=2,5 \times 10^3$, 5×10^3 , $7,5 \times 10^3$ ve 1×10^4 aralığındaki değişimler verilmiştir. Küre etrafından kopan akışın yüzeyle birleşmesi daldırma oranı $0,25 \leq h/D \leq 1,10$ aralığında açıkça görülmektedir. Daldırma oranı arttıkça aşağı akım yönünde ilerleyen birleşme noktası R , $h/D=1,10$ durumunda küreye yaklaşmaktadır. Bunun nedeni, kürenin üst noktası üzerinden geçerek ayrılan akışın yüzeye birleşme noktasını küreye doğru yaklaştırması olarak düşünülebilir. Bu daldırma oranı için birleşme mesafesi, $Re=2,5 \times 10^3$, 5×10^3 , $7,5 \times 10^3$ ve 1×10^4 için sırayla $1,74D$, $1,57D$, $1,85D$ ve $1,49D$ olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışmalar ile serbest su yüzeyi etkisi altına yerleştirilen bir küre için farklı daldırma oranlarında ($h/D=0,25-3,0$) ve farklı Reynolds sayısı aralığında ($Re=2,5 \times 10^3-1 \times 10^4$) deneyler yapılarak küre ile serbest yüzey etkileşimi sonucu oluşan akış yapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar için yorumlar aşağıdaki gibidir.

Serbest su yüzeyinin küre art izindeki akış karışımını etkilediği akış karakteristikleri sonuçlarında açıkça görülmüştür. Küre art izi bölgesinde akış ayrılması sonucu oluşan küçük ölçekli girdaplar serbest yüzeye yakın bölgelerde oluşmamıştır.

Küre etrafından kopan girdapların aşağı akım yönünde ilerledikçe boyutunun büyüdüğü ve art izindeki etkilerinin azaldığı tespit edilmiştir. Küre yüzeyinden ayrılan akışın serbest yüzeye tekrar birleştiği noktalar artan Reynolds sayısı ile birlikte küre sırt kısmına doğru yaklaşmıştır. Kürenin alt kolundan ayrılan akışın $h/D=1,25$ seviyesine kadar su yüzeyi ile birleşmeye devam ettiği görülmüştür. Daldırma oranı $h/D=1,5$ olduğu duruma kadar küre art izinde serbest yüzeyin etkisi devam ettiği net olarak görülmektedir. Bu daldırma seviyesine kadar küre art izi akış yapısı tamamen asimetric olmuştur. Daldırma oranı $h/D=2,0$ ve $2,5$ olduğu durumlarda serbest yüzey etkisinin azalması nedeniyle ortalama girdap eş düzey eğrilerinde kürenin alt ve üst kısmında negatif ve pozitif olmak üzere iki adet girdap eş düzey eğrisi simetrik şekilde oluşmuştur.

Tablo 1'de verilen sonuçlar parametrik olarak küre çevresinden ayrılan akışın hem serbest su yüzeyiyle birleşmesi hem de serbest durma noktasının yeri küre konumuna ve Reynolds sayısına bağlı olarak önemli oranda değişmektedir.

Yapılan bu çalışmaya benzer araştırmalar literatür de çok az sayıda olmasından dolayı küt bir cisim üzerinde akış kontrolü yapılmasının gerekliliği ve sayısal olarak elde edilen sonuçların doğrulanmasında faydalı olabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma TÜBİTAK tarafından 109R028 nolu proje, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri

Koordinatörlüğü ve Çukurova Üniversitesi AAP20025 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Achenbach E., Vortex shedding from spheres, *J. Fluid Mech.*, 62 (2), 209-221, 1974.
2. Taneda S., Experimental Investigation of Vortex Streets, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 20 (9), 1714-1721, 1965.
3. Nakamura I., Steady Wake behind a Sphere, *Phys Fluids*, 19 (1), 5-8, 1976.
4. Sakamoto H., Haniu H., A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow, *J Fluids Eng.*, 112, 386-392, 1990.
5. Sheridan J., Lin J.C., Rockwell D., Metastable states of a cylinder wake adjacent to a free surface, *Phys. Fluids*, 7 (9), 2099-2101, 1995.
6. Hoyt J.W., Sellin R.H.J., A comparison of the tracer and PIV results in visualizing water flow around a cylinder close to the free surface, *Exps. Fluids*, 28 (3), 261-265, 2000.
7. Sheridan J., Lin J.C., Rockwell D., Flow past a cylinder close to a free surface, *J. Fluid Mech.*, 330, 1-30, 1997.
8. Hassanzadeh R., Şahin B., Özgören M., Large eddy simulation of free surface effects on the wake structures downstream of a spherical body, *Ocean Eng.*, 54, 213-222, 2012.
9. Yun G., Kim D., Choi H., Vortical structures behind a sphere at subcritical Reynolds numbers, *Phys Fluids*, 18 (1), 2006.
10. Jang II Y., Lee S. J., PIV analysis of near-wake behind a sphere at a subcritical Reynolds number, *Exp. Fluids*, 44 (6), 905-914, 2008.
11. Ozgoren M., Dogan S., Okbaz A., Sahin B., Akilli H., Passive Control of Flow Structure Interaction between a Sphere and Free-Surface, *EPJ Web of Conferences*, 25 (01065), 1-16, 2012.
12. Ozgoren M., Dogan S., Okbaz A., Sahin B., Akilli H., Comparison of Flow Characteristics of Different Sphere Geometries Under the Free Surface Effect, *EPJ Web of Conferences*, 45 (01022), 1-10, 2013.
13. Ozgoren M., Flow Structure in the Downstream of Square and Circular Cylinders, *Flow Meas. Instrum.*, 17 (4), 225-235, 2006.
14. Doğan S., Küre serbest yüzey etkileşimiyle oluşan akış yapısı ve kontrolünün deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2013.
15. Triantafyllou G.S., Dimas A.A., The low Froude number wake of floating bluff objects, Internal Report MITSG89-5, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1989.
16. Triantafyllou G.S., Dimas A.A., Interaction of two-dimensional separated flows with a free surface at low Froude numbers, *Phys. Fluids*, 1 (11), 1813-1821, 1989.
17. Fornberg B., Steady viscous flow past a circular cylinder up to Reynolds number 600, *J. Comput. Phys.*, 61 (2), 297-320, 1985.

18. Yu D., Tryggvason G., The free surface signature of unsteady two dimensional vortex flows, *J. Fluid Mech.*, 218, 547–572, 1990.
19. Miyata H., Shikazono N., Kani M., Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface, *Ocean Eng.*, 17 (1-2), 81–104, 1990.
20. Reichl P. J., Hourigan K., Thompson M. C., Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface, *J. Fluid Mech.*, 533, 269-296, 2005.
21. Zhu C., Liang, S. C., Fan L.-S., Particle wake effects on the drag force of an interactive particle, *Int. J. Multiphase Flow*, 20 (1), 117-129, 1994.
22. Tunçer O., Kahraman S., Kaynaroğlu B., Investigation of flow past a swirl vane with the PIV technique, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 833-838, 2016.
23. Aküzüm M., Aygün C., The effect of shape factor on the drag coefficient of spin stabilized bullets by experimental and numerical analyses, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 255-262, 2016.
24. Zafer B., Coşgun F., Aeroacoustics investigation of unsteady incompressible cavity flow, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 665-675, 2016.
25. Zhao H., Liu X., Li D., Wei A., Luo K., Fan J., Vortex dynamics of a sphere wake in proximity to a Wall, *Int. J. Multiphase Flow*, 79, 88-106, 2016.

