



Girdap vanesinden geçen akışın PIV yöntemi ile incelenmesi

Onur Tunçer*, Selin Kahraman, Bertan Kaynaroğlu

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Girdap vanesinden geçen soğuk akış PIV yöntemi ile görüntülenmiştir
- Alev tutucu cismin üzerinde kararlı bir girdap yapısı görülmüştür
- Tepkimeli akışta kararlı bir alev yapısının elde edilebileceği değerlendirilmektedir

Makale Bilgileri

Geliş: 04.11.2014

Kabul: 23.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278439

Anahtar Kelimeler:

Girdap vanesi,
parçacık görüntülemeli hız
ölçümü,
alev stabilizasyonu

ÖZET

Kararlı bir girdap yardımı ile alev stabilizasyonu birçok yanma sisteminde özellikle de gaz türbin motorların yanma odalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu tür akışlar aynı zamanda kimyasal proseslerde ısı ve kütle transferini artırmak amaçlı da kullanılırlar. İstenilen girdap yapısını oluşturmak üzere akış bir girdap vanesinden geçirilerek, akışa teğet yönde de bir hız bileşeni kazandırılır. Bu çalışmada girdap sayısı 0,74 olacak şekilde tasarlanmış ekselel bir girdap vanesinden geçen soğuk akışın ani bir genişleme düzlemine ulaştıktan sonra oluşturduğu akış yapısı parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği ile incelenmektedir. Akış içerisinde ters akışlardan ve incelenen akışın doğasından kaynaklı diğer bir takım sebeplerden ötürü parçacık yoğunluğu bölgeden bölgeye önemli miktarda değişmekte ve sinyal gürlüğü oranı zayıf olmaktadır. Bu sebeple hız vektörleri hesaplanırken her bir sorgulama penceresinde korelasyon fonksiyonun ardışık görüntülerdeki ortalaması alınmış, vektör bu ortalama korelasyonun tepe noktası kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçümler sonucunda alev tutucu merkez cismin hemen üzerinde kararlı bir ana yeniden dolaşım bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra jet akışının her iki tarafında da ani genişlemeden kaynaklı zayıf ikincil yeniden dolaşım bölgeleri oluşmaktadır. Bu yapılar sayesinde tepkimeli akışta alevin genişleme düzlemi üzerinde kararlı şekilde tutunabileceği sonucuna varılması mümkündür.

Investigation of flow past a swirl vane with the PIV technique

HIGHLIGHTS

- Cold flow past a swirl vane has been visualized with the PIV technique
- A stable vortex structure is observed above the flame holder
- It is evaluated that a stable flame structure with reacting flow could be obtained

Article Info

Received: 04.11.2014

Accepted: 23.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278439

Keywords:

Swirl vane,
particle image
velocimetry,
flame
stabilization

ABSTRACT

Flame stabilization with the help of a stable vortex is used in many combustion systems and especially in gas turbine combustors. Such flows are also used in chemical processes in order to enhance heat and mass transfer. In order to establish the desired swirl pattern flow is passed through a swirl vane providing it with tangential momentum. In this study, flow past a swirl vane designed such that its swirl number would be adjusted to 0.74, and reaching to a sudden expansion is examined with the particle image velocimetry technique. Seed particle density within the flow changes considerably from one region to another within the flow due to reverse flows and other complexities of the flow under investigation resulting in poor signal to noise ratio. For this reason, when calculating the velocity vectors average cross correlation is taken and mean vectors are computed from the peak point of this averaged cross correlation. As a consequence of measurements a stable re-circulation zone is observed just downstream of the flame holder center body. Moreover secondary weak re-circulation zones are observed either side of the jet flow due to sudden expansion. Due to these flow structures it can be concluded that the flame may be held in a stable manner for the reacting flow case.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: tuncero@itu.edu.tr / +90 212 285 6843

