


Titreşen diskten girdap halkası kopmalarının deneysel incelenmesi

Experimental investigation of vortex ring shedding from oscillating disc

Fahrettin Gökhan ERGİN^{1*} 

¹Arge Bölümü, Dantec Dynamics, Skovlunde, Danimarka.
gokhan.ergin@dantecdynamics.com

Geliş Tarihi/Received: 04.11.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 13.09.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 03.08.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.34711
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Pah kenarlı titreşen bir diskten girdap kopmaları incelenmiştir. Deneyler yüksek hızlı bir Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGHÖ) sistemi kullanılarak 160 Hz görüntü toplama hızında yapılmıştır. Altı tam periyot, çevrim başına 333 hız ölçümü yapılarak ve toplamda 1999 görüntü alınarak kaydedilmiştir. Suda titreşen 175 mm çaplı diskin titreşim frekansı 0.5 Hz ve titreşim mesafesi 20 mm'dir. Rijid obje takibi ve görüntü stabilizasyon teknikleri kullanılarak disk görüntüsünü PGHÖ ham görüntülerinden çıkarabilmek için dinamik görüntü maskeleme uygulanmıştır. Burada bir koordinat değişimi söz konusudur ve bunun sayesinde disk yerinde çakılı duruyormuş gibi diskin etrafındaki akış alanı sonuçlarının incelenmesi mümkün olmuştur. Aynı zamanda istatistiksel analizlerin ve faz kilitli ortalamanın kullanılması da mümkün olur. Sonuçlar her çevrimde girdap oluşumunun ve kopmasının çok düzenli ve öngörülür bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir. Pahlı disk kenarı geometrisinin girdap dinamiğine çok büyük etkisi vardır: Öteleme pahlı tarafa olduğunda diğer düz tarafa büyük ve yapışık bir girdap oluşurken, ötelemenin yönü değişip düz tarafa doğru olduğunda daha önce oluşan büyük ve yapışık girdap merkezden uzaklaşarak kopmuş ve yatay eksene göre 45° eğimi olan bir kayma tabakası gözlemlenmiştir. Bu da asimetric disk kenarı geometrisinin tüm çevrimde net bir kuvvet oluşturduğu anlamına gelir.

Anahtar kelimeler: Girdap kopması, Titreşen disk, Parçacık görüntülemeli hız ölçümü, Dinamik maskeleme, Objeye takibi, Görüntü stabilizasyonu.

Abstract

Vortex shedding from an oscillating disc with a chamfered tip is investigated. The experiments are performed using a high-speed Particle Image Velocimetry (PIV) system with 160 Hz frame acquisition frequency. Six full cycles are recorded with a total of 1999 recordings, i.e. 333 velocity measurements resolving a single cycle. The 175-mm-diameter disc oscillation frequency was 0.5 Hz within a 20 mm displacement in water. Dynamic image masking is performed to remove the disc shape from the PIV raw images, using rigid object tracking and image stabilization techniques. This implies a coordinate transformation and allows the investigation of flow field results with respect to the disc, as if it were stationary. This allows the use of statistical analysis and phase-locked averaging. The results indicate that the vortex formation and shedding from-cycle-to-cycle is very stable and predictable. The chamfered disc tip geometry has great influence in the vortex dynamics: When the motion is towards the chamfered side, a big, attached trailing vortex is present on the flat side; and when the motion is reversed towards the flat side the big trailing vortex is shed off outwards from the center, and a shear layer with a 45° orientation is formed. This means the asymmetric disc tip geometry generates a net force for the complete cycle.

Keywords: Vortex shedding, Oscillating disc, Particle image velocimetry, Dynamic masking, Object tracking, Image stabilization.

1 Giriş

Girdap halkaları doğal akışlarda çok yaygın olarak görülen bir akış yapısıdır. Girdap halkaları günümüzde atmosfer bilimleri, tıp, biyoloji, havacılık (özellikle mikro insansız hava araçları), mikro kanal tasarımı, nükleer silah ve motor tasarımı yapan birçok grup tarafından araştırılmaya tabidir. Araştırmalar girdap halkalarının oluşması/engellenmesi, ölçümü ve mühendislik uygulamalarındaki kontrolü üzerinde yoğunlaşmıştır.

Mikro patlama (yani yeryüzüne çarpan girdap halkaları) adı verilen atmosfer akışında sıcak hava tabakasının üzerinde yoğunlaşan soğuk hava tabakası bir boşluk bulursa, aşağıya doğru hızla inerek yeryüzüne çarpar ve sonucunda yeryüzüne yakın ve çok geniş çaplı bir girdap halkası oluşturur. Mikro patlamalar özellikle havalimanlarına yakın yerlerde iniş yapan uçaklar için ve yerleşim yerleri için çok tehlikeli sonuçlar doğurabilirler [1]. Bunun tersi bir durum ise nükleer patlamalar sonrası oluşan mantar bulutlarında görülebilir. Patlama sonrası oluşan sıcak hava çok hızlı bir şekilde

atmosferde yükselerek, yükselme eksenini etrafında bir girdap halkası oluşturur. Patlamanın şiddeti, girdap halkasının büyüklüğü ile orantılıdır; patlama ne kadar şiddetli olursa, sonrasında oluşan yıkım ve nükleer kirlenme de o kadar büyük olur [2].

Hayvanlar aleminde, şişe burunlu yunuslar burun deliklerinden hava üfleyerek girdap halkası şeklinde kabarcıklar çıkartırlar [3]. Denizaneleri, darbeleri yüzme tekniği sonucu arkalarında bir dizi girdap halkası bırakırlar [4]. Yassı dil balıkları kendilerini kuma gömmek için titreşimlerle etraflarında bir girdap halkası oluştururlar [5]. Bu bağlamda, deniz dibine yakın titreşen bir diskten kaynaklanan girdap halkalarının kumda oluşturduğu erozyonu Sauret ve diğ. [6] akış görüntüleme tekniği ile incelemiştir.

