

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**BÜYÜK SİLİNDİR HACİMLİ DİZEL MOTORLARDA  
SİLİNDİR İÇİNDEKİ GİRDAP TİPİ HAVA  
HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ VE ÖLÇÜM  
METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

**BURAK YELKEN**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**BÜYÜK SİLİNDİR HACİMLİ DİZEL MOTORLARDA**  
**SİLİNDİR İÇİNDEKİ GİRDAP TİPİ HAVA**  
**HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ VE ÖLÇÜM**  
**METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

**BURAK YELKEN**

**Prof. Dr. Zafer DÜLGER**  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Dr. İsmail Hakkı SAVCI**  
Eş Danışman, Ford Otosan Arge Merkezi

Enstitü Yönetim Kurulunun  
13.02.2019 tarih ve 2019/07 nolu  
toplantısında II. tez danışmanı  
olarak atanmıştır.

**Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Prof. Dr. Cenk ÇELİK**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Prof. Dr. Zafer GÜL**  
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi

.....

**Doç. Dr. Mustafa YILMAZ**  
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 08.09.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez kapsamında dizel motorlarda yanma odası içerisindeki hava hareketlerinden biri olan girdap hareketi incelenmiş olup, port ölçüm tekniği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ve parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu kullanılarak iki farklı motor üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz ve testler sonucunda yeni bir test metodu önerilmektedir.

Doktora eğitimim sırasında deneyimlerini benimle paylaşan, zaman ayıran ve yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Zafer Dülger'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında değerli yorumları ile tezime katkıda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet Necati Özsezen ve Prof. Dr. Cenk Çelik hocalarımın teşekkürlerimi sunarım. Tüm tez çalışmamda beni destekleyen, eş danışmanlığımı yapan, yorumları, destekleri, değerli görüşleriyle tezime katkıda bulunan Dr. İsmail Hakkı Savcı'ya, tez çalışmasında ihtiyaç duyduğum test ve simülasyon altyapısını sağlayan Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.' ye, çalışma sürecinde desteklerini esirgemeyen yöneticim Cem Özen'e, yardımlarını esirgemeyen Hande Bezci Zeren, Aydın Ayyıldız'a, Cengizhan Cengiz'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Beni yetiştiren, her zaman destek olan ve her zaman yanımda olan değerli canım aileme içtenlikle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim – 2021

Burak YELKEN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Tezin Kapsamı.....	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	6
3. DİZEL İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HAVA HAREKETLERİ .....	11
3.1. Yanma Performansına Etki Eden Faktörler.....	11
3.1.1. Parçalanma mekanizmaları .....	11
3.1.2. Reynolds sayısı .....	12
3.1.3. Yüzey gerilimi .....	13
3.1.4. Weber sayısı.....	14
3.2. Dizel Motorlarda Girdap Oluşumu ve Emme Kanalı Tasarımı .....	15
3.3. Akışkanlar Dinamiği ve Girdap Hareketi.....	17
3.3.1. Girdap oranı ve ölçüm metotları, hesaplama yöntemleri .....	19
4. DENEYSEL ARAŞTIRMA TEKNİKLERİ.....	21
4.1. Girdap Oranı Ölçüm Teknikleri .....	21
4.1.1. Sıcak telli anemometre .....	21
4.1.2. Lazer Doppler hız ölçeri (LDHÖ).....	24
4.1.3. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) düzeneği.....	27
4.1.3.1. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm çalışma prensipleri.....	30
4.1.3.2. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm algoritması .....	32
4.1.3.3. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm akış diyagramı .....	34
4.1.3.4. Düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümü .....	35
4.1.3.5. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü .....	37
4.1.3.6. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata tahmini .....	41
4.1.4. Girdap oranı ölçüm düzeneği .....	42
4.1.4.1. Akış faktörünün belirlenmesi .....	45
4.1.4.2. Girdap oranının belirlenmesi.....	47
4.2. Plastik Motor Prototipi .....	48
5. BELİRSİZLİK ANALİZİ .....	50
5.1. Tanımlar .....	51
5.2. Belirsizlik Analizi.....	52
5.3. Toplam (Bileşke) Belirsizlik ve Güvenilirlik seviyesi .....	54



5.4. PGHÖ Ölçüm Belirsizlik Analizi .....	56
6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI .....	62
6.1 Türbülanslı Akış ve Modellenmesi .....	62
6.2. Simülasyon Geometrisi ve Ağ Yapısı .....	66
7. DENEYSEL ÖLÇÜMLER .....	77
7.1. Port Girdap Oranı Ölçümleri .....	77
7.2. 2D PGHÖ Test Düzenine Kurulması ve Girdap Oranı Ölçümleri .....	83
7.3. 3D PGHÖ Test Düzenine Kurulması ve Girdap Oranı Ölçümleri .....	88
7.4. Belirsizlik Analizi Hesaplamaları .....	90
7.4.1. Port ölçüm belirsizlik analizi .....	90
7.4.2. Sistemik belirsizlik .....	91
7.4.3. PGHÖ ölçüm sonuçları ve belirsizlik analizi sonucu .....	92
8. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÖLÇÜM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI .....	97
8.1. Simülasyon ve Port Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması .....	97
8.2. Simülasyon Sonuçları İncelemesi .....	101
8.3. 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları .....	116
8.4. Simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları Karşılaştırması .....	121
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	125
KAYNAKLAR .....	127
EKLER .....	133
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	156
ÖZGEÇMİŞ .....	157

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Reynolds sayısına bağlı laminar ve turbulanslı akış .....	12
Şekil 3.2.	Yakıt damlacığını ikiye ayırmak için gereken kuvvet (Yüzey gerilimi) .....	13
Şekil 3.3.	Weber sayısının parçalanmaya etkisi .....	14
Şekil 3.4.	Silindir içi girdap ve takla akışları .....	17
Şekil 3.5.	Silindir içi ezme akış hareketi .....	18
Şekil 3.6.	Silindir içi girdap akış ölçüm düzeneği .....	20
Şekil 4.1.	Termal anemometre problemleri .....	22
Şekil 4.2.	Tipik bir CC devresi .....	23
Şekil 4.3.	Tipik bir CT devresi .....	23
Şekil 4.4.	Lazer doppler optik sistemi .....	25
Şekil 4.5.	Lazer doppler prensipleri .....	26
Şekil 4.6.	Lazer doppler çalışma mekanizması .....	26
Şekil 4.7.	Yıllık erişilebilir yayın sayısı.....	28
Şekil 4.8.	2D 2C, 2D 3C, 3D 3C PGHÖ yöntemleri.....	29
Şekil 4.9.	2D Düzlemsel PGHÖ ölçüm sistemi düzeneği.....	30
Şekil 4.10.	Akışkan içindeki partikülün ideal hareketi .....	31
Şekil 4.11.	Akışkan içindeki partikülün gerçek hareketi .....	32
Şekil 4.12.	Otomatik Korelasyon kullanarak PGHÖ kayıtlarının değerlendirilmesi .....	33
Şekil 4.13.	Çapraz korelasyon kullanılarak PGHÖ kayıtlarının değerlendirilmesi .....	34
Şekil 4.14.	Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodu akış şeması .....	34
Şekil 4.15.	Yinelemeli tahmin-düzeltilici şemasının basitleştirilmiş blok diyagramı .....	35
Şekil 4.16.	Tipik görüntü bozulmaları .....	36
Şekil 4.17.	Kamera bakış açısına göre oluşan hata .....	36
Şekil 4.18.	Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü .....	37
Şekil 4.19.	İki seviyeli kalibrasyon plakası .....	38
Şekil 4.20.	İleri- geri saçılım kalibrasyon görüntüsü .....	39
Şekil 4.21.	Stereo PGHÖ vektör alanı hesaplamasının akış şeması .....	40
Şekil 4.22.	Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata tahmini .....	41
Şekil 4.23.	Girdap oranı ölçümü düzeneği.....	43
Şekil 4.24.	Çarklı girdap ölçümü düzeneği.....	43
Şekil 4.25.	Petekli girdap ölçümü düzeneği.....	44
Şekil 4.26.	Silindir kafası girdap oranı ölçümü .....	45
Şekil 4.27.	Silindir kafası girdap oranı ölçümü .....	45
Şekil 4.28.	Emme supabı kesit görüntüsü .....	46
Şekil 4.29.	Hızlı prototip parça CAD modeli.....	49
Şekil 4.30.	Üretilen hızlı prototip parça .....	49
Şekil 5.1.	Normal dağılımda güvenilirlik seviyesinin gösterimi .....	55
Şekil 5.2.	PGHÖ hata kaynaklarına genel bakış .....	58
Şekil 5.3.	Stereo PGHÖ ölçüm zinciri .....	59

Şekil 5.4.	Stereo PGHÖ ölçüm süreci için belirsizlik yayılım akış şeması .....	60
Şekil 6.1.	Emme ve egzoz supap geometrileri .....	67
Şekil 6.2.	Simülasyon motor parçaları ve akış hacmi geometrisi .....	67
Şekil 6.3.	Girdap oranı ölçüm hacmi .....	68
Şekil 6.4.	Simülasyon modelinde kullanılan 4mm,8mm ve 12 mm supap açıklıklarındaki akış hacimleri .....	68
Şekil 6.5.	Bölgesel ağ yapısı iyileştirmeleri .....	69
Şekil 6.6.	Supap bölgesi ağ yapısı kesit görüntüsü .....	70
Şekil 6.7.	Ağ yapısı hassasiyet çalışma bölgeleri .....	71
Şekil 6.8.	5 ayrı senaryo ile ağ yapısı hassasiyet çalışması .....	72
Şekil 6.9.	Analiz sonucu açılmal momentum akışı değerleri (11mm supap açıklığı) .....	73
Şekil 6.10.	Analiz sonucu kütleli debi değerleri (11mm supap açıklığı) .....	73
Şekil 6.11.	Motor-A 9 mm supap açıklığı türbülans modeli karşılaştırma grafığı .....	74
Şekil 6.12.	Motor-B 12 mm supap açıklığı türbülans modeli karşılaştırma grafığı .....	75
Şekil 6.13.	Motor-B 12 mm supap açıklığı için türbülans modelleri simülasyon sonuçları (silindir merkezi kesit görüntüsü) .....	75
Şekil 7.1.	Motor-B silindir kafası .....	77
Şekil 7.2.	Motor-A için üretilen plastik prototip parça .....	78
Şekil 7.3.	Balpeteği .....	79
Şekil 7.4.	Balpeteği tork ölçüm .....	79
Şekil 7.5.	Motor-B 1 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları .....	80
Şekil 7.6.	Motor-B 2 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları .....	80
Şekil 7.7.	Motor-B 3 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları .....	81
Şekil 7.8.	Motor-B silindir kafası 5 silindirin normalize edilmiş girdap oranı ölçüm sonuç karşılaştırması .....	81
Şekil 7.9.	Motor-B silindir kafası 5 silindirin normalize edilmiş hava akış kütle debisi karşılaştırması .....	82
Şekil 7.10.	Motor-A plastik prototip parça normalize edilmiş girdap oranı ölçümü .....	82
Şekil 7.11.	Motor-A plastik prototip parça normalize edilmiş hava akış kütle debisi ölçümü .....	83
Şekil 7.12.	Partikül izleme hızölçeri (PGHÖ) temel çalışma prensibi .....	84
Şekil 7.13.	PGHÖ çalışma prensibi .....	85
Şekil 7.14.	PGHÖ ölçüm sistemi şeffaf silindir duvarı .....	85
Şekil 7.15.	2D PGHÖ ölçüm sistemi .....	86
Şekil 7.16.	2D PGHÖ ölçüm test sistemi kurulumu .....	86
Şekil 7.17.	Kalibrasyon düzlemi .....	87
Şekil 7.18.	Kalibrasyon düzlemi montajlı şekli .....	87
Şekil 7.19.	Kalibrasyon düzlemi nokta tarama ve düzeltme görüntüleri .....	87
Şekil 7.20.	3D PGHÖ ölçüm sistemi .....	88
Şekil 7.21.	3D PGHÖ ölçüm sistemi kurulumu .....	88
Şekil 7.22.	1 ve 2 nolu kameraların kalibrasyon düzlemi nokta tarama görüntüleri .....	89

Şekil 7.23.	1 ve 2 nolu kameraların kalibrasyon düzlemleri birleştirilmiş görüntüsü .....	90
Şekil 7.24.	Motor-A 2D PGHÖ ölçüm belirsizlik analizi sonucu .....	93
Şekil 7.25.	Motor-A 3D (Stereo) PGHÖ ölçüm belirsizlik analizi sonucu.....	94
Şekil 7.26.	PGHÖ ölçüm sistemi şeffaf silindir duvarındaki yansıma .....	95
Şekil 7.27.	Motor-B 2D ve Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları .....	95
Şekil 8.1.	Normalize edilmiş Motor-A HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen kütle debi değerleri karşılaştırılması .....	97
Şekil 8.2.	Normalize edilmiş Motor-B HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen kütle debi değerleri karşılaştırılması .....	98
Şekil 8.3.	Normalize edilmiş Motor-A HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen girdap oranı değerleri karşılaştırılması.....	99
Şekil 8.4.	Normalize edilmiş Motor-B HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen girdap oranı değerleri karşılaştırılması.....	99
Şekil 8.5.	Supap merkezinden alınan kesitte sırasıyla 1mm,2mm ve 3mm supap açıklıkları için dağılımları .....	100
Şekil 8.6.	Silindir eksenine paralel A-A ve B-B düzlemleri (üstten görünüş) .....	102
Şekil 8.7.	Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri .....	103
Şekil 8.8.	Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri .....	104
Şekil 8.9.	Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	106
Şekil 8.10.	Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	107
Şekil 8.11.	Motor-A silindir kafasından 134 mm uzaktaki silindir Eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için).....	108
Şekil 8.12.	Motor-A silindir kafasından 201 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için).....	109
Şekil 8.13.	Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri .....	111
Şekil 8.14.	Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri .....	112
Şekil 8.15.	Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	113
Şekil 8.16.	Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	114
Şekil 8.17.	Motor-B silindir kafasından 150 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için).....	115
Şekil 8.18.	Motor-B silindir kafasından 227 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için).....	116
Şekil 8.19.	Motor-A 9 mm supap açıklığı için 2D PGHÖ ölçüm sonuçları .....	117
Şekil 8.20.	Motor-B 12 mm supap açıklığı için 2D PGHÖ ölçüm sonuçları .....	118

Şekil 8.21.	Motor-A 9 mm supap açıklığı için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları.....	119
Şekil 8.22.	Motor-B 12 mm supap açıklığı için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları.....	120
Şekil 8.23.	Motor-A 9 mm supap açıklığı için simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçümü karşılaştırılması.....	123
Şekil 8.24.	Motor-B 12 mm supap açıklığı için simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçümü karşılaştırılması.....	124
Şekil A.1.	Motor-A 9 mm supap açıklığı için türbülans modelleri simülasyon sonuçları (silindir merkezi kesit görüntüsü) .....	134
Şekil B.1.	PGHÖ test düzeneği kurulumu akış diyagramı .....	135
Şekil B.2.	Kalibrasyon işlemi ekran görüntüsü .....	137
Şekil B.3.	Test sırasındaki işlem görüntüsü.....	138
Şekil C.1.	Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri.....	140
Şekil C.2.	Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri.....	141
Şekil C.3.	Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	142
Şekil C.4.	Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	143
Şekil D.1.	Motor-A silindir kafasından 30mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için) .....	144
Şekil D.2.	Motor-A silindir kafasından 67 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için) .....	145
Şekil E.1.	Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri.....	146
Şekil E.2.	Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri.....	147
Şekil E.3.	Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	148
Şekil E.4.	Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri.....	149
Şekil F.1.	Motor-B silindir kafasından 30mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için) .....	150
Şekil F.2.	Motor-B silindir kafasından 75 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için) .....	151
Şekil G.1.	Motor-A 3 mm ve 6 mm supap açıklıkları için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları.....	152
Şekil G.2.	Motor-B 4 mm ve 8 mm supap açıklıkları için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları.....	153
Şekil H.1.	Motor-A 3mm ve 6mm supap açıklıkları için 2D PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları.....	154
Şekil H.2.	Motor-B 4 mm ve 8 mm supap açıklıkları için 2D PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları.....	155

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1.	%100 nem koşullarında sıcaklığa bağlı R ve K değerleri.....	47
Tablo 4.2.	%0 nem koşullarında sıcaklığa bağlı R ve K değerleri.....	47
Tablo 5.1.	Normal dağılım güvenilirlik seviyesi yüzdesi .....	55
Tablo 5.2.	Dört belirsizlik ölçüm yönteminin girdi ve çıktı miktarları.....	60
Tablo 6.1.	Motor-A ve Motor-B motorlarının geometrik özellikleri.....	66
Tablo 6.2.	Ağ yapısı hassasiyet çalışması senaryoları .....	71
Tablo 6.3.	Motor-A 9 mm supap açıklığı için türbülans modeli karşılaştırması .....	74
Tablo 6.4.	Motor-B 12 mm supap açıklığı için türbülans modeli karşılaştırması .....	74
Tablo 7.1.	Motor-A ve Motor-B girdap ölçüm test şartları.....	79
Tablo 7.2.	Belirsizlik analizi formülleri.....	92
Tablo 8.1.	Motor-A HAD analizi silindir eksenine dik düzlem kesitleri.....	105
Tablo 8.2.	Motor-B HAD analizi silindir eksenine dik düzlem kesitleri.....	114

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha_k$	: Akış katsayısı
$U_{ort}$	: Akışa ait karakteristik hız
$\rho_{cyl}$	: Balpeteğinden önceki hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$M$	: Balpeteği üzerindeki Moment (Nm)
$w$	: Değişkenin belirsizliği
$m$	: Değişkenin ortalama değeri
$v$	: Değişkenin ölçüm belirsizliği
$w_d$	: Dönel akış hızı
$\Phi$	: Eşdeğerlik oranı
$R$	: Gaz sabiti
$D$	: Girdap katsayısı
$p$	: Güvenilirlik seviyesi (%)
$V_{cyl}$	: Hava akış debisi ( $m^3/s$ )
$C_s$	: İzentropik hız
$\rho_s$	: İzentropik yoğunluk
$N$	: Krank mili hızı
$\dot{m}$	: Kütleli debi
$A_k$	: Motor silindir kesit alanı
$K$	: Özgül ısıların oranı
$Re$	: Reynolds sayısı
$T$	: Sıcaklık
$R_{cyl}$	: Silindirik tüp yarıçapı (m)
$p_1$	: Supap önündeki basınç
$p_2$	: Supap sonrasındaki basınç
$We$	: Weber Sayısı
$\rho$	: Yoğunluk

## Kısaltmalar

CCA	: Constant current anemometer (Sabit akım anemometresi)
CTA	: Constant temperature anemometer (Sabit sıcaklık anemometresi)
CVA	: Constant voltage anemometer (Sabit voltaj anemometresi)
HSA	: Honeycomb swirl anemometer (Balpeteği girdap anemometresi)
LDHÖ	: Lazer doppler hız ölçeri
LSV	: Laser speckle velocimetry (Lazer benek hız ölçeri)
PGHÖ	: Parçacık görüntülemeli hız ölçeri
PIV	: Particle image velocimetry (Parçacık görüntülemeli hız ölçeri)
PSV	: Particle streak velocimetry (Partikül çizgi hızölçeri)
PWA	: Paddle wheel anemometer (Çarklı girdap anemometresi)
STA	: Sıcak telli anemometre

2D 2C : İki bileşenli düzlemsel PGHÖ (2 boyutlu)  
2D 3C : İki bileşenli hacimsel PGHÖ (3 boyutlu, Stereo)  
3D 3C : Üç bileşenli hacimsel PGHÖ  
4D 3C : Tomografik PGHÖ





## **BÜYÜK SİLİNDİR HACİMLİ DİZEL MOTORLARDA SİLİNDİR İÇİNDEKİ GİRDAP TİPİ HAVA HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ VE ÖLÇÜM METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

Dizel motorlar, son yıllarda kamyon ve otobüs gibi ağır ticari araç uygulamaları için ana güç kaynağı olmuştur. Genellikle, benzer motor hacmine sahip dizel motorlar ve benzinli motorlar kıyaslandığında, dizel motorların daha fazla yakıt ekonomisi, yüksek dayanıklılık ve tork sağlamakta olduğu görülmektedir. Ancak dizel motorlarda yanma odası içerisindeki yakıt ve hava homojen olarak karışmış durumda değildir. Basınç altında püskürtülen yakıt, yüksek basınç ve sıcaklıktaki hava içinde çok küçük taneciklere ayrılarak atomize olur. Silindir içindeki yakıt hava hareketlerinin yanma performans ve emisyon çıktıları üzerindeki etkisi büyüktür. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte motor hava giriş portu tasarımını geliştirmek için motor yanma odasındaki girdap hareketinin özelliklerini belirlemek mümkün olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Motor-A ve Motor-B kullanılarak port testleri gerçekleştirilmiş ve farklı supap açıklıkları için girdap oranları belirlenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz yöntemi ile her iki motor geometrisi kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve port test sonuçları teyit edilmiştir. Gelişen kamera ve lazer teknolojileri ile birlikte girdap oranı belirleme tekniklerinden biri olarak geliştirilen PGHÖ (parçacık görüntülemeli hız ölçümü) metodu kullanılarak silindir hacmi temel alınarak Motor-A ve Motor-B üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Testler hem 2D (2 boyutlu), hemde 3D (3 boyutlu, Stereo) düzenekler kullanılarak yapılmıştır. Her iki motor üzerinde yapılan 2D ve 3D ölçümlerin belirsizlik analizleri yapılarak ölçümlerin güvenilirlik oranları belirlenmiştir. Testler sonucunda iki farklı motorun girdap ve akış özellikleri HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılmış ve iki farklı ölçüm yönteminin (2D ve Stereo PGHÖ) sonuçları değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında, port ölçümü için iki farklı akış görselleştirme yöntemi sunulmakta ve tartışılmaktadır. Bu yöntemlerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Tork ölçüm teknikleri ve HAD simülasyon sonuçları testlerin sonuçlarını doğrulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Belirsizlik Analizi, Girdap Hareketi, HAD, PGHÖ.

# **INVESTIGATION OF VORTEX TYPE AIR MOVEMENTS IN CYLINDER IN LARGE DISPLACEMENT DIESEL ENGINES AND COMPARISON OF MEASUREMENT METHODS**

## **ABSTRACT**

Diesel engines have been the main power source for heavy vehicle applications such as trucks and buses in recent years. Generally, diesel engines with similar engine size and gasoline engines are compared, it is seen that diesel engines provide more fuel economy, high durability and torque. However, fuel and air inside the combustion chamber are not homogeneously mixed in diesel engines. Fuel sprayed under pressure is atomized by breaking into tiny particles in the air at high pressure and temperature. The effects of fuel-air movements in the cylinder on engine performance and emission outputs are great. With the developing technology in recent years, it is possible to determine the characteristics of the swirl movement in the engine combustion chamber to develop the engine air intake port design. Within the scope of this study, port tests were carried out using Engine-A and Engine-B and eddy ratios were determined for different valve openings. Simulations were performed using both engine geometries with computational fluid dynamics analysis method, and port test results were confirmed. Tests were carried out on Engine-A and Engine-B based on the cylinder volume by using the PIV (particle imaging velocity measurement) method, which was developed as one of the swirl rate determination techniques with the developing camera and laser technologies. These tests were performed using both 2D PIV and 3D PIV. The uncertainty analysis determined the reliability ratio of the measurement. As a result of the tests, the vortex and flow properties of two different engines were compared with the CFD analysis results and the results of two different measurement methods (2D and Stereo PIV) were evaluated. In this study, two different flow visualization methods for port measurement are presented and discussed. The assessment of these methods is demonstrated. Torque measurement techniques and CFD simulations verifies the results of the tests.

**Keywords:** Uncertainty Analyze, Swirl, CFD, PIV.

## GİRİŞ

Dizel motorlar, son yıllarda kamyon ve otobüs gibi ağır araç uygulamaları için ana güç kaynağı olmuştur. Dizel motorların genellikle benzinli motordakine benzer motor hacmine kıyasla daha fazla yakıt ekonomisi, yüksek dayanıklılık ve tork sağlamaktadır. Ancak dizel motorlarda yanma odası içerisindeki yakıt ve hava homojen olarak karışmış olmadığından güç üretilmesinde verim kaybı ve yüksek kirlilikte emisyon gazları üretebilmektedir. Bu heterojen karışımın yol açtığı sorunu azaltmak için basınç altında püskürtülen yakıt, yüksek basınç ve sıcaklıktaki hava içinde çok küçük taneciklere ayrılarak atomize olmaktadır.

Motor performansını etkileyen en önemli temel faktörler; hava/hava giriş kalitesi, yakıt/enjeksiyon parametreleri ve hava-yakıt karışımıdır. Motordan elde edilen güç, kurum/NOx emisyonları, tork ve diğer motor emisyon parametreleri bu 3 temel parametreye bağlıdır.

Yakıt ve hava karışımı dizel motorun emme stroğu sürecinde emme manifoldu boyunca yol alarak silindir içine girmektedir. Bu hareket sırasında emme manifoldu tasarımı, püskürtme basıncı, hava yakıt karışım tanecik özellikleri gibi birden fazla parametreye bağlı olarak silindir içinde farklı derecelerde ezme, girdap ve takla hareketi yapar. Silindire giriş esnasında oluşan girdap ve takla hareketi yanma performansını etkilemektedir. Dolayısıyla hava yakıt karışımının girdap ve takla hareketi doğru olarak ölçülmeli ve değerlendirilmelidir. Bu tez kapsamında bu hareketlerden girdap hareketi incelenmiştir.

Hava hareketlerinin incelenmesi ve ölçebilmesi uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konu olmuştur. Gelişen teknoloji ile birlikte hem yeni ölçüm metotları geliştirilmiş hem de görselleştirme ve kayıt altına alma cihazları çok kısa sürelerde hassas kayıt yapılabilir hale gelmiştir. Girdap hareketini ölçebilmek için farklı yöntemler mevcut olmakla birlikte bu tez kapsamında mevcut metotlar detaylı olarak tanıtılmış, özellikle

balpeteği torkmetre ve parçacık görüntülemeli hız ölüm metotları üzerine yoğunlaşılmıştır. Motor bilgisayar modeli kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilerek balpeteği torkmetre test sonuçları doğrulanmış ve farklı supap açıklıkları için silindir içinde silindir kafasından farklı uzaklıklardaki kesitlerdeki akış hareketleri detaylı olarak incelenmiştir. Parçacık görüntülemeli hız ölüm metodolojisi akış diyagramı ve çalışma algoritması ile birlikte detaylı olarak açıklanmıştır. Yapılan testlerde iki farklı motor üzerinde balpeteği torkmetre ve 2 boyutlu ve 3 boyutlu (Stereo) parçacık görüntülemeli hız ölümleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, 2 boyutlu ve 3 boyutlu (Stereo) testleri sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yapılan analizler sonucu özellikle otomotiv sektöründe dizel motor uygulamaları girdap oranı ölümleri için yeni bir test metodu önerilmiştir.

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1.Tezin Kapsamı

Yapılan tez çalışmasında öncelikle kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür çalışmasında daha önce yapılmış olan literatürdeki girdap analizi, iki boyutlu ve üç boyutlu girdap ölçüm çalışmaları, motor girdap karşılaştırmaları konulu çalışmalar gözden geçirilmiştir. Araştırmacıların bulguları gözden geçirilmiştir.

Tez kapsamında öncelikle bir dizel motordaki yanma performansına etki eden parametreler ortaya konmuş, yakıt taneciklerinin parçalanma mekanizmaları açıklanmıştır. Motor odası içindeki hava-yakıt karışımının hareketinin önemi ortaya konmuştur. Dolayısıyla motorun emme periyodu boyunca oluşan girdap hareketi detaylı incelenmiştir. Emme manifoldu tasarımının girdap oranına etkisinin önemi belirtilmiş, girdap oranının hesaplama yöntemleri ve ölçüm metotları sırasıyla açıklanmıştır (sıcak telli anemometre, lazer doppler hız ölçeri, parçacık görüntülemeli hız ölçümü). Bu yöntem ve düzeneklerin detaylı olarak çalışma yöntemleri ve avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında da kullanılacak olan parçacık görüntülemeli hız ölçümü detaylı olarak incelenmiştir. Tarihsel olarak ilk uygulaması ve yıllar içindeki gelişiminden kısaca bahsedilmiş, şu anda kullanılmakta olan, ölçülen hız bileşenlerine ve ölçüm alanına göre gerçekleştirilen parçacık görüntülemeli hız ölçüm metot çeşitleri açıklanmıştır. Özellikle yöntemin çalışma prensipleri detaylı olarak açıklanmış, ölçümün mantığını ve yapısını anlayabilmek için çalışma algoritması açıklanmıştır. Bu anlatım akış diyagramları ile güçlendirilmiştir.