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Girdaplı dönen akışlara tepkimeli ve tepkimesiz şartlar altında, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, kimyasal işlem tesisleri, döner fırınlar ve sprey kurutucular gibi birçok mühendislik ve endüstri alanında rastlanır. Girdaplı akış yanma sistemlerinde ve kimyasal proses tesislerinde akışkan karışımını, ısı ve kütle transferi oranını artırmak ve sürecin verimini ya da kararlılık derecesini geliştirmek amacıyla kullanılırlar. Gaz türbinlerinin yanma odasında girdaplandırılmış bu hava akışı sayesinde yanma odası içerisinde kararlı alev yapısı sağlanır. Hava-yakıt karışımının geliştirilmesinden dolayı yanma veriminde artış elde edilir ve bu yüksek yoğunluklu yanma emisyonların (CO, NO_x, UHC vb.) azalmasını sağlar [1, 2]. Girdaplı akışlar son derece karmaşık ve kararsız akış yapılarıdır. Girdap vanesi, akış alanı üzerinde aksel ve radyal doğrultularda basınç gradyanlarının oluşmasına sebep olur. Güçlü girdap olması durumunda, aksel yönde meydana gelen ters basınç gradyanları, aksel boyunca geriye doğru akış ve iç resirkülasyon bölgesi oluşturmaya yetecek düzeyde büyük olur. Oluşan bu resirkülasyon bölgesi kararlı alev yapısını oluşturacak olan faktördür. Hız bileşenleri ve türbülans şiddetleri girdaplı akışların temel karakteristiğini oluşturur ve literatürde bu parametreler olayın fiziğini anlamak amacıyla deneysel ve sayısal modelleme gibi yöntemlerle çokça araştırılmıştır [3]. Girdaplı akışlar, boyutsuz bir parametre olan girdap sayısı S ile karakterize edilirler ve girdap sayısı, açıl momentum akısının aksel momentum akısına oranı olarak tanımlanır (Eş. 1).

$$S = \frac{\int_{R_i}^{R_o} \overline{u_z} \overline{u_\theta} r^2 dr}{\int_{R_i}^{R_o} u_z^2 r dr} \quad (1)$$

Eğer ki girdap vanesinin kanat açısı, bu çalışmada olduğu gibi, sabit ise Eş. 1'de tanımlanan girdap sayısı S Eş. 2 yardımıyla hesaplanabilir.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2} \right] \tan\varphi \quad (2)$$

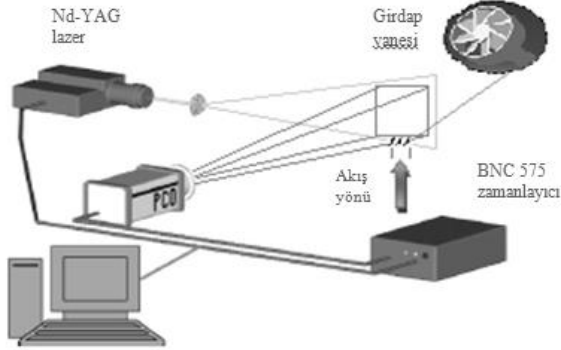
Girdap akışları, girdap sayısına bağlı olarak sınıflandırılır, $S < 0,3$ ise zayıf, $S > 0,6$ olduğu durumda ise kuvvetli girdap olarak anılır [4]. Yeniden dolaşım bölgesinin yapısı girdap sayısının doğrudan fonksiyonudur [5]. Bu çalışmada kullanılan girdap sayısı 0,74'tür bu da yeniden dolaşım bölgesi oluşturmaya yetecek derecede kuvvetli bir girdabın oluşumu için yeterlidir. Gaz türbin motorlarının yanma odalarında da kullanılan girdap sayıları bu civardadır. Ana girdap yapısının fiziksel izahatının anlaşılabilmesi için soğuk akış üzerinde farklı kanat açıları HAD yöntemi ile yapılan bir çalışmada, kanat sayısı arttıkça yeniden dolaşım bölgesinin şeklinde önemli bir değişiklik olmadığını bununla birlikte bu bölgedeki türbülans yoğunluğunun arttığını göstermektedir. Artan kanat açısı ise