İnsan vücudunda da girdap halkaları oluşur; örneğin kalbin sol ventrikülünde, mitral kapak çevresinde bir girdap halkası olduğu bilinmektedir [7],[8].

Balistik uygulamalarında, özellikle tüfek ve top mermilerinin namludan çıkışı esnasında, namlu etrafında bir girdap halkası oluşur [9]. Kurusıkı mühimmat kullanılırsa, namludan sadece

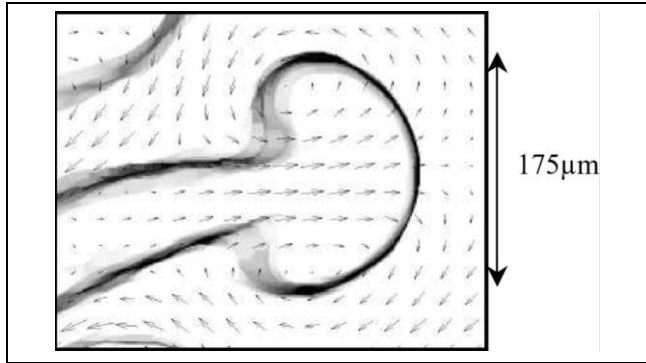
*Yazışılan yazar/Corresponding author

yüksek basınçlı bir girdap halkası çıkar. ABD ordusu bunun ölçülebilir olmayan bir silah olarak toplum kontrolünde kullanılabilirliğini araştırmıştır [10]. Benzer şekilde, füze ve roketlerin ilk ateşlendiği anda, şok tüplerinde [11] ve jet çıkışlarında lüle etrafında da girdap halkaları oluşur. Bu girdap halkaları havada yüksek basınç dalgaları yayarak ses kirliliğine neden olurlar. Bu yüzden yeni nesil yolcu uçaklarının turbofan jet motorlarının lüle çıkışları zikzaklı yapıda tasarlanmıştır [12].

Girdap halkaları, örneğin helikopterler için çok tehlikeli olabilir. Özellikle iniş sırasında helikopterin etrafında girdap halkası oluşabilir: pallerin yere doğru ittiği hava tekrar pallerin üzerine çıkarsa kaldırma kuvveti kaybına yol açar ve helikopterin ani irtifa kaybetmesine neden olur [13].

Girdap halkaları içten yanmalı motorların yanma odasında da karşımıza çıkar. Pistonun silindiri içinde aşağı-yukarı hareketi sonucu tambur akış yapısı oluşur. Piston çukuru tasarımı doğru yapılırsa piston ve silindir duvarı kesişimine yakın yerlerde girdap halkası oluşur. Aynı zamanda emme ve eksoz sübaplarının aşağı - yukarı hareketi sırasında da sübap diski etrafında girdap halkaları oluşur ve bunlar silindir içindeki hava ile yakıtın karışmasını destekler.

Girdap halkalarına mikro karıştırıcılarda da rastlanabilir (Şekil 1). Özellikle mikro ölçekte Reynolds sayısı düşük olduğu için mikro kanallarda laminer akış söz konusudur ve düzgün bir karışım elde etmek için ek kuvvetlere ihtiyaç duyulur. Manyetik bir mikro karıştırıcının kullanıldığı bir çalışmada PGHÖ tekniği kullanılarak 175 µm büyüklüğünde girdap halkaları ölçülmüştür [14]. Girdap halkalarının türleri ve matematiksel formülasyonu hakkında geniş bilgi Shariff ve Leonard'ın [15] derleme makalesinde bulunabilir.



Şekil 1. Mikro kanal içinde ölçülmüş bir girdap halkası [14].

Figure 1. A vortex ring measured in the microchannel [14].

Girdap halkalarının oluşumu ve kopması özellikle kanat çırparak uçan hayvanlar ve mikro hava araçları için önemlidir. Bazı hayvan deneylerinde de PGHÖ kullanılarak kanat çırpma hayvanların oluşturduğu girdap halkaları ölçülmüştür: Fuchiwaki ve diğ. [16] iki kelebek türü etrafında PGHÖ tekniğini kullanmış ve her çevrimde iki tane girdap halkasının varlığını deneysel olarak göstermiştir. Kelebek türünden bağımsız olarak kanat aşağıya ve yukarıya çırpılırken birer girdap halkasının kanadın hücum kenarında oluştuğunu, bunlardan birinin (aşağı çırpma oluşanın) diğerine göre daha büyük ve şiddetli olduğunu göstermiştir. Yazarlar girdap şiddetindeki bu asimetriyi kanatlardaki elastisite farkına bağlamışlardır. Zira, aşağı ve yukarı çırpma hareketindeki asimetri kanat çırparak uçan hayvanların her çevrimde kaldırma kuvveti oluşturması için elzemdir. Buna benzer şekilde Gemmel ve diğ. [4] iki deniz

anası türü etrafında PGHÖ tekniği ile ölçümler yapılmış ve bu iki tür arasındaki yüzme hızı farklılıklarını kopan girdapların oluşma, etkileşimi ve kopma şekline bağlamıştır.

Hayvanların kullanılmadığı deneylerde, PGHÖ tekniği ile su tanklarında kanat çırpma hareketini taklit eden karmaşık düzenekler kurulmuş ve hassas ölçümler yapılmıştır. Karakaş ve diğ. [17] eşzamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri yapan dört değişik kanat profili etrafında senkronize kuvvet ve PGH ölçümleri yapmıştır. Bu iki ölçüm sonuçları beraber değerlendirildiğinde kanat profilinin oluşan itkiye pek de etkisi olmadığı, fakat çırpma parametrelerinin daha önemli olduğu anlaşılmıştır. O çalışmada PGHÖ sistemi kanatlarla beraber hareket etmiş ve 8 farklı istasyonda 25 çevrim süresince veri toplanmıştır ve PGHÖ sistemi 3. çevrimden sonra veri almaya başlatılmıştır. Ayrıca, o çalışmada 3.5 mm × 3.5 mm bir ölçüm çözünürlüğü rapor edilmektedir.