Parçacık görüntülemeli hız ölçümünün çeşitlerinden biri olan tek kamera ile gerçekleştirilen düzlemsel ve iki kamera ile gerçekleştirilen stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümlerinin prensipleri ve farklılıkları açıklanmıştır. Her iki ölçüm metodu içinde olası hata modları belirtilmiştir. Stereo parçacık görüntülemeli

hız ölçümünde iki kamera kullanılmasından dolayı optik olarak doğru bir ölçüm yapabilmek için gerekli olan kalibrasyon işlemi anlatılmış, vektör alanı hesaplamaları akış diyagramları üzerinden açıklanmıştır. Ayrıca hata ölçümü tahmini teorik olarak belirtilmiştir.

Tez kapsamında yapılan testler sırasında kullanılan tork ölçümü ile girdap oranı ölçüm cihazı ve metodu detaylı olarak anlatılmıştır. Akış oranının belirlenmesi sırasında kullanılan denklemler belirtilmiş, test için özel olarak yaptırılan motor emme manifoldunun hava akış haritasını birebir yansıtan hızlı prototip parçanın üretimi hakkında bilgi verilmiştir.

Yapılan her ölçümün doğruluğundan emin olunması ve oluşan hata oranının bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda tez çalışması için ölçüm metotları için belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle belirsizlik analizi metodolojisi ve mantığı genel olarak anlatılmıştır. Ardından bu tekniğin tork ölçümü ile girdap oranı ölçümü ve parçacık görüntülemeli hız ölçümündeki uygulaması detaylı olarak anlatılmıştır.

Gerçekleştirilen testler kapsamında ilk olarak balpeteği metodu kullanılarak iki farklı motor bloğu üzerinde girdap oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Testlere başlarken 3 tekrarlı olarak testler gerçekleştirilmiş, ölçümlerin tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. Motor bloğu üzerindeki aktif olan 5 silindirde ölçümler tamamlanmıştır. Aynı girdap oranı ölçümü diğer motor üzerinde de gerçekleştirilerek girdap oranı sonuçları karşılaştırılmıştır.

Girdap oranı ölçümlerinden sonra parçacık görüntülemeli hız ölçümlerine geçilmiştir. Düzlemsel iki boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçümü için test düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği kurulumu ve test düzeneği ekipmanları anlatılmış, gerekli olan kalibrasyon yapıldıktan sonra testler gerçekleştirilmiştir. Alınan test sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. Ardından iki kamera kullanılarak yapılan üç boyutlu stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümlerine geçilmiştir. Stereo üç boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçümü için test düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği kurulumu ve test düzeneği ekipmanları anlatılmış, gerekli olan kalibrasyon yapıldıktan sonra testler gerçekleştirilmiştir. Alınan test sonuçları grafiklerle gösterilmiştir.

Hem port ölçümü, hemde iki boyutlu ve üç boyutlu (stereo) parçacık görüntülemeli hız ölçümü için belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan belirsizliklerin tüm ölçümler için kabul edilebilir mertebede olduğu ve yapılan ölçümlerin doğrulandığı görülmüştür.

Ölçüm sonuçları karşılaştırılarak analiz edilmiş. Yapılan değerlendirme sonucunda silindir içi hava akış uygulamalarında kullanmak üzere girdap oranı ölçümleri için yeni bir test metodu geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bu sayede uygulamalarda kullanılacak ölçüm metotları uygulamalarda kullanmak için netleştirilmiş ve literatüre katkı sağlanmıştır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

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, NO<sub>x</sub>/kurum emisyonları gibi emisyon parametreleri de temel anlamda bu üç parametreye bağlıdır.

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisindeki hava veya hava yakıt karışımı hareketleri için literatür araştırması yapıldığında önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Silindir içindeki hava hareketlerinden biri olan girdap hareketinin ölçümleri birçok çalışmada gerçekleştirilmiş, girdap katsayısına bağlı olarak yanma performansına ve emisyon seviyelerine olan etkileri incelenmiştir. Farklı ölçekli motorlar üzerinde hava emiş akışı testleri gerçekleştirilmiş olup, akışın girdap ve takla hareketi parametreleri ölçülmüş ve motorun performansı üzerindeki etkisini incelenmiştir [1].

Silindir içine püskürtülen yakıtın homojen olarak yanması motor veriminin yükselmesini sağlamak ve emisyonları düşürmektedir. Ancak yanma parametre sayısının fazla olması ve fiziğinin karmaşıklığından dolayı silindir içindeki yanma olayını optimize etmek oldukça zordur [2]. 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 [3].

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 [4]. Girdap hareketini etkileyen önemli parametrelerden biri motordaki hava emiş kanalının tasarımıdır. Hava emiş kanalının açıl pozisyonunu parçacık görüntülemeli hız



ölçümü metodu ile inceleyen çalışmalarda farklı açısız pozisyonlardaki çeşitli hava emiş geometrilerinin motor performansına olan etkileri bir test motoru üzerinde incelenmiş, girdap ve takla karakteristiklerinin farklı portlar arasında benzer olduğu, bununla birlikte açısız pozisyonlara göre farklılık gösterdiği ortaya koyulmuştur [5]. Farklı hava emiş kanalı tasarımlarının dizel motor içerisindeki girdap oranına etkisi de incelenmiş, yüksek girdap değerleri elde edebilmek için en kritik ve önemli dizayn parametresinin supap yüzeyi olduğu belirlenmiş ve parçacık görüntülemeli hız ölçüm sistemi kullanılarak akışın görsel ölçümü yapılmıştır [6]. Bununla birlikte silindir kafasında farklı supap açıklıkları ile yapılan testlerde, tamamen açık supabın, en güçlü girdap hareketini oluşturduğu, daha küçük açıklıkların ise kinetik enerji ile küçük ölçekli türbülans oluşturdukları gözlemlenmiştir [7]. Silindir kafası girdap oranı ölçümleri için kritik konular incelenmiş, motor silindir içerisindeki açısız momentum ile motordaki yanma performansı arasındaki ilişki ortaya konulmuş ve ölçümlerde dikkat edilmesi gereken noktalar da belirtilmiştir [8]. Silindir içinde akışın motorun yanma karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kararlı akış rejimi içerisinde dört farklı hava emiş portundan ölçümler alınmış, silindir içinde akış hızı dataları çıkarılmış, motorun yanma karakteristiğine olan etkileri incelenmiştir [9].

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniğinin en büyük zorluklarından birisi, girdap hareketinin silindir içinde oluşması ve silindir içindeki hacmin görüntülenmesi gerektiğidir. 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 [10]. Parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu kullanılırken ölçüm alınan yüzeyin seçimi önemlidir. Farklı yüzeylerden ölçümler alınarak ve kararlı akış rejiminde 2 ve 3 boyutlu ölçümler gerçekleştirilerek girdap mekanizmasının zamana karşı olan davranışı irdelenmiştir [11]. 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 [12]. Ayrıca, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak, akış faktörü ve girdap oranı ölçümleri için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu geliştirilmiştir. Çeşitli supap açıklıkları için farklı hız vektörlerini oluşturarak, analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmış, analizlerle elde edilen akış faktörü değerleri yalnızca %5'lik bir farkla tahmin edilebilse de girdap oranı değerlerinde %5 ila %25 arasında bir farklılık gözlemlenmiştir [13]. 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 [14].

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 [15]. 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 [16]. Aynı zamanda ölçümdeki belirsizliklerin minimize edilmesi ve hata oranının azaltılmasını amaçlamak için parçacık görüntülemeli hız ölçümü tekniği kullanılarak 2 ve 3 boyutlu ölçümler gerçekleştirilmiş ve hata oranı üzerine yoğunlaşmıştır. Kalibrasyon değişiklikleri yapılarak ve transformasyon üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir [17]. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metotlarında çalışılan pratik konulardan biri de, hızlı kamera sayısının artırılması ile yüksek bir doğruluk sağlamak için hesaplama süresini optimize etmektir [18]. 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 büyüklüklerin nasıl değiştiğine dair bir korelasyon elde edilmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak sorgulama bölgesi büyüklüğü, aydınlatma yoğunluğu, görüntü büyüklüğü parametreleri ve etkileri incelenmiştir [19].

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodunun belirsizlik analizi çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Deneysel olarak yapılan parçacık görüntülemeli hız ölçümü ile birlikte belirsizlik analizi de gerçekleştirilmektedir. Birbirinden farklı belirsizlik analizi metotları 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 [20]. 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 [21].

Literatürdeki çalışmalarda 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, su analogu veya akış düzeneği gibi basit test düzenekleri ile yapılmaktadır [10-12, 22]. Tamamlanan çalışmada ise motor silindir içi akış gibi karmaşık uygulamalarda farklı parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) metodolojisinin sonuçları tartışılmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında, bu çalışmaya özgü kullanılmak üzere Motor-A'nın hava emiş kanalını simüle eden prototip parça ve Motor-B kullanılmıştır. Prototip parça, hızlı prototipleme yöntemi ile imal edilmiştir. Motor-A prototip parça ve Motor-B üzerinde balpeteği tork port ölçümleri, her 1 mm supap açıklığı için gerçekleştirilerek referans girdap oranı ölçümü elde edilmiştir. Aynı parçalar üzerinde 2 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 ve 3 boyutlu parçacık görüntülemeli ölçüm

metotlarının farklılıklarının ortaya konması ve otomotiv sektöründe bir dizel motorun girdap katsayısı belirleme çalışmasında, incelenen ölçüm metotlarından test edilecek olan motorlara uygun olanını ortaya çıkartmaktır.



### 3. DİZEL İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HAVA HAREKETLERİ

#### 3.1. Yanma Performansına Etki Eden Faktörler

Yanma olayını karakterize eden en önemli parametrelerden birisi hava-yakıt oranıdır.

Hava- yakıt oranı (a/f) veya yakıt-hava (f/a) oranı silindirdeki karışımı tanımlamak için kullanılan parametrelerdir. Hacim veya kütle bazlı ifade edilirler. Tüm yakıtı tüketecek kadar gerekli olan hava miktarı ile teorik olarak yanmanın stokiyometrik f/a oranına sahip olduğu söylenir. Fazla eklenmesi yakıt açısından fakir karışımın oluşmasına, az hava eklenmesi ise yakıt açısından zengin karışımın oluşmasına neden olmaktadır. Farklı yakıtların farklı stokiyometrik yakıt-hava oranlarına sahip olduklarından yakıt-hava değerinin stokiyometrik değere göre normalleştirilmesi uygundur. Eşdeğerlik oranı  $\Phi$  ile ifade edilmektedir,

$$\Phi = \frac{(f/a)_{gercek}}{(f/a)_{stoich}} \quad (3.1)$$

Farklı yakıt türlerinin kullanıldığı yanma olayı kolayca şöyle tanımlanır,  $\Phi < 1$ , Yakıtça fakir karışım,  $\Phi = 1$ , Stokiyometrik ideal karışım,  $\Phi > 1$ , Yakıtça zengin karışım. Diğer bir önemli yanma parametresi adyabatik alev sıcaklığıdır. Prensip olarak en yüksek sıcaklık  $\Phi = 1$  koşulunda oluşur. Eşdeğerlik oranının 1 olduğu stokiyometrik ideal karışım şartlarında hava ve yakıtın tamamı reakte olur ve tüm yakıt tüketilir. Yakıtın tamamen yandığı ve yanma ürünü olarak sadece CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O olduğu yanma reaksiyonuna stokiyometrik yanma olarak adlandırılır. Tam yanma adı da verilmektedir. Pratikte, tür ayrışması ve ısı kapasitenin etkileri en üst noktayı stokiyometrik noktanın biraz üzerine taşımaktadır  $\Phi \sim 1.05$  [23-25]

##### 3.1.1. Parçalanma mekanizmaları

Dizel motorlarda etkin bir yanma, yakıtın silindir içerisinde atomize olmasına ve silindir içerisinde düzgün dağılmasına bağlıdır. Yakıtın püskürtülmesindeki amaç sıvının küçük damlacıklara ayrılması sonucu hava ile temas eden yüzeyinin

arttırılmasıdır. Birim yakıt hacminin  $100 \times 10^{-6}$  [m] çapındaki damlacıklara ayrılması sonucu toplam yüzey alanı 10,000 kat büyümektedir.

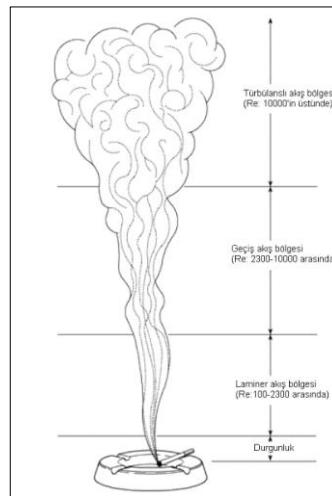
Ortalama yakıt damlacık boyutlarının küçültülmesi, birim hacimde daha yüksek ısının açığa çıkmasına, yakıtın daha kolay tutuşmasına ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler olmasını sağlamaktadır.

Yakıt damlacıklarının enjektör ucundan silindir içerisine kat ettiği yol ve boyutları yanma odası tasarım parametrelerinden birisidir. Bir dizel motor tasarlanır iken, silindir içerisinde hangi parçalanma mekanizmasının daha etkin olacağı ve atomizasyon oranının motorun çalışma şartları ve sıvı özelliklerinden hangi oranda etkileneceği oldukça önemlidir.

Yakıtların yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi gibi özellikleri yakıtın parçalanma mekanizmasını önemli ölçüde etkilemektedir [26].

### 3.1.2. Reynolds sayısı

Parçalanmada en önemli etkiyi atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetler arasındaki dengeyi tanımlayan Reynolds sayısı belirlemektedir. Akışkanlar mekaniğinde Reynolds sayısı, bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir.



Şekil 3.1. Reynolds sayısına bağlı laminar ve türbülanslı akış [26]

Reynolds sayısı, düzgün akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır,

$$Re = \frac{\rho * U_{ort} * D}{\mu} = \frac{\text{Atalet Kuvveti}}{\text{Viskoz kuvvetler}} \quad (3.2)$$

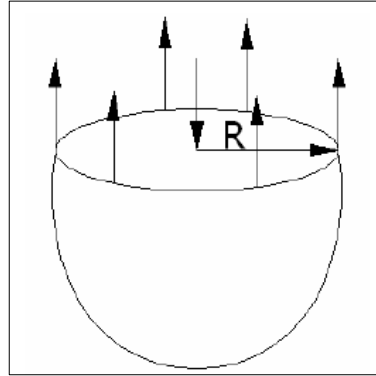
Burada;  $\rho$  sıvının yoğunluğu,  $U_{ort}$  ve  $D$  akışa ait karakteristik hız ve noozle çapı ölçüleridir.

Laminar ve türbülanslı akış Reynolds sayısına bağlı olarak aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

### 3.1.3. Yüzey gerilimi

Sıvının iç kısımlarında yer alan moleküller çok yakın kümелendikleri için birbirlerini iterler. Yüzeyde bulunan moleküller daha az yoğundur ve birbirlerini çekerler. Bu etkiler sonucu, serbestçe genişlemeyen sıvılar ikinci bir sıvı ile ya da gaz ile bir ara yüzey oluştururlar. Bu olaya yüzey gerilmesi denir.

Yüzey gerilimi, bir yakıt damlacığını ortasından kesmek (ikiye ayırmak) için gereken kuvvettir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Yakıt damlacığını ikiye ayırmak için gereken kuvvet (Yüzey gerilimi) [26]

$$\Delta P * \pi R^2 = \sigma 2\pi R \quad (3.3)$$

$$\Delta P = P_i - P_d = 2\sigma R \quad (3.4)$$

Yüzey geriliminin olduğu bölgede iki kuvvet (adezyon ve kohezyon) etkilidir. Kohezyon ve adezyon kuvvetleri, bir sıvının bulunduğu ortamdaki davranışını belirler. Sıvının kohezyonu, bulunduğu kaba uyguladığı adezyondan büyük ise sıvı bulunduğu kabın çeperlerine yapışmaz yani kabı ıslatmaz. Eğer küçük ise bulunduğu kaba yapışır ve kabı ıslatır [26].

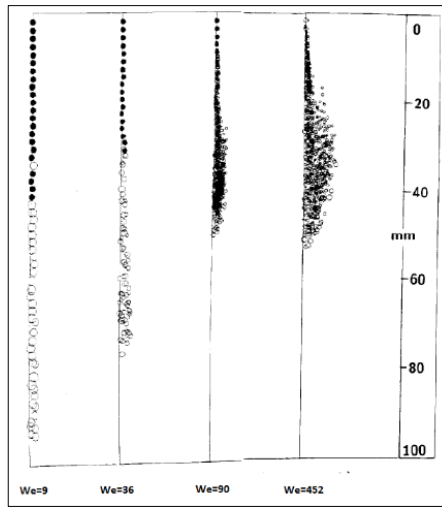
### 3.1.4. Weber sayısı

Damlacıklar üzerindeki atalet kuvvetleri, hava ile yakıt arasındaki direnç nedeniyle parçalanmayı artırıcı doğrultuda etki etmektedir. Yüzey gerilme kuvvetleri ise parçalanmayı önleyici etkiye sahiptir. Bu iki kuvvet arasındaki denge, atalet kuvvetlerinin yüzey gerilme kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan Weber sayısı ile belirlenmektedir. Weber sayısını tespit etmek için kullanılacak aşağıdaki formül kullanılmaktadır;

$$W_e = \frac{\rho U_{ort}^2 D}{\sigma} = \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{Yüzey gerilimi}} \quad (3.5)$$

Burada; (U) yakıt damlacık hızını, ( $\rho$ ) yakıtın yoğunluğunu göstermektedir. Weber sayısı 1'den büyük ise ihmal edilebilir. Bu durumda, düşük hızlı sürtünmeli (viskoz) akışlarda, sadece Reynolds sayısı önemli boyutsuz parametredir.

Weber sayısının parçalanmaya etkisi Şekil 3.3' de gösterilmektedir [26].



Şekil 3.3. Weber sayısının parçalanmaya etkisi [26]



### 3.2. Dizel Motorlarda Girdap Oluşumu ve Emme Kanalı Tasarımı

Motor performansını etkileyen en önemli temel faktörler; hava ve hava giriş kalitesi, yakıt ve enjeksiyon parametreleri ve hava-yakıt karışımıdır. Motordan elde edilen güç, kurum/NOx emisyonları, tork ve diğer motor emisyon parametreleri bu 3 temel parametreye bağlıdır [27].

Ayrıca dizel motorlardaki önemli işletme parametreleri, püskürtme avansı, motor hızı, Yakıt/hava oranı, sıkıştırma oranı, giriş basıncı, soğutucu akışkan ve giriş sıcaklığı, püskürtülen yakıt miktarı, yakıt kalitesi, motor büyüklüğü, aşırı doldurma, püskürtme karakteristikleri, girdap hareketleridir. Bu parametreler, yanmanın tam olarak gerçekleşmesine ve egzoz emisyonlarını azaltmada önemli etki etmektedirler [28].

Silindir içi yanma olayını optimize etmek zor bir iştir çünkü bu işin fiziği karmaşık olmakla beraber ve pek çok parametreye bağlıdır. Yakıt basıncı ve yakıt damlacık boyutu yanma veriminde kritik rol üstlenmektedir. Yanma kalitesini etkileyen diğer bir diğer etken sıkıştırma işlemi sonundaki silindir içerisindeki akış yapısıdır. Akış yapısı havanın girişi anında başlamaktadır ve sıkıştırma işleminde bu akış yapısı evrilir.

Dizel motorlarda hava hareketlerinin karışım hızını artırarak yanma olayını etkilemekte olduğu bilinmektedir. Püskürtme basıncının yeterli ve yüksek olması halinde püskürtülen yakıt miktarı, yakıt hüzmeleri halinde cidarlara ulaşabilmekte ve cidarlara çarpma noktası etrafında girdap hareketinin derecesine bağlı olarak tek veya çift taraflı duvar jetleri oluşturmaktadır. Bu durum, hem duvarlara yakın bölgede etkili bir yakıt-hava karışımı sağlanması, hem de duvara yakın bölgelerde tutuşma gecikmesi süresini azaltması ve yanma süresinin kısaltılması bakımından önem göstermektedir. Girdap hareketi hızının yüksek olduğu durumlarda, yakıt hüzmelerinin cidarlara ulaşmadan önce daha erken aşamalarda deforme olması ve girdap hareketi etkisine girmesi mümkün olabilmektedir. Bu durumda duvara yakın bölgede etkili yakıt hava karışımının oluşması ve yanma süresinin kısaltılması sözkonusu olmamaktadır. Dolayısıyla girdap hareketleri ve püskürtme karakteristikleri arasında yanmanın verimi açısından optimum bir nokta vardır denilebilir [29].

Motor içerisinde genel olarak 2 farklı gaz karışım hareketi gözlemlenmektedir. Bunlardan birisi aksel yöndeki girdap hareketi (silindirin akseni etrafında oluşan dönme hareketi), diğeri ise silindir akseline dik yöndeki takla dönme hareketidir [30].

Motorun çalışması sırasında emme periyodu boyunca yanma odasına alınan akışa ait parametreler silindir duvarı, hareket eden piston ve önemli ölçüde giriş kanalı ve silindir kafası geometrisine bağlı olarak değişir. Ayrıca çevrimler arası akış değişimlerinden de etkilenmektedir [2, 31].

Yanma performansı ve girdap katsayısına olan önemli etkisinden dolayı emme manifoldu tasarım ve optimizasyon çalışmaları endüstride önemli yer tutmaktadır. Örneğin Qi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, emme manifoldunun silindir içi akış üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Emme portunda hacimsel verimi aynı seviyede tutarken küçük bir değişiklik yaparak girdap oranını artırmışlar, yeni tasarımda takla ve yakıt buharlaşmasında %20 artış olduğunu yaptıkları simülasyonlar ile gözlemlemişlerdir [32].

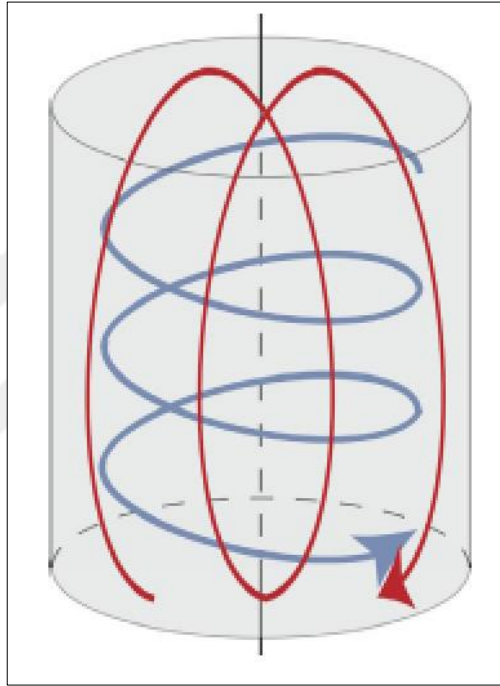
Kent ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2 farklı emme portu açısında ve 4 farklı hava emiş supap yüksekliği için lazer doppler hız ölçeri ile ölçümler almış ve oluşan girdap derecesi ve sürelerinin yanma üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Deneysel bulgular ışığında ideal emme portu açısı için supap yüksekliğinin uzunluk ölçeğindeki değişikliklerin türbülanslı hızın yayılması üzerindeki etkisine ilişkin kavramsal bir model önerisi getirmişlerdir [33].

Mandloi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada emme manifoldu dizaynı için bir tasarım optimizasyon çalışması gerçekleştirmişler. Temel amaç olarak efektif akış alanını maksimize etmek olarak belirlemişlerdir. Tasarım parametreleri olarak emme manifoldu üzerindeki eğrinin açısı, uzunluğu, çapı benzeri parametreleri dikkate almış ve bir optimizasyon çalışması yaparak en iyi tasarıma ulaşmayı hedeflemişlerdir [34].

Bunlar gibi yapılmış çalışmalar göstermektedir ki, emme manifoldu tasarımının girdap oluşumu ve yanma üzerindeki etkisi önemlidir. Emme manifoldu tasarım optimizasyon çalışmaları bu tezin konusu haricinde olup ayrı çalışmalar olarak araştırmacılar tarafından yürütülmektedir.

### 3.3. Akışkanlar Dinamiği ve Girdap Hareketi

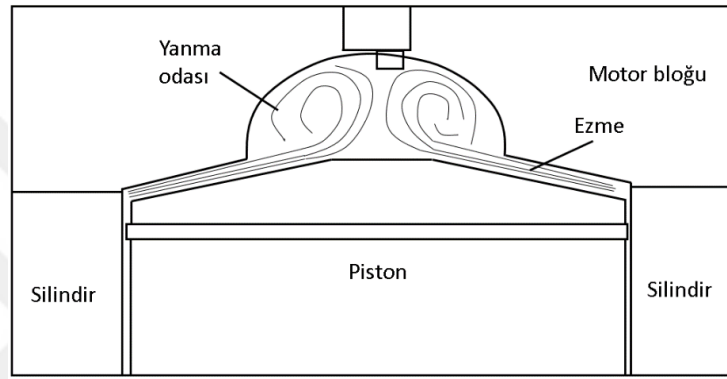
Havanın silindir içerisindeki hareketleri incelenecek olursa, 3 farklı akış yapısı oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bunlar; girdap (swirl), takla (tumble) ve ezme (squish)'dir. Girdap hareketi silindir eksenine etrafında akışkanın dönel hareketine, takla hareketi ise silindir eksenine dik yönde dönel harekete tekabül etmektedir. Şekil 3.4' te görülen mavi hat girdap hareketini, kırmızı hat ise takla hareketini temsil etmektedir [35].



Şekil 3.4. Silindir içi girdap ve takla akışları [11]

Ezme hareketi, normal ezme hareketi ve tersine ezme hareketi olarak iki türdür. Ezme hareketi, sıkıştırma stroğunun sonunda pistonun üst ölü noktaya ulaşması sırasında piston boşluğunun dış kenarına yakın bölgede çevresel olarak gerçekleşir. Sıkıştırma stroğu sonunda, bu büyük ölçekli akışlar küçük ölçekli girdaplara ayrılır ve türbülans seviyesi artar. Bu nedenle ateşlemeden önce daha homojen hava-yakıt karışımı elde edilir. Havanın ezme hareketi silindir içinde girdap ve takla hareketlerinin oluşmasına da sebep olur. Şekil 3.5' te ezme hareketi şematik olarak gösterilmiştir. Tersine ezme hareketi ise, piston üst ölü noktaya ulaşmış ve ters yöne gitmeye başladığı anda oluşur. Diğer yöne doğru bir girdap oluşturur.

Girdap hareketi, sıkıştırma işleminde de devam eden toplu bir akış yapısı yakıt enjekte edilirken de devam eder. Girdap hareketi, sıkıştırma ateşlemeli dizel motorlarda ve direkt enjeksiyonlu buji ateşlemeli benzinli motorlarda görülen akış yapısıdır. Dizel motorlarda özellikle direkt enjeksiyonlu sistemlerde türbülans çoğu zaman yakıt spreyi tarafından üretilmektedir. Motor üreticileri, her bir motor tipleri için farklı yanma odası tasarım parametrelerine sahip olmasına rağmen silindir içerisindeki yanmayı daha uniform hale getirmek için silindir içerisine sevk edilen taze dolgu havasına girdap oranı sağlaması gerekmektedir



Şekil 3.5. Silindir içi ezme akış hareketi

Dizel motorlarda karakteristik silindir içi akış değerlerinde iki karakteristik değer kullanılmaktadır. Bunlardan biri girdap oranı ( $R_s$ ), diğeri ise türbülans kinetik enerjisidir (TKE). Bu değerlerin yüksekliği sayesinde hava yakıt karışımının daha homojen oluşması, düşük yakıt püskürtme basınçları ile birlikte bile sağlanabilmektedir. Fakat bu değerlerin aşırı yüksekliği yanma odasında termal kayıpları arttırmaktadır [35]. Girdap oranı aşağıdaki Denklem (3.6)' deki gibi ifade edilmektedir;

$$R_s = \frac{\omega_d}{\omega_m} = \frac{w_d}{2\pi N} \quad (3.6)$$

Burada  $w_d$  dönel akışın hızını,  $N$  ise krank mili hızını ifade etmektedir.