yeniden dolaşım bölgesinin aşağı doğru kaymasına neden olur [6]. Girdap sayısının artması, türbülans şiddetini ve alev hızını artırır, alevin boyunu ise küçültür. Aşırı girdap yapısı ise, merkezi yeniden dolaşım akışının giriş bölgesine girmesine neden olur ve alev geriye doğru döner [7]. Parçacık yöntemiyle akım görüntüleme tekniği girdaplı akışların hız alanının incelenmesinde literatürde sık kıyaslandığında kesintisiz ve aynı anda bütün akış alanı hakkında bilgi verebilen bir yöntem olması avantaj teşkil eder. Üç boyutlu girdaplı akış yapısının iki boyutlu PIV yöntemi ile incelenmesinde, parçacıkların çok kısa bir zaman aralığında sadece radyal ve aksel yönde hareket ettiği, incelenen düzlemden dışarı bir hareketinin olmadığı kabul edilir. Ancak parçacıkların düzleme dik yöndeki yer değiştirme vektörleri büyük olduğunda ölçülen hızlar üzerinde hatalara sebep olur. Akış alanına ait bütün hız bileşenlerinin elde edilebilmesi için stereoskopik PIV yöntemi kullanılabilir [8]. Girdaplı akışların PIV yöntemi ile incelenmesi hususunda birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Caldira-Pires vd. [9] fakir önkarişimli ön buharlaşmalı yanma odalarında soğuk akışın girdap yapısını PIV metodu kullanarak incelemişlerdir. Silindirik borular içerisine yerleştirilmiş trapezoid şeklindeki kanatçıkların oluşturduğu girdap yapısı ki bazı tasarımlarda bu şekilde girdap vanesi kanatçıkları kullanılabilir Che vd. [10] tarafından PIV ile incelenmiştir. Bazı araştırmacılar silindirik borular içerisinde değil de daha değişik geometriler içerisindeki girdaplı akışları incelemişlerdir. Örneğin Yadav ve Gaikvad [11] kare kesitli borular içerisindeki girdaplı akışı PIV yöntemi ölçmüş, Coelho vd. [12] ise konik difüzörler içerisindeki girdaplı akışı ele almıştır. Girdaplı akışların incelenmesi yalnızca gaz türbin motorları için içten yanmalı motorların karışım ve yanma performansının artırılması için de önemlidir. Invorgsen vd. [13] ile Zeng vd. [14] içten yanmalı motorlardaki girdap yapısını yine PIV yöntemini kullanarak deneysel olarak ele almışlardır. Ön yanma odalı dizel motorları günümüzde pek kullanılmamaktadır. Buna karşın, common-rail püskürtme sisteminin geliştirilmesiyle direkt püskürtmeli dizel motorlar yaygınlaşmış ve özellikle binek taşıtlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, ön yanma odalı motorlarda yapılabilecek iyileşmeler ile ilgili motorların kullanımı da yaygınlaştırılabilir ve daha düşük basınçlı püskürtme sistemine sahip daha ucuz motorlar geliştirilebilir [15]. İçten yanmalı motorlarda da gerek ön yanma odasında gerekse de silindir içi yanmada girdap yardımı ile alev stabilizasyonu kullanılmaktadır. Son yıllarda yeni yeni gelişmekte olan tomografik PIV yöntemi ile aydınlatma hacmine birçok farklı açıdan kameralar ile üç boyutlu akış yapısı elde edilebilmektedir. Alekseenko vd.'nin [16] çalışması tomografik PIV yaklaşımının girdaplı jet akışlarının incelemesinde kullanımına örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada, model bir gaz türbininin yanma odasında kullanılan girdap vanesi, soğuk (tepkimesiz) akış şartlarında deneysel olarak incelenmiştir. PIV yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda anlık hız vektörleri elde edilerek girdap vanesinin meydana getirdiği yeniden dolaşım bölgesinin akış yapısı karakterize edilmiştir.

2. DENEY DÜZENEGİ (TEST RIG)

Deney düzeneği Şekil 1’de şematik olarak resmedilmiştir. Aynı zamanda bu düzende kullanılan laboratuvar ölçeğindeki yanma odası ise Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere yanma odasının üst kısmı deneylerde kullanılmamıştır. Yani girdap vanesinden gelen akış genişleme düzlemine eriştiğinde atmosferik koşullara açılmaktadır.