Benzer bir başka su tankı deneyinde Kurtuluş ve diğ. [18] çırpma kanattan kopan üç farklı girdap belirlemiş ve bunları nümerik olarak da hesaplamasını yapmıştır. Bu girdaplar, yazarlar tarafından hücum kenarı girdabı, firar kenarında oluşan öteleme girdabı ve durma girdabı olarak adlandırmıştır. Kurtuluş ve diğ. deneyi sabit duruma ulaştırmak için düzeneğini 12 çevrimde çalıştırmış ama sadece 7. Çevrimdeki sonuçlar rapor edilmiştir. Her çevrimde 80 görüntü çifti olarak 4.5°'lik bir çevrim çözünürlüğü elde etmişlerdir. Ölçüm alanı 25cm × 50cm olarak verilmiştir.

Girdap halkası kopmalarının sıkça rastlandığı bir uygulama da okyanus mühendisliğinde kullanılan yükselme plakalardır (heave plate). Son zamanlarda, açık denizde yüzen platformlardan elektrik, petrol ve doğal gaz üretimi yaygınlaşmıştır [19]. Yüzen platformların dalga kuvvetleriyle yükselip alçalmasını engellemek için kullanılan yükselme plakaları etrafındaki akış, titreşen disk etrafındaki akışa eşdeğerdir. Yükselme plakalarının tasarımının en iyileştirilmesi disk etrafındaki akışın araştırılması ve değişik parametrelerin araştırılması ile mümkündür. Disk şekli, deliklilik oranı, titreşim büyüklüğü, titreşim frekansı gibi parametreleri inceleyen birçok çalışma yayınlanmış fakat titreşen disk kenarı etrafındaki akış yapısını PGHÖ ile araştıran çalışma sınırlı sayıdadır.

Bu çalışmalardan ilki Tiagarajan ve Troesch [20] tarafından deliksiz bir disk ile yapılmıştır: 150 mm çapındaki ve değişken kalınlıktaki metal disk, dikeyde 6.3 mm'lik bir mesafede titreştirilmiştir. 37 mm × 27 mm'lik bir görüntü alanında 45°'lik bir çevrim çözünürlüğü rapor edilmiştir. Disk kenarı çevresinde oluşan girdaplar gözlemlenmiş fakat bunların zamana göre hareketleri çevrim çözünürlüğünün yeterli olmaması nedeniyle incelenememiştir. Daha sonra Lake ve diğ. [21] benzer bir deney düzeneğinde parçacık görüntüleri ile disk kenarı etrafındaki akışı görüntülemiş, fakat PGHÖ analizi yapmamıştır. Sireta ve diğ. [22] deliksiz ve %15 oranında delikli bir disk etrafındaki akışı PGHÖ tekniği kullanarak karşılaştırmıştır. Deneyde 60°'lik bir çevrim çözünürlüğü rapor edilmiştir. Buna benzer şekilde, Wadhwa [23] çalışmasında delikli ve deliksiz titreşen disklerin hidrodinamik özelliklerini incelemiştir. Deneyde 100 mm çapında ve 2 mm kalınlığındaki metal disk ortasından bir mekanizma yardımı ile 0.5 Hz frekansta dikeyde toplam 20 mm'lik bir mesafede titreştirilmiştir. 97 mm × 72 mm'lik bir görüntü alanında 45°'lik bir çevrim çözünürlüğü rapor edilmiştir.

Bu çalışmada ise titreşen bir diskin etrafında oluşan girdap halkaları ve bu girdapların diskten kopması yüksek hızlı bir

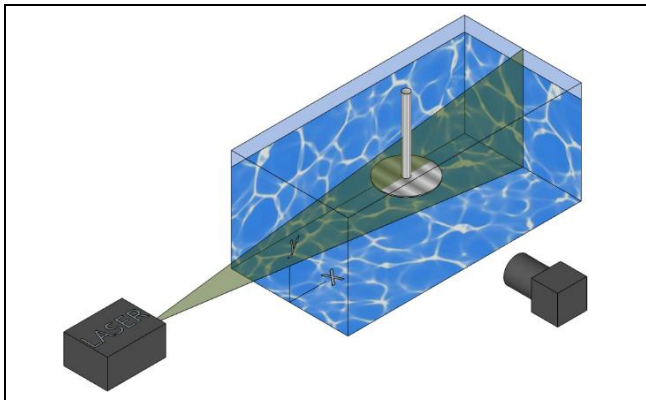
Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGHÖ) sistemi kullanılarak incelenmiştir. Yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak dijital obje takibi, dinamik maskeleme, koordinat sistem değişikliği ve faz kilitli ortalama teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca çevrim çözünürlüğü olarak $\sim 1.1^\circ$ ve ölçüm çözünürlüğü olarak $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ elde edilmiştir.

Bu çalışma dört yönden özgündür: 1. Hem çırpan kanatları konu alan hem de titreşen diskleri konu alan PGHÖ deneylerinde en önemli zorluklardan bir tanesi de hareket halindeki kanatçığın veya diskin maskelenmesidir. Zira maskelenmeyen hareketli objeler PGH ölçümlerinde sıkça kullanılan çapraz korelasyon hesaplamasını olumsuz yönde etkiler ve ölçüm hatalarına sebep olabilir [24]. Yukarıda bahsedilen çalışmaların hiçbirinde dinamik maskeleme ve faz kilitli averaj kullanılmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmadaki PGHÖ ölçümleri diğer titreşen disk çalışmalara nazaran daha hassastır. 2. Daha önce yapılan çalışmaların hiçbirinde 1.1° lik bir çevrim çözünürlüğü elde edilememiştir. Çevrim çözünürlüğü açısından bu çalışmaya en yakın çalışma 4.5° lik bir çevrim çözünürlüğü ile Kurtuluş ve diğ. [18] tarafından çırpan kanatçık deneyinde elde edilmiştir. Bu çalışmadan önceki titreşen disk deneylerindeki en yakın çevrim çözünürlüğü ancak 45° 'dir [20]-[23]. 3. Bu çalışmada hem diğerlerine göre geniş bir görüntü alanı ($105 \text{ mm} \times 56 \text{ mm}$) hem de çok yüksek bir ölçüm çözünürlüğü ($0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$) aynı anda elde edilmiştir. 4. son olarak, daha önce yapılan çalışmaların hiçbirinde burada kullanılan asimetric (pahlı) bir disk kenarı kullanılmamıştır.

