

Dizel İçten Yanmalı Motorlarda Silindir İçindeki Hava Hareketlerinin İncelenmesi ve Ölçüm Metodlarının Karşılaştırılması

Burak Yelken^{*1}, İsmail Hakkı Savcı², Zafer Dülger³

ÖZ

Dizel motorlarda yanma odası içerisindeki yakıt ve hava karışımı tam olarak homojen değildir. Bu karışımın silindir içinde hareketinin davranış özelliklerini çözebilmek için çeşitli modellemeler yapılmış olsa da henüz fiziksel olarak motor içi akış karakteristiği tam olarak anlaşılammıştır. Silindir içindeki hava hareketlerinin özellikle motor yanma performansı ve emisyon gibi parametrelere etkisi vardır. Motorun hava emişi sırasında, silindir içerisindeki hava, girdap ve takla olmak üzere iki farklı hareket yapabilmektedir. Bu çalışmada özellikle girdap hareketi üzerinde durulacaktır. Girdap hareketinin detaylı olarak anlaşılması için son yıllarda gelişen lazer ve kamera teknolojileri kullanılması gerekmektedir. Bu sayesinde girdap hareketinden kaynaklı akış karakteristliklerini detaylı olarak incelemek mümkün olabilecektir.

Bu çalışma kapsamında, çalışmaya özgü olarak, 9l silindir hacmine sahip bir dizel motorun hava emiş portunu temsil eden, hızlı prototipleme yöntemi kullanılarak bir prototip parça üretilmiştir. 9l silindir hacmine sahip motorun hava emiş kanalını temsil eden bu parça üzerinde balpeteği tork yöntemi kullanılarak ve supap verdiğimiz 1mm'lik artan mesafeler ile taranarak girdap katsayıları ölçülmüştür. Gerçekleştirilen belirsizlik analizi ile yapılan testin hata mertebesi belirlenmiştir.

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGHÖ) tekniği ile aynı parça üzerinde girdap ölçümü 2 boyutlu (2d/2c) ve 3 boyutlu (2d/3c) olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. PGHÖ tekniği için de belirsizlik analizi yapılarak hata mertebesi belirlenmiştir. Yöntemler arasında bir karşılaştırma yapılmış ve dizel motor girdap oranı ölçümünde kullanılacak metodların değerlendirilmesi yapılmıştır. Böylece girdap oranına göre kullanılacak metod seçimlerini sağlayacak bir metodoloji üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Girdap hareketi, 2D PGHÖ, stereo PGHÖ, belirsizlik analizi

Investigation of Air Movement in Cylinder in Diesel Internal Combustion Engines and Comparison of Measurement Methods

ABSTRACT

Fuel and air mixture in the combustion chamber is not the homogeneous distribution. Although various models have been developed to understand the characterization of the mixture movement inside the cylinder, it is not well understood. Air movements in the cylinder have a great effect on engine combustion performance and engine emissions. During the suction of the engine, the air can discharge with different movements through to the cylinder as swirl and tumble. In this study, swirl performance is investigated with laser and camera technologies.

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 18 .10.2020

Kabul/Accepted : 22.12.2020

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
yelkenburak@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-6902-8528

² Dr., Ford Otosan Arge Merkezi, İstanbul, isavci@ford.com.tr, ORCID: 0000-0002-7923-6061

³ Prof.Dr., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
ayberk@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5043-788X



Within the scope of this work, a prototype part that represents the air intake port of a 9l diesel engine was manufactured with additive manufacturing method. Swirl coefficients were measured using the honeycomb torque method. The error level of the test was determined by the uncertainty analysis. Swirl measurement was performed with the particle imaging velocimetry (PIV) technique in two dimensions and three dimensions. The degree of error was determined by performing uncertainty analysis for the PIV technique as well. A comparison between the methods and evaluation of suitability was completed.

Keywords: Swirl, 2D PIV, Stereo PIV, Uncertainty analyze

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Fuel and air mixture in the combustion chamber does not have the homogeneous distribution. Air movements in the cylinder have a great effect on engine combustion performance and engine emissions. Although various tests have been developed to understand the characterization of the mixture movement inside the cylinder, it is not well understood. During the suction of the engine, the air can discharge with different movements through to the cylinder as swirl and tumble. In this study, swirl performance is investigated with laser and camera technologies.

Researchers developed different swirl measurement methods such as hot-wire anemometry, laser doppler, and particle imaging velocimeter. (PIV). In this study, PIV technique was examined and used in experimental studies. The study focus on the effect of the two-dimensional and three-dimensional PIV measurements for the port development application. For this purpose, a prototype part which simulating a 9l diesel engine air intake duct was manufactured by using rapid prototype manufacturing method for specific use. As reference baseline measurement; the swirl ratio was determined by performing honeycomb torque port measurements on the rapid prototype part. 2-dimensional and 3-dimensional particle imaging velocimeter (PIV) measurements were performed on the same prototype part, and swirl ratios and swirl characteristics were examined comparatively. The uncertainty analysis of the obtained results was made and the accuracy of the measurements were examined for both honeycomb and PIV measurements..

2. Materials and Methods

A prototype part which represents the air intake port of a 9l diesel engine was manufactured with rapid prototype manufacturing method. It was ensured that the prototype part was geometrically identical to the 9l engine air intake port, and the required valve movement capability was added.. Since both honeycomb torque measurement and particle imaging velocity measurements will be performed on the prototype part, the connection surfaces are designed and manufactured to be suitable for both test devices.

In this study, swirl ratio honeycomb measurement results at steady state flow conditions used as baseline reference measurements. Steady state swirl ratio measurement with honey comb is the state of art method. The working principle of honeycomb swirl anemometer is basically the measurement of the torque value from the honeycomb which mounted in the cylinder at the test bench. The tangential component of the air flow creates momentum on the honeycomb geometry in the test bench. The force on the honeycomb is measured with a torque meter. By using this angular momentum value, swirl ratio is calculated by using swirl ratio equation. This measurement is repeating for each valve lift starting from 1mm up to maximum valve lift values.

Particle Imaging Velocimeter (PIV) is one of the techniques used to measure the swirl ratio of the diesel engine in the cylinder. In particle imaging velocity measurement, a laser pulse device is used to create a plane to observe with laser beam. Single, two or more than two high speed cameras are used with PIV method. Depending on the number of the high speed cameras in the test setup, it is called as 2D PIV or 2d/2c PIV if only single camera is used. If two high speed cameras are used, it is called Stereo PIV or 2d/3c PIV. In this case, two cameras are using with different observation angles.

The error levels of the measurements were determined by uncertainty analysis. Kline and McClintock uncertainty analysis method used for honeycomb torque swirl measurement uncertainty. The PIV



technique is a swirl rate measurement technique currently under development. Measurements may include uncertainties caused by the angles of the cameras, reflections of the laser light and errors in the images. The degree of error was determined by performing Davis uncertainty module for PIV techniques.

3. Swirl Ratio and Particle Image Velocitometry measurement results

In order to determine the swirl ratio of the prototype part, constant flow bench honeycomb torque method was used. Swirl ratio measurements on the prototype part were carried out for each valve openings starting from 1 mm under constant flow conditions. This measurement results used as reference baseline measurement. PIV measurement was performed to understand the velocity magnitude, velocity index, and vortex characterization. Planar (2d/2c) and stereo (2d/3c) particle imaging velocity measurements performed on the prototype part as well. Both honeycomb torque swirl ratios, planar (2d/2c) and stereo (2d/3c) PIV test results compared.

Uncertainty analysis calculations by using Kline and McClintock has been done for honeycomb torque measurement. The uncertainty level of the results are acceptable. Also, by using Davis uncertainty module, uncertainty analysis completed for PIV measurements as well. It is observed that PIV measurements uncertainty is also at acceptable level.

4. Results

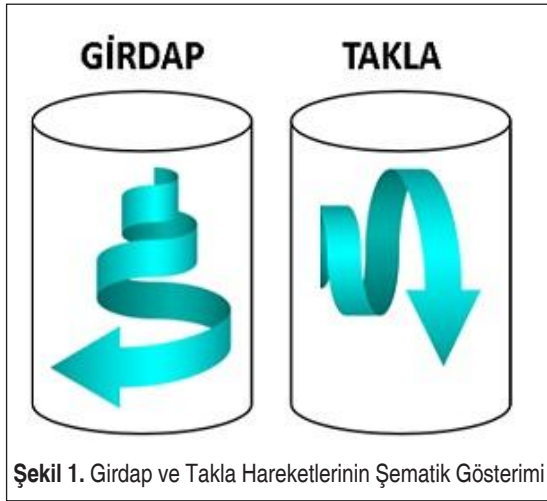
This study aims to reveal the differences between PIV measurement types and to reveal the suitability of this technique for engine port swirl measurements. The advantages of velocity measurement with 2-dimensional (2d/2c) PIV are easy setup, calibration and measurement. According to the measurements on the rapid prototype part, it was seen that the 2d / 2c PIV results could not accurately measure the velocity distribution and velocity index. However the swirl ratio measurements with 2d/3c PIV gave a comparable and more accurate result with the baseline reference honeycomb measurements. As a result, it can be stated that the 2d/2c PIV technique cannot provide sufficient and accurate data to the researchers in engine port swirl ratio measurements and studies in the automotive industry.