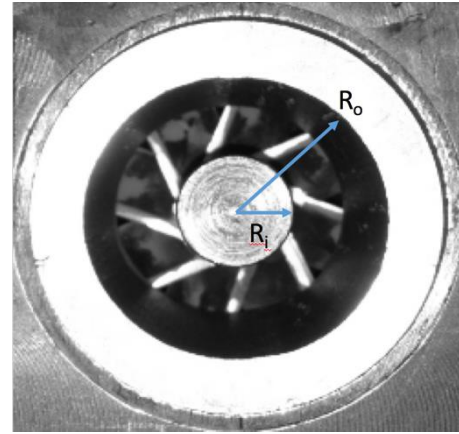
Deneylerde kullanılan ve ısıya dayanıklı pirinç malzemeden üretilen girdap vanesi, 45 derecelik kanat açısına ve sekiz adet kanada sahiptir (bkz. Şekil 3). Girdap sayısı Eş. 2 yardımıyla daha önce de belirtildiği üzere 0,74 olarak hesaplanır. Girdap vanesinin iç ve dış çapları sırasıyla 20 mm ve 50 mm’dir. Vanenin ortasında bulunan 20 mm’lik çapa sahip silindirik merkez cisim ise alev tutucu olarak işlev görmektedir. Dolayısıyla girdap vanesinin iç çapı merkez cismin çapına eşittir. Girdap vanesinin üstten görünüşü Şekil 3’te verilmiştir ve bu şekil üzerinde bahşış geçen iç ve dış çaplar işaretlenmiştir. Buradan geçen akış yine Şekil 3’te görüleceği üzere ani bir genişleme düzlemine ulaşmaktadır.



Şekil 1. Test düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic view of the test setup)

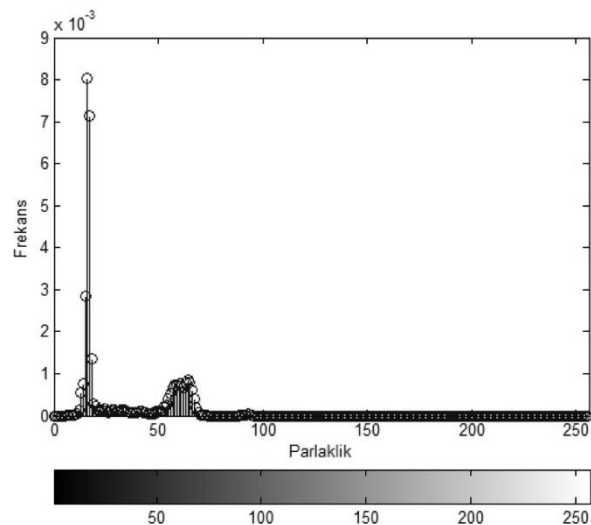
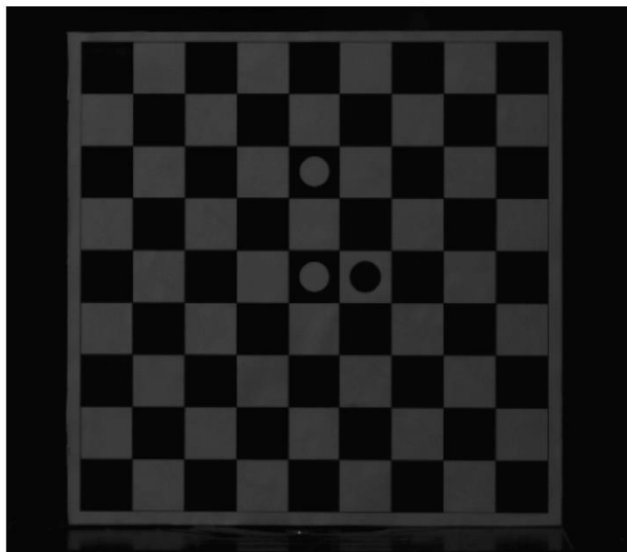


Şekil 2. Test düzeneği ve Nd:YAG lazer (Test rig and the Nd:YAG laser)



Şekil 3. Girdap vanesinin üstten görünüşü (Top view of the swirl vane)

Ölçümler esnasında ışık kaynağı olarak 532 nm dalga boyunda ışık veren çift kaviteli bir Nd:YAG lazer



Şekil 4. Kalibrasyon plakası, solda ve histogramı sağda (Calibration plate on the left and its image histogram on-the-right)

