



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **ÜÇ BOYUTLU ARKA PLAN KONUMLANDIRILMIŞ YOĞUNLUK FARKI (SCHLIEREN) YÖNTEMİ İLE AKIŞ YAPILARININ İNCELENMESİ VE PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜMÜ İLE DOĞRULANMASI**

**ÖZGÜN ÖZER  
DİLEK KUMLUTAŞ  
UTKU ALP YÜCEKAYA  
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**



# ÜÇ BOYUTLU ARKA PLAN KONUMLANDIRILMIŞ YOĞUNLUK FARKI (SCHLIEREN) YÖNTEMİ İLE AKIŞ YAPILARININ İNCELENMESİ VE PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜMÜ İLE DOĞRULANMASI

*Investigation of Flow Structures by Three Dimensional Background Oriented Schlieren Method and Validation with Particle Image Velocimetry*

Özgün ÖZER  
Dilek KUMLUTAŞ  
Utku Alp YÜCEKAYA

## ÖZET

Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi, akışkanın içerdiği yoğunluk farklarının kırılma indisine etkisinden faydalanarak akışın görüntülenmesini sağlayan ve güncel olarak gelişmekte olan bir akış inceleme yöntemidir. Bu yöntemin zayıf noktası sadece iki boyutlu akış yapılarının görüntülenmesi ve üç boyutlu akış yapılarının incelenememesidir.

Mevcut çalışmada; arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi, üç boyutlu olarak geliştirilmiş ve yöntemin temel prensipleri sunulmuştur. Geliştirilen yöntemin uygulama esasları sıcak jet akış üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yönteminden elde edilen hacimsel akış yapısı, literatürde akış alanlarının bütünsel incelemesinde kabul gören parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGHÖ) yöntemiyle elde edilen üç bileşenli hacimsel ortalama akış yapısı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmanın sonucunda, “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi, yoğunluk farkı içeren akışların incelenmesinde kullanılabilecek etkili ve ekonomik bir yöntem olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Schlieren yöntemi, Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi, Parçacık görüntülemeli hız ölçümü.

## ABSTRACT

The background-oriented schlieren method is a current developing method of flow analysis that allows the flow to be viewed using the refractive index effect of the density differences contained in the fluid. The weak point of the BOS method is that only two-dimensional flow structures can be viewed and three-dimensional flow structures can not be investigated.

In the present study, a three-dimensional version of the background-oriented schlieren method was developed and the basic principles of the method are presented. The application guidelines of the developed method are shown on the hot rectangular jet stream. Furthermore, the volumetric flow structure obtained from the "Three Dimensional Background-Oriented Schlieren" method is compared with the three component volumetric average flow structure obtained by the Particle Image Velocimetry (PIV) method which is accepted in the literature for investigating whole flow fields. The results were found to be coherent.

As a result of the study, the "Three Dimensional Background-Oriented Schlieren" method is presented as an efficient and economical method that can be used to study density difference flow.

**Key Words:** Schlieren method, Background-oriented schlieren method, Particle image velocimetry.

## 1. GİRİŞ

Görüntülemeli akış inceleme metotları, akış alanını etkilememesi ve görüntülenen akış alanının tümünden eşzamanlı veri elde etmesi bakımından konvansiyonel ölçüm yöntemlerinden üstündür. Bu görüntüleme yöntemlerinden biri de yoğunluk farkı (Schlieren) yöntemidir.

Klasik Schlieren ve interferometry yöntemleri, akışkan içindeki yoğunluk dağılımının görüntülenmesinde kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler genel olarak, akışkan yoğunluğu ve ışığın kırılma indeksi arasındaki ilişkiyle oluşan optik gradyanların görüntülenmesine dayanmaktadır. Bu ilişki Gladstone-Dale eşitliği ile açıklanmaktadır [1]. Ancak, bu metotların uygulanması için karmaşık optik düzenekler gerekmektedir.

Bu zorlukların aşılması için arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi 2000'li yılların başlarında geliştirilmiştir [2,3,4]. Yeni geliştirilen yöntemde karmaşık optik elemanların yerine, belirli bir dokuya sahip arka plan kullanılmakta ve elde edilen görüntüler üzerinde çapraz korelasyon tekniği uygulanarak akışkanın yoğunluk dağılımları elde edilmektedir. Böylece diğer yöntemlere göre daha sade, uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem geliştirilmiştir. Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yönteminin ülkemizdeki ilk uygulamaları mevcut çalışma ekibi tarafından yapılmıştır [5].

Bahsi geçen tüm yöntemlerin zayıf noktası ise sadece iki boyutlu akış yapılarının görüntülenebilmesidir. Literatürde, üç boyutlu akış yapılarının arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi ile incelenebilmesi için teknik geliştirmekte olan iki çalışma ekibi mevcuttur. Bunlardan biri Fransız Uzay Araştırmaları (ONERA) ekibidir. Bu ekip 2015 yılında yaptıkları çalışmada arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı verilerinin üç boyutlu yeniden yapılandırılması ile ilgili bir çalışma sunmuşlardır [6]. Çalışmada saniyede 10 görüntü kaydı yapabilen, 5 Mpx çözünürlüklü 12 hızlı kamera kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi ile karşılaştırılmıştır.