Birçok deneysel çalışma kapsamında, hava emiş stroğu boyunca oluşan akışın öneminin ortaya konması amacıyla optik olarak gözlenebilen motorlar ile çalışmalar yürütülmüştür. Girdap yoğunluğu ve kütleli debi gibi bütünleşik özellikler uzun zamandır araştırılmaktadır. Optik olarak gözlemlenebilen motorlar ile silindir içerisine müdahale etmeden silindir içerisinden hız ölçümleri alınabilir olmuştur. Lazer doppler

hız ölçeri (LDHÖ), Partikül görüntülemeli hız ölçeri (PGHÖ) gibi yöntemler silindirik içi akışlar için kullanılan optik yöntemlerdir [35].

### 3.3.1. Girdap oranı ve ölçüm metotları, hesaplama yöntemleri

Farklı uzmanlar tarafından konvansiyonel girdap ölçmek amacıyla farklı metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları;

- FEV Swirl metodu
- AVL Paddle Wheel metodu
- Ricardo Impulse Swirl Meter
- HWA
- LDV

FEV girdap metoduna göre girdap oranı sayısı, boyutsuz akış olup basınç düşümü, ortam basınç ve sıcaklığından bağımsızdır ve girdap katsayısı formülü Denklem (3.7)'de aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$D = \frac{M \cdot R_{cyl}}{\rho_{cyl} \cdot V_{cyl}^2} = \frac{M \cdot R_{cyl} \cdot \rho_{cyl}}{\dot{m}^2} \quad (3.7)$$

Bu denklemde,

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

Silindir için girdap akışı şematik olarak Şekil 3.6' de gösterilmektedir.

FEV girdap metoduna göre 2. önemli parametre ise akış katsayısıdır;

$$\alpha_k = \frac{\dot{m}_{ölçülen}}{\dot{m}_{teorik}} \quad (3.8)$$

$\dot{m}_{teorik}$  aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$\dot{m}_{teorik} = A_k * \rho_s * C_s \quad (3.9)$$

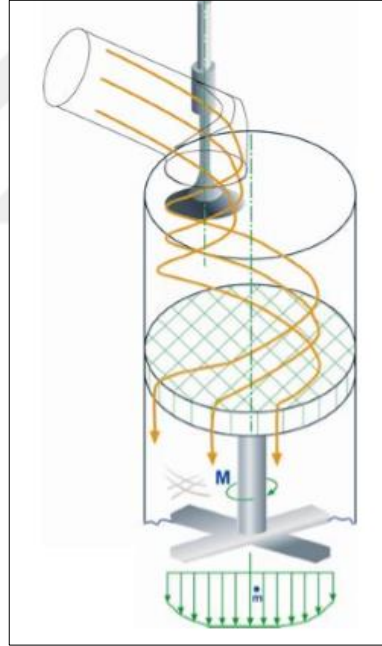
Bu denklemdaki  $A_k$  motor silindir kesit alanı,  $\rho_s$  izentropik yoğunluk,  $C_s$  ise izentropik hızdır.

$C_s$  ise izentropik hız aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$C_s = \sqrt{\frac{2 * K}{K-1} * R * T * \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}} \quad (3.10)$$

$\rho_s$  izentropik yoğunluk ise aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$\rho_s = \frac{p_1}{R * T} * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (3.11)$$



Şekil 3.6. Silindir içi girdap akış ölçüm düzeneği [36]

#### **4. DENEYSEL ARAŞTIRMA TEKNİKLERİ**

İçten yanmalı motorların performans incelemeleri için, deneysel birçok teknik kullanılabilir. Performans inceleme ve doğrulama amacıyla kullanılacak sonuçların, doğru bir şekilde ve detaylı olarak toplanması gerekmektedir. İlk olarak ise, kullanılan test cihazının kalibrasyonundan, deney yönteminin tekrarlanabilirliğinden ve ölçüm kalitesinden emin olunmalıdır.

##### **4.1 Girdap Oranı Ölçüm Teknikleri**

Dizel motorların içerisinde gerçekleşen girdap hareketinin incelenmesi için günümüzde kullanılan ölçüm teknikleri; Lazer Doppler Hız Ölçeri (LDHÖ), Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçeri (PGHÖ) ve Sıcak Telli Anemometre (STA)'dir. Lazer doppler hız ölçeri ve parçacık görüntülemeli hız ölçeri yöntemleri için kullanılan teknik, görüntüleme olması nedeniyle test motorlarının optik olarak ulaşılabilir şekilde şeffaf malzemelerle dizayn edilmesi ve üretilmesi zorunludur. Bu sebeple uygulaması oldukça pahalı yöntemlerdir. Bu gerçeklik, zaman içerisinde farklı girdap oranı ölçüm yöntemlerinin oluşturulmasını ve geliştirilmesine neden olmuştur. FEV, AVL ve Ricardo gibi mühendislik firmaları sürekli akışlı durumda hassas olarak girdap oranı ölçümü yapacak şekilde kendi yöntemlerini geliştirmiş ve test düzeneklerini tasarlamışlardır.

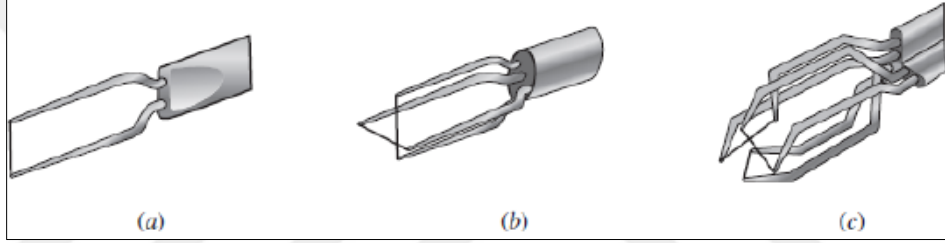
##### **4.1.1 Sıcak telli anemometre**

Sıcak telli anemometre (hız ölçeri), akışkan hızı ölçülmek istenen birçok endüstri ve uygulamada kullanılmaktadır. Termal anemometreler elektrikle ısıtılan sensöre sahiptir ve akış hızını ölçmek için termal etkiyi kullanır. Ortam sıcaklığından yüksek bir sıcaklığa elektrik ile ısıtılmış çok ince bir tel (birkaç mikrometre mertebesinde) kullanılır. Telin üzerinden geçen hava teli soğutur. Telin metal elektrik direnci (metalin sıcaklığına bağlı olarak tungsten sıcak teller için uygun bir seçenek oluşturmaktadır), tel direnci ve akış hızı arasındaki bir ilişki ile elde edilir [37].

Termal anemometrelerin aşırı derecede küçük sensörleri vardır ve dolayısıyla akışa kayda değer bir rahatsızlık vermeksizin akışın herhangi bir noktasındaki anlık hızı ölçmek için kullanılabilir. Saniyede birkaç santimetreden, yüzlerce metreye kadar geniş bir aralıkta sıvı ve gazlardaki hızları ölçebilir [37].

Termal anemometreye, sensörü tel ise sıcak-tel anemometresi denilmektedir. Sensörü, çoğunlukla çapı 50  $\mu\text{m}$  civarında nispeten kalın bir seramik desteğe monte edilmiş ince metal film ise (kalınlığı 0.1  $\mu\text{m}$ 'den az) sıcak-film anemometresi adını alır.

(a) Bir-, (b) iki-, (c) üç-boyutlu hız bileşenlerini aynı anda ölçmede kullanılan tekli, ikili ve üçlü sensörü olan termal anemometre problemleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Termal anemometre problemleri [37]

Sıcak telli anemometrenin sabit akım yöntemiyle (CCA), sabit voltaj yöntemiyle (CVA) ve sabit sıcaklık yöntemiyle (CTA) çalışanlar olmak üzere üç çeşidi bulunmaktadır. Bu anemometrelerden voltaj çıkışı, sabit bir spesifik çıkış değişkeni (akım, gerilim veya sıcaklık) korumaya çalışırken cihazın içindeki bir çeşit devrenin sonucudur.

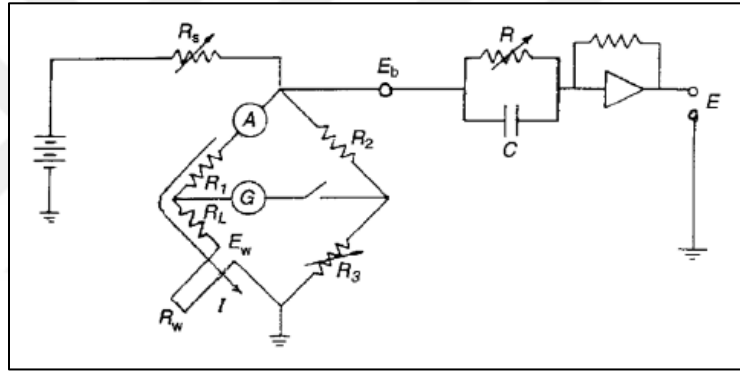
CTA kullanılarak herhangi bir anda ve noktada akışa ait ortalama hız, çalkantı hızları, türbülans yoğunluğu, oto-korelasyon ve güç spektrumu (power spectrum) alınabilir. CTA'nın diğer ölçüm sistemlerine göre bazı üstün yönleri şu şekilde sıralanabilir:

- Birkaç cm/s'den ses-üstü hızlara kadar değişen hız aralıklarında ölçüm yapabilir.
- Çok yüksek frekanslara kadar çıkarak yüksek çözünürlüğe imkân verir.
- Aynı anda hızın üç bileşeni de eş-zamanlı olarak elde edilebilir [38].



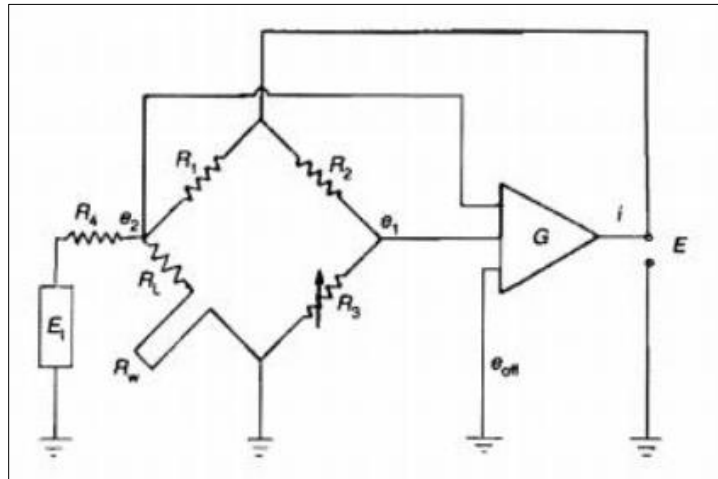
Sabit akım yönteminde (CCA), Algılama telinden sabit bir akım geçirilir ve bu nedenle tel ısıtılır. Yani, köprü devresi boyunca voltaj sabit tutulur. Akış nedeniyle, telden sıvıya ısı transferi gerçekleşir ve böylece telin sıcaklığı düşer, telin direncinde bir değişikliğe neden olur. Bu nedenle, başlangıçta sıfır konumunda olan galvanometre sapar ve galvanometrenin bu sapması, akış hızının bir ölçüsünü verir. Sabit Akım Anemometresi (CCA) daha yüksek frekans cevabına sahip olsa da az dezavantajı vardır. Bu yöntem zor bir yöntemdir, çünkü sabit sıcaklık anemometresi kalibre edildiği gibi kullanılır. Kalibrasyon bu durumda dinamikken CCA cihazlarında sabit sıcaklıkta kalibre edilir ve sabit akım modunda kullanılır. Sabit akım modunda, hız çok küçükse, tel kritik ısı akısı nedeniyle yanarak yok edilebilir [39].

Sabit Akım (CC) devresi ile birlikte köprü düzenlemesi Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tipik bir CC devresi [40]

Sabit Sıcaklık Anemometre (CTA) devresi ile birlikte köprü düzenlemesi Şekil 4.3' te gösterilmiştir. Filament telinin sıcaklığı bu düzenlemede sabit tutulur.



Şekil 4.3. Tipik bir CT devresi [40]

Bu devre, bir Op-Amp (operasyonel amplifikatör) ve ayarlanabilir bir direnç ile Wheatstone köprüsüdür. Kablodan geçen bir akım onu ısıtır. Üzerinden geçen akış nedeniyle, algılama telinden konvektif ısı transferi gerçekleşir ve bu, sıcaklığı ve dolayısıyla telin direncini azaltır. Bu yöntemdeki prensip, sıcaklığı ve dolayısıyla ısıtılan telin direncini sabit bir seviyede tutmaktır. Bu nedenle, soğutma etkisi ile birlikte, ısıtılan telden geçen akım, algılama telinin başlangıç direncine ve sıcaklığına sahip olmasını sağlamak için servo amplifikatör kullanılarak arttırılır. Günümüzde, CT yöntemi sıvı akış ölçümleri için standart elektronik sistem haline gelmiştir [39].

#### 4.1.2. Lazer doppler hız ölçeri (LDHÖ)

Lazer doppler hız ölçümü temel olarak bir akış alanının anlık hızını ölçmek için kullanılan tekniklerden biridir. Gazlarda ve sıvılarda akışkan dinamiği araştırmaları için yaygın olarak kabul gören bir araçtır ve otuz yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Akış hızı hakkında bilgi veren köklü bir tekniktir. Müdahalesiz ilkesi ve yön hassasiyeti, akışı ters çeviren, kimyasal olarak reaksiyona giren veya yüksek sıcaklık ortamları ve fiziksel sensörlerin kullanımının zor veya imkânsız olduğu dönen makineler için çok uygun hale getirir.

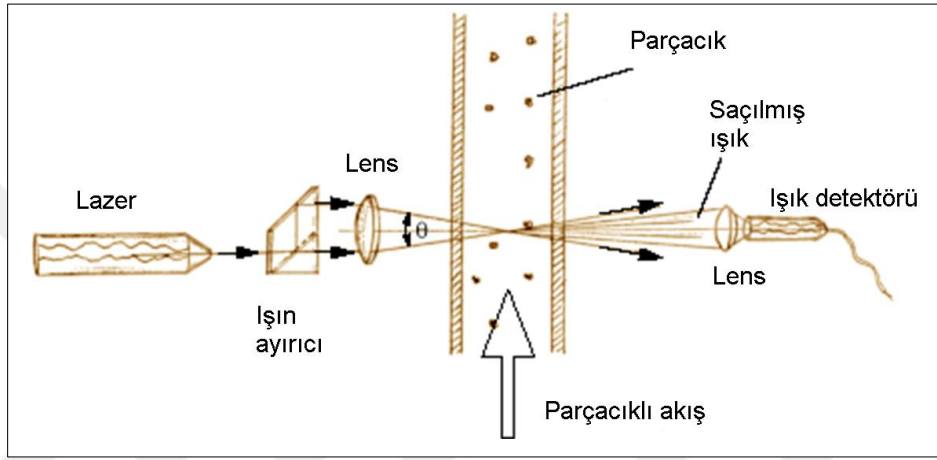
Lazer doppler hız ölçüm metodu teknik yeterlilik ve özellikleri kapsamında aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır [41].

- Laminer ve türbülanslı akışlar
- Aerodinamik üzerine araştırmalar
- Süpersonik akışlar
- Türbinler, otomotiv vb.
- Sıvı akışlar
- Yüzey hızı ve titreşim ölçümü
- Sıcak ortamlar (alevler, plazma vb.)
- Parçacıkların hızı

Bu teknik sıcak telli anemometre gibi akış alanına müdahale etmez. Lazer doppler hız ölçümü tekniği ile her üç hız bileşeni de ölçülebilmektedir. Çalışma prensibi olarak lazer doppler hız ölçer, ölçüm yapılacak akış alanına tek renkli bir lazer ışığı gönderir ve yansıyan radyasyonu toplar. Akışta izleyici partiküller gerektirir. Doppler etkisine

göre, yansıyan radyasyonun dalga boyundaki değişiklik, hız ölçümü yapılacak akışın bağıl hızının bir fonksiyonudur. Böylelikle nesnenin hızı, orjinal ve yansıyan sinyalleri üst üste bindirerek (yani bir girişim saçak modeli oluşturarak) yansıyan lazer ışığının dalga boyundaki değişiklik ölçülerek elde edilebilir. Bu uygulama, lazer doppler hız ölçümünün temelini oluşturmaktadır [42].

Lazer doppler optik sistemi şematik gösterim olarak aşağıdaki Şekil4.4' te gösterilmektedir.



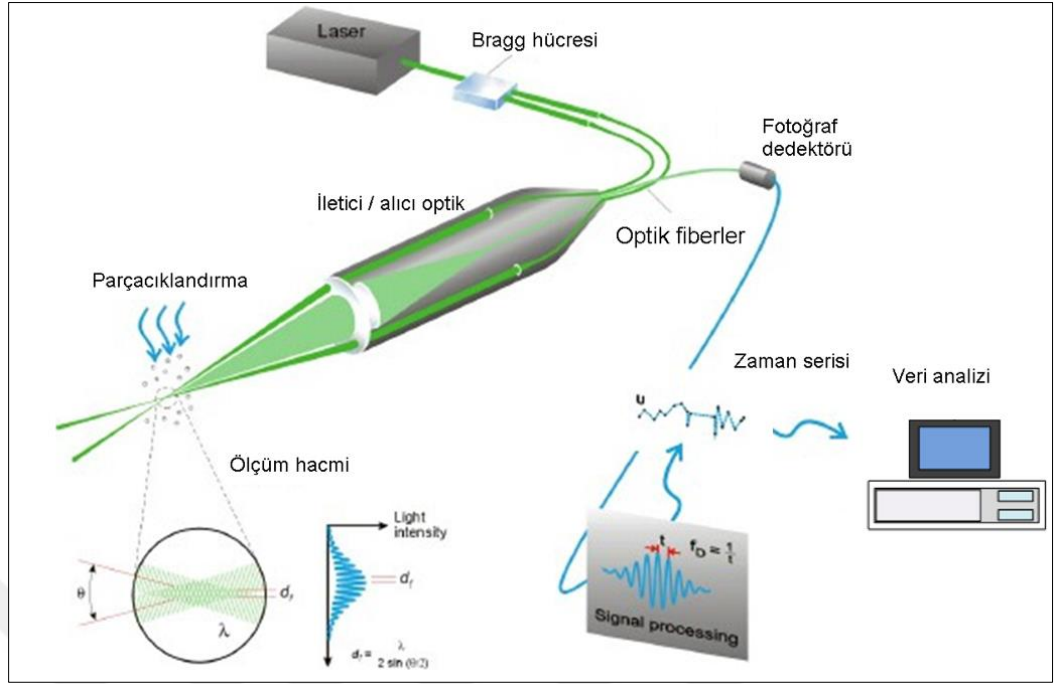
Şekil 4.4. Lazer doppler optik sistemi [42]

Lazer doppler hız ölçerinin temel yapısı şunlardan oluşmaktadır;

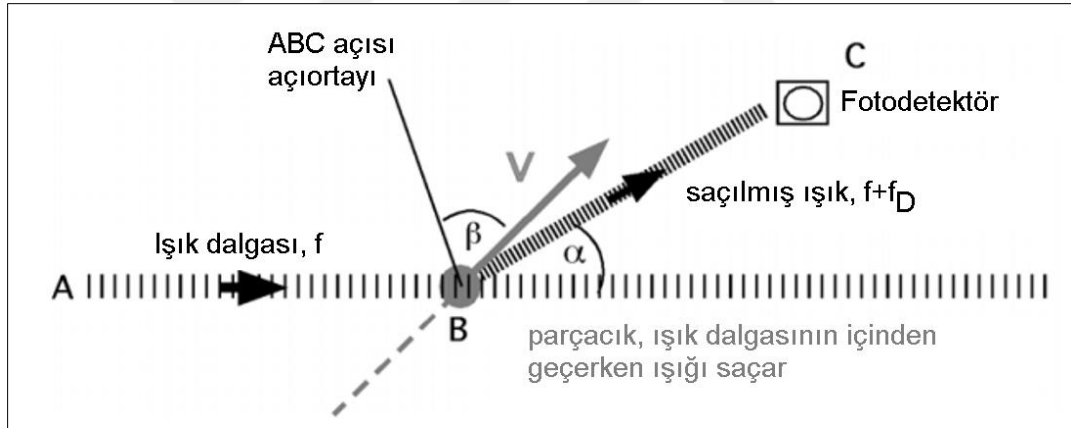
- Sürekli dalga lazeri,
- Bir ışın ayırıcı ve odaklama lensi dahil olmak üzere iletici optikler,
- Odaklama merceği, parazit filtresi ve fotodetektörden oluşan optik alıcı,
- Bir sinyal düzenleyici ve bir sinyal işlemcisi.

Gelişmiş sistemler, çapraz sistemleri ve açısal kodlayıcıları içerebilmektedir. Genellikle ışın ayırıcı olarak kullanılan Bragg hücresi titreşimli bir piezo kristali eklenmiş bir cam kristaldir. Titreşim, optik bir ızgara gibi davranan akustik dalgalar üretir. Temel prensipleri aşağıdaki Şekil 4.5' te gösterilmektedir.

Doppler kayması,  $f_D$ , parçacık hareketinin hızına ( $V$ ), parçacığın yönüne, ışığın dalga boyu ( $\lambda$ )'ya ve gözlemcinin yönüne bağlıdır. Gözlemcinin yönelimi, gelen ışık dalgası ile fotodetektör arasındaki  $\alpha$  açısı ile tanımlanır. Parçacık hareketinin yönü, hız vektörü ile ABC'nin açıortayı arasındaki açı olan  $\beta$  ile tanımlanır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.5. Lazer doppler prensipleri [43]



Şekil 4.6. Lazer doppler çalışma mekanizması [44]

Bir parçacık,  $f$  frekanslı bir ışık dalgası boyunca hareket eder ve ışığı her yöne dağıtır. Fotodetektör tarafından toplanan dağınık ışık,  $f_D$  tarafından kaydırılacaktır [44].

Lazer doppler ölçüm metodunun başlıca avantajları;

- Ölçüm sırasında akışı kesintiye uğratmaz,
- Ölçüm hızı doğrudan ölçerek yapılır,
- Ölçüm alanının hacmi çok küçük olabilir,
- Yüksek ölçüde kesinliğe sahiptir,
- Gazların ve sıvıların akışını ölçmek için kullanılabilir.

Buna karşın dezavantajları;

- Tekniğin birincil dezavantajı, sıvının kendisinin hızından ziyade mikron boyutundaki parçacıkların hızlarının ölçülmesidir,
- Parçacıklar akışkan hareketlerini takip etmek için yeterince küçük değilse veya akışta eşit olarak dağılmadıysa, ölçüm hataları ortaya çıkabilir,
- Parçacık saçılmış ışığın yoğunluğuna bağlı olarak, yeterince yüksek olmadığında, fotodedektör çıktısının sinyal kalitesinde de hatalar meydana gelebilir,
- Lazer kaynağı, hedef yüzey ve fotodetektör (alıcı) arasında yeterli şeffaflık gereklidir (şeffaf kanallar gerektirir),
- Ölçümdeki doğruluk, yayılan ve yansıyan ışınların hizalanmasına büyük ölçüde bağlıdır,
- Titreşimlere karşı hassastır.

Sonuç olarak; Lazer doppler hız ölçüm metodu, çok farklı akış şartlarında kullanılabilen, yüksek doğruluklu ölçümler yapabilen ve veri üretebilen, hassas ve yaygın bir kullanım alanı olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanıma sahiptir.

#### **4.1.3. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) düzeneği**

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodu temel anlamda görüntü işleme teknolojisidir. Temel olarak özellikle akışkan dinamiği çalışma ve araştırmalarının yanında diğer birçok bilim alanında da kullanılan parçacık veya parçacık gruplarının izlenmesi tekniğidir. Birçok uygulama alanında akışkanlar dinamiği hareketlerini tanımlayabilmek için akış içindeki parçacıkların zaman içindeki görüntülerini izleme, kaydetme ve yorumlama ihtiyacı olmuştur. Bu işlem bazen tek kamera ile bazen de birden fazla kamera ile farklı açılardan yapılan çekimler ile gerçekleştirilmiştir.

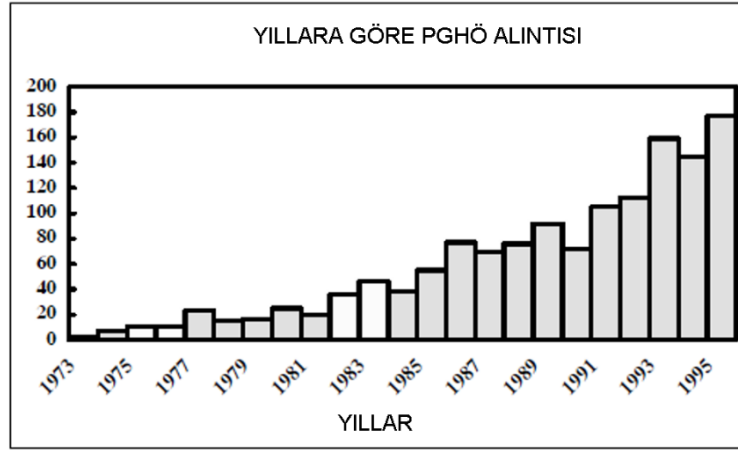
Tekniğin bibliyografyası incelendiğinde zaman içinde gelişim gösterdiği ve bu gelişim sürecinde farklı isimler altında adlandırıldığı görülmüştür. Partikül çizgi hızölçeri (PSV), lazer benek hız ölçeri (LSV), partikül görüntü hız ölçeri ve partikül izleme hız ölçeri bunlardan bazılarıdır.

Gerçekleştirilen en eski kantitatif parçacık temelli ölçüm, J.L. Naylor ve B.A. Frazier'in gerçekleştirdikleri "Suya batırılmış bir modelden geçen girdap akışının

geçmişini kinematografik fotoğraf yardımıyla araştırmaya yönelik deneysel bir yöntem üzerine ön rapor” şeklindedir. 1917 yılında manuel olarak bir sinematik filmin ardışık karelerine parçacık görüntüleri kaydedilerek gerçekleştirmiştir [45].

Literatürdeki parçacık görüntülemeli hız ölçüm ile ilgili yayınlar 1973 yılında başlamış ve sonraki yıllar hızla artmıştır (Şekil 4.7).

1970’li yıllarda yayınlanan ilk yayınlar arasında, hidrodinamik akış görüntülemesi [46], baroklinik dalgaların incelenmesi [47], bulut hareketlerinin analizi [48] gibi yapılan çalışmalar sayılabilir. Kısa zaman sonra 1980’li yıllarda gazlarda ve sıvılarda düzlemsel akış alanlarını ölçmek amacıyla bir lazer ışığı düzlemi ile akışkan dinamiği alanına görüntü kaydı yapılmıştır [49-51]. Bu çalışmalardan Meynart tarafından yapılan çalışmada bir fotoğraf filmi üzerinde görüntüler oluşturulmuş, kaydedilmiş, ardından sıvı hareketi için otomatik analiz için bir bilgisayara aktarılmıştır. Bu çalışma aynı anda çok fazla sayıda noktada akışkan hızı vektörlerini ölçme yeteneği ve akışa müdahaleci olmayan karakteri nedeniyle akışkanlar dinamiği topluluğu içinde büyük ilgi görmüştür.