1. GİRİŞ

Hava/hava giriş kalitesi, enjeksiyon/yakıt parametreleri ve yakıt-hava karışımı motor performansını etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, motordan elde edilen güç, NOx/kurum emisyonları gibi emisyon parametreleri de temel anlamda bu üç parametreye bağlıdır.

Silindir içine püskürtülen yakıtın homojen olarak yanması motor veriminin yükselmesini sağlamak ve emisyonları düşürmektedir. Ancak yakıtın yanma parametrenin sayısının fazla olması ve fiziğinin karmaşıklığından dolayı silindir içindeki yanma olayını optimize etmek oldukça zordur [1]. Yanmanın bağlı olduğu parametreler arasında yakıt damlacık boyutu ve yakıt enjeksiyon basıncı gibi parametreler önemli yer tutmaktadır. Yanmanın performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri de sıkıştırma işlemi sonundaki silindir içindeki akışın yapısıdır. Akış yapısı havanın girişi esnasında başlar ve sıkıştırma işlemi sırasında gelişmektedir [2].

Silindir içine alınmakta olan havanın 2 farklı akış yapısında olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi girdap (swirl), ve diğeri takla (tumble). Şekil 1’de girdap ve takla hareketi şematik olarak gösterilmektedir.



Silindir içindeki girdap hareketinin sebepleri, karakteristiği ve yanma performansına olan etkileri üzerine çalışmalar ve yayınlar devam etmektedir. Silindirde istenen girdap modelini elde etmek amacıyla, tasarım optimizasyonu için test düzenekleri kullanılmaktadır. Bu sayede giriş stroku, sabit bir supap kaldırma ile baştan sona akış kurulumuna kıyasla çok daha gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmektedir [3]. Girdap hareketini etkileyen önemli parametrelerden biri motordaki hava emiş kanalının tasarımıdır. Hava emiş kanalının açılmal pozisyonunu parçacık görüntülemeli hız ölçü-



mü metodu ile inceleyen çalışmalarda farklı açısız pozisyonlardaki çeşitli hava emiş geometrilerinin motor performansına olan etkileri bir test motoru üzerinde testlerle incelenmiş ve girdap ve takla karakteristiklerinin farklı portlar arasında benzer olduğu, bununla birlikte açısız pozisyonlara göre farklılık gösterdiği ortaya koyulmuştur [4]. Bununla birlikte silindir kafasındaki supapların açıklıkları açısından, tamamen açık supabın, en güçlü büyük ölçekli yapıları verirken, daha küçük açıklıklar ile daha büyük miktarda kinetik enerji, küçük ölçekli türbülansa dönüştürüldüğü gözlemlenmiştir [5].

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniğinin en büyük zorluklarından birisi, girdap hareketinin silindir içinde oluşması ve silindir içindeki hacmin görüntülenmesi gerektiridir. Bu zorluğu aşabilmek için saydam bir dizel motor üzerinde parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve gruplandırılarak motorun çevrimleri arasındaki hareketler belirlenmiştir. Özellikle çevrimler arasında akışın girdap hareketinin vortex tipten dairesel tipe geçiş yaptığı belirlenmiştir [6]. Parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu kullanılırken ölçüm alınan yüzeyin seçimi önemlidir. Farklı yüzeylerden ölçümler alınarak ve kararlı akış rejiminde 2 boyutlu ve 3 boyutlu ölçümler gerçekleştirilerek girdap mekanizmasının zamana karşı olan davranışı irdelenmiştir. [7]. Benzer inceleme ve test çalışmaları ağır dizel motor gibi farklı motorlar üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Motor üzerinde gerçekleştirilen testlerde, girdap hareketi, hem torkmetre, hemde parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodları ile ölçümler alınarak incelenmiştir. Bu ölçümler ile birlikte teğetsel hız profili belirlenmiş, teorik hesaplamalar ile elde edilen girdap sayısı ile yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve akışın türbülans karakteristiğini belirlenmiştir [8]. Son dönemde yapılan parçacık görüntülemeli hız ölçümü çalışmalarında parçacık konumlarını başarılı bir şekilde yeniden yapılandırmak için hesaplama süresini yüksek bir doğrulukla önemli ölçüde azaltmak amacıyla sinir ağı modeli de kullanılmaktadır [9].

Tüm bu çalışmaların yapılması ile birlikte parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği her ölçümde olduğu gibi hata ve belirsizlik içermektedir. Yapılan bazı çalışmalarda parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata kaynakları üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle partikül yoğunluğu, partikül çapı, hız gradyanı ve partikül yer değiştirmesi parametreleri üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Dört boyutlu bir belirsizlik yüzeyi oluşturulmuş, parçacık görüntülemeli ölçüm metodu algoritması oluşturularak bir metodoloji geliştirilmiştir [10]. Veri toplama sisteminin zamanlaması ve senkronizasyonu, aydınlatma, parçacıkların mekanik özellikleri, bunların görüntülenmesi, parçacık hareketinin analizi, veri doğrulama ve tüm ölçüm zinciri parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodunun hata kaynaklarına örnek olarak verilmektedir. Parçacık görüntülemeli hız ölçümlerinin belirsizliği, genel bir rakam sağlayan öncül yaklaşımlarına ve veriye dayalı olan ve belirli veri setlerinin belirsizliğini ölçmeyi amaçlayan soncul yaklaşımlarından oluşmaktadır [11]. Aynı zamanda ölçümdeki belirsizliklerin mini-



mize edilmesi ve hata oranının azaltılmasını amaçlamak için parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu ölçümler gerçekleştirilmiş ve hata oranı üzerine yoğunlaşmıştır. Kalibrasyon değişiklikleri yapılarak ve transformasyon üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir [12]. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodlarında çalışılan pratik konulardan biri de, hızlı kamera sayısının artırılması ile yüksek bir doğruluk sağlamak için hesaplama süresini optimize etmektir [13]. PGHÖ metodu, araştırmacılar tarafından kullanılması ile birlikte hala hazırda geliştirilmekte olan bir tekniktir. Yapılan bir çalışmada parçacık görüntülemeli hız ölçümü için parçacık görüntü yoğunluğu, parçacık özellikleri ile sistemdeki tepe büyüklüklerinin nasıl değiştiğine dair bir korelasyon elde edilmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak sorgulama bölgesi büyüklüğü, aydınlatma yoğunluğu, görüntü büyüklüğü parametreleri ve etkileri incelenmiştir [14].

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodunun belirsizlik analizi de çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Deneysel olarak yapılan parçacık görüntülemeli hız ölçümü ile birlikte belirsizlik analizi de gerçekleştirilmektedir. Birbirinden farklı belirsizlik analizi metodları karşılaştırılmakta, karşılıklı olarak güçlü ve gelişime açık yönleri araştırılmaktadır. Ölçüm hataları için görüntü eşleştirme ve korelasyon istatistikleri yaklaşımlarının hassasiyet oluşturdukları gözlemlenmiştir ve özellikle parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu için lazer ışığının yansıma sorunu ele alınmıştır [15]. Hata kaynaklarının araştırılması için kullanılan önemli bir araçta hesaplamalı akışkanlar metodudur. Hesaplamalı akışkanlar alanının temel özellikleri kullanılarak, hata kaynakları araştırılmış, bir belirsizlik niceleme yöntemi önerilmiş ve diğer belirsizlik yöntemleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır [16].