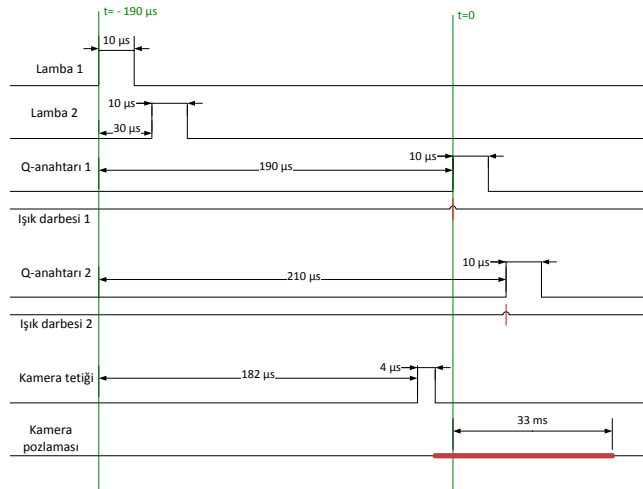
kullanılmıştı (Şekil 2). Kullanılan lazerin teknik özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Akışı tohumlamak için TiO_2 partiküller kullanılmıştır. Mie saçılımı görüntüleri kaydetmek için 1600 x 1200 piksel çözünürlükte bir CCD kamera kullanılmıştır. Görüntüler 15 Hz sıklıkla kaydedilmiştir (lazer ile senkron şekilde). Kameranın önünde 50 mm’lik lensler kullanılmıştır. Ölçümler sırasında lenslerin açıklığı (f sayısı) 2,8’dir. Kameranın kalibrasyonu, her bir karenin boyutları 17 mm x 17 mm olan, 9 x 9 siyah-beyaz satranç tahtası deseni ile hazırlanmış bir kalibrasyon hedefi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için kullanılan görüntü Şekil 4’te gösterilmiştir. Aynı şekilde bu görüntüdeki parlaklığın piksellere dağılımı da gösterilmiştir. Histogramda birbirinden rahatlıkla ayırt edilebilen iki farklı tepe noktasının bulunması (ki birisi beyaz renkli karelere, diğeri siyah renkli karelere karşılık gelir) kalibrasyon algoritmasının doğru sonuç vermesi açısından önemlidir.

Tablo 1. Ölçümlerde kullanılan Nd: YAG lazerin teknik özellikleri

(Technical specifications of the Nd: YAG laser used for measurements)

Optimum Tekrarlama Sıklığı (Hz)	15
Enerji (mJ/vuruş @ 532 nm)	120
Enerji Stabilitesi (%)	± 4
Işın Çapı (mm)	4,5
Puls Genişliği (ns)	5
Işının Iraksaklığı (mrad)	< 2
Işın Stabilitesi (urad)	< 100

Ölçüm zamanlaması oldukça hassas bir gecikme üretici tarafından senkronize edilir. Gecikme üretici ölçüm sıklığını belirleyen 15 Hz frekanstaki ana saat pulsuna, her bir kanalda istenilen kadar gecikme ekleyerek kamera ve lazere tetik sinyalleri iletir. Böylelikle ölçüm için gerekli olaylar doğru zamanlarda birbirlerinin peşi sıra gerçekleşir. Zamanlama diyagramı Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Zamanlama diyagramı (Timing diagram)

Her bir lazer kavitesi için biri flaş lambası diğeri ise Q-anahatları olmak üzere iki tetik sinyali gönderilir. Flaş

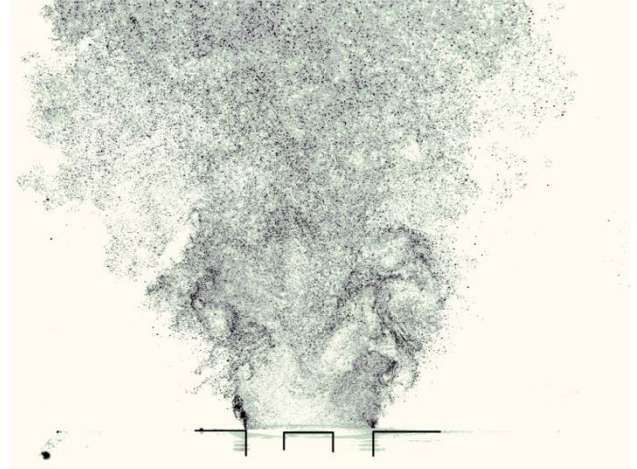
lambası ile Q-anahatları arasındaki gecikme lazerin optimum enerji verdiği değere ayarlanmıştır. Kameranın pozlama yaptığı esnada her iki lazer kavitesinden de istenilen sıra ile ışık yayınlanmaktadır.