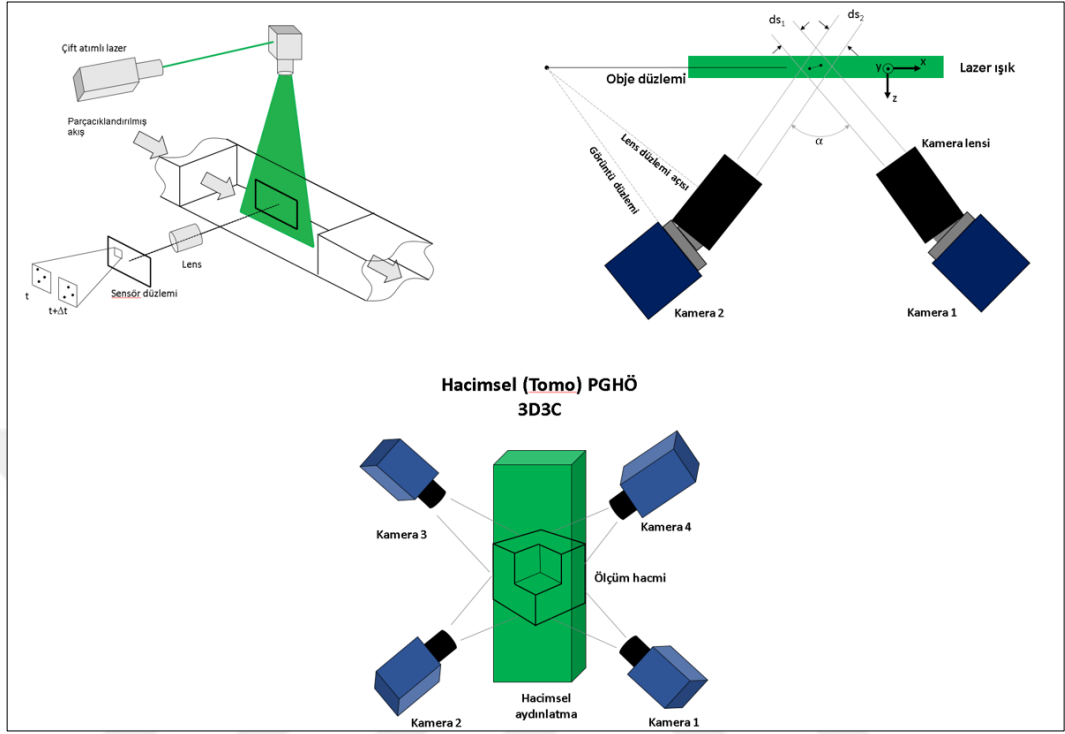


Şekil 4.7. Yıllık erişilebilir yayın sayısı: 1973-1995 [45]

90'lı yıllarda, hızlı işlem için ucuz, ancak güçlü kişisel bilgisayarlarla birlikte iki görüntüyü hızlı kaydedebilen dijital kameraların varlığı ile PGHÖ'nün yaygın kullanımı başlamıştır. Görüntü kayıt sistemlerinin ve algoritmaların gelişimi farklı araştırmacıların tekniği ilerletmelerini sağlamıştır.

Özellikle donanım bileşenlerinin teknolojik ilerlemesiyle birlikte PGHÖ'nün gelişimi güçlü bir şekilde bağlantılı olmuştur. Günümüzde güçlü lazerler, yüksek hızlı

lazerlerin tekrarlama oranı, görüntü çiftlerini kısa sürede kaydeden yüksek hızlı kameralar geliştirilmiştir.



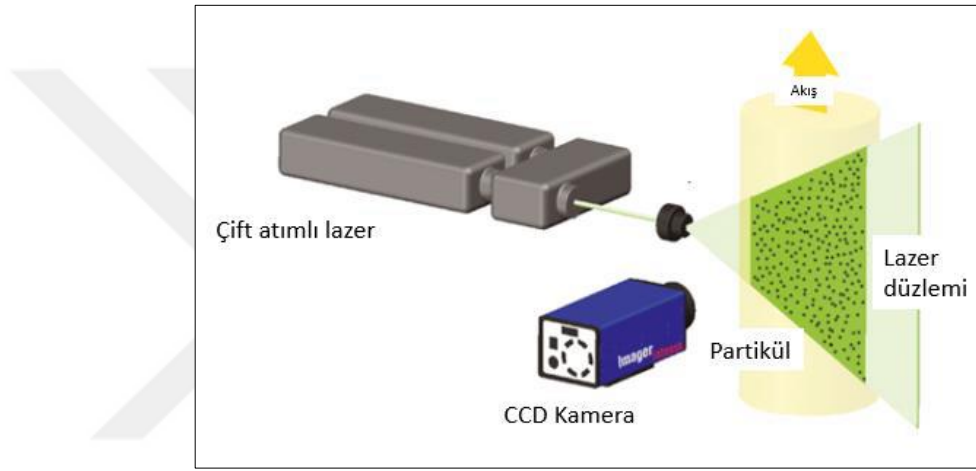
Şekil 4.8. 2D 2C, 2D 3C, 3D 3C PGHÖ yöntemleri [58]

Ölçülen hız bileşenlerine ve ölçüm alanına göre parçacık görüntülemeli hız ölçüm metotları şu şekildedir;

- 2D 2C: iki bileşenli düzlemsel PGHÖ, görüntülerin kaydedilmesi ve iki hız bileşeninin sırayla (2C) ölçülmesi için lazer tabakasına normal tek bir kamera (2D ölçüm hacmi) kullanılır. (Şekil4.8)
- 2D 3C: İki kamera farklı gözlem açılarından kullanarak üçüncü (düzlem dışı) hız bileşeni hakkında bilgi alınması ve istenen hız ölçümünün gerçekleştirilmesidir. Bu tekniğe stereoskopik PGHÖ denilmektedir, doksanlı yılların sonlarında tanıtılmıştır [52-54]. (Şekil4.8).
- 3D 3C: 3 boyutlu bir ölçüm alanında üç boyutlu hız alanını ölçmek için Elsinga ve arkadaşları [55]. tarafından tomografik PGHÖ yöntemi önerilmiştir (Şekil 4.8).
- 4D 3C: Zamana bağlı 3 boyutlu hız alanları elde edilmesi, tomografik PGHÖ deneyinin yüksek edinim frekanslı kameralarla yapılması ile mümkün olabilir [56,57] (Şekil 4.8).

#### 4.1.3.1. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) çalışma prensipleri

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü, temel olarak akışkan içindeki taşınan partiküllerin birim zamanda yer değiştirmelerinin ölçülerek akışkanın hızının tayin etme metodudur. Akış içindeki parçacıklar, bir ışık kaynağı olan lazerle çok kısa bir zaman aralığında iki kez lazer atımı ile düzlemsel bir ölçüm alanında aydınlatılır. Parçacıklardan dağılan ışık parçacık görüntülemeli hız ölçümü çeşidine göre bir veya birden fazla yüksek hızlı kameralar ile kaydedilir. 2D düzlemsel bir parçacık görüntülemeli hız ölçümü tipik kurulumu Şekil 4.9’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. 2D Düzlemsel PGHÖ ölçüm sistemi düzeni [59]

Akışkan kinematiği, akışkan hareketinin nasıl tanımlanacağını ve akışanların nasıl aktığını incelemektedir. Hareketi tanımlamanın en bilinen yolu hareket eden partiküllerin tek tek yörüngelerini takip etmektir. Bu hareketi tanımlamada Newton yasaları kullanılmaktadır. Bu sayede partiküllerin nereye gideceğini, birinden diğerine ne kadar momentum veya kinetik enerji geçeceği doğru olarak kestirilebilir. Bu tür bir çalışma; her bir partikülün zamana bağlı konum vektörünün ve hız vektörünün takip edilmesini gerektirir. Bu yöntem akışın Lagrange tanımlaması olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemdeki zorluk, akışkan içinde hareket eden parçacıkların hareketleri ile birlikte sürekli şekil değiştirmeleri, hareket eden parçacıkların kolaylıkla tanımlanması ve ayırt edilememesi, akışın sürekli bir ortam olmasıdır. Lagrange yaklaşımında ölçüm probu akış ile birlikte akım doğrultusunda hareket etmiş olur [60].

Akışkandaki bir parçacığın ivmesi aşağıdaki Denklem (4.1) ile ifade edilmektedir;



$$\vec{a}_{parçacık} = \frac{d\vec{v}_{parçacık}}{dt} \quad (4.1)$$

Parçacığın herhangi bir t anındaki hızı;

$$\vec{V}_{parçacık}(t) = \vec{V}_{parçacık}(x_{parçacık}(t), y_{parçacık}(t), z_{parçacık}(t), t) \quad (4.2)$$

Denklem (4.1)'de yerine konup zamana göre türevi alınırsa;

$$\vec{a}_{parçacık} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x_{parçacık}} \frac{dx_{parçacık}}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y_{parçacık}} \frac{dy_{parçacık}}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z_{parçacık}} \frac{dz_{parçacık}}{dt} \quad (4.3)$$

Parçacık takip edilirken, parçacığın x,y ve z konumlarındaki zamana göre değişim hızları;

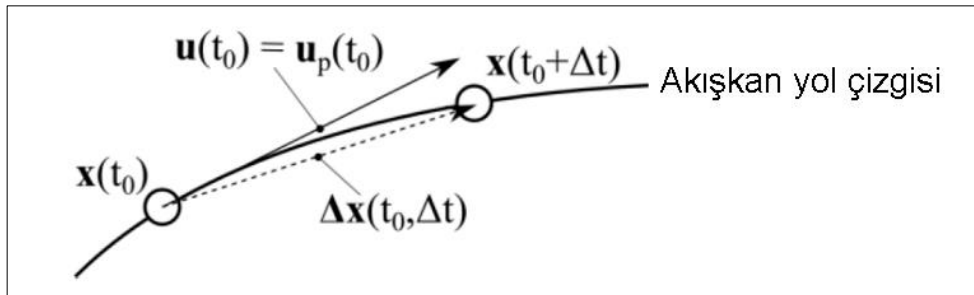
$$\frac{dx_{parçacık}}{dt} = u, \frac{dy_{parçacık}}{dt} = v, \frac{dz_{parçacık}}{dt} = w \quad (4.4)$$

Denklem (4.3)'de yerine konulunca aşağıdaki nihai şeklini alır;

$$\vec{a}_{parçacık}(x, y, z, t) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \quad (4.5)$$

Akışkanın hızı, u (x, t) lazer ışığının iki atımı arasında, parçacığın Δt zamanda yer değiştirmesinin bir fonksiyonu Δx (x,t) olarak dolaylı olarak ölçülür (Şekil 4.10) [61]. Aşağıdaki formül, partikülün yer değiştirmesini belirleyebilmek amacıyla kullanılır;

$$\Delta x(x, t_0, \Delta t) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u_p(x, t) dt \quad (4.6)$$



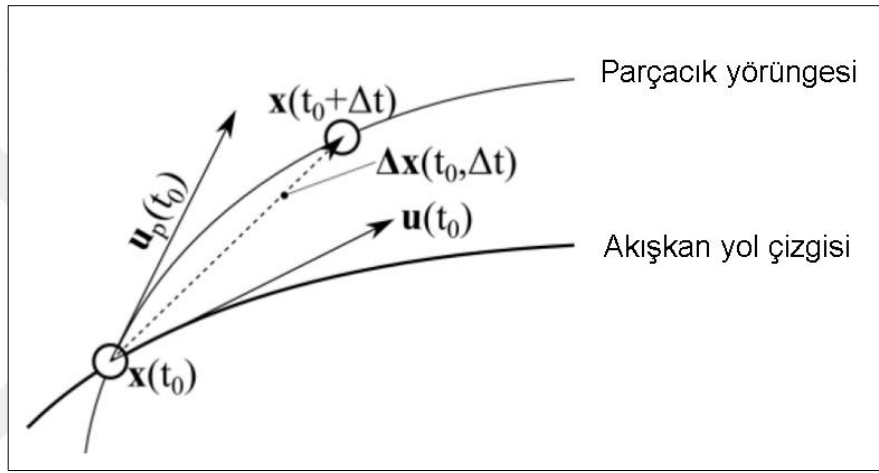
Şekil 4.10. Akışkan içindeki partikülün ideal hareketi [20]

u(x,t) ideal durumda partikülün hızını göstermektedir.  $u_p(x,t)$  ise akışkan içindeki partikülün gerçek hızını göstermektedir. Lazer darbe atımlarının akış ivmesinden Δt

zamanda gelecek olan etkilerinin ihmal edilecek kadar küçük olması gereklidir. Bu durumda parçacık hızı denklemi aşağıdaki şekilde belirtilir;

$$u_p(x, t_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x(x, t_0, \Delta t)}{\Delta t} \cong \frac{\Delta x(x, t_0, \Delta t)}{\Delta t} = \frac{x(t_0 + \Delta t) - x(t_0)}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Gerçekte ise, akışkan içindeki parçacıkların hızının, içinde oldukları akışkanın hızından (kayma hızı) her zaman küçük bir sapması vardır. Bu da akışkan ve içindeki parçacık arasında nispi harekete (genellikle ihmal edilebilir) neden olur (Şekil 4.11) [20].



Şekil 4.11. Akışkan içindeki partikülün gerçek hareketi [20]

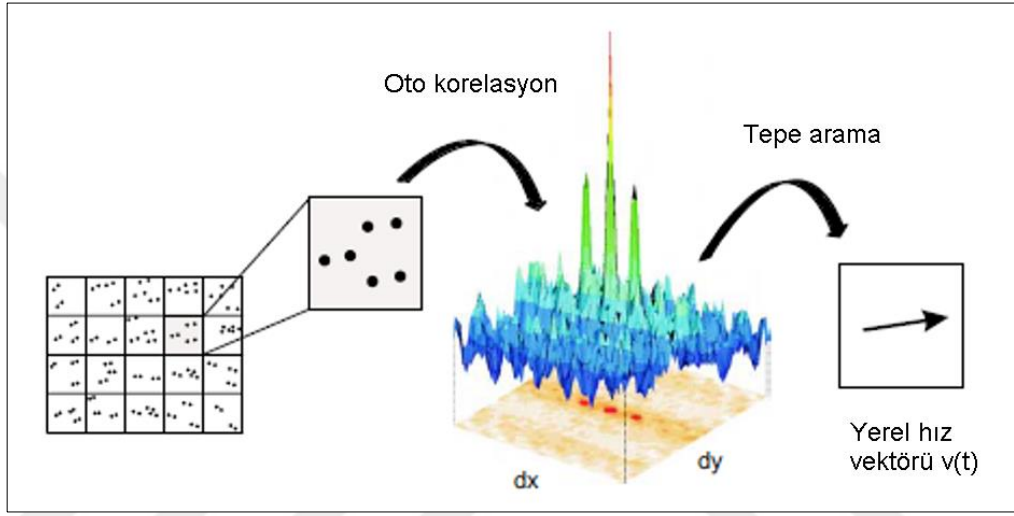
#### 4.1.3.2. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) algoritması

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü temel olarak, lazer atımı kullanılarak kaydedilen görüntülerin arasındaki partiküllerin hareket ettiği mesafenin belirlenmesidir. Görüntü verileri işlenmesi 3 farklı şekilde yapılmaktadır; otomatik korelasyon, çapraz korelasyon ve parçacık izleme. Hangi işleme tekniğinin kullanılacağı, görüntü verilerini kaydetmek için kullanılan donanıma göre seçilir.

Otomatik korelasyon yönteminde tek bir görüntü çerçevesi, birden fazla kere pozlandırılır ve küçük alt bölgelerden oluşan düzenli bir ızgara üzerine işlenir [62]. Tam görüntü, sorgulama pencereleri olarak adlandırılan alt bölümlere ayrılır ve her pencere otomatik korelasyon ile değerlendirilir (Şekil 4.12).

Otomatik korelasyon fonksiyonu, sıfır yer değiştirmeyi gösteren en yüksek merkezi pik etrafında dönele simetrik olan iki özdeş korelasyon piki ile karakterize edilir.

Bu, hangi parçacığın birinci veya ikinci lazer darbesiyle aydınlatıldığını bilmememiz nedeniyle yer değiştirmenin işaretini algılayamadığınız için bir sonuçtur. Bu nedenle, otomatik korelasyondan elde edilen bilgiler belirsizdir ve gözlemlenen akışla ilgili bazı önsel bilgiler kesin olmaması nedeniyle kullanılamaz. Ayrıca çok küçük yer değiştirmelerin tespiti de bir sorundur çünkü bu durumda korelasyon zirveleri merkezi zirveye çok yakındır. Çapraz korelasyon ile karşılaştırıldığında, oto korelasyon zirveleri önemli ölçüde daha küçüktür.



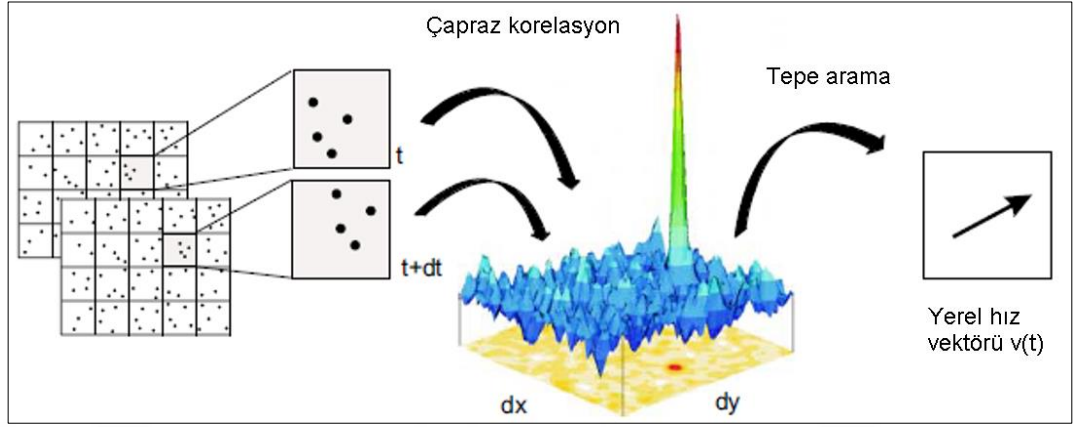
Şekil 4.12. Otomatik Korelasyon kullanarak PGHÖ kayıtlarının değerlendirilmesi [63]

Çapraz korelasyonda ise; belirli bir  $dt$  zaman dilimi için parçacık görüntülemeli hız ölçümü yapılırken parçacık görüntüleri çiftler olarak saklanır. Kaydedilen bu parçacık görüntü çiftleri hız vektör alanına dönüştürülürken ilk olarak görüntüler sorgulama pencereleri veya bölgelerine küçük bölümler halinde dönüştürülür. 1 nolu görüntüdeki her bir sorgulama bölgesinin 2 nolu görüntüdeki karşılık gelen sorgulama bölgesi kullanılarak çapraz korelasyon elde edilir. Dolayısıyla parçacıkların o bölge içindeki en olası yer değiştirmesi elde edilir. Parçacık görüntülemeli hız ölçümü için çapraz korelasyon aşağıdaki denklem ile elde edilir;

$$C(r, s) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N IA_1(i, j) IA_2(i + r, j + s) \quad (4.8)$$

Burada,  $IA_1$  ve  $IA_2$ , 1 ve 2 nolu sorgulama bölgeleri için yoğunluk dizileri,  $M$  ve  $N$  ise piksel cinsinden sorgulama bölgesi boyutunu ifade etmektedir.

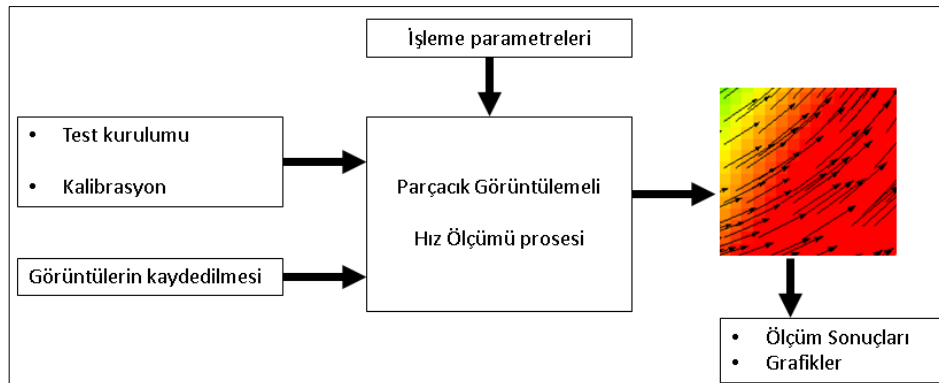
Parçacık görüntü yer değiştirmesinin değerlendirilmesi  $C(r,s)$  üzerine uygulanan bir optimizasyon işlemidir. Şekil 4.13’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Çapraz korelasyon kullanılarak PGHÖ kayıtlarının değerlendirilmesi [63]

#### 4.1.3.3. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) akış diyagramı

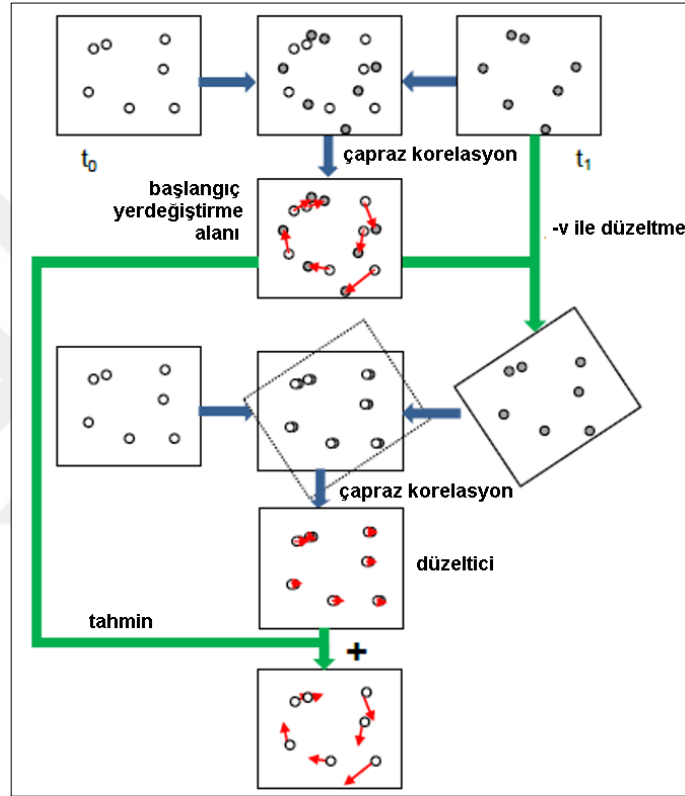
Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodu için akış şeması prensip olarak basittir. Zamanlama, kamera veya kameraların bakış açısı, kalibrasyonu, geometrik kurulum gibi test parametreleri verildiğinde, kameralar tarafından kaydedilen görüntüler, parçacık görüntülemeli hız ölçüm algoritması tarafından daha önce kullanıcı tarafından girilen işlem parametreleri ile işlenir. Bunun sonucunda görüntüler arasında en uygun yer değiştirme alanı hesaplanır ve görüntüler hacimsel veya düzlemsel hız alanını verir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodu akış şeması

Günümüzde, en son teknoloji olan parçacık görüntülemeli hız ölçüm işleme şemaları, yinelemeli (iterative) bir tahmin-düzeltilici yöntem kullanmaktadır. Öncelikle, ilk yer

değiştirme alanı hesaplanır, sonraki yinelemeler genellikle simetrik olan 2 görüntünün bombelenmesini içerecek şekilde hesaplanan tahmini yer değiştirme alanı kullanılarak yapılır. Eğer tahmini alan mükemmel çözüm ise, bu durumda düzeltilmiş iki görüntü mükemmel şekilde örtüşür. Ardından, sıfır olmayan düzeltici bir yer değiştirme alanı tahmin ediciye eklenir. Sayısal kararlılık alanını sağlamak ve hatalı vektörleri kaldırmak için bazı vektör doğrulama ve tahmin edici/düzeltilici filtreler dahil edilir (Şekil 4.15) [21].

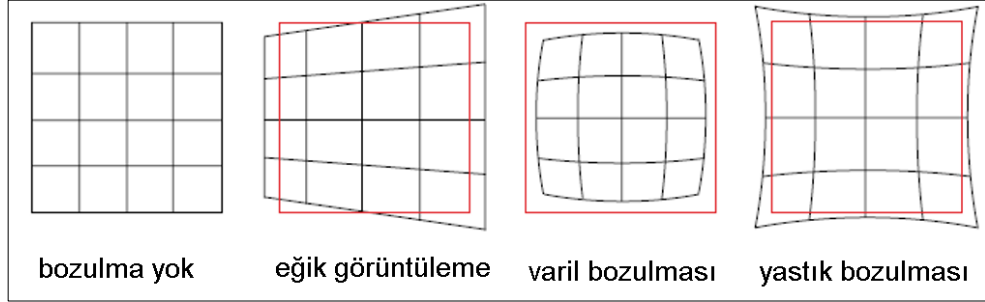


Şekil 4.15. Yinelemeli tahmin-düzeltilici şemasının basitleştirilmiş blok diyagramı [21]

#### 4.1.3.4. Düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümü

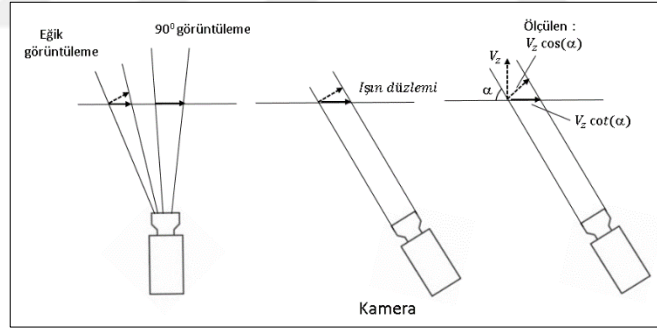
Düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümünde genellikle ideal durumda kamera nesne düzlemine 90 dereceden bakacak şekilde ayarlanmaktadır. Ancak deney düzeneğinde ideal bakış açısı sağlanamayabilir. Bu ideal durumda bile bazen görüntüdeki bozulmayı önlemek mümkün değildir. Bu durumda görüntüde bir düzeltme yapılması gerek olmaktadır. Kaydedilen görüntünün kenarlarında hafif bir bozulma mümkün olabilmektedir. Tipik görüntü bozulmaları Şekil 4.16' da gösterilmektedir. Eğer kamera açısının tam görüntünün orta noktasına 90 derece

olarak ayarlanması durumunda, kameranın nesne düzlemine olan mesafesinden ve büyütme faktörüne bağlı olarak, kamera görüntünün kenarlarına farklı bir açıda (85-89 derece gibi) olabilir.



Şekil 4.16. Tipik görüntü bozulmaları [64]

Deney düzeneğinin fiziksel kısıtlamaları dolayısıyla kameranın görüntüleme açısı 90 dereceden farklı bir açıda olması gerekiyor ise sonuçların doğru hesaplanabilmesi için düzeltme işlemi yapılması gereklidir. Bu işlemdeki temel amaç; lazer ile aydınlatılmış düzlem içindeki gerçek x ve y hızı bileşenlerini bozulmuş görüntü verilerinden kurtarmaktır.



Şekil 4.17. Kamera bakış açısına göre oluşan hata

Lazer düzlemi ve kamera bakış yönü arasındaki açı  $\alpha$  ise aşağıdaki formülde görüldüğü üzere gerçek hız değeri, ölçülen hız değerinin  $\sin(\alpha)$  değerine bölünmesi ile bulunur;

$$V_x(\text{gerçek}) = \frac{V_x(\text{ölçülen})}{\sin(\alpha)} \quad (4.9)$$

Bununla birlikte eğer akış lazer ışık düzlemine dik bir hız bileşenine (z yönünde) sahipse bu bileşen ölçülen x yönündeki hız değerini de ekleyecektir. Ölçüm sadece x yönündeki hız bileşenini değil, aynı zamanda z bileşiminin izdüşümünü de ölçmektedir. Hesaplanan x yönündeki hız değerleri z yönündeki hız bileşeninin bir

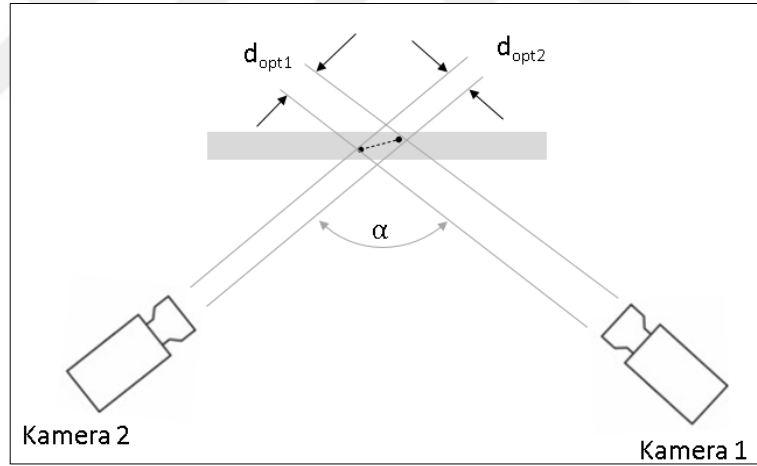
izdüşümü içermektedir. z bileşeninden dolayı  $V_x$ ' teki oluşan hata aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir;

$$\cos(\alpha) \frac{V_z}{\sin(\alpha)} = \cot(\alpha) V_z \quad (4.10)$$

Ölçüm öncesinde x ve/veya y yönünde eğimli herhangi bir kamera görüntüleme pozisyonu için genel amaçlı bir görüntü bozulması kalibrasyonu gerçekleştirilmesi gereklidir.