Literatürdeki inceleme çalışmalarında parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodunun halen geliştirilmekte olduğu, farklı belirsizlik hesaplama yaklaşımlarının olduğu, çeşitli araştırmacılar tarafından farklı uygulama ve çalışmalarda kullanılmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca literatürdeki çalışmalar basit test düzenekleri ile yapılmaktadır. [6] [7] [8] [17] Tamamlanan çalışmada ise motor silindir içi akış gibi karmaşık uygulamalarda farklı PGHÖ ölçüm metodolojisinin sonuçları tartışılmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında, çalışmaya özgü kullanılmak üzere, 9l silindir hacmine sahip bir dizel motorun hava emiş kanalını simüle eden prototip parça, hızlı prototipleme yöntemi ile imal edilmiştir. Prototip parça üzerinde balpeteği tork port ölçümleri, her 1 mm supap açıklığı için gerçekleştirilerek referans girdap oranı ölçümü elde edilmiştir. Aynı parça üzerinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçümleri (PGHÖ) gerçekleştirilerek testler tamamlanmış ve karşılaştırmalı olarak girdap oranları ile girdap karakteristikleri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçların belirsizlik analizleri yapılarak ölçümlerin doğruluğu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın literatüre olan katkısı port gibi karmaşık akış uygulamalarında 2 boyutlu ve 3 boyutlu parçacık görüntülemeli ölçüm metodlarının farklılıklarının ortaya



konması ve otomotiv sektöründe bir dizel motorun girdap katsayısı belirleme çalışmasında, incelenen ölçüm metodlarından test edilecek olan motorlara uygun olanını ortaya çıkartmaktadır.

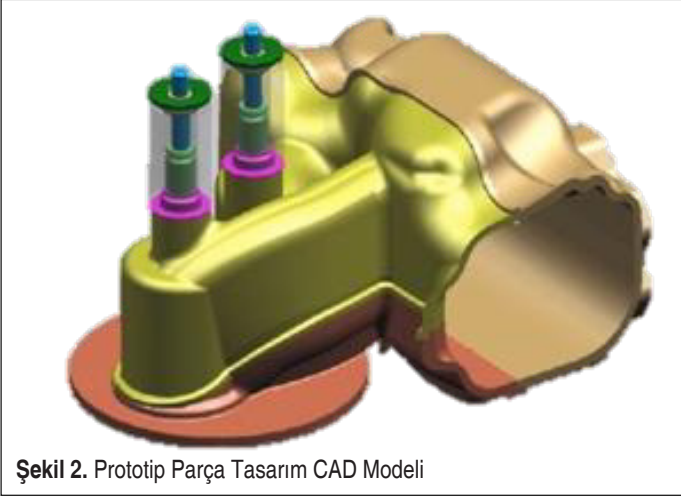
2. MALZEME VE YÖNTEM

Silindir içindeki hava hareketlerini incelemek için zaman içinde geliştirilmiş ve uygulanmakta olan birden fazla test yöntemi mevcuttur. Özellikle girdap hava hareketini ölçmek amacıyla kullanılan bu yöntemler için test cihazının kalibrasyonundan ve test yönteminin tekrarlanabilir olduğundan emin olunmalıdır [6] [18].

Yukarıda bahsedilen ve bir dizel motorun silindir içindeki girdap hareketini ölçmek için kullanılan teknikler arasında Sıcak Telli Anemometre (STA), Lazer Doppler Hız Ölçeri (LDHÖ), Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçeri (PGHÖ) sayılabilir. Lazer doppler hız ölçeri ve parçacık görüntülemeli hız ölçeri test metodları göreceli olarak diğer yöntemlerden daha pahalıdır [19] [20]. Parçacık görüntülemeli hız ölçümünde lazer ışını ile gözlem yapmak üzere düzlem oluşturmak için bir lazer atım cihazı ve metoda göre tek, iki veya ikiden fazla yüksek hızlı kameralar kullanılmaktadır [15].

Yapılan bu çalışmada, referans ölçüm olarak 9l silindir hacmine sahip bir dizel motoru temsil eden prototip parçanın testlerini gerçekleştirmek için öncelikle balpeteği tork ölçüm metodu ile girdap oranı ölçülmüştür. Ardından, 2 boyutlu ve 3 boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu ile girdap oranı ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. 9 litre silindir hacmine sahip dizel motor üzerinde testlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların karşılaştırılması olarak planlanmıştır. Çalışmada kullanılması planlanan silindir blokta olabilen imalat kaynaklı hatalar sebebiyle akış karakteri değişebilir [21] [22]. İmalat kaynaklı hatanın oluşmaması için çok hassas olarak bu çalışmaya özel ve özgü olarak 9l silindir hacmine sahip motoru temsil eden, hızlı prototipleme yöntemi ile plastik prototip bir parça imal edilmiştir. Prototip parça üretilirken 9l silindir hacmine sahip motor CAD dosyası kullanılmış ve prototip parçanın ölçüsel, geometrik olarak 9l silindir hacmine sahip motor ile aynı olması sağlanmış, ayrıca testlerde gereken supap hareket kabiliyeti eklenmiştir. Prototip parça üzerinde hem balpeteği tork ölçümü, hemde parçacık görüntülemeli hız ölçümü yapılacağından bağlantı yüzeyleri her iki test cihazına da uygun olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Kullanılan CAD dosyası Şekil 2’de görülmektedir. Hızlı prototipleme yöntemi ile üretilen plastik prototip parça ise Şekil 3’te görülmektedir.

Prototip parça üretimi için PLA malzeme kullanılmıştır. Geometrik olarak hava emiş kanallarını, hava dağıtısının bir parçasını ve hava akış kanalının geometrisini tamamen temsil etmektedir. Ayrıca supap yaylarını, emme supaplarını, supap kaidelerini de içermektedir. Valfler testlerde kontrollü olarak açılmak üzere mekanik olarak kapayıp açılabilir.

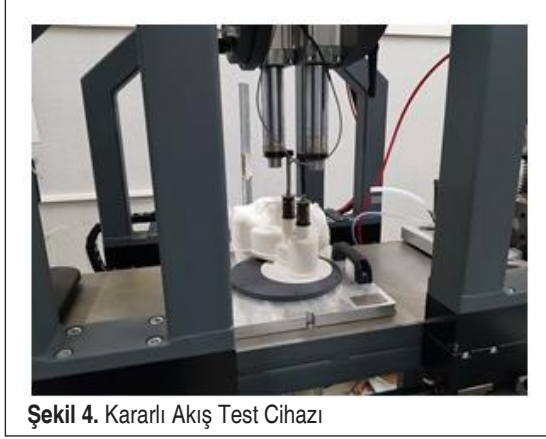


2.1 Girdap Oranı Ölçüm Düzeneği

Sürekli akış düzeneği, motor silindiri içerisinde gerçekleşen hava hareketlerinin sabit akış koşulları altında ölçülebilmesini sağlamaktadır. Bu sayede hava emiş kanalının girdap ve takla hareketi üretebilme performansı ve bu hareketlerin şiddet seviyeleri ölçülebilmektedir.

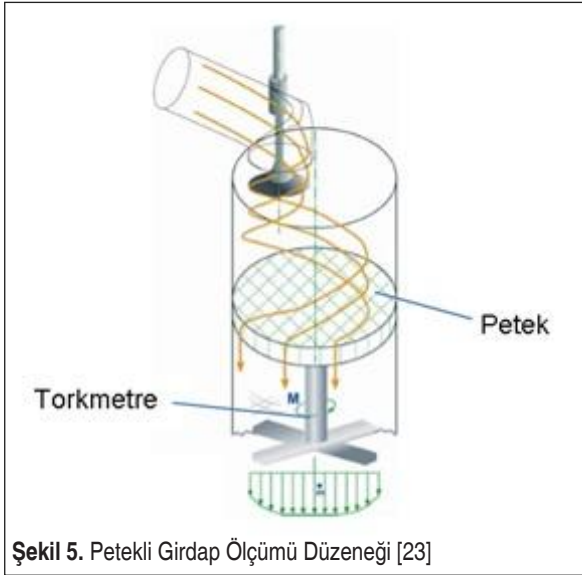


Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testler sırasında kullanan sürekli akış test düzeneği Şekil 4’te gösterilmektedir. Bu sistem dizel motorlar için girdap oranının belirlenmesi için kullanılmakta ve ayrıca parçacık görüntülemeli hız ölçüm düzeneği için de bir modülü bulunmaktadır



Şekil 4. Kararlı Akış Test Cihazı

Girdap oranı ölçüm cihazında, prototip parçanın bağlantısının altında bir petek yapısı mevcuttur. Petek yapısının bağlı olduğu bir torkmetre, havanın açısız momentinin ölçülmesini sağlamaktadır. Balpeteği parçası, ölçüm yapılacak prototip parçaya 120mm mesafede pozisyonlandırılmıştır ve hava akışının aksel olmayan bileşenini sönmölemektedir. Sönümleme, açısız momentum korunum denklemlerine göre balpeteğini