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Küçük bir sonlu zaman farkıyla kaydedilmiş iki Mie saçılımı görüntüsünü işlemek için en bilindik yöntem çapraz korelasyon metodudur. Parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) yöntemi iki ya da daha fazla bu şekilde kaydedilen görüntünün işlenmesi sonucu aydınlatılan düzlem içerisindeki hız vektörlerinin saptanması için kullanılır [17]. Hız vektörlerinin hesaplanması için yaklaşık dört yüz adet görüntü çifti kaydedilmiştir. Böylece ortama hızlardaki belirsizlik yaklaşık $\% \pm 2$ olmaktadır. Hız vektörleri hesaplanırken 64 x 64 piksellik sorgulama pencereleri birbirleri ile $\%50$ çakışmaktadır. Bu durumda ölçümlerin çözünürlüğü her bir yönde yaklaşık 4 mm olmaktadır. Her bir görüntü çiftinden birkaç bin vektör hesaplandığından gereken hesaplama yükü son derece fazladır. Verilen N x N piksel bir sorgulama penceresi için N^4 işlem yapılması gerekmektedir. Bu sebeple çapraz korelasyon işlemi için FFT (hızlı Fourier dönüşümü) algoritması kullanılır [18]. Korelasyon teoremine göre iki fonksiyon arasındaki korelasyon frekans uzayında birinci fonksiyonun Fourier dönüşümü ile ikincisinin Fourier dönüşümlerinin karmaşık eşleniği çarpılarak hesaplanabilir. Bu da hesaplamayı son derece hızlandırır. Frekans uzayında hesaplanan korelasyon fonksiyonunun tepe noktası sorgulama penceresi içerisindeki parçacıkların ortalama yer değiştirmesini gösterir. Böylece her bir korelasyon penceresi içerisinde bir vektör hesaplanıp daha sonra bu vektörlerin ortalaması alınabilir. Fakat bu yöntem özellikle sinyal/gürültü oranının düşük olduğu durumlarda o kadar iyi sonuç vermez. Özellikle de bu çalışmada olduğu gibi (Şekil 6) parçacık yoğunluğunun akış içerisindeki noktalar arasında önemli farklılıklar gösterdiği durumlarda hız vektörlerinin korelasyon fonksiyonunun ortalaması alındıktan sonra hesaplanması sinyal/gürültü oranını iyileştiren en uygun yöntemdir. Böylelikle ölçümler neticesinde kaydedilen iki yüz adet görüntü çifti kendi aralarında işlenerek ikiyüz adet korelasyon matrisi elde edilmiş daha sonra bu korelasyon matrislerinin aritmetik ortalaması hesaplanarak buradan hareketle tek bir ortalama hız alanı elde edilmiştir. Böylece tohumlanın yeterli olmadığı sinyal gürültü oranının bölgelerde hatalı vektör hesaplanmayacaktır. Hesaplama yöntemine ait detaylar [19] numaralı referansta açıklanmaktadır. Kullanılan görüntü çifti sayısının akışı istatistiksel olarak tanımlamak için yeterli olduğu daha fazla sayıda örneğin 400 adet görüntü çifti kullanmanın sonuçları değiştirmedigi test edilmiştir.

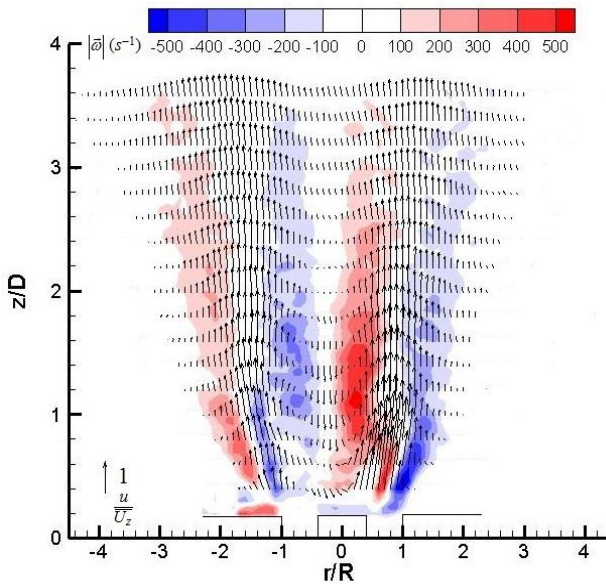
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışma neticesinde elde edilen ortalama hız vektörleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Belirtilen Reynolds sayısı ani genişleme düzlemine bağlanan silindirik borunun hidrolik