#### 4.1.3.5. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü

Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü temel anlamda, düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümünde kullanılan tek kameraya ek olarak ikinci bir kamera daha kullanılarak farklı bir görüntüleme ekseninden yapılan ek bir PGHÖ kayıdır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü

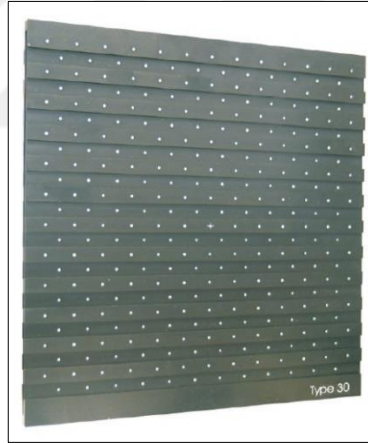
İki kamera kullanılarak iki farklı bakış açısına sahip olunmuş olunur. Bu sayede iki düzlemde hız vektörünün izdüşümleri elde edilebilir. Her iki kameranın görüş yönleri kalibrasyon ile belirlenir. Her iki kameranın yerleşimi bilindiğinden, her üç hız bileşenini de iki projeksiyondan çıkarılır. Stereoskopik PGHÖ kullanılarak üç hız bileşeninin tümü iki boyutlu bir alanda (2D-3C) ölçülür [63].

Kameralar, izlenecek akış alanının ve test laboratuvarının fiziksel özelliklerine bağlı olarak stereoskopik bir PGHÖ sistemini oluşturmak üzere farklı şekillerde düzenlenebilirler. İlgi alanına optik erişim olanaklarına bağlı olarak, kameraları

stereoskopik bir PGHÖ sisteminde düzenlemek için farklı olasılıklar vardır: ileri-geri saçılım, ileri-ileri saçılım, geri-geri saçılım.

Genel olarak ileri-geri saçılım kurulumunun kalibre edilmesi daha kolaydır. Vektör hesaplamasında doğruluğu artıracığından kameralar simetrik olarak düzenlenmelidir. Mümkünse, ışık tabakası, maksimum akış bileşeni düzlem içi olacak şekilde düzenlenmelidir. Her iki kameranın görüş yönleri arasındaki açı tipik olarak yaklaşık 45 derecedir.

Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü her iki kameranın da doğru bir şekilde kalibrasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Eksen dışı görüntüleme için düzeltme, değerlendirmenin önemli bir parçasıdır ve doğru sonuçlar elde etmek için dikkatle yapılmalıdır. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü sistemlerinin kalibrasyonu için iki seviyeli tanımlanmış ayırım işareti olan kalibrasyon plakaları kullanılmaktadır (Şekil 4.19).

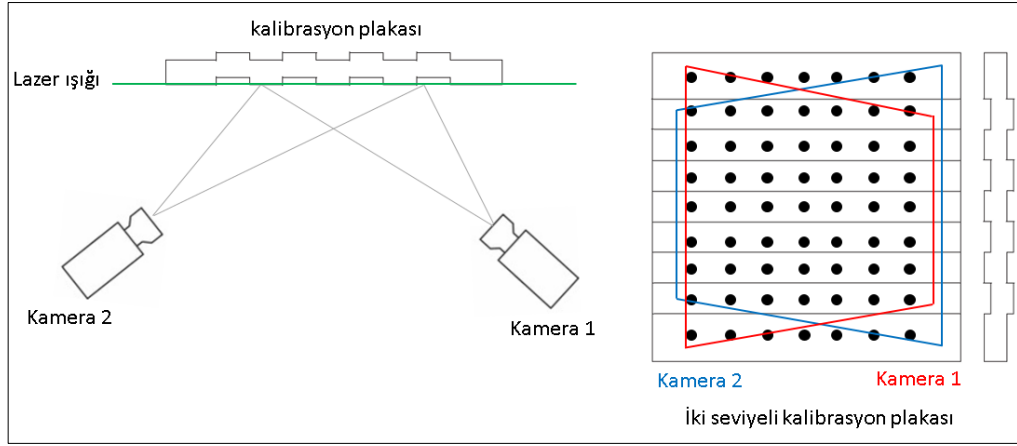


Şekil 4.19. İki seviyeli kalibrasyon plakası

İleri-geri saçılım özelliğindeki stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü sisteminde kameralar Şekil 4.20' de görüldüğü üzere kalibrasyon plakasının ayrı tarafındadırlar.

Akış vektörleri sadece her iki kameranın görüntülerinin üst üste binen alanda hesaplanabilmektedir. Bu nedenle kameralar maksimum örtüşme olacak şekilde ayarlanır. Kalibrasyon plakası lazer ışık düzlemine paralel olmalıdır. Her iki kameranın kalibrasyon düzlemine bakış açısı arasındaki açı değeri  $10^0$ 'den büyük olmalıdır. Tavsiye edilen açı değeri  $30^0$  ila  $45^0$  arasında olmasıdır [63].





Şekil 4.20. İleri-geri saçılım kalibrasyon görüntüsü

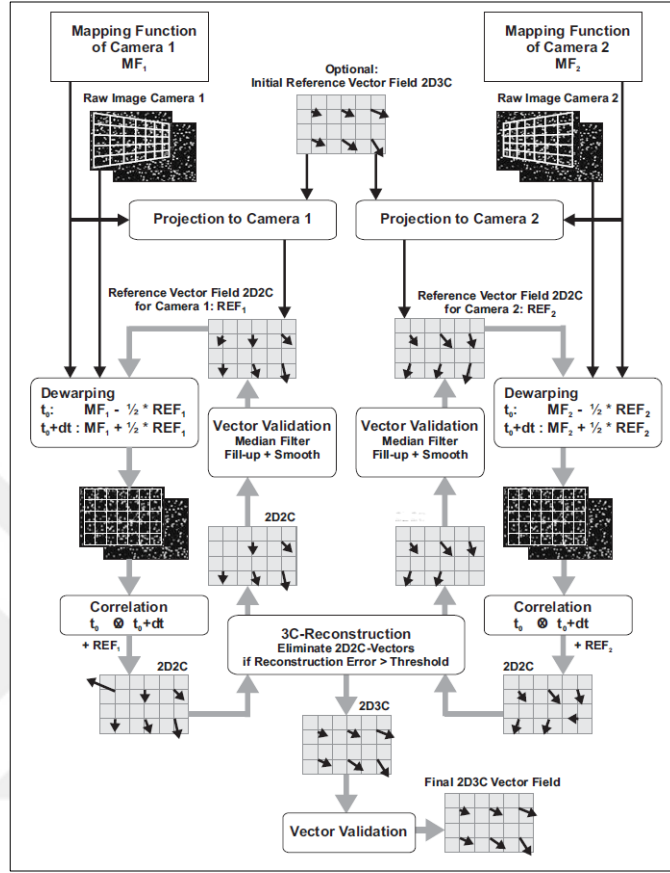
Kalibrasyon prosedürü tamamlandığında, stereoskopik PGHÖ ölçümü yapılabilir. Vektör alanı hesaplaması için PGHÖ parametresi, korelasyon modunun stereo çapraz korelasyona ayarlanması dışında, geleneksel 2D-PGHÖ ile tamamen aynı şekilde çalışmaktadır.

Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü vektör hesaplaması için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Her durumda 2D2C-vektör alanları, stereoskopik yeniden yapılandırma ile bir 2D3C-vektör alanının hesaplandığı her kamera için hesaplanır. Bu çalışmada da tercih edilen yöntemde hesaplanan 2D2C vektörler zaten dünya doğru konumunda hesaplanmıştır ve eşit boyut ve şekle sahip aynı sorgulama penceresinden alınmaktadır.

Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü vektör alanı hesaplamasının akış şeması Şekil 4.21' de gösterilmektedir.

İlk vektör hesaplama geçişi için her kameranın iki karesinin ( $t_0$ ,  $t_0 + dt$ ) düzeltilmesi ve değerlendirilmesi yapılır. Bu işlem zaten dünya koordinat sisteminde doğru konumda vektörler sağlar. Ayrıca, her iki kamera için sorgulama pencerelerinin boyutu ve şekli aynıdır, yani korelasyon, ışık tabakasının sıfır olmayan kalınlığından dolayı etkilerden ayrı olarak aynı parçacıklar üzerinde yapılır. Daha sonra, yeniden yapılandırma hatasının çok büyük olduğu 2C-vektör alanlarındaki karşılık gelen vektörleri kaldırmak için bir ön 3C yeniden yapılandırma yapılır, örneğin 0,5 veya 1 pikselden büyük olarak. Bu, rastgele yönlere sahip iki yanlış vektörün nadiren ilişkilendirildiği için sahte vektörleri çok etkili bir şekilde ortadan kaldırır. İlk geçişin

sonunda, eksik vektörler enterpolasyona tabi tutulur ve vektör alanı sayısal kararlılık için hafifçe yumuşatılır.



Şekil 4.21. Stereo PGHÖ vektör alanı hesaplamasının akış şeması [21]

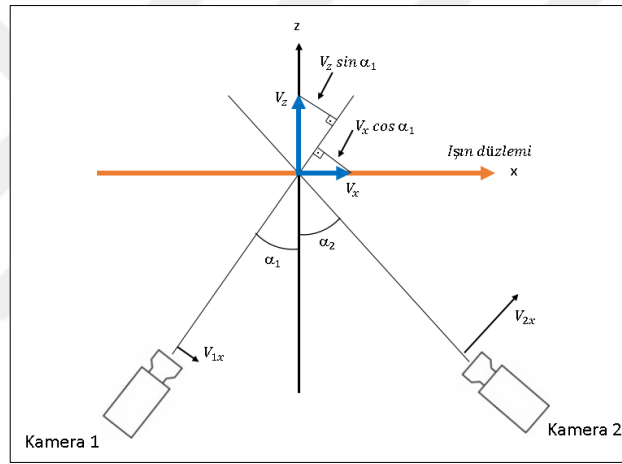
Elde edilen vektör alanı, bir sonraki geçişte sorgulama pencerelerini deforme etmek için bir referans olarak kullanılır. Aslında, her bir sorgulama penceresi ayrı ayrı deforme olmaz, ancak geri yönde yer değiştirmenin yarısı  $t_0$ 'da birinci görüntüye ve diğer yarısı da  $t_0 + dt$ 'de ikinci görüntüye atanan geri yönde yer değiştirmenin yarısı ile aynı anda deforme olur. Görüntü deformasyonu matematiksel olarak pencere deformasyonu ile aynıdır ancak daha az kayan nokta işlemleri gerektirir, çünkü örneğin %75'lik bir örtüşme için aynı bölge, pencere deformasyonu kullanılarak 16 kez deforme olacaktır. Görüntü deformasyonu, tek adımda orijinal görüntünün bombelenmesi ile birleştirilir. Genellikle son sorgulama penceresi boyutunda 3 veya 4 geçişten sonra 2D2C-vektör alanları yeterince yakınsamıştır. Daha sonra, üç bilinmeyenli (u, v, w) 4 lineer denklem sisteminin çözülmesinden oluşan 3C-rekonstrüksiyonu yapılır. Bu, hatayı üç bileşene eşit olarak dağıtan normal denklem

kullanılarak yapılır.  $(u, v, w)$ ' den tekrar  $(u_1, v_1)$  ve  $(u_2, v_2)$  bileşenlerinden hesaplanarak ölçülen  $(u_1, v_1)$  ve  $(u_2, v_2)$ ' den sapma hesaplanabilir (yeniden yapılandırma hatası). Genellikle iyi bir kalibrasyon ve 0,1 pikselin altındaki 2C-vektör hataları ile yeniden yapılandırma hatası 0,5 pikselin oldukça altındadır. Bu, genellikle büyük yeniden yapılandırma hataları üreten yanlış rastgele vektörlerin etkili bir şekilde reddedilmesi olarak kullanılabilir [63].

#### 4.1.3.6. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata tahmini

Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata tahmini yapabilmek için aşağıdaki

Şekil 4.22'yi ele alalım.



Şekil 4.22. Stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümü hata tahmini

Şekilde görüldüğü üzere xz düzlemi üzerinde kurulan tipik bir kamera kurulumu ile ölçümün x bileşenleri  $V_{1x}$  ve  $V_{2x}$  şu şekilde verilir;

$$V_{1x} = V_x \cos \alpha_1 + V_z \sin \alpha_1 \quad (4.11)$$

ve,

$$V_{2x} = V_x \cos \alpha_2 + V_z \sin \alpha_2 \quad (4.12)$$

Ölçümün y bileşenleri aynı iken;

$$V_{1y} = V_{2y} = V_y \quad (4.13)$$

Burada  $V = (V_x, V_y, V_z)$  dünya koordinat sistemindeki gerçek hız bileşenleridir ve buradaki z eksenini kameralardan uzaklaşan eksendedir.

(4.11), (4.12), (4.13) nolu denklemlerden;

$$V_x = \frac{(V_{1x} \sin \alpha_2 + V_{2x} \sin \alpha_1)}{(\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1)} = \frac{(V_{1x} \sin \alpha_2 + V_{2x} \sin \alpha_1)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (4.14)$$

$$V_z = \frac{(V_{1x} \cos \alpha_2 - V_{2x} \cos \alpha_1)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (4.15)$$

$$V_y = \frac{(V_{1y} + V_{2y})}{2} \quad (4.16)$$

$z=ax+by$  sisteminin hata yayılımının x ve y üzerinde yol açtığı eşit seviyedeki hatalar z'de  $rms(z) = rms(x)\sqrt{(a^2 + b^2)}$  hatasına neden olur. Dolayısıyla yukarıdaki V hataları;

$$rms(V_x) = rms(V_{1x,2x}) \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2}{|\sin(\alpha_2 - \alpha_1)|}} \quad (4.17)$$

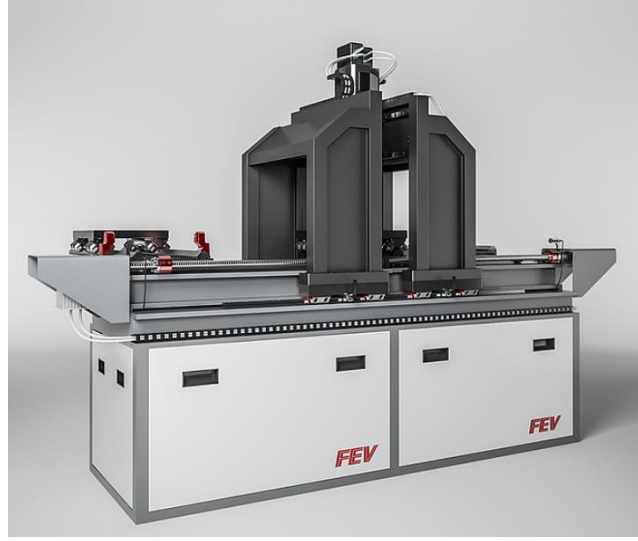
$$rms(V_z) = rms(V_{1x,2x}) \sqrt{\frac{\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2}{|\sin(\alpha_2 - \alpha_1)|}} \quad (4.18)$$

$$rms(V_y) = \frac{rms(V_{1x,2x})}{\sqrt{2}} \quad (4.19)$$

#### 4.1.4. Girdap oranı ölçüm düzeneği

Motor silindiri içerisindeki hava emiş kanalı geometrisine bağlı olarak gerçekleşen hava hareketlerinin, sabit akış koşulları altında ölçülebilmesine sürekli akış test düzeneği olarak sağlamaktadır. Böylelikle hava emiş kanalının takla ve girdap hareketi üretebilme performansı incelenebilmektedir

Bu çalışmada dizel içten yanmalı motorlarda silindir içerisinde gerçekleşen havanın girdap hareketi incelendiği için bu bölümde girdap oranı ölçüm düzeneği anlatılacaktır. Testler sırasında kullanılan sürekli akış test düzeneği Şekil 4.23' de görülmektedir. Bu sistem dizel motorlar için girdap oranının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca parçacık görüntülemeli hız ölçüm düzeneği için de bir modülü bulunmaktadır.

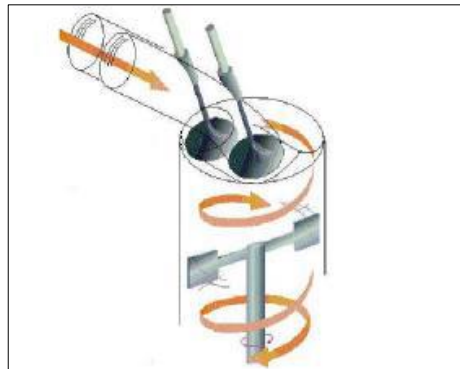


Şekil 4.23. Girdap oranı ölçümü düzeneği [64]

Girdap oranının tayini için iki farklı metod uygulanabilmektedir. Bunlar;

- Çarklı girdap anemometresi (Paddle Wheel Anemometer-PWA)
- Balpeteği girdap anemometresi (Honeycomb Swirl Anemometer-HSA) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Çarklı girdap anemometresi sisteminde silindir içerisinde silindir kafasından 120 mm uzaklıkta oldukça az sürtünme kaybına sahip bir çark bulunmaktadır. Çark yüzeyleri silindir eksenine paralel olarak yerleştirilmiştir ve yalnızca teğetsel hıza bağlı olarak hareket etmektedir. Silindir içerisinde hava hareketinin başlamasıyla birlikte bu çark, havayla aynı frekansta olacak şekilde dönmektedir. Çarkın dönme hızının ölçülmesiyle birlikte havanın girdap oranı hesaplanmaktadır. Şekil 4.24' te çarklı girdap anemometresinin detayları gösterilmektedir.

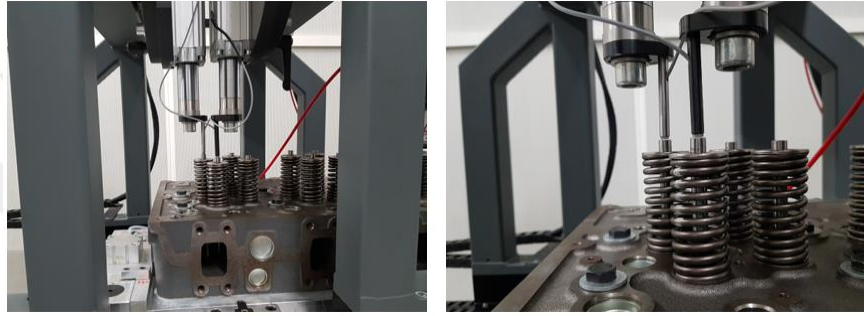


Şekil 4.24. Çarklı girdap ölçümü düzeneği [36]





Şekil 4.26. Silindir kafası girdap oranı ölçümü



Şekil 4.27. Silindir kafası girdap oranı ölçümü

#### 4.1.4.1. Akış faktörünün belirlenmesi

Akış faktörü teorik debiyi ölçebilme kabiliyetini göstermektedir. Ölçümde elde edilen kütleli debinin, teorik kütleli debiye oranı olarak ifade edilmektedir;

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{ölçülen}}{\dot{m}_{teorik}} = \frac{A_s}{A_k} \quad (4.20)$$

Bu formülasyondaki  $\dot{m}_{ölçülen}$  ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$\dot{m}_{ölçülen} = \dot{V} * \frac{p}{R*T} \quad (4.21)$$

Burada;

$\dot{V}$  = Hava akış debisi,

T = Sıcaklık,

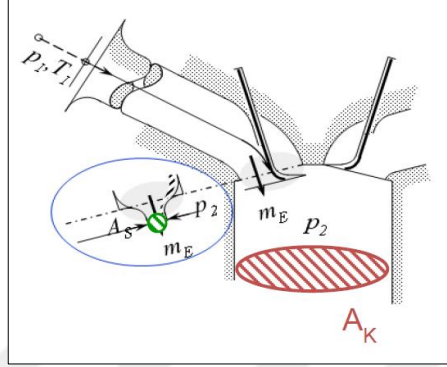
P = Basınç,

R = Gaz sabitini ifade etmektedir.

Teorik kütleli debi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$\dot{m}_{teorik} = A_k * \rho_s * C_s \quad (4.22)$$

Bu denklemde  $A_k$  motor silindir kesit alanıdır,  $\rho_s$  izentropik proses için hava yoğunluğudur,  $C_s$  ise izentropik proses için akış hızıdır.



Şekil 4.28. Emme supabı kesit görüntüsü [36]

İzentropik proses için hava hızı ve yoğunluk aşağıdaki formüllerle ifade edilmektedir [36];

$$C_s = \sqrt{\frac{2 * K}{K-1} * R * T * \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}} \quad (4.23)$$

$$\rho_s = \frac{p_1}{R * T} * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (4.24)$$

Bu denklemlerdeki  $p_1$  supabın önündeki basıncı,  $p_2$  supabın sonrasındaki basıncı,  $K$  özgül ısıların oranı (hava için 1,4) ve  $T$  ise sıcaklığı ifade etmektedir.

Ölçüm odasındaki havanın nem oranı da ölçümleri önemli derecede etkilemektedir. Test cihazı düzeneği havadaki nem oranını ölçen bir sensöre de sahiptir. Havadaki nemin etkisi, Denklem (4.25) ve Denklem (4.26)'da gösterilmektedir. Gaz sabiti ( $R$ ) ve ( $K$ ) hesaplamasında dahil edilmektedir;

$$R(T) = R_{100\%nem} * \frac{nem[\%]}{100} + R_{0\%nem} * \left(1 - \frac{nem[\%]}{100}\right) \quad (4.25)$$



$$K(T) = K_{100\%nem} * \frac{nem[\%]}{100} + K_{0\%nem} * \left(1 - \frac{nem[\%]}{100}\right) \quad (4.26)$$

Tablo 4.1. %100 nem koşullarında sıcaklığa bağlı R ve K değerleri [65]

Sıcaklık [°C]	R [J/kgK]	K
0°C	287.76	1,39973819
5°C	288,04	1,3996295
10°C	288,424971	1,39947899
15°C	288,952378	1,39927382
20°C	289,65	1,39900345
25°C	290,572725	1,39864349
30°C	291,768577	1,39817829
35°C	293,334578	1,39756911
40°C	295,328524	1,39679344

Tablo 4.2. %0 nem koşullarında sıcaklığa bağlı R ve K değerleri [65]

Sıcaklık [°C]	R [J/kgK]	K
0°C	287.1	1,4
5°C	287.1	1,4
10°C	287.1	1,4
15°C	287.1	1,4
20°C	287.1	1,4
25°C	287.1	1,4
30°C	287.1	1,4
35°C	287.1	1,4
40°C	287.1	1,4

Bu denklemlerde yer alan  $R_{100\%nem}$ ,  $R_{0\%nem}$ ,  $K_{100\%nem}$  ve  $K_{0\%nem}$ , değerleri sıcaklığa bağlı olarak test düzeneği üreticisi tarafından belirlenmiştir. %100 ve %0 nem oranı koşullarında ortam sıcaklığına bağlı olarak hava için K ve R değerleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

#### 4.1.4.2. Girdap oranının belirlenmesi

Bu çalışmada incelenen girdap oranı, motor içerisinde emme kanalının yapısına bağlı olarak gözlemlenen dönme hareketini ölçeklendiren boyutsuz bir akış değeridir. Bu sebeple basınç düşümü, ortam basıncı ve sıcaklığı gibi parametrelerden bağımsızdır. Yakıt hava karışımının yanmadan önceki yanma odası içerisindeki yayılımını

göstermektedir. Girdap oranı yanma odası silindiri dikey ekseninde oluşan açışal hızın motorun çalışma hızına oranı olarak tanımlanmaktadır;

$$R_s = \frac{w_s}{2\pi N} \quad (4.27)$$

Burada  $R_s$  genel girdap oranını,  $w_s$  silindir dikey ekseninde etrafındaki dönme hızını ve  $N$  ise motorun çalışma hızını göstermektedir.

Kullanılan petek sisteminde ölçülen tork değerine bağılı olarak belirlenen girdap oranı silindir içerisindeki kütlelel debinin karesiyle ters orantılıdır ve aşağıdaki denklemlerle hesaplanmakta olduğu daha önce açıklanmıştır.

$$D = \frac{M \cdot R_{sil}}{\rho_{sil} \cdot \dot{V}_{sil}^2} = \frac{M \cdot R_{sil} \cdot \rho_{sil}}{\dot{m}^2} = \frac{\left( kg \cdot \frac{m^2}{s^2} \right) \cdot m \cdot \frac{kg}{m^3}}{\frac{kg^2}{s^2}} \quad (4.28)$$

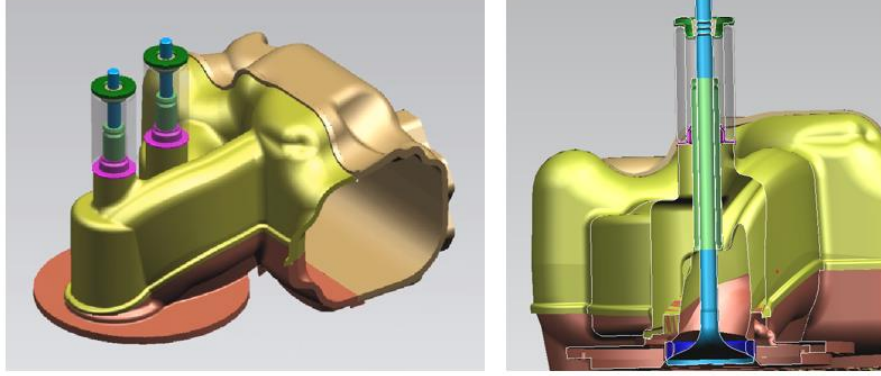
Bu çalışma kapsamındaki girdap oranı hesapları Denklem (4.28)'de açıklanmış şekilde yapılmıştır. Bu sebeple doğrulama çalışmasında öncelikle kütlelel debinin doğru şekilde tahmin edilmesi önemlidir.

## 4.2. Plastik Motor Prototipi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, test planı iki farklı hacimdeki motor ile (Motor-A ve Motor-B) gerçekleştirmek ve sonuçları karşılaştırmak üzere oluşturulmuştur. Ancak mevcut koşullarda Motor-A temin edilememiştir. Yerine Motor-A'nın CAD datası kullanılarak, motoru ölçüsel, geometrik ve supap hareketi olarak %100 temsil eden ve hızlı prototipleme yöntemi kullanılarak plastik bir prototip parça üretilmiştir. Prototip parça hem girdap oranı ölçüm cihazı, hemde PGHÖ ölçüm cihazı olmak üzere farklı düzeneklere uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Kullanılan CAD datası Şekil 4.29' da gösterilmektedir. Üretilen prototip ise Şekil 4.30' da gösterilmektedir.

Prototip parça, hava dağıtıcısının bir parçasını, hava emiş kanallarını içermekte, hava akış kanalının coğrafyasını %100 yansıtmakla birlikte ayrıca supap kaidelerini, supap yaylarını ve emme supaplarını da içermektedir. Valfler mekanik olarak açılıp kapanabilmektedir.

Prototip üretimi Ultimaker S5 hızlı prototipleme cihazı ile üretilmiş olup, PLA malzeme kullanılmıştır.



Şekil 4.29. Hızlı prototip parça CAD modeli



Şekil 4.30. Üretilen hızlı prototip parça

## 5. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Deneysel çalışmalar sırasında yapılan her ölçüm sonucu elde edilen fiziksel büyüklük beraberinde belirsizlik de içermektedir. Testler ne kadar çok titiz ve dikkatli yapılırsa yapılsın deneysel ölçümler daima kesin ve tam değildir. Deneyler sırasında farklı ve çeşitli sebeplerden meydana gelebilecek hatalar ölçülen değerlerin doğruluğunu etkileyebilmektedir. Ölçüm sonucu verilirken ölçülen ve hesaplanan değer belirsizliği her zaman belirlenmeli ve bu belirsizliğin rakamsal olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu hataları en aza indirmek yapılan çalışmanın güvenilirliğini artıracaktır.

Ölçümün kalitesini karakterize eden, hemen uygulanabilir, kolayca anlaşılabilir ve genel olarak kabul gören bir işlemin olması çok önemlidir. Bu da ölçüm sonucunda elde edilen değer belirsizliğini hesaplamak ve ifade etmektir.

Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen verilerdeki hata iki farklı şekilde çıkabilmektedir. Bunlardan biri deney seti ve ölçüm cihazlarının yapısından kaynaklanabilmektedir, diğeri ise deneyi yapan kişiden kaynaklanabilmektedir. Bu tür hataların yetenekli veya eğitimli ölçümcü veya deneyci ile giderilmesi mümkündür. Ancak deney cihazlarından kaynaklanan hataların belirlenmesi her zaman mümkün olmayabilir [66].

Deneysel ölçümlerde kullanılan ölçü aletlerinden toplanan veriler ile hesaplanmakta olan test sonuçları değerlerinin hata oranını belirlemek için birçok metot uygulanabilmektedir. Bunlardan biri de Kline ve McClintock tarafından geliştirilen belirsizlik analizi metodu ile deneysel bulguların hata analizini yapmak mümkündür [67].

Bir ölçüm sonucunun belirsizliğinin hesaplanması ve ifade edilmesi için ideal olan yöntem şu özellikleri taşımalıdır;

**Evrensellik:** Yöntem her çeşit ölçüme ve her ölçüm için kullanılan her çeşit veriye uygulanabilir olmalıdır. Belirsizliğin ifadesinde kullanılan gerçek nicelik de aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

Kendi içinde tutarlılık: Ölçüm belirsizliği, belirsizliğe katkıda bulunan bileşenlerden, bileşenlerin gruplanış şekliyle veya alt bileşenlerine ayrılmış olmasından bağımsız olarak elde edilebilmektedir.

Taşınabilirlik: Bir ölçümün sonucunu ikinci bir ölçümde kullanmak gerektiğinde birinci ölçümün belirsizliği doğrudan bu ikinci ölçümde kullanılabilir [68].

## 5.1. Tanımlar

Gerçekleştirilen bir ölçümdeki ölçüm hatası, ölçüm sonucundan, ölçülen büyüklüğün (konvansiyonel) gerçek değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sonuçtur. Rastgele hata ve sistematik hata olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşebilir. Rastgele hata aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri esnasında önceden tahmin edilemeyecek şekilde değişen ölçüm hatası bileşenidir. Sistematik hata ise aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilebilen değişimler gösteren ölçüm hatası bileşenidir.

Yapılan her ölçümde, ölçülen büyüklüğün (konvansiyonel) gerçek değeri ile ölçüm sonucu arasındaki uyuma yakınlığının, dolayısı ile ölçümün doğruluğunun belirtilmesi gerekmektedir. Bir ölçümün doğruluğu niteleyici bir kavramdır. Bu yüzden rakamsal olarak ifade edilmemeli, rakamlar ölçümün belirsizliği için verilmelidir.

Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği aşağıdaki koşulların tümüne uyarak, aynı ölçülen büyüklüğe ait ardıl ölçüm sonuçları arasındaki uyuma yakınlığıdır.

- aynı ölçüm metodu,
- aynı gözlemci,
- aynı ölçme cihazı,
- aynı konum,
- aynı kullanım koşulları,
- kısa zaman aralığında tekrar

Ölçüm sonuçlarının tekrar gerçekleştirilebilirliği ise her bir ölçümün, aşağıdaki değişken koşullarda gerçekleştirildiği zaman, aynı ölçülen büyüklüğe ait ölçüm sonuçları arasındaki uyuma yakınlığıdır.

- ölçüm metodu,

- gözlemci,
- ölçme cihazı,
- konum,
- kullanım koşulları,
- zaman

Ölçüm belirsizliği, ölçülen büyüklüğün gerçek değerini kapsayan değerler aralığını karakterize eden tahmini değerdir. Bileşik standart belirsizlik ise bir ölçümün pek çok sayıda başka değerlerden elde edilmiş sonucunun standart belirsizliği, bu değerlerdeki değişimlerin ölçüm sonucunu nasıl etkilediği gözönüne alınarak hesaplanan varyans veya covaryans ifadeleri toplamının pozitif kara köküne eşittir [68].

## **5.2. Belirsizlik Analizi**

Belirsizlik, ölçülen değerlerin belli bir olasılıkla ortalama değer etrafında bulunduğu aralığı tanımlamaktadır. Belirsizlik genelde bir rakam olarak verilirken, mutlak veya göreceli olabilmektedir.

Genel olarak ölçüm, sonuçlarda hatalara neden olan, bir takım mükemmellikten uzak unsurlar içermektedir. Hata unsurları rastgele bileşen ve sistematik bileşen olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Rastgele hatalar, ölçülen değeri etkileyen niceliklerin önceden kestirilemeyen değişimleridir. Rastgele hatalar, tekrarlanan gözlemlerde farklı değerler çıkmasına neden olur. Bir ölçümde rastgele hatayı dengelemek olanaklı değilse de çok sayıda gözlem yapılarak teorik olarak sıfıra bile düşürülebilir. Rastgele hatalar, pek çok tanımlanamayan ve kontrol edilemeyen birbirinden bağımsız küçük doğal etkenlerin sonucunda ortaya çıkan istatistiksel bir niceliktir. Deneyden deneye farklılık gösterir. Eğer aynı değeri okumak için çok sayıda ölçüm yapılırsa, verinin ortalama değerden sapmasının dağılımı bulunabilir. Bu sonuçlar, genellikle ortalama değer etrafında gaussian dağılım gösterir. Bu dağılımın ortalama değeri gerçek değer olarak kabul edilir [68].

Sistematik hatalar ise veriyi her zaman belli bir yönde ve miktarda değiştirir. Sistematik hata bellidir ve sabittir. Deneydeki gözlemlerde hep aynıdır. Sistematik hatalar, deneyin tasarlanışından, cihazların diziliminden, cihazların kalibrasyonundan veya cihazın durumundan, deney tekniği veya deney işleminden, insan hatasından

kaynaklanabilir. Sistematik hatalarda rasgele hatalar gibi tamamen yok edilemez fakat değeri çok düşürülebilir. Eğer sistematik hata, ölçümü etkileyen niceliğin bilinen bir etkisinden kaynaklanıyorsa bu etki nicelendirilebilir ve bu etkiyi dengelemek için düzeltme veya düzeltme faktörü uygulanır. Bu uygulamadan sonra sistematik etkenlerden kaynaklanan hatanın beklenen en değeri sıfırdır [68].

Ölçüm belirsizliği, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin, içinde bulunduğu değerler aralığını karakterize eden tahmini bir değerdir. Ölçüm belirsizliği, genel olarak birçok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bir kısmı, ölçüm serileri sonuçlarının istatistiksel dağılımına bakılarak tahmin edilebilir ve deneysel standart sapma yardımıyla karakterize edilebilir. Diğer bileşenlerin tahmini ise sadece tecrübeye veya diğer bilgilere dayandırılmalıdır.

Bir ölçüm işlemi için oluşturulan belirsizlik paketi, bütün belirsizlik kaynaklarını, bu kaynaklara karşılık gelen varyanslarını ve hesaplama-tahmin metotlarını içermelidir. Tekrarlanan ölçümler için “n” adet ölçüm sayısı ifade edilmelidir. Bir ölçüme ait belirsizlik değeri, o ölçümün konvansiyonel değeri ile aynı sayısal değerde ve aynı birimde verilmelidir. Buna göre, ölçüm sonucu (m) ve toplam (bileşke) belirsizlik (w) olmak üzere; ölçüm belirsizliği bilinen bir büyüklük ( $m \pm w$ ) şeklinde yazılmalıdır.

Ölçüm belirsizliğinin iki ana bileşeni vardır;

A tipi belirsizlik; bir ölçüm sonucu elde edilen verilerin istatistiksel dağılımına bakılarak tahmin edilebilir ve deneysel standart sapma yardımıyla karakterize edilebilir. Dijital cihazların hafızalarında uygun bir süre içinde tutmak ve standart sapmayı hesaplamak gibi özellikleri bulunduğu için, A tipi belirsizliği hesaplamak kolaydır. Analog cihazlarda ise, A tipi belirsizliği hesaplamak için, uygun bir zaman aralığı içerisinde pek çok ölçüm yapmak gerekir. Her iki durumda da gözlemlerin yapıldığı zaman aralığı, ideal olarak 30-60 dakika olmalıdır. Standart sapma hesaplanırken kullanılan okuma sayısı en az 5 olmalıdır.

B tipi belirsizlik; o ölçüm esnasında kullanılan tüm ölçü aletlerinin belirsizliği ile operatör ve ortam şartlarından meydana gelen belirsizlikler toplamıdır. Hata hesaplanmasında kullanılan doğruluk ifadeleri cihazın karakteristiklerini meydana getirir. Hesaplanan hata, belirsizlik ile ilişkili olabilir, çünkü tanım gereği belirsizlik, ölçümdeki muhtemel hatanın bir tahminidir.

### 5.3. Toplam (Bileşke) Belirsizlik ve Güvenilirlik Seviyesi

Toplam belirsizlik (Bileşke belirsizlik), belirsizlik dağılım kuralı kullanılarak, ölçümlerin A ve B tipi standart belirsizliklerinin bir araya getirilmesinden elde edilir. Bu işlem, A tipi ve B tipi standart belirsizliklerinin vektörel olarak toplanması yoluyla bulunur. Toplam belirsizlik, bütün belirsizliklerin karelerinin toplamının kareköküne eşit olup mutlaka belirli bir güvenilirlik seviyesine göre hesaplanmalıdır. Başka bir ifade ile, toplam belirsizlik hesaplanırken, A tipi ve B tipi belirsizliklerin hepsi aynı güvenilirlik seviyesinde olmalıdır.

Bir değişkenin ölçüm belirsizliği deklare edilirken, o değişkenin tahmin edilen değeri, mutlak belirsizliği ve güvenilirlik seviyesinin birlikte verilmesi ile ifade edilir. Örneğin;

Bir değişkenin ölçüm belirsizliği;

$$v = m \pm w, \%p \quad (5.1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada;

m: Değişkenin ortalama değeri,

w: Değişkenin belirsizliği,

p: Güvenilirlik seviyesi (%) olarak tanımlanmıştır.

Bu ifade, fiziksel bir büyüklük ile şu şekilde örneklendirilebilir;

$$P = 50.2 \pm 0.5 Pa \quad (k = 2 / 95\% \text{ Güvenilirlik aralığı}) \quad (5.2)$$

Bu değer bize ortalama değer 50.2 Pascal olduğunu ve %95 ihtimalle gerçek (konvansiyonel) değer de ortalama değer etrafında  $\pm 0.5$  Pa'lık bir salınım içinde bulunduğu göstermektedir. Buradaki  $k=2$  ifadesi %95 güvenilirlik seviyesini gösteren bir parametredir.

Cihazlara ait doğruluklar (B tipi belirsizlik / sistematik hata) genelde %95'lik güvenilirlik seviyesinde belirtilirler. Ancak ölçümlerden kaynaklanan rastgele hatalar %68'lik güvenilirlik seviyesinde verilirler. %68 güvenilirlik seviyesindeki hata, %95 güvenilirlik seviyesindeki hatanın yarısı olmaktadır.

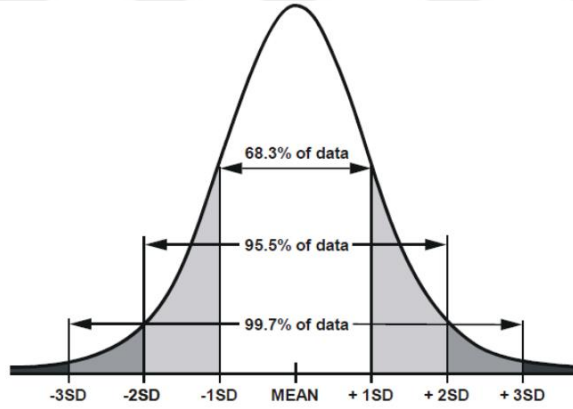


Güvenirlilik seviyesi (veya aralığı) bir yüzde olarak tanımlanmaktadır ve belirsizlik bölgesi içinde gerçek değerin olma olasılığını göstermektedir. Örnek olarak; yatay ekseninde  $-1\sigma$  ve  $+1\sigma$  arasında yerleşmiş noktalar toplam noktaların %68'ini oluşturuyorsa güvenirlilik derecesi %68'dir denilmektedir (Tablo5.1.).

Güvenirlilik çevrimi, standart sapmanın "coverage factor" adı verilen bir katsayı ile çarpılmasıyla oluşturulur. Bu aynı zamanda, güvenirlilik seviyesini belirleyen iki nokta arasındaki uzaklıktır. "2 $\sigma$  güvenirliliği" adı verilen tanım, normal dağılıma göre eğrinin altında  $-2\sigma$  ve  $+2\sigma$  aralığında kalan alanı belirtmektedir (Şekil 5.1). Buna göre, bu çevrimin güvenirlilik seviyesi %95'tir.

Tablo 5.1. Normal dağılım güvenirlilik seviyesi yüzdesi

Hata Sınırı	Sınır içindeki noktaların yüzdesi	k değeri (coverage factor)
$\pm\sigma$	%68,0	3
$\pm2\sigma$	%95,0	2
$\pm3\sigma$	%99,7	1



Şekil 5.1. Normal dağılımda güvenirlilik seviyesinin gösterimi [69]

Bir deneysel çalışmanın sonucunda elde edilmesi veya tespit edilmesi istenen sonuç fonksiyonu olan 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 fonksiyonun ölçüm belirsizliği, RSS (root sum square) metodu ile bulunur [68].

Bir v değişkeninin, w belirsizliği;

$$\pm w = k\sqrt{(A_1)^2 + (A_2)^2 + \dots + (B_1)^2 + (B_2)^2 + \dots} \quad (5.3)$$

ifadesi ile bulunur. Burada  $A_1, A_2, \dots$  rasgele hataları ve  $B_1, B_2, \dots$  sistematik hataları göstermektedir. Bu iki tip hatadan kaynaklanan belirsizlikler aynı güvenilirlik seviyesine dönüştürüldükten sonra vektörel olarak toplanır. Buradaki “k” değeri yukarıda tanımlanmış olan “coverage factor” dur. Bu yöntem, bütün ölçüm değişkenlerine uygulanarak  $w_1, w_2, \dots, w_n$  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;

$$w_R = \pm \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

veya,

$$\frac{w_R}{R} = \left[ \left( \frac{w_{x1}}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{w_{x2}}{x_2} \right)^2 + \left( \frac{w_{x3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left( \frac{w_{xn}}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

Belirsizlik analizinin en büyük üstünlüğü, burada en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir.

#### 5.4. PGHÖ Ölçüm Belirsizlik Analizi

Parçacık görüntü hız ölçümü (PGHÖ), iki veya üç boyutlu bir alan üzerinde akış alanı ölçümleri yapmak için kullanılan deneysel bir tekniktir. Hala hazırda kullanılan bir teknik olmasına rağmen daha fazla araştırılması gereken sınırlamalar içerir. Bunlardan en önemlileri sınırlı ölçüm hacmi, aydınlatma ve görüntüleme sistemi için optik erişim ihtiyacı, zamana bağlı ölçümlerin doğruluğunun azalması ve belirsizlik ölçümleridir

PGHÖ yöntemi temel olarak görüntü eşleştirme kavramına dayanmaktadır. PGHÖ ölçüm sırasında alınan kayıtlar ölçülen hız alanına göre eşleştirilir. Eşleştirilmiş parçacık görüntüleri arasındaki konumsal eşitsizlik daha sonra ölçüm belirsizliğini elde etmek için hesaplanır. Yapılan çalışmalar görüntü eşleştirme yaklaşımının, ölçüm

belirsizliğinin gerçek hata değeri ile iyi bir uyum içinde tahmin edilmesine izin verdiğini göstermektedir [20].

PGHÖ ölçümündeki belirsizliği belirleyebilmek için farklı belirsizlik ölçüm yöntemleri mevcuttur. Buna karşılık, belirsizlik yüzey yöntemi olarak sayısal simülasyonlara dayanan yöntemler, küçük parçacık görüntüleri ve düşük zerrecik yoğunluğu varlığında daha doğrudur.

Lazer ışıkları yansımaları görüntülerde doğru şekilde kaldırılmadığında, hız alanında bozuk veya eksik veri kümeleri, yani boşluklar oluşabilir. Boşluklar, model tarafından üretilen gölgelerden, yansılardan veya lazer veya görüntüleme sisteminin sınırlı optik erişiminden de kaynaklanabilir.

Temel olarak bir PGHÖ ölçümündeki hataların nedenleri olarak şunlar olabilmektedir;

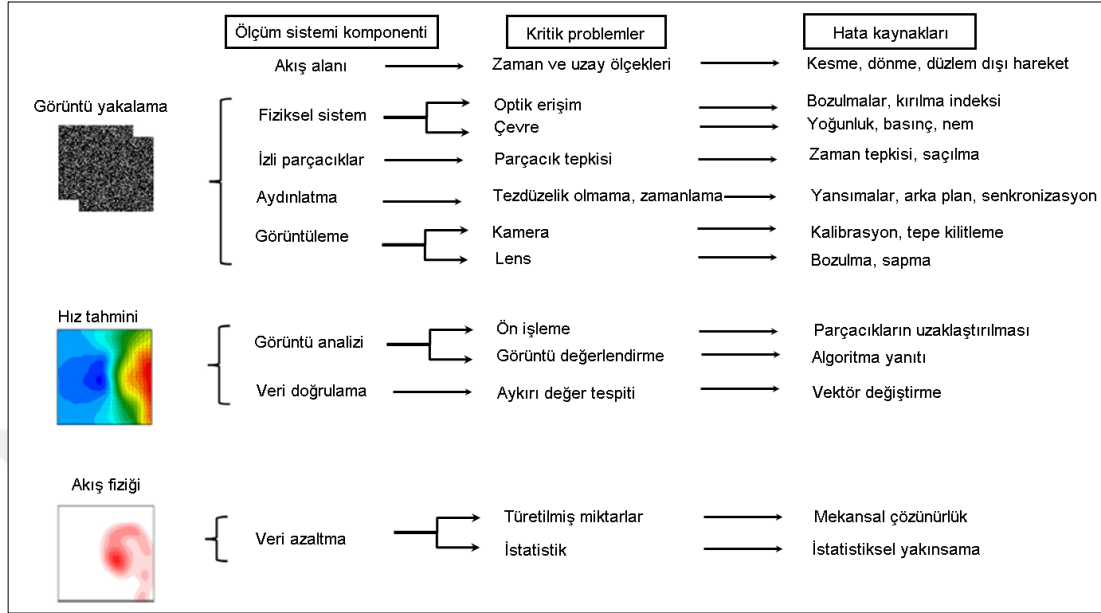
- Kullanılan akış test cihazı,
- Deney aparatlarının kurulması,
- Görüntü kayıt prosesi,
- Veri değerlendirme yöntemleri,

PGHÖ ölçüm zincirinin ana bileşenlerinin ve en ilgili hata kaynaklarının şematik gösterimleri Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Hata esas olarak sistematik veya çoğunlukla rastgele olan kaynaklar sırasıyla mavi veya kırmızı ile belirtilmiştir. (bazı hata kaynaklarının tepe kilitleme gibi rastgele ve sistematiktir).

Hem düzlemsel (2D), hem de stereo- PGHÖ çeşitli parametrelerin karmaşık bir fonksiyonudur. Stereo PGHÖ, düzlemsel PGHÖ ölçümündeki hatalara ek olarak hız ölçümündeki hatalara katkıda bulunan kayıt hataları da içermektedir. Son yıllarda ölçüm doğruluğunu sağlamak ve hatayı en aza indirmek amacıyla PGHÖ 'deki gelişmeleri optimize edilme çalışmaları yapılmaktadır.

Stereo PGHÖ' deki belirsizlik, düzlemsel PGHÖ belirsizliğinin her kamera ve stereo kalibrasyon fonksiyonundaki belirsizliğinin bir kombinasyonudur. Her ne kadar düzlemsel iki bileşenli PGHÖ belirsizliğini ölçmek için yöntemler mevcut olsa da, tam bir belirsizlik ölçümü yoktur. Düzlemsel üç bileşenli stereo PGHÖ için yaklaşım

mevcuttur. Stereo PGHÖ ölçümlerinde belirsizliği nicelleştirmek için bir çerçeve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [70].



Şekil 5.2. PGHÖ hata kaynaklarına genel bakış [16, 21]

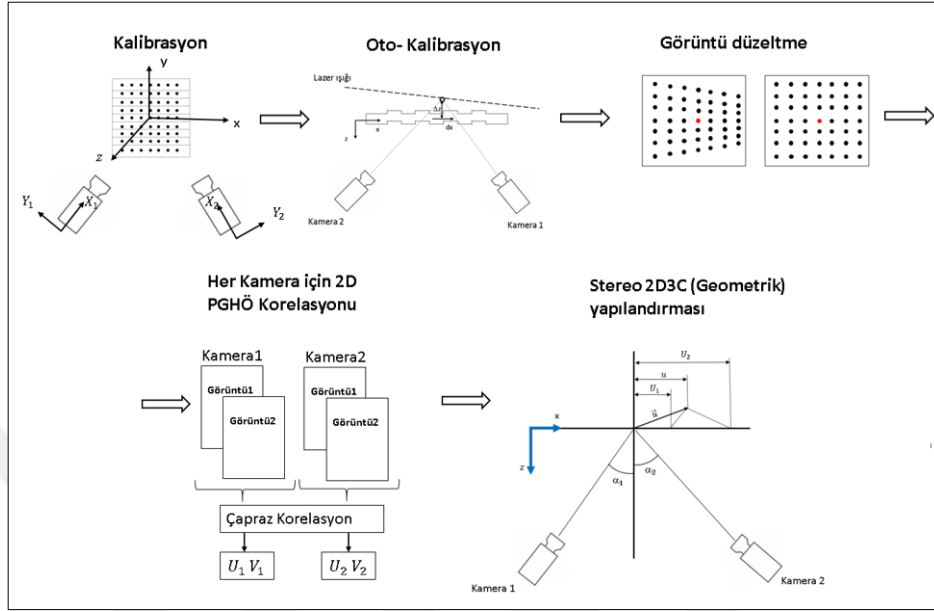
Stereoskopik PGHÖ [71], aynı akış alanının iki açılı görüntüsünü kullanarak düzlem dışı hız bileşenini çözmek için geliştirilmiştir. Ölçüm zinciri, Şekil 5.3'deki blok şemada gösterilen prosedürleri içermektedir.

Buna ek olarak, Şekil 5.4, bir stereo PGHÖ işleminde farklı belirsizlik kaynaklarından belirsizlik yayılımını göstermektedir. Şekil'de (a)-(c), fiziksel koordinat sistemindeki belirsizliği göstermektedir. (d) ve (e)'de temsil edilen üçgenleştirilmiş z konumundaki belirsizliği ve haritalama fonksiyon katsayılarındaki belirsizliği (f) ve (g) göstermektedir. Açılardaki belirsizlikleri (h), münferit kamera bozuk görüntüleri için düzlemsel belirsizliği (i) göstermektedir. Son olarak, düzlemsel belirsizlikler ve açı belirsizlikleri, üç hız bileşeninin belirsizliğini (j) göstermektedir.

Ölçülen hız vektörünün anlık lokal belirsizliğini tahmin eden dört yaklaşım değerlendirilir: belirsizlik yüzey yöntemi (US) [72], parçacık eşitsizliği yöntemi (PD) [73], tepe oranı yöntemi (PR) [74], ve korelasyon istatistikleri yöntemi (CS) [75,76].

Dört yöntem farklı miktarlar getirir; bu nedenle, tutarlı bir karşılaştırma için, sadece bir hız bileşeninin (x eksenı boyunca) belirsizliği değerlendirilir (Tablo 5.2). x-hızı bileşeni için y-bileşeni için eşit olarak uygulanan yöntemlerin girdi ve çıktı

miktarlarını özetlemektedir. Stereo- PGHÖ için, z bileşeninin belirsizliği, iki x ve y yer değiştirme alanının belirleme yayılımı ile birlikte kalibrasyon hatalarının bir tahminini gerektirecektir.

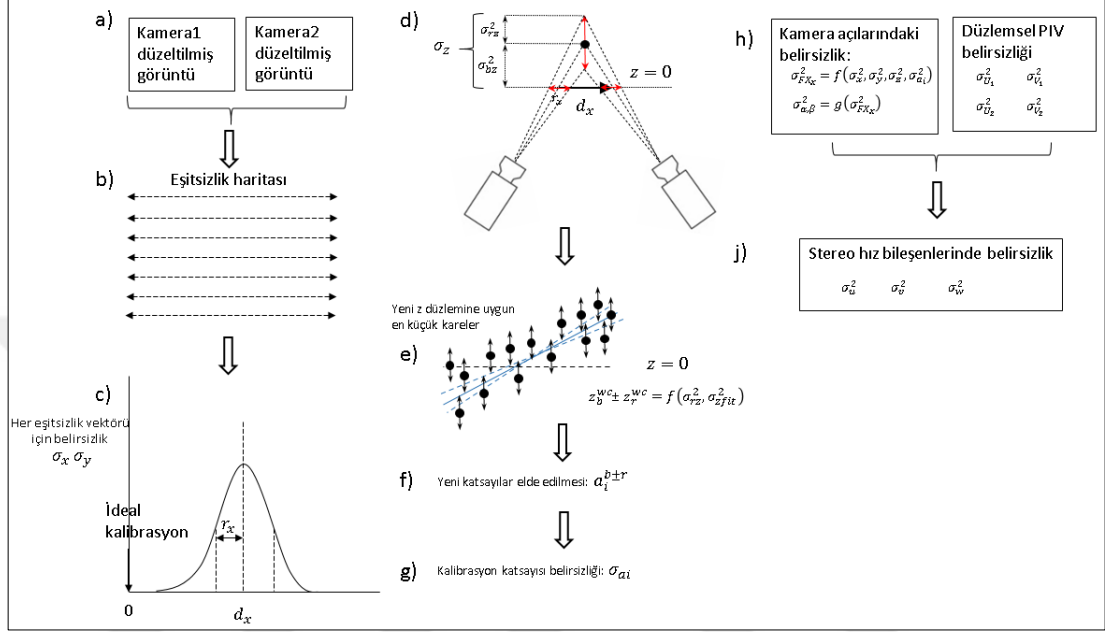


Şekil 5.3. Stereo PGHÖ ölçüm zinciri [70]

Belirsizlik yüzey yöntemi; Timmins ve arkadaşları [72] tarafından geliştirilen belirsizlik yüzey yöntemi (US), her bir anlık hız vektörünün belirsizliğini belirlemek için belirli bir PGHÖ algoritmasının bir dizi hata kaynağına önceden hesaplanmış bir yanıtını kullanır. Bir PGHÖ hesaplamasının belirsizliği kullanılan algoritmaya (yani tüm ayarlarla birlikte yazılım paketine) bağlı olduğundan, algoritmanın her hata kaynağının değişen büyüklüğüne cevabı, bu algoritma için bir belirsizlik yüzeyi oluşturmak için sistematik olarak değerlendirilmelidir. Bu amaçla sentetik görüntülere dayanan Monte Carlo simülasyonları kullanılmaktadır. Yöntem, parçacık görüntü çapı, parçacık görüntü yoğunluğu, parçacık yer değiştirmesi ve kesme gibi deneysel parametrelerin gerçek ölçümlerden tahmin edilmesinin bir posterioriğidir. Belirsizlik yüzeyi üretildikten sonra, her vektörün belirsizliği, hata kaynaklarının büyüklüğü tahmin edilerek belirlenir. Daha sonra bu sonuçlara dayanarak belirsizlik yüzeyi sorgulanır.

Tepe oranı yöntemi; (PR) [74], korelasyon düzleminde, ölçülen yer değiştirmedeki hatanın doğrudan çapraz korelasyon tepe oranı ile ilişkili olduğu varsayımına dayanır. İkincisi, saptanan en büyük tepe noktası (parçacıkların yer değiştirmesini temsil eden)

ile sahte parçacık görüntü eşleştirmesinden kaynaklanan ikinci en yüksek tepe noktası arasındaki oran olarak tanımlanır [77]. Zirve oranı görüntü kalitesi, düzlem içi ve düzlem dışı hareket gibi bir dizi koşuldan etkilenir. Yöntem, ölçülen yer değiştirme büyüklüğünün belirsizliği (U) ile tepe oranı (PPR) arasında ampirik bir ilişki önerir.