Üç boyutlu akış yapılarının Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı yöntemi ile incelenebilmesi için teknik geliştirmekte olan diğer ekip ise mevcut çalışma ekibidir.

Bu çalışmada, geliştirilmekte olan "Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı" yönteminin temel prensipleri ve uygulaması sunulmuştur. Uygulamada, literatürden farklı olarak 3 adet son kullanıcı ürünü aynasız kamera kullanılmıştır. Kullanılan bu kameraların çözünürlüklerinin hızlı kameralara göre çok yüksek olması daha detaylı veri alınmasına imkan vermektedir (24 Mpx).

Ayrıca mevcut çalışmada, sıcak jet akışın, "Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı" yöntemi ile incelenmesi ve sonuçlarının parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGHÖ) yöntemi ile karşılaştırılarak doğrulanması verilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda, "Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı" yöntemi, yoğunluk farkı içeren akışların incelenmesinde kullanılacak etkili ve ekonomik bir yöntem olarak sunulmuştur.

## 2. METOT

### 2.1 Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı Yönteminin Temel Prensibi

Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi, ışığın farklı yoğunluktaki ortamlarda farklı kırılma indeksine sahip olmasına dayanmaktadır. Bacadan ya da arabanın egzozundan çıkan sıcak egzoz gazının arka plandaki görüntüyü dalgalandırması buna örnek olarak verilebilir. Gladstone-Dale eşitliği, Kırılma indeksi ( $n$ ) ve yoğunluk ( $\rho$ ) arasındaki ilişkiyi vermektedir [1].

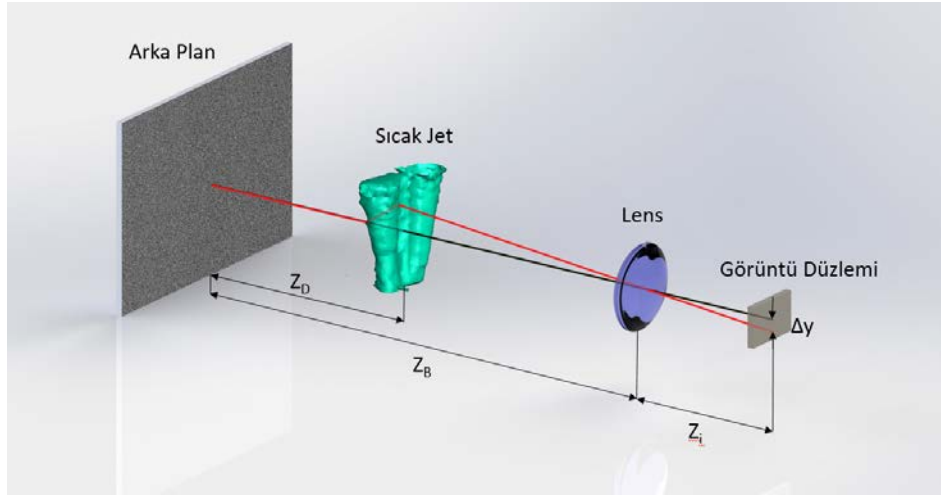
$$\frac{n-1}{\rho} = G(\lambda) \quad (1)$$

Yöntemin uygulanmasında, incelenecek akış alanının arka planı dokulu bir yüzey olmalıdır. Bu dokulu yüzeyler doğal veya yapay olabilir. Deneyin başarısını garantilemek için arka plan dokusunun tekrarlamayan ve rastgele olması önerilir. Yöntemin güncel uygulamalarında arka plan bilgisayar ile oluşturulmaktadır. Oluşturulan dokulu arka plan, deneyin başarısını sağlamak için yüksek uzamsal ayrıntı ve kontrasta sahip olmalıdır.

Söz konusu akış alanını görüntülemek için kamera arka plana dik olacak şekilde yerleştirilmelidir. Ayrıca ek perspektif bozulmalarını önlemek için, kamera objektifinin geniş açı lens olmaması önerilir. Kullanılan lens belirtilen özelliklere sahip değil ise, elde edilen görüntülerdeki problemler dijital görüntü işleme yöntemleri ile giderilebilir.

Deneyden önce (yoğunluk farkı oluşmadan önce) bir referans görüntü kaydedilir. Daha sonra deney başlatılarak akıştan kaynaklı yoğunluk farkının kamera ile arka plan arasında oluşması sağlanır. Bu aşamada yoğunluk farkı ışığın  $\epsilon_y$  açısız sapmasıyla kırılmasını sağlayarak elde edilen görüntünün referans görüntüden farklı olmasına neden olur. Bu durum Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1’de görülen siyahla gösterilen ışın, yoğunluk farkına maruz kalmadan giden ışığın izlediği yolu, kırmızı ile gösterilen ışın ise yoğunluk farkından kırılarak giden ışığın izlediği yolu temsil etmektedir.  $\Delta y$  ile gösterilen mesafe aynı noktanın referans görüntüsü ile deney sırasında alınan görüntü arasındaki farkı göstermektedir.