Bu makalenin amacı rijid obje takibi ile yapılan dinamik maskeleme ve sonrasında uygulanan koordinat değişiminin yararlarını (faz kilitli averaj alınarak hassasiyetin artırılması, yüzeylere yakın yerlerde hassasiyetin artırılması vs.) titreşen disk örneği ile göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan analiz teknikleri ileride başka benzer uygulamalarda da (çırpan kanat titreşen delikli plakalar vs.) kullanılabilir.

2 Deneysel Düzenek ve Metot

Deneysel düzenek dikdörtgen prizması şeklinde bir su tankı içine yatay olarak yerleştirilmiş bir metal diskten oluşmaktadır (Şekil 2).

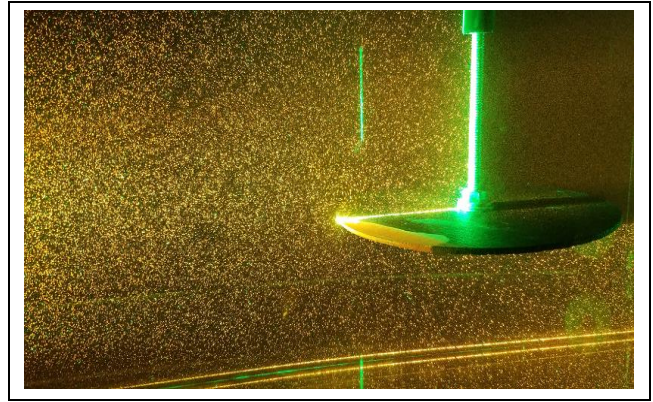


Şekil 2. Deneysel düzenek şematik görünümü.

Figure 2. Schematic view of the test apparatus.

175 mm çapında ve 3 mm kalınlığındaki metal disk ortasından bir mekanizma yardımı ile yaklaşık 0.5 Hz frekansta dikeyde 20 mm'lik bir mesafede titreştirilmiştir. Su tankının duvarları ve su yüksekliği ölçüm yapılan bölgede oluşan ve kopan girdap halkalarını etkilemeyecek kadar uzakta tutulmuştur. Bu

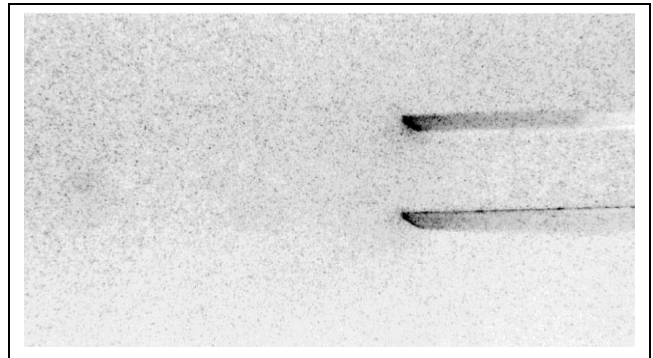
nedenle su tankı boyutları $800 \times 400 \times 350 \text{ mm}^3$ olarak seçilmiştir. Suyun içine $50 \mu\text{m}$ çaplı, polyamide 12 parçacıklar bırakılmıştır. Bu parçacıklar tankın yan tarafına yerleştirilen 5W ışık şiddetli 532 nm dalga boylu (yeşil) lazer cihazı ve ışın perdesi optikleri ile aydınlatılmıştır (Şekil 3). Stabil deney durumu elde etmek için parçacık görüntüleri titreşme mekanizması çalışmaya başladıktan birkaç dakika sonra alınmaya başlanmıştır. Piksel boyu $5.86 \mu\text{m}$ olan, 1920×1200 piksel çözünürlüklü PGHÖ kamerası tankın yan tarafından, $106 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ 'lik bir alanı, saniyede 160 görüntü kaydederek, toplamda ardışık 1999 görüntü, yani 6 çevrim kaydetmiştir. Ardışık görüntüler arasında PGHÖ analizi uygulanmış ve 1998 hız vektörü haritası elde edilmiştir. Her çevrimde 333 vektör haritası kullanılarak 1.1° lik bir çevrim çözünürlüğü elde edilmiştir. Bu çevrim çözünürlüğü girdap halkası oluşumu ve kopmalarının detaylı bir şekilde incelenmesine imkân vermesi için seçilmiştir.



Şekil 3. Disk düzeneğinin deney esnasında görünümü.

Figure 3. The test apparatus during the experiment.

Elde edilen PGHÖ ham görüntülerinin sağ tarafında titreşen diskin kenarı net bir şekilde görülmekte ve görüntülerde düşeyde aşağı-yukarı hareket etmektedir. Diskin ham görüntülerdeki en yüksek ve en alçak pozisyonu Şekil 4'te verilmiştir. Burada diskin altında geometrik asimetrici sağlayan 45° lik bir pah da görülmektedir.

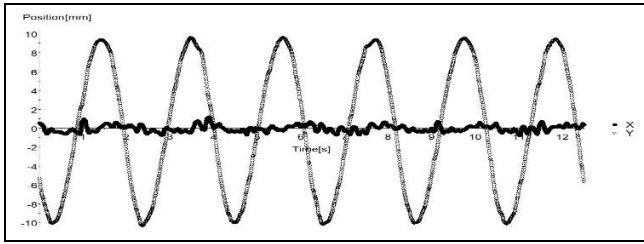


Şekil 4. Ham parçacık görüntülerinde disk kenarının en yüksek ve en alçak durumdaki görüntüsü.

Figure 4. Highest and lowest disc position in raw particle images.