Şekil 5.4. Stereo PGHÖ ölçüm süreci için belirsizlik yayılım akış şeması [70]

Tablo 5.2. Dört belirsizlik ölçüm yönteminin girdi ve çıktı miktarları [76]

Metot	Girdiler	Çıktılar
Belirsizlik Yüzeyi (US)	PGHÖ kayıtları Ölçülen hız alanı İşleme algoritması	$U_x^+$ : x hız bileşeninin üst belirsizlik sınırı $U_x^-$ : x hız bileşeninin alt belirsizlik sınırı $U_y^+$ : y hızı bileşeninin üst belirsizlik sınırı $U_y^-$ : y hızı bileşeninin alt belirsizlik sınırı
Tepe oranı (PR)	Çapraz korelasyon tepe oranı	$U$ : hız büyüklüğünün belirsizlik sınırı
Parçacık eşitsizliği (PD)	PGHÖ kayıtları Ölçülen hız alanı İşleme algoritması	$U_x$ : x hız bileşeninin belirsizlik sınırı $U_y$ : y hız bileşeninin belirsizlik sınırı
Korelasyon istatistikleri (CS)	Ölçülen hız alanı Çapraz korelasyon işlevine görüntü katkıları	$U_x$ : x hız bileşeninin belirsizlik sınırı $U_y$ : y hız bileşeninin belirsizlik sınırı

Parçacık eşitsizliği yöntemi; (PD) [73], ölçülen hız alanını, işleme algoritması yoluyla (pencere deformasyonu veya pencere kaydırma yoluyla) kayıtların parçacık görüntülerine uyacak bir tahmin edici olarak kullanır. Her sorgu penceresinde parçacık görüntü çiftleri tespit edilir. Kesin bir ölçüm için, iki kaydın parçacık görüntüleri mükemmel şekilde eşleşmelidir. Herhangi bir gerçek deneyde, eşleştirilmiş parçacık

görüntüleri tam olarak eşleşmez ve konumsal bir eşitsizlik oluşur. İkincisi, alt piksel doğruluğu ile parçacık görüntü sentroidleri arasındaki mesafe olarak değerlendirilir. Son olarak, ölçüm belirsizliği her bir sorgulama penceresi içinde, eşitsizlik vektörünün ortalama değerinden ve istatistiksel dağılımından alınır.

Korelasyon istatistik yöntemi; (CS) parçacık eşitsizliği yöntemine benzer şekilde [75], tarafından önerilen korelasyon istatistik yöntemi (CS), birbirine eşlenen iki sorgu penceresi arasındaki artık yoğunluk farklılıklarını ölçüm belirsizliğine çevirmektedir. Her bir parçacık görüntü çiftinin katkısını değerlendirmek yerine, bu yöntem tüm piksellerin korelasyon pikinin şekline toplam katkısını analiz eder. Çalışma hipotezi, tahmin edici düzeltme şemasıyla [78] yinelemeli görüntü sorgulama algoritmasının yakınsamadan sonra simetrik bir korelasyon zirvesi vermesidir (yani sıfır düzeltici yer değiştirmesi). Prensip olarak, bu yöntem parçacık görüntüsü eşitsizliği, arka plan görüntüsü gürültüsü ve düzlem dışı parçacık hareketi gibi faktörleri açıklar [76].

## 6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Daha önceki bölümlerde, dizel içten yanmalı motorlarda hava emişi stroğu sırasında oluşan girdap hareketini sürekli rejimde sabit akış koşullarında ölçmek için kullanılan test metotları anlatılmıştı. Bu bölümde ise ilave olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği metotları kullanılarak nasıl modellendiği ve analizlerin gerçekleştirildiği anlatılacaktır.

Dizel motorlarda yanma verimini etkileyen önemli faktörlerden biri hava-yakıt karışımıdır. Homojen hava-yakıt karışımını etkileyen önemli bir parametre de havanın girdap hareketidir. Yanma verimini etkileyen diğer faktörler hava emiş kanalı tasarımı, yanma odası tasarımı gibi parametrelerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile bu parametreler farklı supap açıklıkları ile bilgisayar ortamında analiz edilebilmektedir. Bu sayede farklı hava emiş kanalı tasarımlarının, farklı yanma odası tasarımlarının veya farklı supap açıklıkları için girdap oranı analizleri karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle bilgisayar ortamında oluşturulan sanal test modelinin gerçek testler ile uyumlu ve birebir yansıtıyor olması önemlidir.

Araştırmacılar tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için kullanılmakta olan birçok yazılım programı bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında Converge adı verilen yazılım programı kullanılmıştır. Ayrıca görselleştirme ve analiz sonuçlarının elde edilmesi için Ensight adı verilen yazılım kullanılmıştır. Converge yazılım programının en büyük avantajı, akış koşullarına göre uyumlu ağ oluşturabilme özelliğidir. Bu sayede türbülans modeline uygun olan girdap hareketinin çözümlenebilmesi ve gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmesi sağlanmaktadır.

### 6.1. Türbülanslı Akış ve Modellenmesi

Akış genel olarak düşük hızlarda bir akım çizgisi halindedir. Bu durumdaki akışa laminer akış denilmektedir. Ancak hızın belli bir kritik değerin üzerine çıkması



durumunda akış karmakarışık bir hal alır. Bu durumdaki akışa ise türbülanslı akış denilmektedir. Hız çalkantıları ve çok düzensiz hareketler içermektedir. Uygulamada karşılaşılan çoğu akış türbülanslıdır. Türbülanslı akışta var olan hız değişimleri ile birlikte akışkan yoğun bir şekilde karışmaktadır. Bunun sonucu olarak akışkan parçacıkları arasındaki momentum geçişi artmaktadır. Dolayısıyla yüzeydeki sürtünme kuvveti de artmaktadır.

Akışın laminer akıştan türbülanslı akışa evrilmesi akış hızı, akışkan türü, geometri, yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü gibi birçok parametreye bağlıdır. Genel olarak bir akışın laminer veya türbülanslı olmasını belirleyen temel oran Reynolds sayısıdır;

$$Re = \frac{V_{ort} * D}{\nu} \quad (6.1)$$

Burada  $V_{ort}$  ortalama akış hızını (m/s), D geometrinin karakteristik uzunluğunu,  $\nu$  ise akışkanın kinematik viskozitesini ( $m^2/s$ ) ifade etmektedir.

Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır ve boyutsuz bir büyüklüktür. Atalet kuvvetleri, akışkan yoğunluğu ve akışkan hızının karesi ile orantılıdır. Büyük Reynolds sayılarında viskoz kuvvetler akışkanın rastgele ve hızlı değişimlerini engelleyemez. Buna türbülanslı akış denilmektedir. Küçük veya orta Reynolds sayılarına sahip akışkanlarda ise viskoz kuvvetleri bu değişimleri sönmüleyebilir. Bu akış türüne ise laminer akış denilmektedir.

Akışın laminer özellikten türbülanslı hale geçmesi aniden gerçekleşmez. Akış tamamen türbülanslı oluncaya kadar laminer ve türbülanslı akış arasında geçişler yapar. Akışın türbülanslı olmaya başladığı Reynolds sayısına kritik Reynolds sayısı denilmektedir. Laminer akış rejiminde Reynolds sayısı kritik Reynolds değerinin altında olmaktadır. Kritik Reynolds sayısının borulardaki iç akışlar için kabul edilen değeri  $Re_{kr}=2300$ 'dür. Birçok pratik uygulamada dairesel borudaki laminer akış  $Re \leq 2300$  olarak, laminer türbülans geçişi  $2300 \leq Re \leq 4000$  ve türbülanslı akış için ise  $Re \geq 4000$  olarak kabul edilmektedir.

Motor silindir hacmi içerisindeki akış, supap açılma kapanma ve pistonun hareketleri nedeniyle zamana ve konuma bağlı olarak sürekli olarak değişmektedir. Bununla birlikte akış içerisinde akış kopmaları ve birleşmeleri, dönme hareketleri içermektedir.

Bu hareketler ve girdaplar türbülans enerjisi içermektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada emme supabı açık iken süreklilik akış koşulları için Reynolds sayısı  $\sim 10^4$  mertebesinde. Dolayısıyla, silindir hacmi içerisinde türbülanslı akış koşulları geçerlidir denilebilir.

Bir kontrol hacmindeki korunum kanunu denklemleri; süreklilik denklemi (kütle korunumu), momentum (Newton'un ikinci kanunu) korunumu için hareket denklemleri, açısal momentum (Newton yasası) korunumu için açısal momentum denklemleri, enerji (termodinamiğin birinci kanunu) korunumu için enerji denklemleri ve bu denklemlerden türetilen türbülans denklemleridir. Denklemler çözülerek türbülans etkileri belirlenmektedir. Momentum korunum denklemleri ile akışkan davranışını belirleyen Navier-Stokes denklemleri olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (6.2) süreklilik denklemini göstermektedir, momentum denklemi Denklem (6.3)'te tanımlanmaktadır, Enerji denklemi Denklem (6.5)'te tanımlanmaktadır;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S^I \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_j} + S^{II} \quad (6.3)$$

Buradaki viskos stres tensörü;

$$\sigma_{i,j} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left( \mu_b - \frac{2}{3} \mu \right) \delta_{i,j} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho e u_j}{\partial x_j} = -P \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \sum_m h_m \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \right) + S^{III} \quad (6.5)$$

Bu denklemlerde; S kaynak terimi, u hızı,  $\rho$  yoğunluğu, P basıncı,  $\mu$  dinamik viskosite,  $\mu_b$  genişleyen viskosite,  $\delta_{ij}$  ise Kronecker delta olup i ve j değişkenleri birbirine eşit olduğunda 1'e, farklı olduklarında ise 0'a eşit olacağını ifade etmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile laminer akışlar kolayla çözülebilmektedir. Ancak türbülanslı akışların çözümü için türbülans modelleri kullanılmaktadır. Türbülanslı akışın çözümün zor olmasının nedeni, sürekli olarak daimî olmaması ve üç boyutlu olmasıdır. Ayrıca türbülanslı akış içinde rastgele ve çevrintili türbülans girdapları

ortaya çıkabilmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, türbülanslı akışın hareketini ölçmek için doğrudan sayısal simülasyon (direct numerical simulation DNS) kullanılmaktadır. DNS düşük Reynolds sayıları için kullanılmaktadır. Reynolds sayısı büyüdükçe DNS hesaplamaları daha da güçleşir. Yüksek Reynolds sayıları için yeni türbülans modeli geliştirme çalışmaları devam etmektedir [60].

Yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akış alanlarının simülasyonunun yapılması için türbülanslı girdapların istatistiksel olarak benzer ve tahmin edilebilir olması gibi bazı basitleştirici kabuller yapılmaktadır (Büyük girdap simülasyonu, LES). Buna rağmen günümüz teknolojisinde, bu çözümlerin bilgisayar gereksiniminin karşılanması oldukça zordur. Bunun yerine kullanılmakta olan yöntem, matematiksel denklemler ve modeller kullanmaktır (Navier-Stokes denklemleri). Türbülans modeli çalışması için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri kullanılır [65].

Sabit viskoziteli sıkıştırılamaz bir akış için Navier-Stokes denklemi;

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (6.6)$$

Daimî, sıkıştırılamaz ve türbülanslı akış için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemi;

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \cdot \vec{\nabla}P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{V}(\tau_{ij,türbülans}) \quad (6.7)$$

$\tau_{ij,türbülans}$  terimi türbülans çalkantılarını hesaba katan bir ek terimdir. Özgül Reynolds gerilme tensörü olarakta bilinmektedir.

Günümüzde akış problemlerinde daha iyi çözüm sağlanabilmesi için kullanılmak üzere geliştirilmiş olan birçok türbülans modeli vardır. (k- $\epsilon$ ), (k- $\omega$ ) ve (q- $\omega$ ) modelleri kullanılan türbülans modelleri arasındadır. Genel olarak iki denklemlilik türbülans modelleri olarak anılırlar. Motor silindiri içerisindeki hava akışı çok karmaşık ve türbülanslı özelliğe sahiptir. Dolayısıyla doğru türbülans modelinin seçilmesi önemlidir. k- $\epsilon$  türbülans modeli hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde türbülanslı akışları analiz edebilmek için en yaygın kullanılan modeldir. Temel olarak iki farklı transport denklemi kullanılarak türbülans tanımlayan iki denklemlilik bir modeldir. Bu denklemlerdeki değişkenlerden ilki türbülans kinetik enerjisi (k),

türbülanstaki enerjiyi belirler. Diğeri ise türbülans yitim hızı ( $\varepsilon$ ), türbülans kinetik enerjisindeki yayılım miktarını belirler. RNG ( $k-\varepsilon$ ) ise türbülans viskozitesini uygun şekilde düzelterek girdap ve dönme hareketlerinin etkilerini göz önüne alır. Küçük ölçekli girdapların hareket denklemlerinden elde edilmektedir. Böylelikle küçük girdapları da istatistiksel olarak çözüme dahil etmekte ve akış hareketi üzerinde başarılı bir yaklaşım getirebilmektedir.

Motor silindiri içindeki hava hareketleri gözlemlendiğinde, hava akışının yüksek türbülans seviyelerinde ve girdap hareketlerinin olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında, 3 farklı türbülans modeli (RNG  $k-\varepsilon$ , Standart  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  SST) modelleri simülasyon çalışması ile karşılaştırılmıştır. Hem düşük Reynolds sayısı etkilerini içerisine katan, hem de yüksek girdaplı akışlarda daha doğru sonuçlar vermekte olan RNG ( $k-\varepsilon$ ) türbülans modeli kullanılmıştır.

## 6.2. Simülasyon Geometrisi ve Ağ Yapısı

Bu tez çalışmasında hem simülasyon hemde test aşamasında kullanılan iki motorun bazı özellikleri aşağıdaki Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

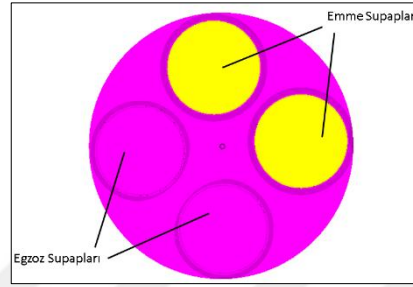
Tablo 6.1. Motor-A ve Motor B motorlarının geometrik özellikleri

Motor	Motor-A	Motor-B
Silindir Çapı (mm)	115	130
Silindir Sayısı	6	6
Emme Supap sayısı	2	2
Maksimum supap açıklığı (mm)	9.6	12.6

Gerçekleştirilen analizlerde kullanılan akış hacmine, silindir parçaları, motor kafası, emme supapları ve hava emiş kanalları dahil edilmiştir. Her bir supap açıklığı için ayrı ayrı geometriler oluşturulmuş ve aynı parametreler ile analizler yapılmıştır. Böylelikle her supap açıklığı için sabit akışlı sürekli rejim koşullarında analizler

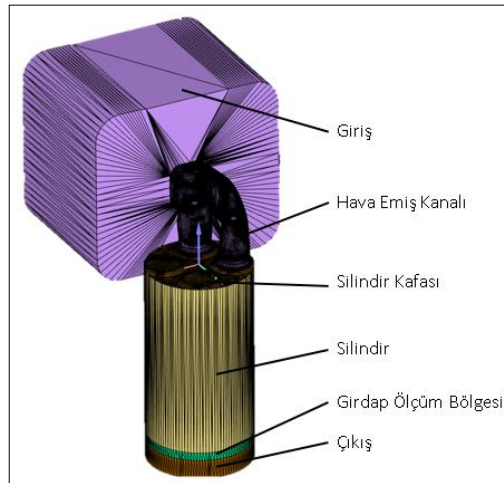
gerçekleştirilmiştir. Sabit akışlı sürekli rejim koşullarının sağlandığından emin olmak için akış debisi ve açısal momentum akılarının yakınsamaları dikkate alınmıştır.

Tez çalışması kapsamındaki temel amaç hava emiş stroğu sırasındaki girdap oranının belirlenmesi olduğu için, egzoz kanalları akış hacmine dahil edilmemiştir. Şekil 6.1’de gösterildiği gibi egzoz supapları kapalı, sadece emme supaplarının hareketleri göz önüne alınmıştır.



Şekil 6.1. Emme ve egzoz supap geometrileri

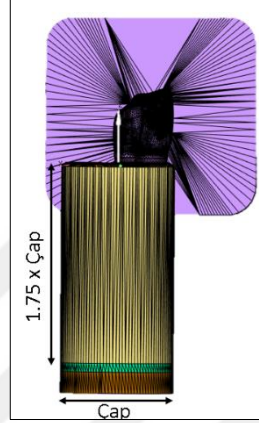
Simülasyon modelinde teste olduğu gibi motorun bulunduğu oda hacminden hava emmesi durumunu simüle etmek gerekmektedir. Bu amaçla modelin giriş sınırına büyük bir hacim (durulma odası) eklenmiştir. Eklenen bu hacmin temel amacı test ortamını simülasyona bire bir yansıtılabilmek, emme kanalı içerisindeki akışın modelin sınırındaki olabilecek türbülans etkilerinden ve akış dalgalanmalarından etkilenmemesini sağlamaktır. Ayrıca giriş koşulu olan basınç değerlerini sağlayabilmektir.



Şekil 6.2. Simülasyon motor parçaları ve akış hacmi geometrisi

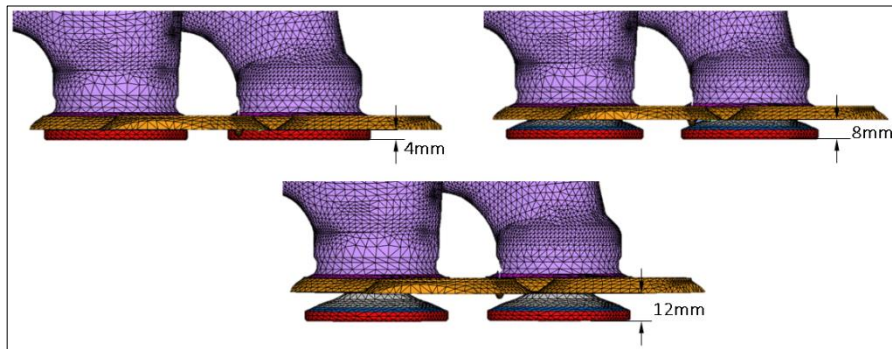
Simülasyon modelinde oluşturulmuş olan motor parçalarını ve akış hacmi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

Girdap oranı ölçüm yapılan akış hacmi, yapılan literatür araştırması sonucunda silindir kafasından silindir çapının 1,75 katı kadar uzağına konumlandırılmıştır [79]. (Şekil 6.3)



Şekil 6.3. Girdap oranı ölçüm hacmi

Simülasyon modelinde her bir emme supap açıklığı için farklı geometri ve analiz dosyaları oluşturulmuştur. Bunun amacı; test sonuçlarının bire bir yansıtılabilmek, her supap açıklığı için sabit akışlı sürekli rejim koşulunu sağlayabilmek ve sonuçları karşılaştırabilmektir. Simülasyon modelindeki üç farklı supap açıklığını (4mm, 8mm, 12mm) göstermek olan akış hacimleri Şekil 6.4’te görülmektedir. Ölçümler sonucu elde edilen giriş ve çıkış koşulları, oluşturulmuş her bir simülasyon modeli için sınır koşulları olarak kullanılmıştır.

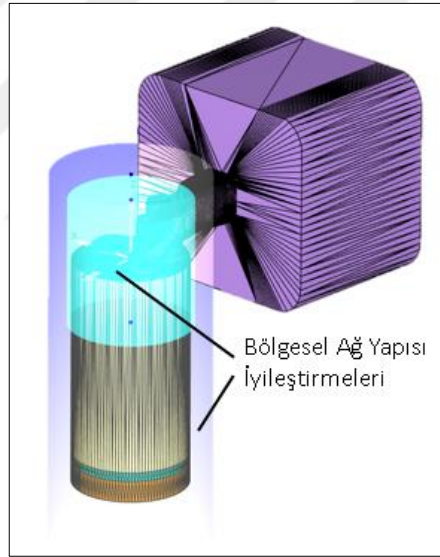


Şekil 6.4. Simülasyon modelinde kullanılan 4mm, 8mm ve 12 mm supap açıklıklarındaki akış hacimleri [65]

Oluşturulmuş olan akış hacimlerinde egzoz supapları kapalıdır. Buna karşın emme supapları belirli mesafeler için ayrı ayrı konumlandırılmıştır. Analizler gerçekleştirilerek, farklı supap açıklıkları için hava debisi ve girdap oranları değerleri belirlenmiştir.

Analizlerin gerçekleştirildiği Converge adlı yazılım, aynı amaçla kullanılan diğer yazılımlardan farklı olarak geometri üzerindeki ağ yapısını belirlenen parametreler çerçevesinde akış koşullarına uygun olarak oluşturmaktadır. Çözümlenen analiz bu ağ yapısı ile gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte ağ yapısındaki baz olarak belirlenen boyut referans kabul edilerek ölçeklendirme yapılmasına izin vermektedir. Ölçeklendirme denklemi Denklem (6.8)'de gösterilmektedir;

$$dx_{\text{Ağ yapı boyutu}} = \frac{dx_{\text{Baz boyut}}}{\text{ölçeklendirme sayısı}} \quad (6.8)$$

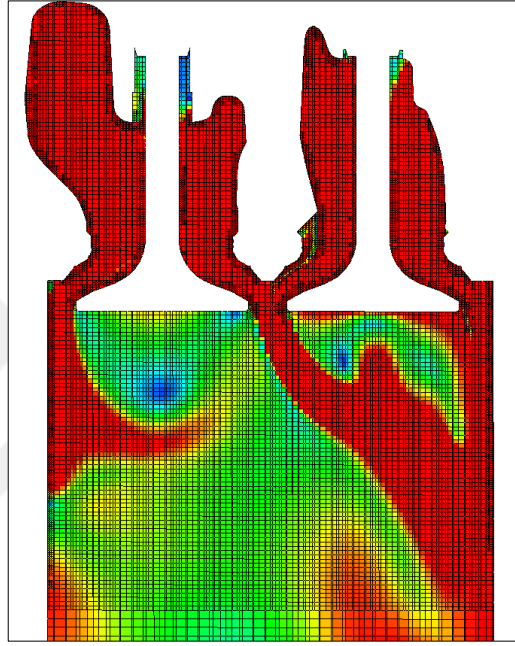


Şekil 6.5. Bölgesel ağ yapısı iyileştirmeleri

Akış karakterinin en doğru şekilde belirlenebilmesi ve analizin doğruluğu için ağ yapısının kritik bölgelerde daha sık ve daha küçük elemanlardan oluşması gerekmektedir. Bu çalışmadaki geometri için silindir kafası ile emme supapları arasındaki hacim kritik özellik taşımaktadır. Dolayısıyla silindir içindeki akışın doğru şekilde çözülmesi için bu hacimdeki ağ yapısına bölgesel ağ yapısı iyileştirmesi uygulanmıştır. Bununla birlikte supap ve kafa yüzeylerinde de ağ iyileştirmesi

gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bölgesel ağ yapıları iyileştirmeleri Şekil 6.5’ de gösterilmektedir.

Ağ yapısı boyutu için temel değer olarak 4 mm alınmıştır. Analizler tekrarlanarak ağ yapısı optimizasyonu yapılmış ve çözümün yakınsama değerlerine bağlı olarak ağ yapısı yoğunluğu elde edilmiştir. Analiz çalışmaları amacıyla supap bölgesi için yapılan ağ yapısı kesit görüntüsü Şekil 6.6’da gösterilmektedir.



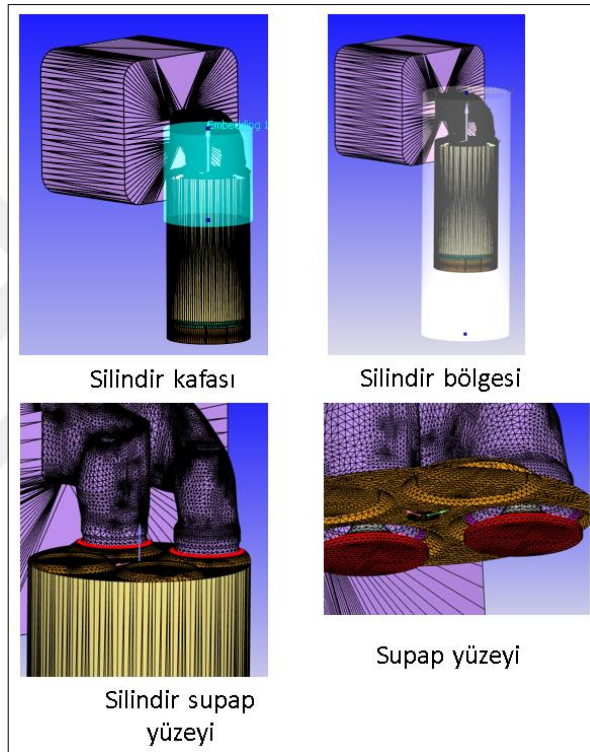
Şekil 6.6. Supap bölgesi ağ yapısı kesit görüntüsü

Yapılan analizlerin sonucunda doğru sonuç elde edebilmek için ağ yapısını oluşturan ağ elemanlarının büyüklükleri için hassasiyet çalışması gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet çalışması 12 mm supap açıklığı olan akış hacmi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7’de gösterilen silindir kafası, supap yüzeyleri ve silindir bölgesindeki ağ yapısının büyüklüğünün etkisi incelenmiştir. Hassasiyet çalışması Şekil6.8’da gösterildiği üzere 5 aşamada Tablo 6.2’de gösterilen senaryolar için gerçekleştirilmiştir. Denklem (6.8)’de açıklanan ölçeklendirme sayısı her senaryoda kademe kademe artırılarak daha küçük ve daha fazla sayıda elemanlardan oluşan ağ yapıları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen girdap oranı değerinin ağ yapısındaki eleman sayısına bağlı olarak yakınsamasına dikkat edilmiş ve nihai analiz için uygun ağ yapısı elde edilmiştir.



Tablo 6.2. Ağ yapısı hassasiyet çalışması senaryoları

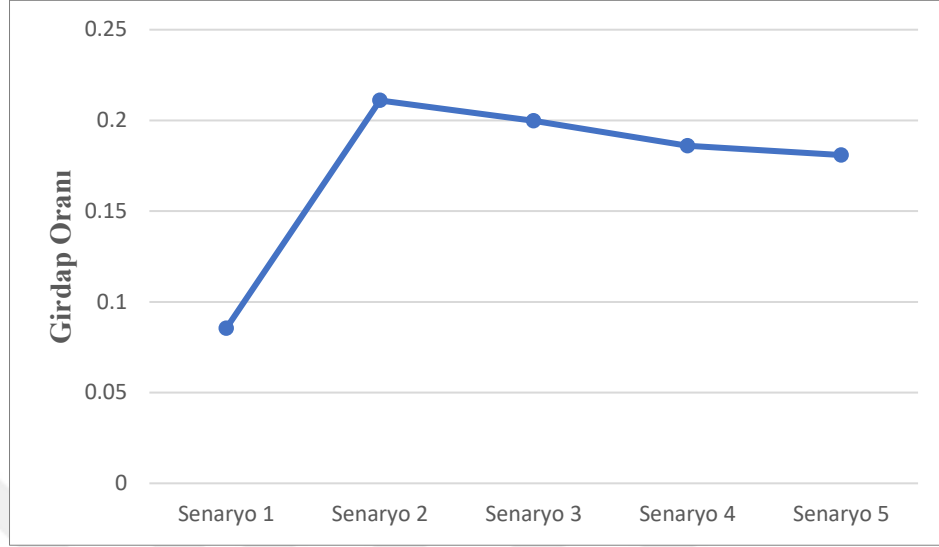
	Ölçeklendirme		Sayısı	
	Silindir kafası	Silindir bölgesi	Silindir supap basma yüzeyi	Supap yüzeyi
Senaryo 1	1	1	1	1
Senaryo 2	2	1	1	1
Senaryo 3	2	1	2	2
Senaryo 4	2	1	3	2
Senaryo 5	2	1	3	3



Şekil 6.7. Ağ yapısı hassasiyet çalışma bölgeleri

Gerçekleştirilen analizlerde, deneysel testlerin girdi parametreleri sınır şartlar olarak belirlenmiştir. Bundaki amaç; test koşullarını ve ortamını yapılan analize mümkün olduğu kadar yansıtmaktır. Testler sırasındaki ölçümlerde elde edilen giriş ve çıkış basınçları her bir supap açıklığı için yapılan analizde sınır değer olarak kullanılmıştır. Başlangıç koşulu olarak atmosferik basınç kullanılmıştır. Çıkış basıncı olarak statik basınç sınır koşulu uygulanmıştır. Böylelikle test parametrelerine uygun olarak analizde giriş ve çıkış arasında oluşturulan basınç farkı ile akış hacmi içinde hava hareketinin oluşumu sağlanmış ve girdap hareketi analizi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık

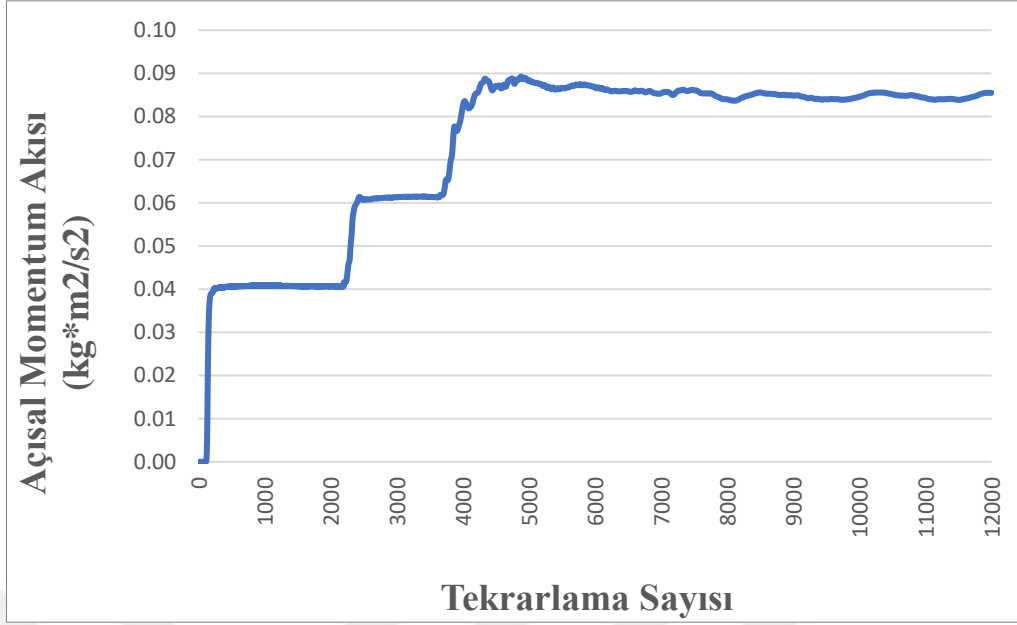
sınır koşulu olarak testler sırasında laboratuvarında ölçülmüş olan sıcaklık değeri kullanılmıştır.