Şekil 1. Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yönteminin şematik gösterimi

$\Delta y$  ile gösterilen mesafenin hesaplanmasında kullanılan ve kırılma indeksi ( $n$ ) ile açısız sapma ( $\epsilon_y$ ) arasındaki ilişkiyi temsil eden denklem eşitlik (2)'de verilmiştir [1].

$$\tan(\epsilon_y) = \int_0^{Z_B} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (2)$$

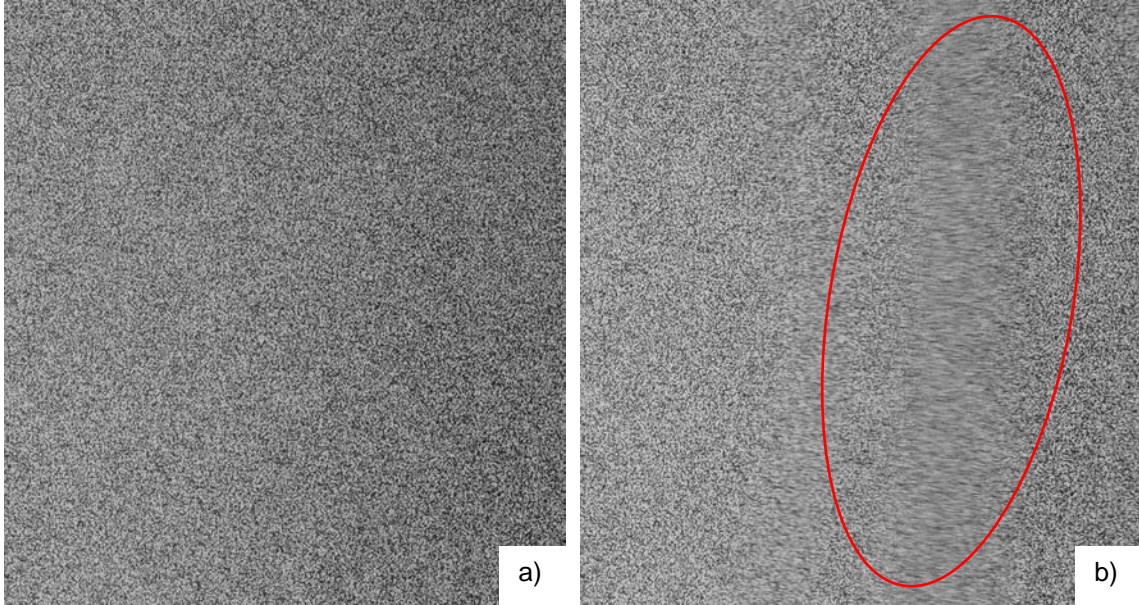
$\tan(\epsilon_y)$  yeteri kadar küçükse,  $\epsilon_y$ 'ye eşit kabul edilebilir. Bu nedenle ışığın yoğunluk farkında kırılmasının sebep olduğu deplasman ( $\Delta y$ ) eşitlik (3) ile ifade edilir;

$$\Delta y = Z_D M \epsilon_y \quad (3)$$

(3) eşitliğinde M, büyütme faktörü olarak adlandırılır ve  $M=Z_i/Z_B$  olarak ifade edilir. Şekil 1'de  $Z_d$  arka plan ile yoğunluk farkı arasındaki mesafeyi,  $Z_i$  odak uzaklığını,  $Z_B$  ise arka plan ile kamera lensi arasındaki uzaklığı temsil eder.

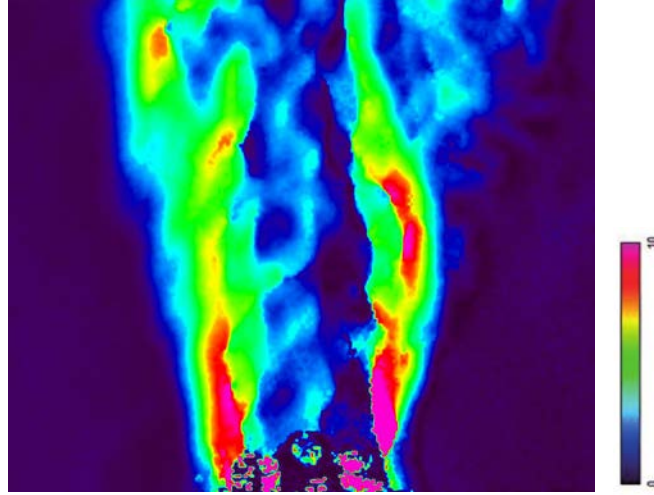
Bu deplasman, yoğunluk farkından kaynaklı olarak farklı açısal sapmalar ile kırılan tüm noktalar için elde edilecektir. Şekil 2.a'da deneyden önceki referans görüntü ve Şekil 2.b'de deney sırasında elde edilen görüntü gösterilmiştir. Şekil 2.b'de kırmızı ile gösterilen alanda bahsi geçen yoğunluk farkından kaynaklı deplasman belirtilmiştir.

Şekil 2'de gösterilen deney ve referans görüntüleri alındıktan sonra art işlem (post-processing) bölümüne geçilir. Bu aşamada referans görüntüsü ile deney görüntüsü arasında çapraz korelasyon işlemi yapılır. Bu işlem referans görüntüsü ile tüm deney görüntüleri arasında uygulanır.