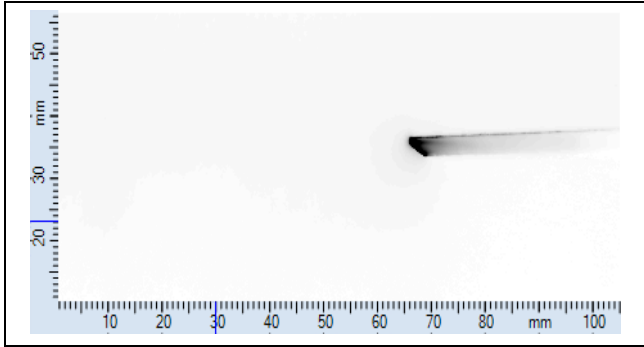
Diske yakın bölgelerde daha hassas PGH ölçümleri alabilmek için obje takibi ve görüntü stabilizasyonu ile dinamik maskeleme tekniği kullanılmıştır [24]-[27]. Kısaca, PGHÖ görüntülerindeki hareketli objeler maskelenmediği sürece, çapraz korelasyon fonksiyonunu olumsuz etkiler ve PGHÖ

analizi sonucu elde edilen hız vektörlerinde obje sınırına yakın yerlerde hatalı sonuçlar oluşur. Cisimlerin dijital olarak maskelenmesi, özellikle hareketli cisimlerin dinamik maske kullanılarak görüntülerden çıkarılması PGH ölçüm hassasiyetini artırır. Bunun uygulanması üç aşamadan oluşur: İlk olarak diskin yan görüntüsü seçilerek tüm görüntü kümesinde (1999 görüntü) çapraz korelasyon ile arattırılmıştır. Bunun sonucunda diskin yatay (x) ve düşeydeki (y) pozisyonu zamana bağlı olarak elde edilir (Şekil 5). İkinci olarak bu pozisyonların etrafında görüntü pencereleri belirlenerek disk merkezli görüntü stabilizasyonu elde edilir. Bu çalışmada 1881x837 piksel boyunda bir görüntü penceresi seçilerek, son görüntü boyutu 105 mm × 56 mm olmuştur. Son olarak arka planda sabit olarak kalan disk görüntüsü maskelenerek dinamik maskeleme tamamlanmış olur (Şekil 6). Objeye takibi ile dinamik maskeleme istenmeyen titreşimleri önlemek için de kullanılabilir [28].



Şekil 5. Disk kenarının yatay ve düşey ekseninde zamana göre değişen pozisyonu.

Figure 5. Position time history of the disc along the horizontal and vertical axes.



Şekil 6. Diskin görüntü stabilizasyonundan sonraki görüntüsü ve görüntü alanı.

Figure 6. Image of disc after image stabilization and stabilized image area.

PGHÖ analizi Dantec Dynamics firmasının DynamicStudio v6.9 yazılımındaki Adaptive PIV algoritması kullanılarak yapılmıştır. Bu analiz sırasında önce 64x64 piksel, sonrasında ise 32x32 piksel korelasyon pencereleri kullanılmış ve yatayda ve düşeyde 16 piksel aralıklarla analiz yapılmıştır. Bu da düzlemsel çözünürlüğü olarak 0.9 mm×0.9 mm ve karşılık gelmektedir. Diskin görüntü stabilizasyonu sonrası elde edilen maske görüntüsü de kullanılarak, diske yakın korelasyon pencerelerinde duvar maskelemesi yapılarak ölçüm hassasiyeti artırılmıştır [29]. Çapraz korelasyonda elde edilen en yüksek değer ikinci en yüksek değerden en az %25 oranında büyükse kabul edilmiştir. Sonrasında standart değerler kullanılarak evrensel uçdeğer araması ve düzeltilmesi yapılmıştır [30]. Son olarak korelasyon pencereleri akışa uyum sağlayacak şekilde deforme edilerek ölçüm hassasiyeti artırılmıştır:

$$\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|, \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \leq 0.5 \quad (1)$$

$$\sqrt{\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|^2} \leq 0.5 \quad (2)$$