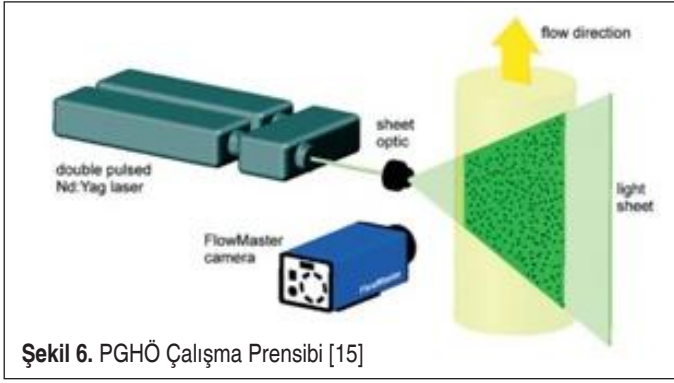


Şekil 5. Petekli Girdap Ölçümü Düzeneği [23]

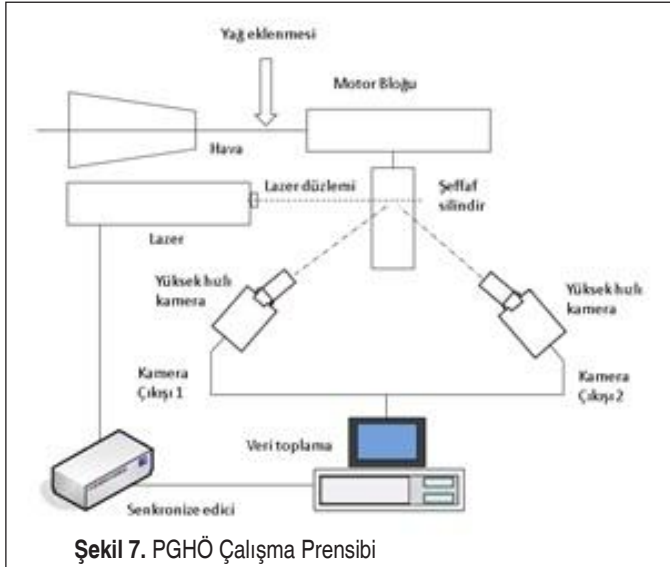
dönmeye zorlayan bir kuvvete neden olmakta ve bu kuvvet torkmetre ile ölçülmektedir. Ölçülen açısal kuvvet değeri girdap oranı denklemlerinde kullanılarak girdap oranı hesabı yapılmaktadır (Şekil 5).

2.2 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGHÖ)

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) sistemi, testler sırasında akış alanına müdahale etmeyen bir metod ile deneysel veri üretebilen bir tekniktir. Akış alanı kameralar ile görüntülenmekte ve hız vektörleri elde edilmektedir. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm sistemi, akış alanının detaylı olarak incelenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile elde edilen sonuçların doğrulanması gibi amaçlar için birçok uygulamada kullanılmaktadır.



Şekil 6. PGHÖ Çalışma Prensibi [15]



Şekil 7. PGHÖ Çalışma Prensibi



PGHÖ sisteminin başlıca elemanları Şekil 6'da görüldüğü gibi çift atımlı bir lazer, yüksek çözünürlüklü hızlı kamera, akış alanının görüntüleme yapılabilecek şekilde parçacıklandırılması amacıyla kullanılan bir parçacık üretim sistemi, veri toplama sistemi ve bilgisayardır [15].

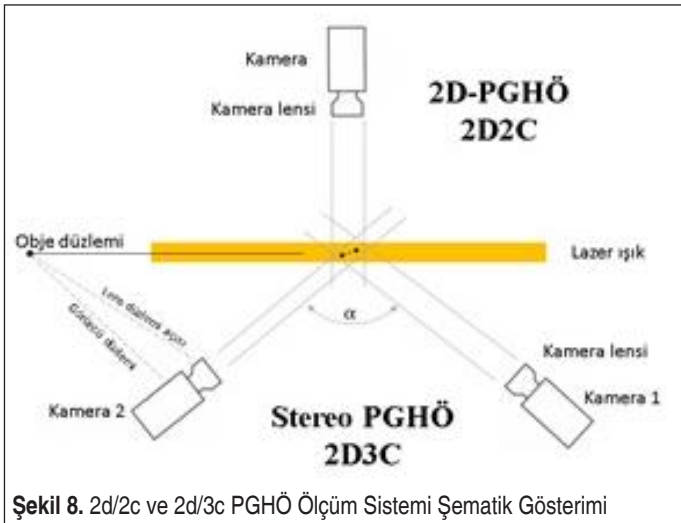
Üzerinde çalışılan akış şartlarına ve akışkan cinsine bağlı olarak boyutu ve yoğunluğu belirlenen parçacıklar kararlı akış şartlarında iken, lazer ışınları yardımıyla bir düzlem üzerinde aydınlatılmakta ve parçacıklardan saçılan ışık hızlı kamera veya kameralar tarafından ardarda kaydedilmektedir. Ardarda kaydedilen iki görüntü incelenmekte ve parçacıkların belirli zaman aralığındaki yer değiştirme değerleri kullanılarak hız vektörleri Şekil 7'deki gibi elde edilmektedir.

PGHÖ tekniğinde tek kamera ile yapılan ölçüm düzlemsel (2d/2c), 2 kamera ile yapılan ölçüm Stereo PGHÖ (2d/3c) olarak adlandırılmaktadır. Her iki tür ölçüm Şekil 8'de şematik gösterimi gösterilmektedir.

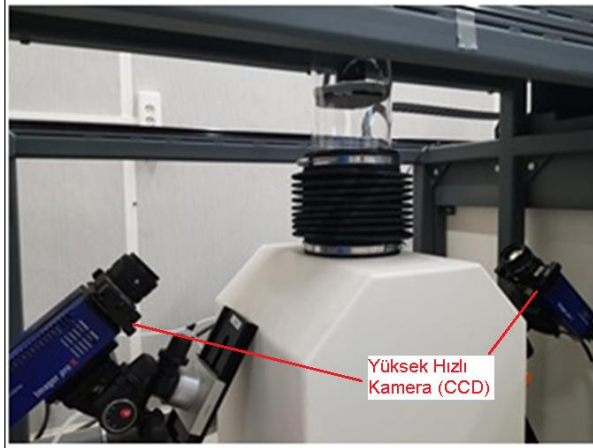
2 adet yüksek hızlı kamera (CCD) ile yapılan Stereo PGHÖ (2d/3c) test kurulumu Şekil 9'da gösterilmektedir.

PGHÖ metodunun akış alanına müdahale etmeyen bir metod olması nedeniyle, ölçümler sırasında Şekil 10'da gösterildiği gibi silindir yüzeyi olarak şeffaf bir malzeme ile üretilen bir parça kullanılmaktadır. Silindir içinden geçen parçacıklar şeffaf silindir duvarı sayesinde PGHÖ sistemindeki yüksek hızlı kameralar tarafından görüntülenmektedir. Şeffaf silindir alttan bir piston yardımıyla silindir kafasına sabitlenmekte ve sızdırmazlık sağlanmaktadır.

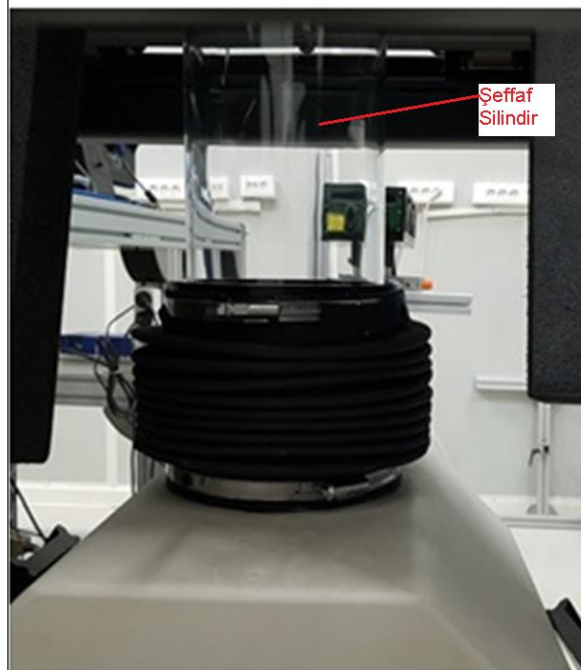
Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodunda, lazer atım cihazı tarafından silindir