**Şekil 2.** a) Deneyin başlamasından önce çekilen referans fotoğrafı  
b) Deney sırasında çekilen akış görüntüleme fotoğrafı

Çapraz korelasyon işleminin ilk adımında, referans görüntü inceleme alanlarına ayrılır. Daha sonra deney sırasında elde edilen görüntü ile referans görüntü konum bilgisi bakımından karşılaştırılır. Deney sırasında elde edilen görüntüdeki konum ile referans görüntüdeki konum aynı ise ( $\Delta y=0$ ) bu bilgi gelen ışınların herhangi bir kırılmaya maruz kalmadığı, yani ışının yolu üzerinde herhangi bir yoğunluk farkının bulunmadığı anlamına gelmektedir. İki konum arasındaki fark olan alanlar ise kırılmaların olduğunu göstermektedir. Bu alanlar işaretlenerek akış yapısı belirlenebilmektedir. Şekil 3'te mevcut çalışma kapsamında elde edilen deney sonucu örnek olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Sıcak jet akışının arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi sonucu

Şekil 3'te, bir jetin kesiti gösterilmektedir. Görsel üzerindeki renk kodları, piksel bazında iki resim arasındaki yer değiştirmeyi göstermektedir. Koyu mavi renk, piksel bazında yer değiştirme olmadığını, mor renge doğru giden diğer renkler ise yer değiştirme miktarını temsil etmektedir.

Şekil 3'ten elde edilen sonucun nitel bir sonuç olduğu unutulmamalıdır. Görselleştirilen piksel bazındaki yer değiştirme, akışın yapısı hakkında bilgi verirken herhangi bir hız ya da sıcaklık verisi içermemektedir.

Piksel bazında yer değiştirme, görüntünün alındığı çözünürlükle de ilişkilidir. Çalışma kapsamında 24 Mpx'lik, 23.5 mm X 15.6 mm sensöre sahip aynasız fotoğraf makineleri kullanılmıştır. Çalışmanın farklı çözünürlükte ekipmanla yapılması piksel bazlı yer değiştirmenin boyutunu değiştirecektir. Örneğin, aynı çalışmanın yarı çözünürlükte bir ekipmanla yapıldığı varsayıldığında, 10 piksellik yer değiştirmeler 5 piksele düşecektir. Daha düşük deplasmana sahip 2-3 piksellik yer değiştirmeler yarı çözünürlükte sifıra yakınsayacak ve tespit edilemeyecektir. Bu nedenle çözünürlüğün yeterliliği deneyin özellikle detayları açısından başarısı için önemli bir unsurdur.

İlk görüntünün ayrıştırıldığı inceleme alanı, görüntünün alındığı çözünürlükten etkilenmektedir. Bu alanlar 16x16, 32x32 veya 64 x64 piksel olabilir. İnceleme alanlarının büyümesi deformasyona uğramış görselde inceleme alanlarının daha kesin ve kolay şekilde tespit edilmesini sağlarken, detayların kaybedilmesine neden olabilmektedir. Kademeli algoritma kullanılarak bu sorun çözülebilir. Algoritmada öncelikle 64x64 ya da 128x128 gibi geniş alanlardan konum tespiti gerçekleştirilir. Geniş inceleme alanının doğru konum tespit edebilme yeteneğiyle, dar inceleme alanının detay verebilme yeteneğini beraber kullanabilmek için geniş alanlardan elde edilen konum bilgisini, 32x32 ya da 16x16 inceleme alanlarında kullanarak ikinci bir çapraz korelasyon uygulanır. Böylelikle geniş inceleme alanının doğru konum tespiti yeteneği, dar inceleme alanının ise detay verebilme yeteneği beraber kullanılır.

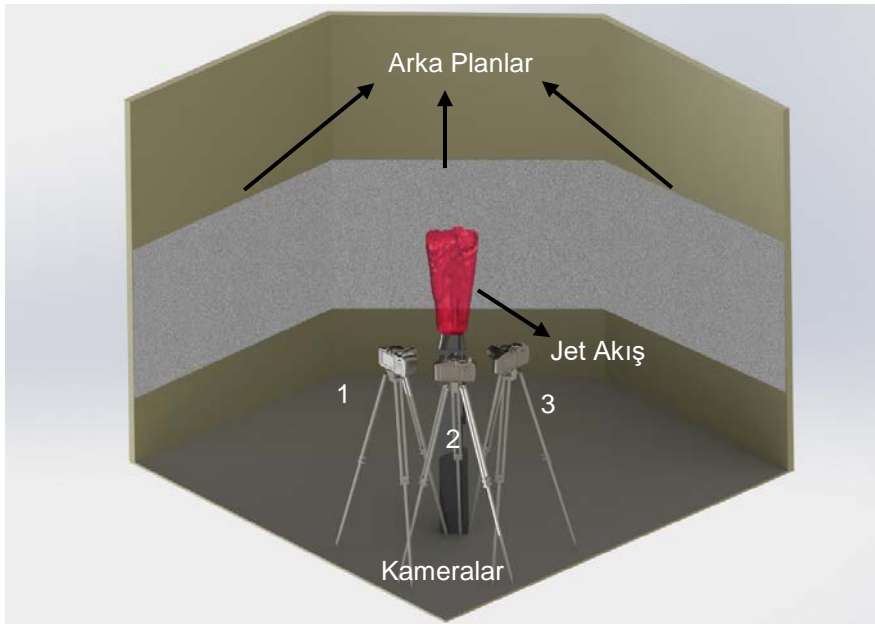
## 2.2 Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı Yöntemi

Arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yönteminin uygulanmasında kullanılan tek kamera yatay ve dikey olarak iki bileşen konumu hakkında bilgi vermektedir. Bu da sadece hacimsel akış yapısının yoğunluk dağılımının düzlemsel izdüşümünün görüntülenmesine izin vermektedir. Dolayısıyla arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yöntemi, iki boyutlu kabul edilebilecek ya da radyal simetrik sistemlerin incelenmesinde kullanışlı olsa da üçüncü boyut bileşenlerinin önemli olduğu hacimsel akış yapılarının incelenmesinde yetersiz kalmaktadır.

Bahsedilen hacimsel akış yapılarının da incelenebilmesi için mevcut çalışmanın konusu olan “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi geliştirilmiştir.

Hacimsel ölçümün elde edilebilmesi için en az üç bileşene ihtiyaç duyulmaktadır. Bir kameranın sadece iki bileşen hakkında bilgi verdiği düşünülürken, üç boyutlu akış yapısının görüntülenmesi için en az iki kamera gerekmektedir. Mevcut çalışmada ise elde edilen hacimsel verinin detayının artırılması için üç adet kamera kullanılmıştır. Kameralardan ilki seçilen x-y düzlemine, ikincisi y-z düzlemine diktir. Üçüncü kamera ise diğer iki kamera ile 45'er derecelik açı yapacak şekilde aralarına yerleştirilmiştir. Yöntemin ana bileşenlerinden olan arka planlar ise kameraların dik bakacağı şekilde incelenecek olan akışın diğer tarafına konumlandırılmıştır. Bahsi geçen deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmiştir.

Yöntemin üç boyutlu versiyonunun uygulanmasında da başlangıç aşamasında (yoğunluk farkı oluşmadan önce) referans görüntüler alınmaktadır. Ancak bu aşamada yöntemin iki boyutlu uygulamasından farklı olarak kameraların görüş alanlarını örtüşürecek kalibrasyon görüntüsünün de alınması gerekmektedir. Bu görüntünün alınmasında incelenecek akış alanına yerleştirilen bir kalibrasyon hedefi kullanılmaktadır. Deneyin tamamlanmasının ardından elde edilen düzlemsel sonuçlar bu kalibrasyon görüntülerinden alınan konum bilgileri ile hacimsel hale getirilir. Mevcut çalışmada hacimsel veri Tecplot yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Üç boyutlu arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yönteminin şematik gösterimi

### 3. SONUÇLAR VE DOĞRULAMA

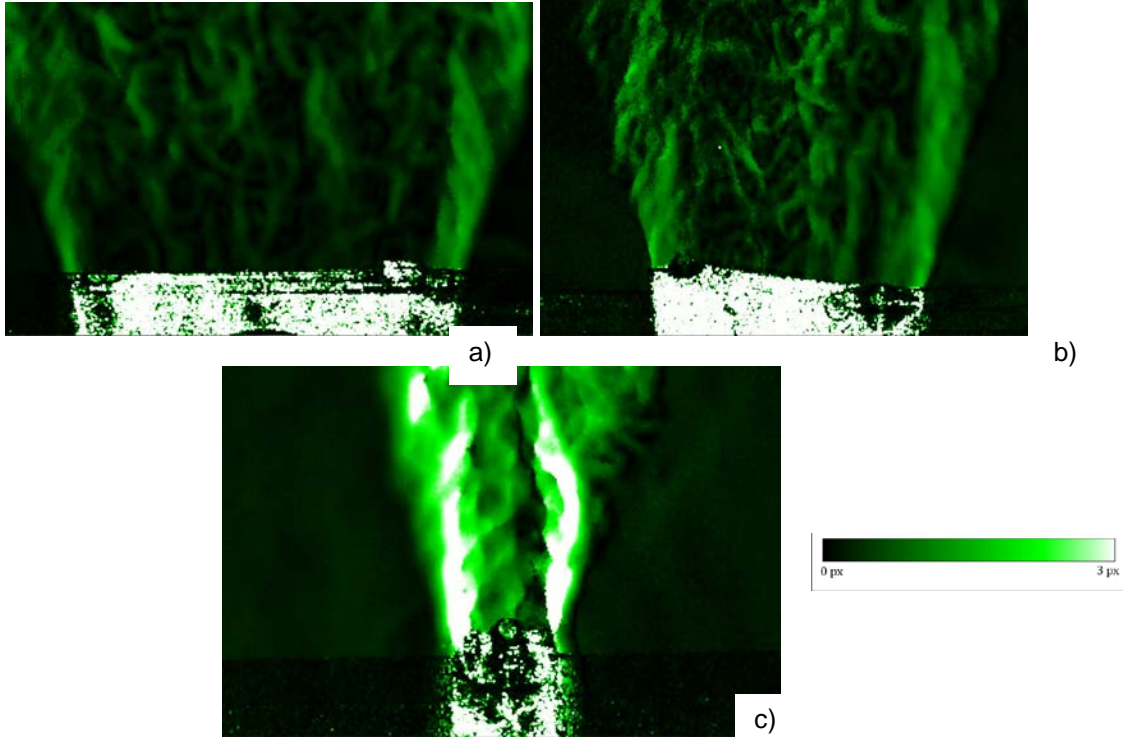
Geliştirilen “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi, Sıcak jet akışına uygulanmıştır. İncelenen jetin çıkış ağız ölçüleri 120 mm x 28 mm'dir. Jet akışının ağızdan ortalama çıkış sıcaklığı 42 °C'dir. Bahsi geçen jet akışın incelenmesi için metod bölümünde aktarıldığı gibi üç kameradan oluşan bir düzenek kurulmuştur (Şekil 4). Deneyde son kullanıcı ürünü aynasız (mirrorless) fotoğraf makineleri kullanılmıştır. Kameraların jet merkezine olan uzaklığı 40 cm'dir. Yerleştirilen arka planlar ile jet merkezi arasındaki mesafe ise 127'şer cm'dir. Deneyde elde edilen düzlemsel sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur.