Şekil 6. Arka arkaya kaydedilmiş örnek mie saçılımı görüntüleri (Successively recorded mie scattering images)
 $\Delta t = 30 \mu s$, resimlerde anlaşılabilirliği kolaylaştırmak üzere parlaklık tersine çevrilmiştir ($\Delta t = 30 \mu s$, images are intensity inverted for clarity.)

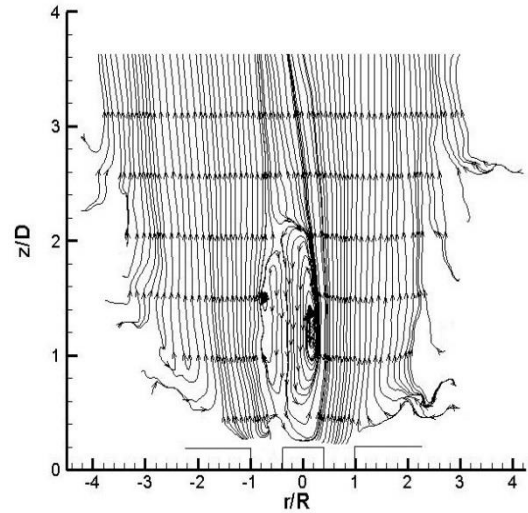
çapı (çünkü içerisinde bir de silindirik merkez cisim vardır) ve eksenel yöndeki akış hızı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada girdap vanesinden döndürülerek geçip sonrasında ani genişleme düzlemine ulaşan jet akışının hız değişim katmanından ortam havasını içerisine çekip genişleyişi şekilde açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra iki adet eliptik ters yönde dönen girdap yapıları da ortalama hız vektörlerinden ayrıca da bu vektörlerin işlenmesi ile elde edilen akım çizgilerinin gösterildiği Şekil 8'den açıkça anlaşılabilir. Yanma odasının merkez eksenini boyunca ($r/R=0$) ters akış ta şeklinde net olarak görülmektedir. Aynı zamanda ani genişlemeden ötürü zayıf ikincil yeniden dolaşım bölgeleri oluşmaktadır.



Şekil 7. Ortalama hız vektörleri ve vortisite büyüklüğü
(Mean velocity vectors)

Hızlar ortalama eksenel hıza \bar{U}_z bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır ($S=0,74$, $Re_{Dh}=19,400$).

Akış yapısında görülen ana yeniden dolaşım bölgesinin alev tutmak için elverişli olduğu sonucuna varılabilir. Bu yeniden dolaşım bölgesi sıcak yanma gazlarını ve serbest radikalleri bünyesinde hapsedip yeni gelen taze reaktantların alev almasını sağlayacaktır. Bu konfigürasyonda ve aynı hava akışı debisinde yanmanın stabil bir şekilde sağlanabildiği Tunçer vd. [20] tarafından gösterilmiştir.



Şekil 8. Akım çizgileri ve akış içerisindeki yeniden dolaşım bölgeleri $S=0,74$ $Re_{Dh}=19,400$
(Flow streamlines and Re-circulation Regions $S=0.74$ $Re_{Dh}=19.400$)

Bu deneysel çalışmanın devamında stereoskopik PIV ölçümleri ile ki bu konfigürasyonda aydınlatma düzlemine belirli bir açı ile iki kamera ile bakılmaktadır, aydınlatma düzlemine dik yöndeki hız vektörlerinin de incelenmesi planlanmaktadır. Buna ilaveten bu çalışmada elde edilen soğuk (tepkimesiz) akış verilerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerini doğrulamak amacıyla da kullanılması da planlanmaktadır.