Şekil 8. 2d/2c ve 2d/3c PGHÖ Ölçüm Sistemi Şematik Gösterimi

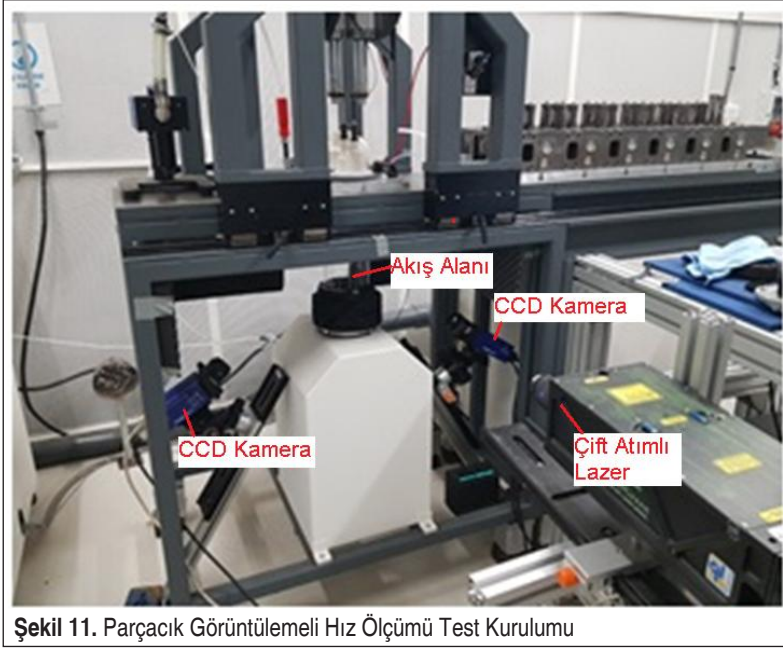


Şekil 9. Stereo PGHÖ (2d/3c) Test Kurulumu



Şekil 10. PGHÖ Ölçüm Sistemi Şeffaf Silindir Duvarı ve Lazer Atım Cihazı

içinden geçen bir lazer düzlemi oluşturulmaktadır. Hava emiş kanalından silindir içine gönderilen parçacıklandırılmış hava akışı Şekil 11’de görüldüğü gibi yüksek hızlı kameralar yardımıyla görüntülenmektedir.



Şekil 11. Paracak Görüntülemeli Hız lm Test Kurulumu

Ölüm alma işlemi yapılmadan önce hızlı kameralar ve lazer düzleminin eşleşmesini sağlamak üzere kalibrasyon işleminin yapılması gereklidir. Bu kalibrasyon işlemi için Şekil 12’de görülen kalibrasyon düzlemi kullanılmaktadır.



Şekil 12. Kalibrasyon Düzlemi



Şekil 13. Kalibrasyon Düzlemi Montajı Şekli

Şeffaf silindir duvarı içine kalibrasyon düzlemi Şekil 13'te gösterildiği üzere yerleştirildikten sonra lazer ışını düzlemi ile kalibrasyon düzlemini eşleştirilerek ve hızlı kamera ile bu noktaların görüldüğü belirlenerek kalibrasyon işlemi tamamlanır. Kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon düzlemi şeffaf silindir içinden çıkartılarak testler gerçekleştirilir.

2.4 Belirsizlik Analizi

Gerçekleştirilen testler ve deneyler sırasında elde edilen ölçüm sonuçları belirsizlik de içermektedir. Belirsizlik ve hata kaynağını belirlemek ve minimize etmek için önemlidir. Testler ve deneyler sırasında elde edilen test sonuçlarındaki hata, temel olarak 2 farklı şekilde oluşabilmektedir. Bunlar ölçüm cihazlarından, ölçüm hassasiyetinden veya testi gerçekleştiren kişiden kaynaklanabilmektedir. Gerekli olan eğitimlerin verilmesi ile test yapan kişiden kaynaklanan hataların giderilmesi mümkündür. Ancak test cihazlarından kaynaklanan hataların belirlenebilmesi her zaman mümkün olmayabilir [24]. Test cihazlarından kaynaklanan hatayı belirleyebilmek için birçok metod geliştirilmiştir. Kline ve McClintock tarafından geliştirilen metod bunlardan biridir [25].

DeneySEL bir çalışmanın sonucunda elde edilen büyüklük "R" olsun. Eğer bu büyüklük v_1, v_2, \dots, v_n ölçüm büyüklüklerine bağlı olarak $R = R(v_1, v_2, \dots, v_n)$ biçimindeki bir fonksiyon ile ifade ediliyorsa ve bu değişkenlerin belirsizlik değerleri w_1, w_2, \dots, w_n ise; R-sonuç fonksiyonunun ölçüm belirsizliği, RSS (root sum square) metodu ile bulunur [24] [18].

Bu durumda v değişkeninin, w belirsizliği;

$$\pm w = k\sqrt{(A_1)^2 + (A_2)^2 + \dots + (B_1)^2 + (B_2)^2 + \dots} \quad (1)$$



ifadesi ile bulunur. Burada rastgele hataları A_1, A_2, \dots ve sistematik hataları B_1, B_2, \dots göstermektedir. Rastgele ve sistematik hatalar aynı güvenilirlik seviyesine dönüştürülür ve vektörel olarak toplanırlar. Buradaki “k” değeri yukarıda tanımlanmış olan “coverage factor” dur. Bu metod, bütün ölçüm değişkenlerine uygulanır ve w_1, w_2, \dots, w_n bulunur.

Kline ve McClintock belirsizlik analizi yönteminde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olan her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ile gösterilir ise Kline ve McClintock belirsizlik analizi denklemi aşağıdaki gibi gösterilmektedir (2), (3);

$$w_R = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

veya

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{w_{x1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{x2}}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{x3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{w_{xn}}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

2.5 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü Belirsizlik Analizi

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGHÖ) düzlemsel veya bir hacimsel bir akış alanı içinde ölçüm yapabilmek için kullanılan metodlardan biridir. PGHÖ metodu aktif olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Bununla birlikte araştırılması ve geliştirilmesi gereken bazı kısıtlamalar içermektedir. Bunlar; aydınlatma ve görüntüleme sistemi için optik cihaz ihtiyacı, ölçüm hacminin veya alanının sınırlı olması, zamana bağlı ölçümlerin doğruluğunun azalması ve belirsizlik içeren ölçümlerdir. PGHÖ metodu temel olarak akış alanı içerisinde yüksek hızlı kameralar aracılığı ile alınan görüntülerin eşleştirilmesi kavramına dayanmaktadır. Kararlı akışın devam ettiği sırada ardarda görüntüler alınır ve bu görüntüler akıştaki hız alanına göre eşleştirilir. Eşleştirilen görüntülerdeki parçacık görüntülerinin konumları arasındaki yer değiştirme daha sonra ölçümdeki belirsizliği elde etmek için hesaplanmaktadır. Ölçüm belirsizliğini belirleyebilmek için kullanılan görüntü eşleştirme yaklaşımı önemli yaklaşımlardan biridir.

Farklı belirsizlik yöntemleri PGHÖ metodundaki belirsizliği belirleyebilmek için kullanılabilir. Düşük zerrecik yoğunluğu ve küçük parçacık görüntülerinin olduğu durumlarda sayısal simülasyonlara dayanan yöntemler daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Görüntülerde oluşan lazer ışığı yansımaları kaldırılmadığında ölçüm sonucunda elde edilen hız alanında boşluklar yani bozuk, hatalı veya eksik veri kümelerine rastlanabilir. Bu boşluklar lazer sisteminden, görüntüleme sisteminden veya oluşan yansıma ve gölgelerden kaynaklanabilir.

Kullanılan akış test cihazı, deney aparatının kurulumu, görüntü kayıt prosesi ve veri



değerlendirme yöntemleri PGHÖ metodundaki hata kaynakları arasında sayılabilir.