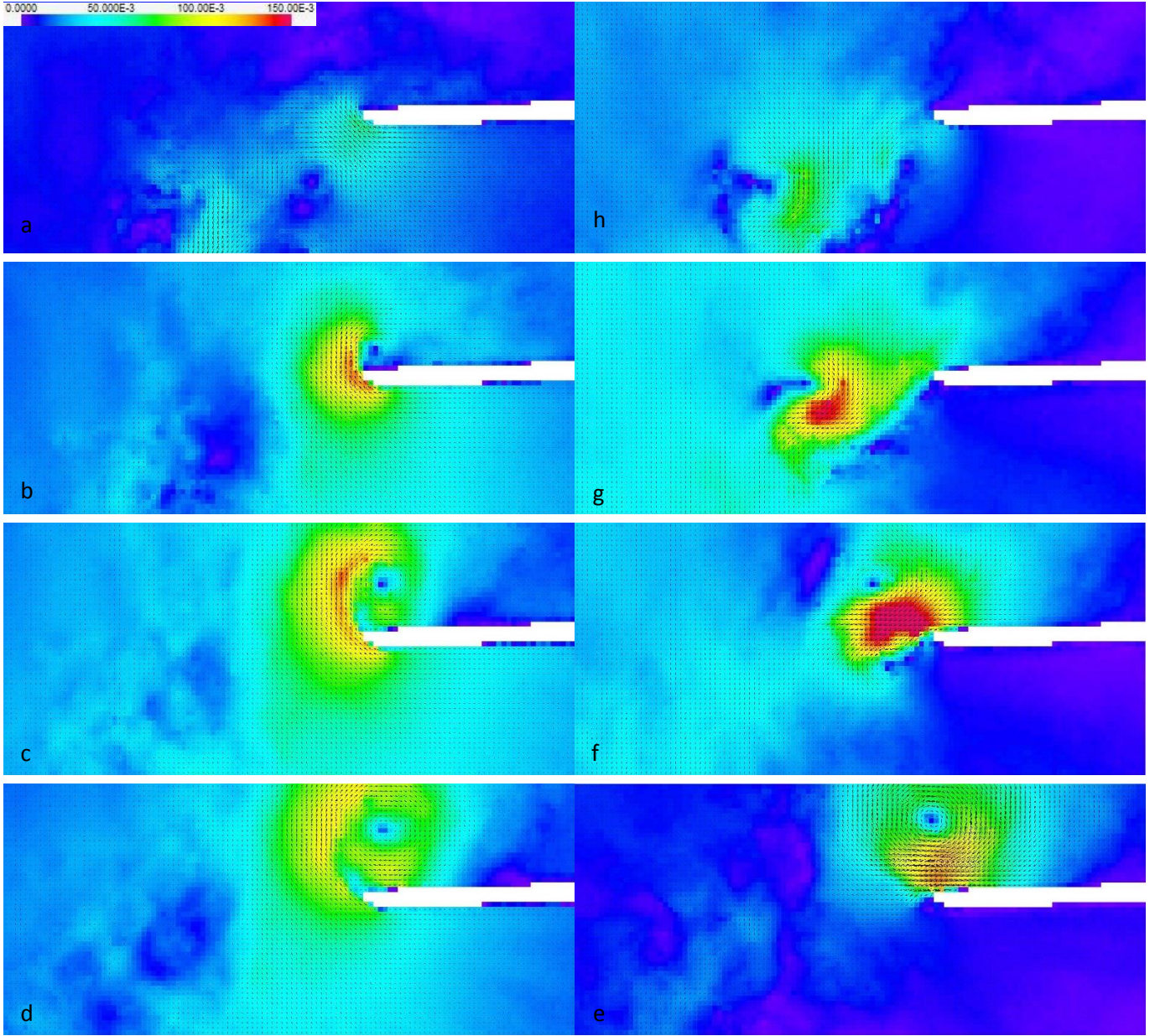
Bu çalışmada kullanılan Adaptive PIV algoritmasının %95 güvenilirlikle piksel altı ölçüm hassasiyeti 0.055 piksel olarak yayınlanmıştır [31]. Buna dayanarak bu çalışmada bildirilen sonuçların ölçüm hassasiyeti %1.8 mertebesinde dir. Zamana bağlı akış ölçümünde bu hassasiyet elde edildikten sonra vektör haritalarının faz kilitli ortalaması alınmış, ölçüm hassasiyeti %0.74e düşmüş ve Şekil 7'deki sonuçlar elde edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Şekil 7'da disk kenarında oluşan girdap halkasının PGHÖ sonuçlarının faz kilitli ortalaması gösterilmektedir. Sol üst köşede hız vektörlerinin uzunluğunu gösteren renk skalası verilmiştir. Bu şekilde sol sütunda aşağı yöndeki hareket, ve sağ sütunda yukarı yönde hareket çevrimin 1/8 aralıklarıyla gösterilmiştir. Okuyucunun çevrimi rahat okuyabilmesi için, sol sütunda yukarıdan aşağı doğru (a-b-c-d) diskin aşağı hareketi, sağ sütunda ise aşağıdan yukarıya doğru (e-f-g-h) diskin yukarı hareketi gösterilmiştir. Bu durumda (a) diskin en yüksek (e) ise en alçak konumunu; (c) ve (g) aşağı-yukarı ötelemenin orta noktalarını göstermektedir.

Şekil 7 dikkatlice incelenecek olursa şu gözlemler yapılabilir:

- En yüksek nokta: Disk üstünde akış durgun, disk köşesinden yukarıya bir akış başlamak üzere ve bir önceki periyottaki girdap halkasının disk köşesinden sol aşağıya koştüğünü gösteren belirtiler mevcut,
- Aşağıya çeyrek periyot: Disk köşesinden saat yönünde bir girdap halkası oluşmaya başlıyor ve girdap halkasının merkezi disk üstünde ve kenarına çok yakın,
- Aşağıya yarım periyot: Disk kenarından yukarıya doğru olan akış aynı şiddette devam ediyor, disk üzerindeki girdap halkası merkezi disk kenarından uzaklaşmış,
- Aşağıya üç çeyrek periyot: Disk kenarından yukarıya doğru olan akış azalarak devam ediyor, disk üzerindeki girdap halkası merkezi stabil pozisyonunu koruyor,
- En düşük nokta: Disk hareketi durduğu için disk kenarından yukarıya doğru olan akış durmuş, disk üzerindeki girdap halkası diskin üzerinde asılı duruyor. Disk altında akış durgun,
- Yukarıya çeyrek periyot: Diskin yukarı hareketiyle disk üzerindeki girdabın alt kısmı sıkışıyor ve sola ve aşağı doğru kopma başlıyor. Aşağı harekette oluşan girdap merkezi halen belirgin. Disk altında akış halen durgun. Bu arada diskin pahlı köşesinden sola ve aşağıya doğru 45° eğimli bir sürtünme katmanı oluşmaya başlıyor,
- Yukarıya yarım periyot: Bir önceki aşamada başlayan kopma devam ediyor. Aşağı harekette oluşan girdap merkezi belirginliğini kaybetmeye başlıyor. Diskin köşesinden sola ve aşağıya doğru 45° eğimli bir kayma tabakası çok belirgin. Disk altında akış halen durgun,
- Yukarıya üç çeyrek periyot: Girdap kopması tamamlanmış, disk yavaşladığı için diskin hem altında hem üstünde akış durgun. 45° eğimli kayma tabakası çok belirgin.



Şekil 7. Disk kenarında oluşan girdap halkasının PGHÖ sonuçları. Sol sütun aşağı yöndeki hareket, sağ sütun yukarı yönde hareket. (a): En yüksek nokta. (b): Aşağıya çeyrek periyot. (c): Aşağıya yarım periyot. (d): Aşağıya üç çeyrek periyot. (e): En düşük nokta. (f): yukarıya çeyrek periyot. (g): Yukarıya yarım periyot. (h): Yukarıya üç çeyrek periyot.