Şekil 5'teki görseller değerlendirildiğinde jetin sınır bölgelerinin belirgin bir şekilde tespit edildiği görülmektedir. Farklı kameralardan elde edilen görüntüler değerlendirildiğinde akışın daha dar kesitinden alınan görüntüde yoğunluk farklarının daha belirgin şekilde görülebildiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni merkez alandaki yoğunluk farkı bulunan bölgelerin yüzeylerinin kameraya paralel olarak

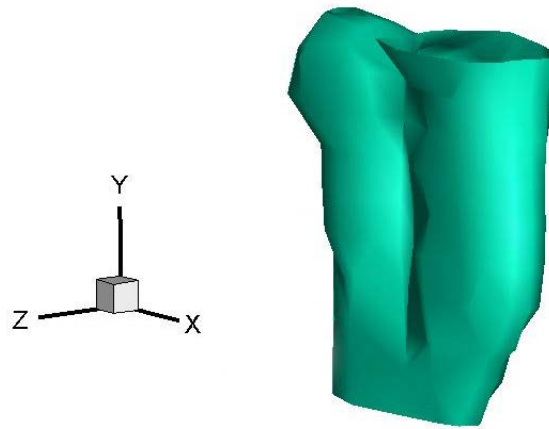
konumlanmasdır. Dolayısıyla bu bölgelerden gelen ışınlar daha az kırılarak ya da hiç kırılmadan kameraya ulaşmaktadır.

Yoğunluk farkı yöntemlerinin hiçbiri doğrudan nicel veri vermemektedir [3]. Bu açıdan yaklaşıldığında, doğrulama için görüntü üzerinden jetin açılma açısı ve çıkış ölçüleri alınmıştır. Daha sonra aynı jet PGHÖ ile incelenmiş ve bu ölçüler üzerinden kıyaslama yapılmıştır.

Ayrıca, üç kameradan elde edilen arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı verileri Tecplot programı ortamında kalibrasyon verisine göre yerleştirilmiş ve interpolasyon ile hacimsel veriye dönüştürülmüştür. Elde edilen hacimsel veri Şekil 6'da gösterilmiştir.



**Şekil 5.** a) 1 numaralı kameradan elde edilen arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı deney sonucu  
b) 2 numaralı kameradan elde edilen arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı deney sonucu  
c) 3 numaralı kameradan elde edilen arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı deney sonucu



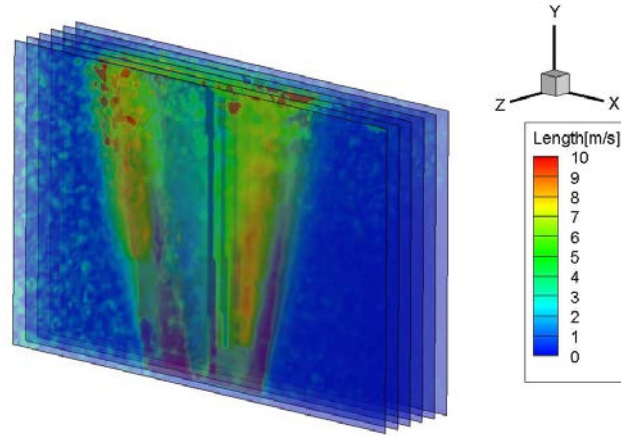
**Şekil 6.** Üç boyutlu arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı sonucu