Hem iki boyutlu düzlemsel PGHÖ, hemde üç boyutlu stereo PGHÖ birçok ve çeşitli parametrelerin karmaşık bir fonksiyonudur. Buna ek olarak stereo PGHÖ metodu iki boyutlu PGHÖ (2d/2c) ölçümündeki hatalara ilave olarak hız ölçümündeki kayıt hatalarını da içerebilmektedir. Son dönemde ölçüm hatalarını minimize edebilmek ve dolayısıyla ölçüm doğruluğunu sağlayabilmek için optimizasyon çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Üç boyutlu Stereo PGHÖ'nün sahip olduğu belirsizlik, iki boyutlu PGHÖ'nün her kamera için sahip olduğu belirsizliğin ve stereo kalibrasyon prosesinde kaynaklanan belirsizliğin bir karışımıdır. Düzlemsel iki boyutlu PGHÖ belirsizliğini ölçebilmek için farklı metodlar mevcut olmasına rağmen kesin ve tam bir belirsizlik ölçümü mevcut değildir. Benzer şekilde üç boyutlu stereo PGHÖ içinde belirsizlik hesabı için yaklaşımlar mevcuttur. Bununla birlikte hala hazırda bir çerçeve oluşturma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Stereo PGHÖ metodunda 2 kamera kullanılmaktadır ve aynı akış alanına 2 farklı kamera farklı bakış açıları ile bakılmaktadır. Dolayısıyla aynı akış alanının 2 açılı görüntüleri kullanılarak ve birbirleri ile eşleştirilerek düzlem dışı olan hız bileşenini çözmek için kullanılmaktadır. Fiziksel koordinat sistemindeki belirsizlik, haritalama fonksiyon katsayılarındaki belirsizlik, açılardaki belirsizlikler, kamera açıları ile üçgenleştirilmiş z eksenindeki belirsizlik ve çeşitli kamera bozuk ve hatalı görüntüleri stereo PGHÖ prosesi için belirsizlik kaynakları olarak belirtilebilir.

3. GİRDAP ORANI VE PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamındaki gerçekleştirilen testler, 9 litre silindir hacmine sahip motoru temsil eden ve bu çalışmaya özgü olarak üretilen hızlı prototipleme yöntemi ile üretilen prototip parça kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temsil edilen motora ait olan bilgiler ise Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. 9 Litre Motor Karakteristik Bilgileri

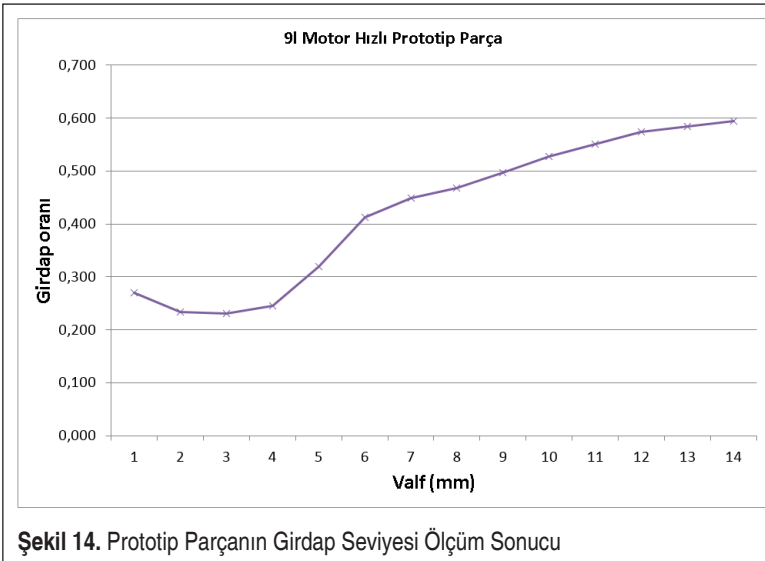
Silindir hacmi	8,974 cc
Silindir çapı	115 mm
Silindir Sayısı	6
Valf Sayısı	4
Güç (1900 dd)	243kW
Tork (1200-1700 dd)	1300 Nm
Yakıt sistemi	Common rail
Sıkıştırma Oranı	17:1



Prototip parçanın girdap oranının belirlenmesi için sabit akış tezgahı balpeteği tork metodu kullanılmıştır. Prototip parça üzerindeki girdap oranı ölçümleri sabit akış koşullarında 1 mm'den başlayarak her bir supap açıklığı için gerçekleştirilmiştir. Supap açıklıkları, test cihazında pozisyon sensörleri tarafından otomatik olarak ayarlanmaktadır. Bu sayede ölçüm durmaksızın veya tekrar manuel kalibrasyon yapma gereği olmadan devam etmekte, böylelikle test güvenilirliği ve tekrar edilebilirliği sağlanmaktadır. Girdap oranı ölçümü sırasında silindir basıncı ve atmosfer basıncı arasındaki fark 500 mmSS (su sütunu) olarak sabitlenmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Prototip parçanın supap açıklığına bağlı girdap oranı grafiği Şekil 14'te gösterilmektedir.

Sabit akış test cihazında girdap oranı ölçülen prototip parça üzerinde, bu çalışmanın önemli bir bölümü olarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçümü testleri de gerçekleştirilmiştir. 2 boyutlu (2d/2c) PGHÖ metodunda ölçüm tek kamera kullanılarak yapılmakta iken 3 boyutlu stereo (2d/3c) PGHÖ tekniğinde ise iki kamera birlikte kullanılmaktadır. Tek kamera kullanılmasından dolayı 2d/2c PGHÖ'nün avantajı test düzeneğinin kurulum kolaylığıdır. Buna karşın 2d/3c PGHÖ tekniğinde ise, birbirleri ile bağlantılı çalışan 2 kamera kullanılmasından dolayı özellikle kurulum ve kalibrasyon prosesi karmaşıktır.

2d/2c PGHÖ kurulumunda lazer ışık düzlemi silindiri negatif z yönünde aydınlatmaktadır ve kullanılan tek kameranın bu düzleme bakış açısı 45 derecedir. Elde edilen görüntüdeki düzlemin sol tarafı, kameranın bakış açısından dolayı çarpık olarak oluşmaktadır. Bu bölgedeki hız bilgisi iyi bir şekilde yakalanamamaktadır. Buna karşın 2d/3c testlerinde ise Şekil 9'da gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Bu kurulumda 2 kamera

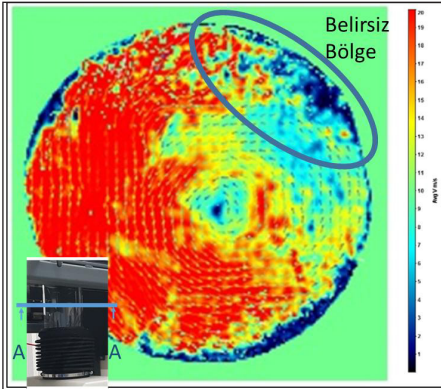


mevcuttur ve ters yönde düzleme 45 derece bakış açısına sahip olacakları şekilde monte edilirler. Ölçüm işlemi öncesi kalibrasyon plakası kullanılarak her iki kameranın görüntüleri üstüste bindirilerek ve eşleştirilerek kalibrasyon işlemi tamamlanır.

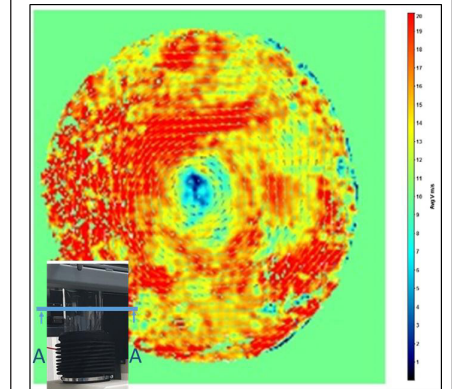
Bu çalışmada prototip parça üzerinde yapılan 2d/2c ve 2d /3c PGHÖ testleri ile her iki farklı kurulumdan kaynaklanan sonuçlar incelenecektir. Ayrıca sonuçlar değerlendirilerek her iki tekniğin emme kanalı geliştirme çalışmalarına uygunlukları üzerine karşılaştırmalı olarak durulacaktır.

Prototip parçanın 11mm valf açıklığı için 2d/2c akış girdap oranı ölçüm sonucu Şekil 15’te gösterilmektedir. Referans ölçüm olan, balpeteği tork ölçümlerinde aynı valf açıklığı için ölçülen değer 0,55 idi. Ancak 2d/2c PGHÖ ölçümü 0,45’dir. Bu nedenle PGHÖ tekniğini geliştirme çalışmalarının devam etmesi gerektiği söylenebilir.

Aynı prototip parça üzerinde yapılan 2d/3c PGHÖ ölçüm sonuçlarında, İki kamera kullanıldığından ölçüm sonucunda akış hızı girdap merkezinin silindirin etrafına daha homojen bir şekilde yayılmış olduğu görülmektedir (Şekil 16). Bu ölçümde belirsiz alan bulunmamaktadır. Bu ölçüm sonucu ise 0,52’dir.