5. SEMBOLLER (SYMBOLS)

D	Çap [m]
Q	Hacimsel debi [$m^3 \cdot s^{-1}$]
R	Yarıçap [m]
Re	Reynolds sayısı
S	Girdap sayısı
R	Radyal koordinat [m]
U	Hız [$m \cdot s^{-1}$]
Z	Eksenel koordinat

Yunan Harfleri (Greek Letters)

Ω	Vortisite
Φ	Girdap vanesi kanat açısı [rad]

İndisler (Indices)

H	Hidrolik
i	İç
o	Dış

Operatörler (Operators)

*	Korelasyon
$\langle \rangle$	Ortalama

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Deneysel çalışmaya maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 109M426) ve ayrıca makalenin iyileştirilmesine olanak sağlayan hakemlere teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Mak H., Balabani S., Near Field Characteristics of Swirling Flowpast a Sudden Expansion, *Chemical Engineering Science*, 62, 6726 – 6746, 2007.
- Yasir M. Al-Abdeli, Assaad R. Masri, Recirculation and Flowfield Regimes of Unconfined Non-Reacting Swirling Flows, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27, 655-665, 2003.
- Raj R.T.K., Ganesan V., Study on the Effect of Various Parameters on Flow Development Behind Vane Swirlers, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1204–1225, 2008.
- Ganesan V., Recirculation and Turbulence Studies in an Isothermal Model of a Gas Turbine Combustor Chamber, *Doktora Tezi*, Indian Institute of Technology-Madras, India, 1974.
- Huang R.F., Tsai F.C., Observations of Swirling Flows Behind Circular Disks, *AIAA Journal*, 39, 1106–1112, 2001.
- Eldrainy Y.A., Jaafar M.N.M., Lazim T.M., Cold Flow Investigation of Primary Zone Characteristics in Combustor Utilizing Axial Air Swirler, *Engineering Technology*, 74, 977-983, 2010.
- Huang Y., Yang V., Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, 30,1 775–1782, 2005.
- Liu Z., Zheng Y., Jia L., Zhang O., An Experimental Method of Examining Three-Dimensional Swirling Flows in Gas Cyclones by 2D-PIV, *Chemical Engineering Journal*, 133, 247–256, 2007.
- Caldeira-Pires A., Sousa A.J., Neiva R.Q., Swirling Flow Analysis Using PIV, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brazil, 2007.
- Che C.C., Tian M.C., Zhang G.M., Leng X.L., Experimental Study by PIV of Swirling Flow Induced by Trapezoid Winglets, *Journal of Hydrodynamics*, 25, 919-928, 2013.
- Yadav O., Gaikwad P., Swirling Flow Visualization in a Square Section Test Duct by Particle Image Velocimetry (PIV) System, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4, 175-184, 2014.
- Coelho J.G., Neiva R.Q., Sousa A.J., Brasil Junior, A.C.P., Experimental and Numerical Study of the Swirling Flow in Conical Diffusers, *Journal of Engineering Science and Technology*, 9, 657-669, 2014.
- Ingvorsen K. M., Meyer K. E., Walther J. H., Mayer S., PIV and LDA Measurements of the Swirling Flow in a Low-Speed Two-Stroke Diesel Engine, 10th European Fluid Mechanics Conference (EUROMECH), Lyngby, Danimarka, 2014.
- Zeng W., Sjöberg M., Reuss D.L., PIV Examination of Spray-Enhanced Swirl Flow for Combustion Stabilization in a Spray Guided Stratified-Charge Direct-Injection Spark-Ignition Engine, *International Journal of Engine Research*, 16, 316-322, 2015.
- Şahin Z., Experimental Investigation of the Effects of Using Gasoline-Diesel Fuel Blends on Combustion Engine Performance Parameters and NO_x Emission in a Turbocharged Pre-Chamber Diesel Engine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (3), 329-338, 2015.
- Alekseenko M.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tomographic PIV Measurements in a Swirling Jet Flow, 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Delft, Netherlands, 2013.
- Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J., *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Almanya, 2007.
- Priestly M.B., *Spectral Analysis and Time Series*, 1, Academic Press Inc., New York, ABD, 1981.
- Dynamic Studio User Guide*, Dantec Dynamics, Publication No:9040U4732, Danimarka, 2010.
- Tuncer O., Kaynaroğlu B., Karakaya M.C., Kahraman S., Çetiner-Yıldırım O., Baytaş C., Preliminary Investigation of a Swirl Stabilized Premixed Combustor, *Fuel*, 115, 870-874, 2014.