### 3.1 PGHÖ ile Doğrulama Çalışması

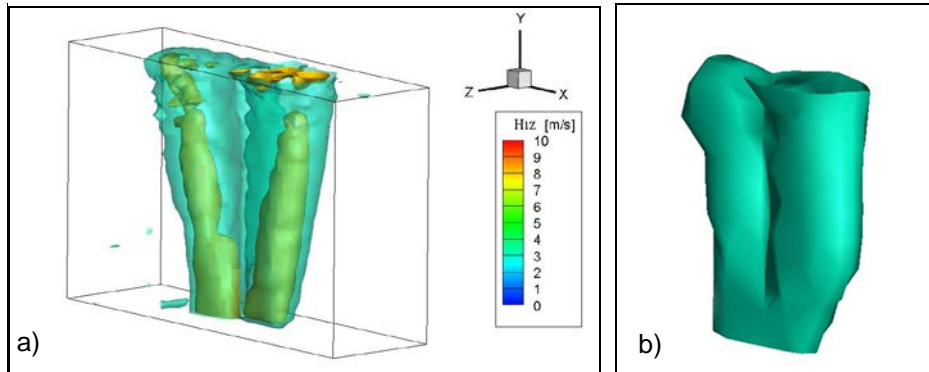
Temel olarak PGHÖ'nün avantajı, aynı anda tüm akış kesitinin incelenebilmesidir. Bu mevcut avantajın daha iyi değerlendirilebilmesi için, "Hacimsel üç boyutlu ortalama hız vektörlerinin" oluşturulması konusunda mevcut çalışma ekibi tarafından daha önceki çalışmalarda bir yöntem geliştirilmiştir [7].

"Hacimsel üç boyutlu ortalama hız dağılımının" elde edilebilmesi için sistemin belirli aralıklar ile incelenmesi gerekmektedir. Cihazın, bu aralıklarda sağlıklı olarak ötelenebilmesi için cihaz bir traverse sistemine yerleştirilmiştir. Kameralardan biri cihazın oluşturduğu akışı karşıdan diğeri ise açılı olarak görececek şekilde konumlandırılmıştır. Lazer ise kameraların ihtiyacı olduğu aydınlatmayı sağlayacak şekilde jet akışını karşıdan görececek şekilde yerleştirilmiştir. İncelenmek istenen Sıcak jet akış 12 düzlemle taranmıştır. İncelenen her düzlemde iki kamera ile 200'er görüntü çifti alınmıştır. Elde edilen bu görüntü çiftlerinin işlenmesi ile ortalama düzlemsel üç bileşenli hız dağılım haritaları oluşturulmuştur. Şekil 7'de oluşturulan ortalama düzlemsel üç bileşenli hız dağılım haritalarından 6'sı sunulmuştur.



Şekil 7. Sıcak jet akış üzerinden alınan düzlemsel PGHÖ görüntüleri

Daha sonra 12 düzlemde alınan ortalama düzlemsel üç bileşenli hız dağılımı sonuçlarının interpolasyonu ile hacimsel üç boyutlu hız dağılımına dönüştürülmüştür. Akış yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için elde edilen sonuç eş hız yüzeyleri olarak Şekil 8'de verilmiştir. Sunulan eş hız yüzeylerinin dış tarafındaki 5 m/s, jet çekirdeğini temsil eden iç taraftaki ise 7 m/s'yi göstermektedir.



Şekil 8. Sıcak jet akışının,

- PGHÖ yöntemi ile elde edilen üç bileşenli hacimsel ortalama akış yapısı eş hız yüzeyleri (5-7 m/s)
- Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı yöntemiyle elde edilen hacimsel akış yapısı

Şekil 8 değerlendirildiğinde incelenen jet akışın çekirdeğinin ağızdan itibaren ikiye ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu akış ayrılması “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” sonuçlarında da benzer şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 8). Ancak yeni geliştirilen yöntemin başarısının nicel olarak değerlendirilebilmesi için PGHÖ verisinden, jetin açılma açısı ve çıkış ölçüleri elde edilmiştir. Bu ölçüler Tablo 1’de arka plan konumlandırılmış yoğunluk farkı yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

**Tablo 1.** PGHÖ ile elde edilen hacimsel üç bileşenli ortalama hız dağılımı sonuçları ve “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” sonuçlarının karşılaştırılması

Değerlendirme Parametresi	PGHÖ	Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı	Fark
y=30 mm jetin x uzunluğu	160.63 mm	159.41 mm	1.22 mm
y=30 mm jetin z uzunluğu	39.55 mm	40.42 mm	0.87 mm
Jetin X-Y düzlemindeki açılma açısı	34.10 °	33.30 °	0.80 °
Jetin Z-Y düzlemindeki açılma açısı	10.9 °	11.7 °	0.80 °

#### 4. DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışmanın sonucunda, bir sıcak jet üzerinden “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi ile elde edilen akış alanının, PGHÖ yöntemi ile elde edilen akış alanıyla örtüştüğü görülmektedir (Şekil 8).

PGHÖ yöntemiyle elde edilen hacimsel üç bileşenli ortalama hız dağılımı sonuçları, “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” sonuçları ile Tablo 1’de karşılaştırılmıştır. Jetin çıkış ağzından 30 mm ilerisinde alınan ölçümlerde PGHÖ ile “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemleri arasında x ekseninde 1.22 mm (%0.76 hata oranı), z ekseninde ise 0.87 mm (% 2.2 hata oranı) fark gözlemlenmiştir. Bu anlamda sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu ve geliştirilen “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yönteminin doğrulandığı söylenebilir. Böylelikle bir jet akışının hacimsel yapısı “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi ile elde edilmiştir (Şekil 6).