Şekil 15. 2 Boyutlu(2d/2c) PGHÖ Ölçümü



Şekil 16. 3 Boyutlu (2d/3c) PGHÖ Ölçümü

3.1 Girdap Oranı Tork Ölçümü Belirsizlik Analizi

Bir akışın sahip olduğu girdap katsayısı formülü aşağıda belirtilmektedir. Girdap katsayısı, birimsiz bir akış değeridir.

$$D = \frac{M * R_{cyl}}{\rho_{cyl} * V_{cyl}^2} \quad (4)$$

Burada;

D = Girdap Katsayısı



$V_{cyl} =$ Hava akış debisi (m^3/s)

$M =$ Balpeteği üzerindeki Moment (Nm)

$R_{cyl} =$ Silindirik tüp yarıçapı (m)

$\rho_{cyl} =$ Balpeteğinden önceki hava yoğunluğu (kg/m^3) ifade etmektedir.

$$\rho_s = \frac{p_1}{R * T} * \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (5)$$

Eğer 4 nolu denklemde yerine konulursa;

$$D = \frac{M * R_{cyl}}{\frac{P_1}{R * T} * \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{K}} * V_{cyl}^2} \quad (6)$$

Girdap katsayısı belirsizlik denklemi aşağıdaki denklem 7 deki gibi ifade edilir.

$$w_D = \pm \left[\left(\frac{\partial D}{\partial M} w_M \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial T} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial P} w_P \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial V} w_V \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

veya

$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[\left(\frac{w_M}{M} \right)^2 + \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{w_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Benzer şekilde kütleli debi ve akış katsayısı içinde belirsizlik analizi için hesaplanan formüller aşağıda verilmiştir.

Kütleli debi belirsizlik denklemi;

$$\frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \pm \left[\left(\frac{w_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{w_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Akış katsayısı belirsizlik denklemi;

$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[\left(\frac{w_M}{M} \right)^2 + \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{w_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Sabit akış tezgahı balpeteği tork metodu kullanılarak yapılan testlerde ölçülen parametreler; sıcaklık, hava akışı, tork ve basınç değerleridir. İlgili test cihazı üreticisi tarafından bu parametrelerin ölçümleri için verilen sensör hata (ölçüm hassasiyet) oranları aşağıdaki gibidir:



Basınç sensörü hata değeri;	+/- 0.05 %
Sıcaklık sensörü hata değeri;	+/- 0.5 °C
Debimetre hata değeri;	+/- 2 %
Torkmetre sensörü hata değeri;	+/- 0.1%

9l silindir hacmine sahip motor prototip parçası için girdap oranı belirsizlik analizi sayısal hesaplaması yapılırsa;

$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[\left(\frac{0.1}{90.44} \right)^2 + \left(\frac{0.5}{27.92} \right)^2 + \left(\frac{0.0005}{610.39} \right)^2 + \left(\frac{0.02}{396.07} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Belirsizlik değeri 0,018% olarak hesaplanır.

Kütleli debi ve akış katsayısı için belirsizlik analizi için sayısal hesaplaması yapılırsa;

Kütleli debi belirsizlik değeri 0,019% olarak hesaplanır.

Akış katsayısı için belirsizlik değeri 0,019% olarak hesaplanır.

3.2 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü Belirsizlik Analizi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen PGHÖ'lerinin hata oranını belirleyebilmek için belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. PGHÖ belirsizlik analizi için Davis belirsizlik modülü kullanılmıştır. Bu metodoloji teknik özellik açısından özellikle 2d/2c ve 2d/3c PGHÖ için anlık hız vektörleri için bir belirsizlik değeri sağlayabilmektedir. Ayrıca ölçüm sırasında kameralar tarafından kaydedilen görüntülerdeki hata kaynakları detaylı bir şekilde gösterebilmektedir.

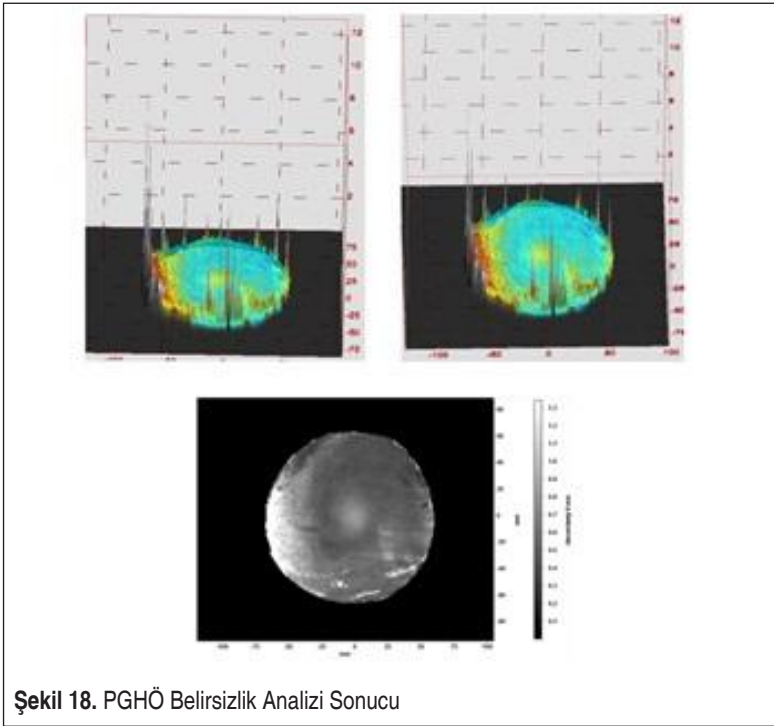
2d/2c ve 2d/3c PGHÖ metodları ile yapılan ölçümlerin sonuçları Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmektedir. Bu sonuçlar gözden geçirildiğinde görülmektedir ki, Şekil 15'te gösterilen 2d/2c PGHÖ ölçüm sonucunda kenar bölgeleri tam olarak yakalanamamıştır. Bu nedenle bu kenar bölgelerindeki girdap hızları tam olarak yakalanamamıştır. Buna karşın iki kamera ile gerçekleştirilen Şekil 16'da gösterilen 2d/3c PGHÖ ölçüm sonucunda kameraların karşılıklı ve geniş açılarından dolayı kenar bölgeler ve dolayısıyla bu bölgelerdeki tüm hızların yakalanabildiği görülmüştür.

Burdan yola çıkarak; 2d/2c PGHÖ sistemindeki ölçüm doğruluğunu ve kalitesini etkileyen konulardan biri, kullanılan tek kameranın kontrol gözlem düzlemine (kalibrasyon düzlemi) olan açısal bakışı, diğerinin ise şeffaf silindirin duvarındaki yansımanın olduğu söylenebilir (Şekil 17). Bu sebeplerden dolayı 2d/2c PGHÖ'de kullanılan tek kamera, silindirin kenar bölgelerini net ve açık şekilde görememektedir. Bu nedenle de tek kamera ile yapılan 2d/2c PGHÖ'nde akış içindeki akışkan parçacıkların hızlarını kameranın net olarak göremediği, kenar bölgelerde tam olarak tespit edememiş olduğu gözlemlenmektedir.

Karşılaştırmalı test sonuçlarının değerlendirilmesi ile elde edilen sonucu doğrulamak



Şekil 17. PGHÖ Ölüm Sistemi Şeffaf Silindir Duvarındaki Yansıma



Şekil 18. PGHÖ Belirsizlik Analizi Sonucu



için PGHÖ belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. DaVis programı ile gerçekleştirilen PGHÖ belirsizlik analizi sonuçlarına göre kameralar ile kaydedilen görüntülerde kenar bölgelerde ve merkezde belirsizlik seviyesinin çok düşük olduğu görülmektedir. Silindir yüzeyine yakın en kenar bölgelerde ise yansımadan dolayı kısıtlı sayıda noktada belirsiz noktaların oluşmuş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 18).

4. SONUÇ

Tamamlanan bu çalışma kapsamında özel olarak 91 silindir hacmine sahip motoru temsil eden hızlı protipleme üretim tekniği ile üretilen plastik malzemeden imalat bakımından hassas ve kontrollü bir prototip parça üretilmiştir. Bu parça üzerinde motor portu performansı bal peteği tork ölçümleri ve 2 boyutlu (2d/2c) ve 3 boyutu (2d/3c) parçacık görüntülemeli hız ölçüm teknikleri kullanılarak testler gerçekleştirilerek girdap performansı irdelenmiş olup hız büyüklüğü, yapısı ve hız indeksi açılarından bilgi edinilmiştir.