Figure 7. Phase-locked average PIV results of vortex ring dynamics around the oscillating disc. Left column downstroke, right column upstroke. (a): Highest point, TDC. (b): Quarter downstroke. (c): Half downstroke. (d): Three-quarter downstroke. (e): Lowest point, BDC. (f): Quarter upstroke. (g): Half upstroke. (h): Three-quarter upstroke.

Bu bulgulara ek olarak bir önemli bulgu da diskin aşağıya ve yukarıya doğru hareketlerinin akışta yarattığı etkilerin aynı olmamasıdır. Bunu disk kenarında alt tarafında yer alan 45°'lik pah kırığına bağlayabiliriz: Bu küçük geometrik detay aslında disk geometrisindeki simetriyi bozarak, akış çevriminde yukarı ve aşağı ötelemede farklı akış yapılarının ve farklı sirkülasyon değerlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan diskin pahsız üst yüzü girdap kopmasını destekleyici bir etkiye sahiptir. Bunun sonucunda çevrim sonucunda disk üzerinde aşağıya doğru net bir itki kuvveti elde edilmiştir.

Gerek deniz analarının [4], gerekse kelebeklerin [16] kullanıldığı çalışmalarda da aslında bulgular aynıdır: Yukarı yönde bir kaldırma kuvveti elde etmek için deniz analarının geometrisi ve çırpma hamleleri simetrik değildir. Aynı şekilde kelebekler aşağı yöndeki çırpma hamlelerini yukarı yöndeki hamleye göre biraz da olsa farklı yapmak zorundadır. Her iki durumda da oluşan girdap halkalarından çevrim uçlarında kurtulurlar.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada titreşen diskin etrafındaki girdap halkası oluşumu ve kopması yüksek hızlı bir PGHÖ sistemi ile yüksek zaman çözünürlüğü (6.25 ms), yüksek çevrim çözünürlüğü (1.1°) ve yüksek düzlemsel çözünürlük (0.9 mm) aynı anda elde edilerek ölçülmüştür. Ölçüm hassasiyeti faz kilitli ortalama alınarak %0.74'e kadar düşürülmüştür. Bunun yapılmasını mümkün kılan ise obje takibi ile yapılan dinamik maskeleye ve bunu müteakip yapılan görüntü stabilizasyonu ile koordinat sisteminin disk üzerine taşınmasıdır. Buna ek olarak, diske yakın noktalarda korelasyon penceresine duvar maskesi uygulanmıştır. Girdap halkası oluşumu, büyümesi, kopmaya başlaması ve kopması ayrıntılarıyla incelenmiş ve diskin çevrimdeki yeriyle eşleştirilmiştir. Ayrıca küçük geometrik farkların akış haritasını ve gelişimini ne kadar değiştirebildiği ve geometrik asimetrinin net itki kuvveti oluşturmada ne kadar büyük etkisinin olduğu gösterilmiştir. Bu yüzden doğada kanat çırparak uçan veya titreşimlerle yüzen hayvanları incelerken küçük asimetrileri göz ardı etmemek gerekir.

İleride titreşen diskten kopan girdap halkası verisi tekrar incelenerek Düzgün Dik Ayrıştırma (Proper Orthogonal Decomposition, POD) ve Titreşim Deseni Ayrıştırması (Oscillating Pattern Decomposition, OPD) gibi modal analiz yöntemleri kullanılarak akış yapısının statik ve dinamik modlarına ayrıştırılması planlanmaktadır.

Ayrıca ileride aynı deney düzeneği disk su tankının daha derininde olacak şekilde tekrar kullanılarak, su tankının dibinden kum taneciklerinin kaldırılması incelenecektir. Bu dipte sürünen ve kum altına saklanan balıkların (dil balığı vb.) davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

5 Results

The vortex ring formation and shedding from an oscillating disc was measured by a high-speed PIV system, simultaneously obtaining high time resolution (6.25 ms), high cycle resolution (1.1°) and high spatial resolution (0.9 mm). Measurement accuracy is reduced to 0.74% by taking the phase locked average of the velocity information. What makes Phase-locked averaging possible is the dynamic masking by object tracking and the subsequent image stabilization, whereby the coordinate system is moved on the disc. In addition, a wall mask was applied to the correlation window near the disc. Using PIV analysis the vortex ring initiation, growth, rupture, and shedding were examined in detail and matched to the position of the disc in the cycle. In addition, it has been shown that how small geometric differences can change the flow field, and how easily a geometric asymmetry can generate net lift force in an oscillation cycle. Because of this, it is important not to ignore small asymmetries when examining flapping-wing flyers or oscillatory swimmers.

In the future, it is planned to re-examine the oscillating disc vortex ring shedding data in order to decompose the flow field into its static and dynamic modes by using modal analysis methods such as Proper Orthogonal Decomposition (POD) and Oscillating Pattern Decomposition (OPD).

In addition, lifting of sand particles from the bottom of the water tank will be examined by using the same experimental setup, but with the disc at a deeper position in the water tank. This will provide a better understanding of the behavior of crawling fish (flat fish, etc.) hiding under the sand.

6 Teşekkür

Yazar deney düzeneğinin kurulumu ve veri toplamadaki yardımlarından ötürü Kai OH'a teşekkür eder.