Her ne kadar mevcut çalışmada PGHÖ yöntemi, “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemini doğrulamak için kullanılsa da iki yöntemin birbirlerini destekleyen ek özelliklerinin olduğu unutulmamalıdır. PGHÖ yöntemi bir akış görüntüleme yöntemi olmakla beraber aynı zamanda bir hız ölçümü yöntemidir. Yöntemin uygulanmasıyla incelenen tüm akış alanının hız vektörü haritası ve buna bağlı diğer akış özellikleri (çalkantılılık (vorticity), türbülans kinetik enerji... vb. ) elde edilebilir. Öte yandan daha önce belirtildiği gibi “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi ise nicel veri üretmemektedir. Ancak bu yöntem sıcak ve soğuk akışların karıştığı durumlarda PGHÖ’nün ayırtıramayacağı akışların birbirinden ayrıştırılması için kullanılabilir.

Çalışmanın önemli noktalarından biri de geliştirilen “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” deneysel yönteminin son kullanıcı ürünü kameralarla başarılı olmuş olmasıdır. Kullanılan bu kameraların fiyatları akış görüntüleme amaçlı üretilen kameralarla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Geliştirilen yöntemde kullanılması önerilen kameraların maliyeti, mevcut çalışmayı doğrulamak için kullanılan PGHÖ yöntemindeki kameralar ile karşılaştırıldığında (çalışmanın gerçekleştirildiği tarih itibarıyla) 26 kat daha ucuzdur.

Ayrıca, “Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı” yöntemi tek başına olarak da doğal taşınım akışlarının ve yoğunluk farkı içeren diğer akışların incelenmesinde kullanılabilir. Ayrıca ekonomik bir yöntem olarak sunulabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Venkatakrisnan, L., Meier, G. E. A., “Density Measurements Using the Background Oriented Schlieren Technique,” Experiments in Fluids, 37(2), 237–247, 2004.
- [2] Meier, G.E.A., “Hintergrund Schlierenmeßverfahren Deutsche Patentanmeldung” DE 199 42 856, 1999.
- [3] Richard, H., Raffel, M., Rein, M., Kompenhans, J. and Meier, G. E. A., “Demonstration of the Applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) Method” Proc.10th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2000.
- [4] Dalziel, S. B., Hughes, G. O., Sutherland, B. R., “Whole-field Density Measurements by “Synthetic Schlieren.” Experiments in Fluids, 28(4), 322–335, 2000.
- [5] Özer, Ö., Kumlutaş, D., “ Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı (Schlieren) Yöntemi ile Doğal Taşınım Akışlarının İncelenmesi”, 2. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi, İkses-14, Bildiriler kitabı sayfa 574-581.
- [6] Nicolas, F., Todoroff, V., Plyer, A., Le Besnerais, G., Donjat, D., Micheli, F., Le Sant, Y., “A Direct Approach for Instantaneous 3D Density Field Reconstruction from Background Oriented Schlieren (BOS) Measurements”, Experiments in Fluids, 57(1), 1–21, 2016.
- [7] Karadeniz, Z. H., Kumlutaş, D., & Özer, Ö., “Experimental Visualization of The Flow Characteristics of The Outflow of a Split Air Conditioner Indoor Unit by Meshed İnfrared Thermography and Stereo Particle Image Velocimetry. Experimental Thermal and Fluid Science”, 44, 334–344, 2013.

## ÖZGEÇMİŞ

### Özgün ÖZER

1984 İzmir doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 2008 yılında, Anadolu Üniversitesi Fotoğrafçılık ve Kameramanlık Bölümünü 2011 yılında, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Enerji Yüksek Lisans programını 2011 yılında ve Anadolu Üniversitesi Felsefe Bölümünü 2015 yılında tamamlamıştır. Şu anda Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Enerji Doktora programına devam etmektedir. Ayrıca İzmir Fotoğrafçılar Odasında 2005 yılından beri gönüllü uzman fotoğraf eğitmeni olarak çalışmaktadır. 2016'dan itibaren İzmir Fotoğrafçılar Odası Eğitim Müdürlüğü görevini sürdürmektedir.

### Dilek KUMLUTAŞ

İzmir doğumludur. 1990 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı Üniversite'nin Enerji Anabilim dalında 1994 yılında Yüksek Lisans, 1999 yılında Doktora Eğitimini tamamlamıştır. 1990-1999 yılları arasında Araştırma Görevlisi, 1999-2007 yılları arasında Yardımcı Doçent, 2007-2013 yılları arasında Doçent olarak görev yapmıştır. 2013 yılından beri Makina Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak çalışmakta ve 2016 yılından itibaren de Enerji Anabilim Dalı Başkanlığı görevini yürütmektedir.

### Utku Alp YÜCEKAYA

1991'de Sivas'ta doğmuştur. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Yüksek Lisans Programı'nda yüksek lisans öğrencisidir.