Yapılan testlerin doğruluğunu anlamak için döngü akışının testlerdeki belirsizlik analizleri yapılmıştır. Böylece ölçüm sırasında dikkat edilmesi gereken parametreler belirlenmiştir. Basınç, sıcaklık, debi ve tork parametreleri incelenerek sensör kalibrasyonları yapılmıştır. Yapılan kalibrasyonlar ile belirsizlik analizinde 0,018'e kadar inilmiştir. Referans değeri 0,55 olarak ölçülmüştür.

Port tasarım çalışmalarında, döngü değeri ile birlikte silindirin farklı kesitlerinde bulunan hız değerlerinin ölçülmesi ve hız dağılımındaki girdapların azaltılması için PGHÖ çalışmaları da yapılması gerekmektedir. Bu PGHÖ çalışmaları sırasında kullanılacak metodun akış yapısına göre değişiklik göstermesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı akış karakteristiklerinin doğruluğu, yüksek referans değer ile karşılaştırılması sonucunda farklı motorlardaki uygulamalarda kullanılacak yöntem belirlenmektedir. Mesela yüksek dönme akışına sahip uygulamalardan olan mevcut test parçasında 2d/2c metodu ile 0,45 dönme oranı elde edilmektedir. Referans ölçüm ile arasında %18,2 hata olmaktadır. Aynı uygulamada 2d/3c metodu ile 0,52 dönme oranı ölçülmüştür. Bu ölçüm ile referans arasında sadece %5,45 gibi bir hata payı ile elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek dönme oranına sahip motorlarda 2d/3c ile ölçüm yapılması gerekmektedir. Düşük dönme oranına sahip motorlarda ise 2d/2c gibi daha kolay ölçüm yöntemlerinin kullanılması gerektiği görülmüştür. Yapılan çalışma prototip yerine üretilen farklı seri motorlar ile yapılacak ve daha fazla veriler ile karşılaştırılacaktır.

Kısaltmalar

- PGHÖ : Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü
2d/2c : 2 Boyutlu 2 hız bileşenli
2d/3c : 2 boyutlu 3 hız bileşenli



STA : Sıcak Telli Anemometre
LDHÖ : Lazer Doppler Hız Ölçeri

Abbreviations:

PIV : Particle Imaging Velocimetry
2d/2c : 2 Dimensions 2 Components
2d/3c : 2 Dimensions 3 Components
HWA : Hot Wire Anemometer
LDA : Laser Doppler Anemometer

KAYNAKÇA

1. Heywood, J. 1988. Internal combustion engine fundamentals. New York, NY
2. Gül, M. Z., Köten, H., Yılmaz, M., Savcı, İ. H. 2018. “Advanced numerical and experimental studies on CI engine emissions”, Journal of Thermal Engineering, Vol.4, No.4, ss. 2234-2247.
3. Vester, A. K., Nishio, Y., Alfredsson, P. H. 2018. “Unravelling tumble and swirl in a unique water-analogue engine” Journal of Visualization, 21(4):557–568, doi: 10.1007/s12650-018-0485-3
4. Bottom, K. E. 2003. “PIV measurements of in-cylinder flow and correlation with engine performance” Ph.D. thesis, University of Wisconsin – Madison, Wisconsin. <https://search.proquest.com/pqdtglobal/docview/305284162/51E61068881B4A96PQ/1?accountid=16382>
5. Vester, A. K., Nishio, Y., Alfredsson, P. H. 2019. “Investigating swirl and tumble using two prototype inlet port designs by means of multiplanar PIV” International Journal of Heat and Fluid Flow, 75, 61-76, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.11.009
6. Cosadia, I., Bore'e, J., Charnay, G., Dumont, P. 2006. “Cyclic variations of the swirling flow in a diesel transparent engine” Experiments in Fluids, vol.41, pp.115–134. doi: 10.1007/s00348-006-0163-4
7. Rabault, J., Vernet, J., Alfredson, P. 2016. “A study using PIV of the intake flow in a diesel engine cylinder” International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.62, pp.56-67. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.06.020
8. Doosje, E., Bastiaans R. J. M., Baert, R. S. G. 2004. “Application of PIV to characterise the Flow-Phenomena of a Heavy-Duty Cylinder Head on a Stationary Flow-Bench, In Particle Image Velocimetry: Recent Improvements” Springer, pp. 301-313. doi: 10.1007/978-3-642-18795-7_22
9. Gim, Y., Jang, D. K., Sohn, D. K., Kim, H., Ko, H. S. 2020. “Three-dimensional particle tracking velocimetry using shallow neural network for real-time analysis” Experiments in Fluids, 61(2), 1-8, doi: 10.1007/s00348-019-2861-8
10. Timmins, B. H. 2011. “Automatic particle image velocimetry uncertainty quantification” Ms.C. thesis, Utah State University, Utah. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/884/>
11. Sciacchitano, A. 2019. “Uncertainty quantification in particle image velocimetry” Measurement Science and Technology, 30(9), 092001, doi: 10.1088/1361-6501/ab1db8



12. **Abe, M., Longmire, E. K., Hishida, K. and Maeda, M.** 2000. "A Comparison of 2D and 3D PIV Measurements in an Oblique Jet" *Journal of Visualization*, vol.3, No.2, pp.165-173. <https://content.iospress.com/articles/journal-of-visualization/jov3-2-09>
13. **Martins, F.J., Foucaut, J.M., Thomas, L., Azevedo, L.F., Stanislas, M.** 2015. "Volume reconstruction optimization for tomo-PIV algorithms applied to experimental data" *Measurement Science and Technology*, 26(8), 085202, doi: 10.1088/0957-0233/26/8/085202
14. **Warner, Scott O.** 2012. "Autocorrelation-based estimate of particle image density in particle image velocimetry" Ms.C. thesis, Utah State University, Utah. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/1386/>
15. **Sciaccitano, A.** 2014. "Uncertainty quantification in particle image velocimetry and advances in time-resolved image and data analysis" PhD thesis, Delft University of Technology, Delft. doi: 10.4233/uuid:bfe57561-523f-4e7e-8e28-e804a6f1625e
16. **Wieneke, B.** 2017. "PIV Uncertainty Quantification and Beyond" PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft. doi: 10.4233/uuid:4ca8c0b8-0835-47c3-8523-12fc356768f3
17. **Özgün, Ö., Kumlutaş, D., Yücekaya, U. A.** 2017. "Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı (Schlieren) Yöntemi ile Akış Yapılarının İncelenmesi ve Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü ile Doğrulanması" *Mühendis ve Makina*, 58(687), 29-40.
18. **Sadikov, E., Kangı, R., Uğur, S.** 1995. "Ölçüm Belirsizliği" TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Ulusal Metroloji Enstitüsü, UME 95-014 pp.55-61. <https://www.ume.tubitak.gov.tr/sites/images/ume/ume-95-014.pdf>
19. https://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper_techniques/LDA.text.pdf, Son erişim tarihi: 27.12.2020
20. **Dwarshala, S., Vandana, S., & Rambhaji, G.** 2016. "Computation and Validation of In-Cylinder Flow Field, Swirl and Flow Coefficients for a Naturally Aspirated Single Cylinder Diesel Engine" *SAE Technical Paper*, No. 2016-28-0018, doi: 10.4271/2016-28-0018
21. **Demirkesen, C., Çolak, U., Savcı, İ.H., Zeren, H.B.** 2020. "Experimental and Numerical Investigation of Air Flow Motion in Cylinder of Heavy Duty Diesel Engines" *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(2), 537-547, doi: 10.29252/jafm.13.02.30369
22. **Çetin, A., Sayer, S.** 2019. "Emme Manifoldu Üretiminde Gelişen Teknolojik Uygulamalar". *Mühendis ve Makina*, 60(696), 251-261
23. **Funken, B., Doğan, B.** 2014 "Port Flow Test Rig Manual" FEV. https://www.fev.com/fileadmin/user_upload/TEC-INFOS-Flow_Test_Bench-EN-DE.pdf
24. **Onan, C.** 2013. "Boruların dış yüzeyindeki hareketli sıvı filminden olan ısı ve kütle transferinin incelenmesi" Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul. <https://scholar.google.com/scholar?hl=en&q=C.%C2%A0Onan%2C+Heat+and+Mass+Transfer+Analysis+of+the+Falling+Film+Outside+the+Horizontal+Tubes.+Ph.D.+Thesis%2C+Yildiz+Technical+University%2C+Istanbul%2C+Turkey%2C+2013.>
25. **Kline, S.J. ve McClintock, F.A.** 1953. "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments" *Mechanical Engineering*, vol.75: pp.3-8. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Describing%20uncertainties%20in%20single-sample%20experiments&author=S.J.%20Kline&publication_year=1953&pages=3-8