7 Simgeler dizini

PIV	:	Particle image velocimetry,
PGHÖ	:	Parçacık görüntülemeli hız ölçümü,
x, y	:	Yatay ve düşey eksenler,
U, V	:	Yatay ve düşey eksene paralel hız bileşenleri.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Fahrettin Gökhan ERGİN, fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, veri analizlerinin gerçekleştirilmesi, elde edilen sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, makalenin hazırlanması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

10 Kaynaklar

- [1] Zhang Y, Sarkar P, Hu H. "An experimental study of microburst-wind loads on gable-roofed building models". *42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, New Orleans, Louisiana, 25-28 June 2012.
- [2] Glasstone S, Dolan PJ. *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed. Washington, USA. US Department of Defense and US Department of Energy, 1977.
- [3] McCowan B, Marino L, Vance E, Walke L, Reiss D. "Bubble ring play of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): Implications for cognition". *Journal of Comparative Psychology*, 114(1), 98-106, 2000.
- [4] Gemmill BJ, Colin SP, Costello JH, Sutherland KR. "A ctenophore (comb jelly) employs vortex rebound dynamics and outperforms other gelatinous swimmers". *Royal Society Open Science*, 2019. [Doi:10.1098/rsos.181615](https://doi.org/10.1098/rsos.181615).
- [5] Kristensen LD, Sparrevojn CR, Christensen JT, Støttrup JG. "Cryptic Behaviour of Juvenile Turbot *Psetta maxima* L. and European Flounder *Platichthys flesus* L.". *Open Journal of Marine Science*, 4(3), 185-193, 2014.
- [6] Sauret A, Morize C, Gondret P. "Erosion of a granular bed by an oscillating foil". *68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Boston, Massachusetts, 22-24 November 2015.
- [7] Hu Y, Shi L, Parameswaran S, Smirnov S, He Z. "Left ventricular vortex under mitral valve edge-to-edge repair". *Cardiovascular Engineering Technology*, 1(4), 235-243, 2010.
- [8] Töger J, Kanski M, Carlsson M, Kovács SJ, Söderlind G, Arheden H, Heiberg E. "Vortex ring formation in the left ventricle of the heart: analysis by 4D flow MRI and Lagrangian coherent structures". *Annals of Biomedical Engineering*, 40(12), 2652-2662, 2012.
- [9] Cler D. "CFD Application to Gun muzzle blast-a validation case study". *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 6-9 January 2003.
- [10] Lucey GK. *Vortex Ring Generator: Mechanical Engineering Design for 100-Kpsi Operating Pressures*. Adelphi, Maryland, Army Research Laboratory 2000.

- [11] Arakeri JH, Das D, Krothapalli A, Lourenco L. "Vortex ring formation at the open end of a shock tube: a particle image velocimetry study". *Physics of Fluids*, 16(4), 1008-1019, 2004.
- [12] Eschricht D, Panek L, Yan J, Michel U, Thiele F. "Jet noise prediction of a serrated nozzle". *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*, Vancouver, British Columbia, Canada, 5-7 May 2008.
- [13] Leishman JG, Bhagwat MJ, Ananthan S. "The vortex ring state as a spatially and temporally developing wake instability". *Journal of American Helicopter Society*, 49(2), 160-175, 2004.
- [14] Ergin FG. "Measurements of micro-mushroom patterns in a magnetic micromixer". *5th Micro and Nano Flows Conference*, Milan, Italy, 11-14 September 2016.
- [15] Shariff K, Leonard A. "Vortex rings". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 24(1), 235-279, 1992.
- [16] Fuchiwaki M, Kuroki T, Tanaka K, Tababa T. "Dynamic behavior of the vortex ring formed on a butterfly wing". *Experiments in Fluids*, 2013. [Doi: 10.1007/s00348-012-1450-x](https://doi.org/10.1007/s00348-012-1450-x).
- [17] Karakaş F, Paça O, Köse C, Son O, Zaloglu B, Fenercioğlu İ, Cetiner O. "Çirpan kanatta kanat profilinin etkisi". *Journal of Aeronautics and Space Technology (Havacilik ve Uzay Teknolojisi Dergisi)*, 7(2), 1-16, 2014.
- [18] Kurtulus DF, David L, Farcy A, Alemdaroglu N. "Aerodynamic characteristics of flapping motion in hover". *Experiments in Fluids*, 44(1), 23-36, 2007.
- [19] Wu X, Hu Y, Li Y, et al. "Foundations of offshore wind turbines: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 379-393, 2019.
- [20] Thiagarajan KP, Troesch AW. "On the use of various contour shapes for evaluating circulation from PIV data". *Thirteenth Australasian Fluid Mechanics Conference*, Melbourne, Australia, 13-18 December 1998.
- [21] Lake M, He H, Troesch AW, Perlin M, Thiagarajan KP. "Hydrodynamic coefficient estimation for TLP and spar structures". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 122(2), 118-124, 2000.
- [22] Sireta F-X, Thiagarajan KP, Molin B, Pistani F. "Hydrodynamic coefficients of porous plates and application to subsea deployment". *Marine Operations Specialty Symposium*, Singapore, 5-7 March 2008.
- [23] Wadhwa H. "Hydrodynamics of Porous Plates and Influence of Free Surface Proximity". Dissertation, The University of Western Australia, Perth, Avustralya, 2011.
- [24] Ergin FG. "Dynamic masking techniques for particle image velocimetry". *Isi Bilim ve Teknigi Dergisi*, 37(2), 61-74, 2017.
- [25] Ergin FG, Olofsson J, Watz BB, Gade-nielsen NF. "Dynamic masking application examples in two-phase flow pIV measurements". *19th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 16-19 July 2018.
- [26] Ergin FG, Watz BB, Wadhwa N. "Pixel-accurate dynamic masking and flow measurements around small breaststroke-swimmers using long-distance MicroPIV". *11th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Santa Barbara, California, 14-16 September 2015.
- [27] Ergin F, Watz B, Gade-Nielsen N. "A Review of planar PIV systems and image processing tools for lab-on-chip microfluidics". *Sensors*, doi: 10.3390/s18093090, 2018.
- [28] Dantec Dynamics. "DynamicStudio 6.4 release with new Dynamic Masking add-on". <https://www.dantecdynamics.com/news/dynamicstudio-6-4-release-with-new-dynamic-masking-add-on> (04.11.2018).
- [29] Ergin FG. "PIV accuracy improvement near stationary walls using interrogation window masking". *12th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Pusan, Korea, 19-21 June 2017.
- [30] Westerweel J, Scarano F. "Universal outlier detection for PIV data". *Experiments in Fluids*, 39(6), 1096-1100, 2005.
- [31] Ergin FG, Watz BB, Erglis K, Cēbers A. "Time-resolved velocity measurements in a magnetic micromixer". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 67, 6-13, 2015.