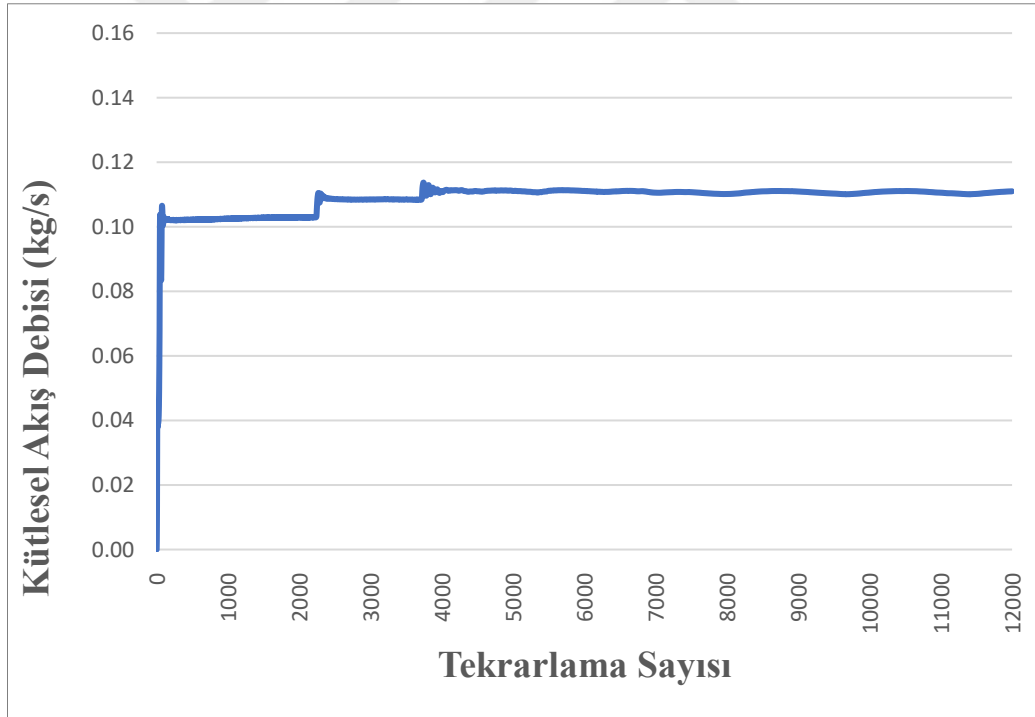
Şekil 6.8. 5 ayrı senaryo ile ağ yapısı hassasiyet çalışması

Analiz sonucunda elde edilen çıktı değerlerden girdap oranı hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Girdap oranı formülü Denklem (4.28)' de verilmiş idi. Bu denkleme göre girdap oranı değeri tork değeri ile doğru orantılı, kütleli debinin karesi ile test orantılıdır. Analiz sonunda çıktı değerleri arasında kütleli debi değeri ve tork değeri içinde açısal momentum akısı değerleri elde edilmektedir. Girdap oranı hesaplaması için bu değerler alınmıştır. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilen kütleli debi ve açısal momentum akısı grafikleri çizdirilerek değerlerin stabil olduğu bölge olan 6000-12000 tekrarlanma (iterasyon) arası değerlerin ortalamaları alınarak girdap oranı hesaplanmıştır. Böylelikle analiz sonuçlarındaki salınımdan kaynaklanan hatalar dikkate alınmıştır. Her supap açıklığı için analizler ve girdap oranı hesaplamaları tekrarlanmıştır.

Bölüm 6.1'de bahsedildiği üzere, türbülanslı akışın analizi için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında en doğru türbülans modelinin seçimi için karşılaştırılmalı bir çalışma yapılmıştır. En yaygın olarak kullanılan RNG k-ε, Standart k-ε ve k-ω SST türbülans modelleri kullanılarak Motor-A için 9mm supap açıklığında, Motor-B için 12mm supap açıklığı için simülasyon çalışmaları yapılmış ve elde edilen girdap oranları balpeteği tork ölçüm sonucu ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.9. Analiz sonucu açısal momentum akısı değerleri (11mm supap açıklığı)



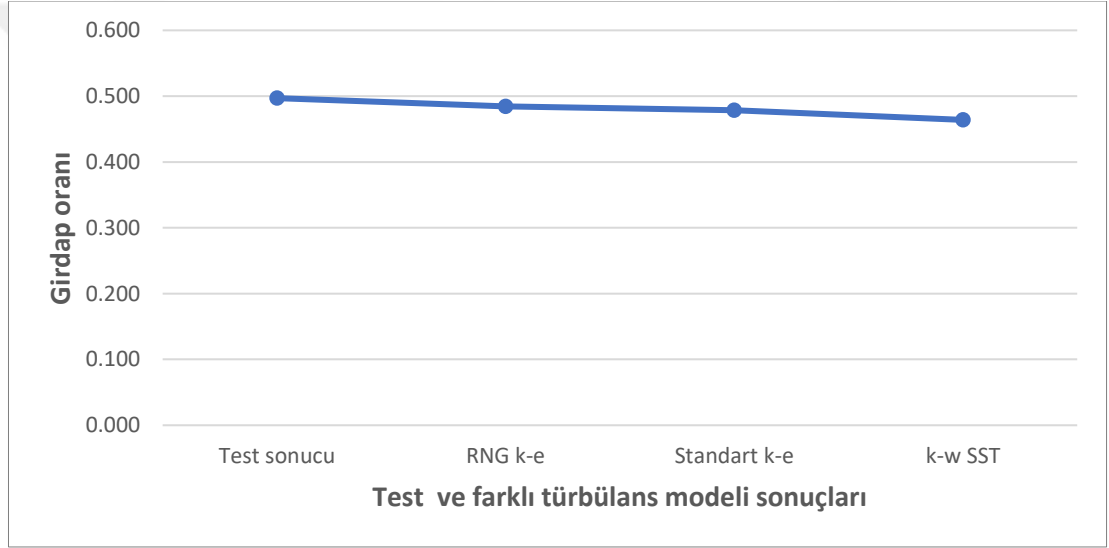
Şekil 6.10. Analiz sonucu kütleli debi değerleri (11mm supap açıklığı)

Yapılan ilk çalışmada Motor-A modeli üzerinde Converge programı kullanılarak tüm mesh sayısı, basınç ve sıcaklık değerleri, supap açıklığı gibi tüm girdi parametreleri aynı tutularak sadece türbülans modelleri değiştirilerek ardarda analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen girdap oranı değerleri ve test sonucundan olan

yüzdesel fark oranı Tablo 6.3'te ve grafiksel olarak Şekil 6.11'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar gözden geçirildiğinde bal peteği tork yöntemi ile ölçülen girdap oranına en yakın sonuç RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile elde edildiği görülmektedir.

Tablo 6.3. Motor-A 9 mm supap açıklığı için türbülans modeli karşılaştırması

Türbülans Modeli	Girdap Oranı	Yüzde Fark (%)
Test sonucu	0.497	-
RNG k- $\epsilon$	0.484	2.5
Standart k- $\epsilon$	0.478	3.7
k- $\omega$ SST	0.464	6.7



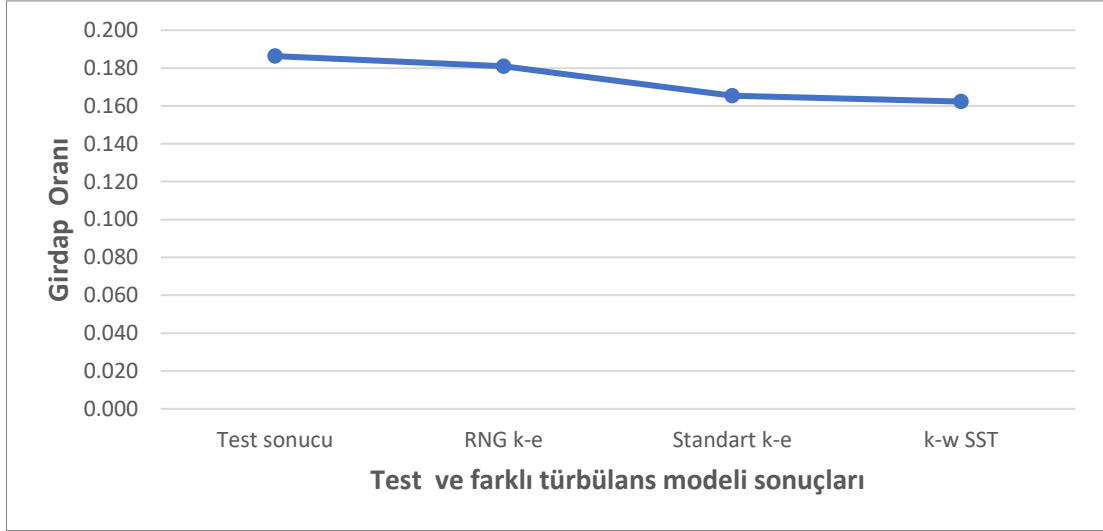
Şekil 6.11. Motor-A 9 mm supap açıklığı türbülans modeli karşılaştırma grafiği

Aynı simülasyon çalışması Motor-B için 12mm supap açıklığı için gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 6.4 ve grafiksel olarak Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

Motor-B için yapılan çalışmada da bal peteği tork yöntemi ile ölçülen girdap oranına en yakın sonuç RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile elde edildiği görülmektedir.

Tablo 6.4. Motor-B 12 mm supap açıklığı için türbülans modeli karşılaştırması

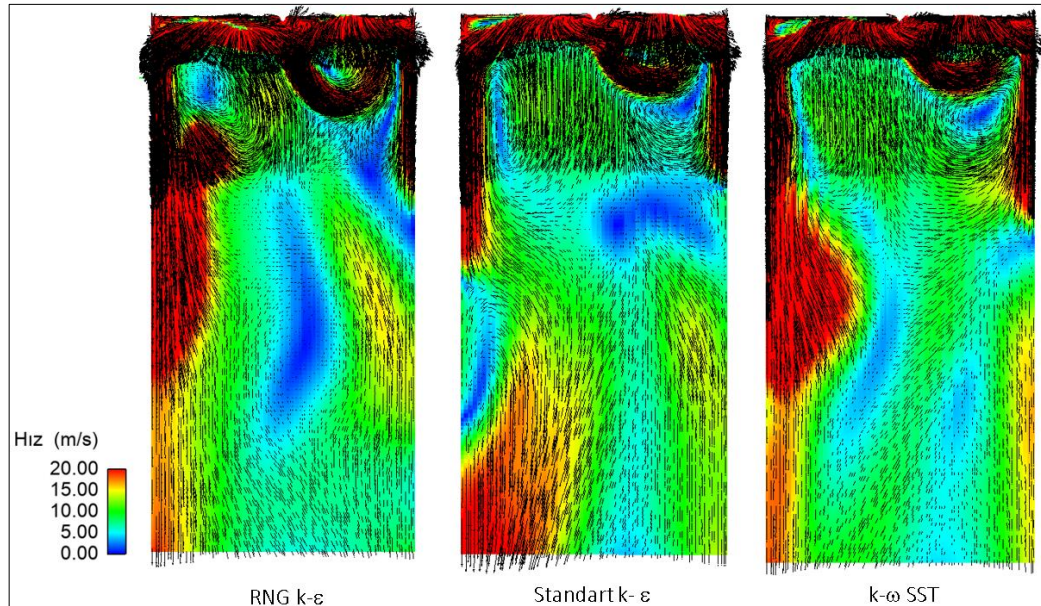
Türbülans Modeli	Girdap Oranı	Yüzde Fark (%)
Test sonucu	0.186	-
RNG k- $\epsilon$	0.181	2.9
Standart k- $\epsilon$	0.165	11.2
k- $\omega$ SST	0.162	12.9



Şekil 6.12. Motor-B 12 mm supap açıklığı türbülans modeli karşılaştırma grafiği

Motor-B için gerçekleştirilen simülasyon sonucu silindir merkezinden alınan kesit görüntüsü Şekil 6.13'te görülmektedir. RNG k-ε türbülans modeli ile yapılan simülasyonda silindirin merkezinde diğer iki türbülans modelinden farklı olarak bir vortex oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Standart k-ε ve k-ω SST türbülans modelleri için silindir kafasına yakın bölgedeki akış özellikleri ve hız vektörleri çok benzer olsa da silindir kafasından uzaklaştıkça akış özelliklerinin çok farklılaştığı görülmektedir.

Motor-A ile yapılan simülasyon sonucu ise ekler kısmında EK-A'ye eklenmiştir.



Şekil 6.13. Motor-B 12 mm supap açıklığı için türbülans modelleri simülasyon sonuçları (silindir merkezi kesit görüntüsü)

Simülasyon sonucu elde edilen girdap oranı değerleri karşılaştırıldığında ve buna olarak simülasyon sonuçları akış özellikleri değerlendirildiğinde tez çalışmasındaki tüm simülasyon çalışmasında RNG k- $\epsilon$  türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir.



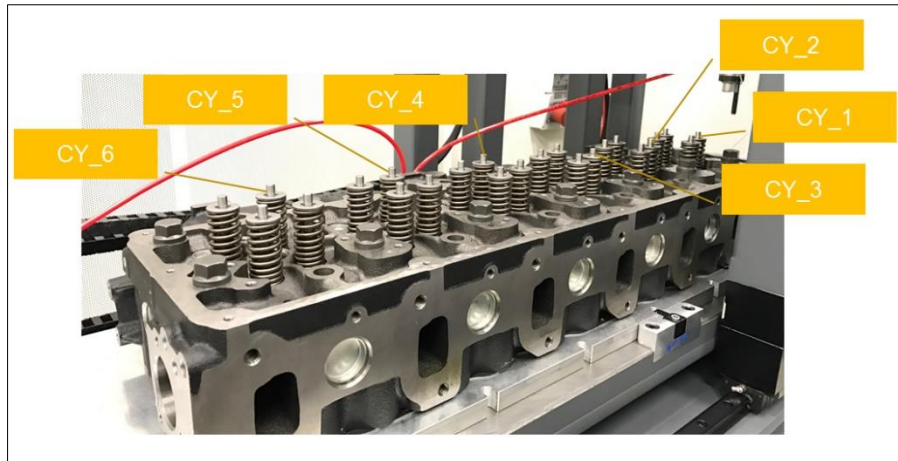
## 7. DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Bu tez kapsamında Ford Otosan bünyesindeki akış laboratuvarında Motor-A ve Motor-B olmak üzere iki farklı motor için hem port ölçümleri hem de 2 ve 3 boyutlu PGHÖ ölçüm testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz yöntemi kullanılarak testler sonucunda elde edilen değerler doğrulanmıştır.

### 7.1. Port Girdap Oranı Ölçümleri

Port ölçümlerinin temel amacı her iki motor içinde girdap katsayılarını ve alpha k akış katsayısını belirlemektir. Yapılan ölçümlerde ortam ve akış içindeki sıcaklık, ortam basıncı, akış içindeki basınç, akışın oluşturduğu tork değeri, kütle debisi sensörler yardımı ile ölçülmektedir. Alpha k akış kat sayısı geliştirilen labview yazılımına eklenmiş olup sonuçlar otomatik olarak bu yazılımdan alınmaktadır. Girdap katsayısı ise yazılımdan alınan sonuçlar kullanılarak Denklem (4.28)'de gösterilen ifade ile ayrıca hesaplanmaktadır.

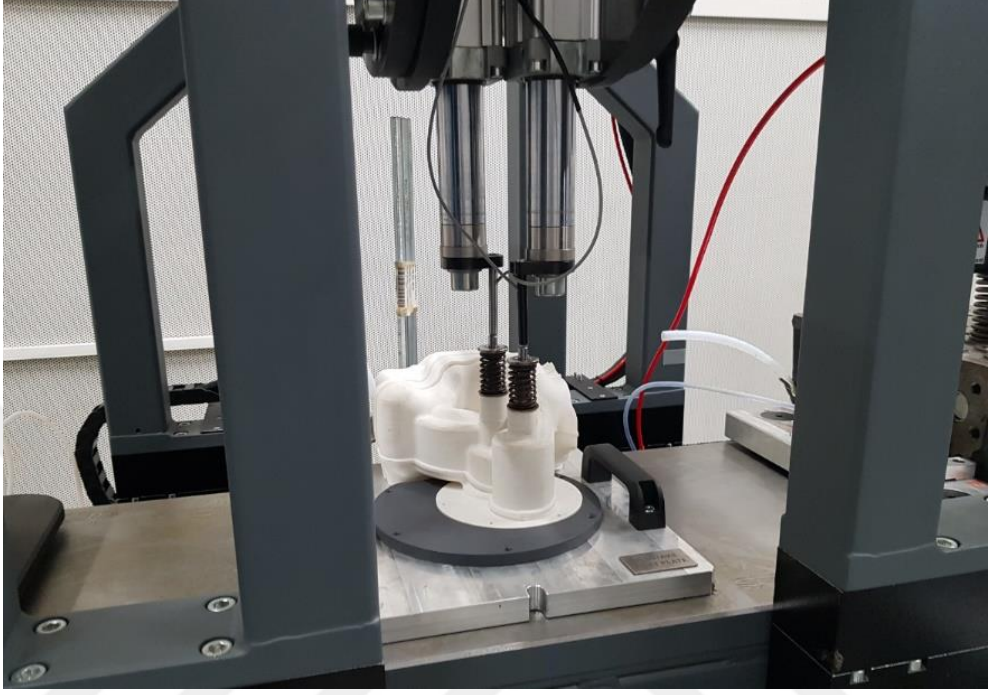
Motor-B ölçümleri için Şekil 7.1'de görülen motor kafası kullanılmakta iken Motor-A için yapılan testte Şekil 7.2'de görülen farklı düzeneklere uyum sağlayabilecek prototip parça tasarlanmış ve hızlı prototipleme yöntemi ile üretilmiştir. Prototip üretilen parça Motor-A port detaylarını ve geometrisini bire bir temsil edecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 7.1. Motor-B silindir kafası



Prototip parça, motorda olduğu gibi hava emiş kanallarını, hava dağıtıcısının bir parçasını, emme supaplarını, supap yaylarını ve supap kaidelerini içermektedir. Buna ek olarak, PGHÖ ölçümlerinde de plastik prototip kullanılmıştır.



Şekil 7.2. Motor-A için üretilen plastik prototip parça

İlk olarak Motor-A ve Motor-B motorlarının girdap oranlarını belirleyebilmek için ölçümler Tablo 7.1’de gösterilen test koşullarında balpeteği girdap anemometresinde gerçekleştirilmiştir.

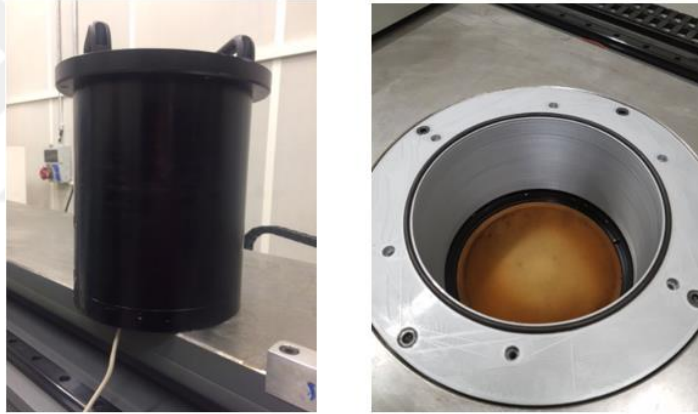
Girdap oranı ölçümlerin güvenilirliği Motor-B silindir kafasındaki 3 farklı silindir üzerinde tekrarlanarak yapılan testlerle irdelenmiştir. Yapılan ölçümlerde 1 mm supap açıklığından başlanarak 12mm supap açıklığına kadar her bir supap açıklığı için ölçümler alınmıştır. Balpeteği silindir gömleği içinde aşağı akış yönünde silindir alev cidarına yerleştirilmiştir. Böylelikle aksel olmayan akış bileşenlerini ortadan kaldırılmıştır. Balpeteği çapı 130 mm’dir. (Şekil 7.3)

Emme supaplarının açılması ile başlayan akışın aksel yöndeki bileşeni bal peteğinin için geçmekte, açılmal eksendeki bileşeni ile balpeteğini dönmeye zorlayarak bir tork oluşturmaktadır. Bu oluşan tork balpeteği altındaki düzenek ve ölçüm cihazı ile ölçülmektedir. (Şekil 7.4)

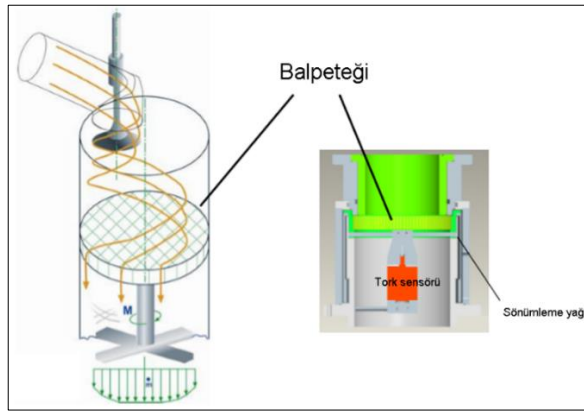


Tablo 7.1. Motor-A ve Motor-B girdap ölçüm test şartları

<b>Örnekleme zamanı</b>	120 s
<b>Kontrol parametresi</b>	0.00045
<b>Girdap öncesi Tork değeri</b>	0.045 Nmm
<b>Sıcaklık (Akış)</b>	18.11 °C
<b>Sıcaklık (Ortam)</b>	21.09 °C
<b>Nem (Ortam)</b>	32.41 %
<b>Maksimum Tork değeri</b>	500 Nmm
<b>Maksimum Tork değeri (kalibrasyon sonrası)</b>	375.23 Nmm

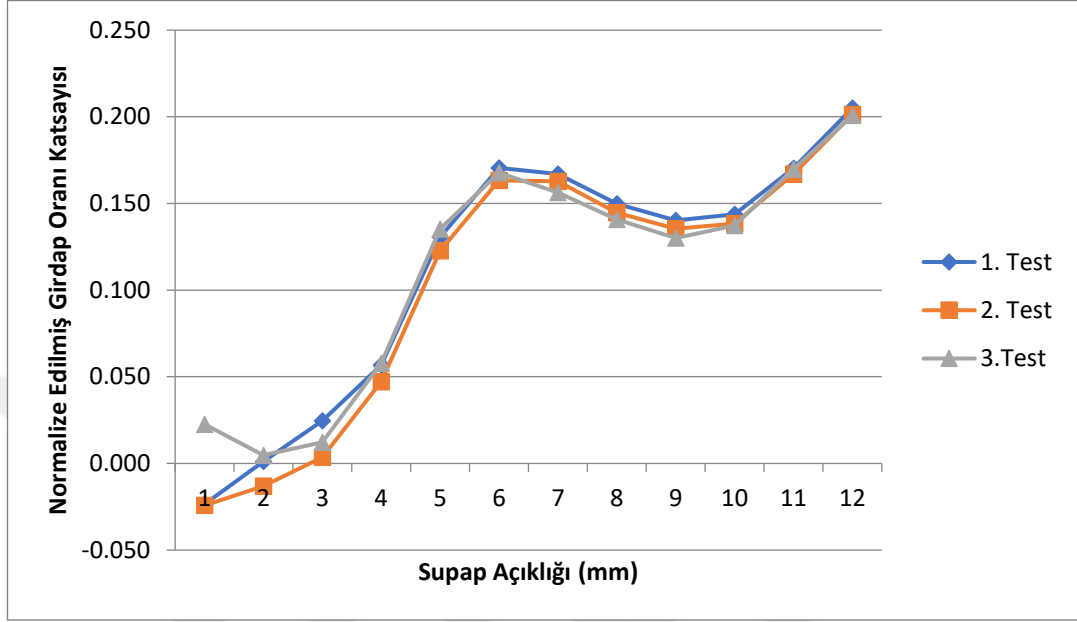


Şekil 7.3. Balpeteği

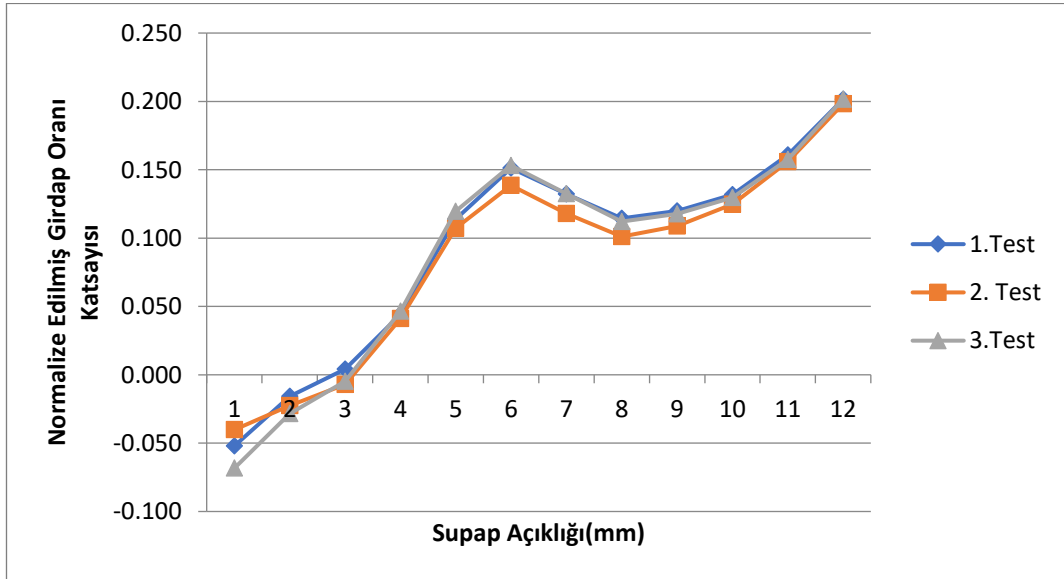


Şekil 7.4. Balpeteği tork ölçüm [36]

Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini belirleyebilmek için Motor-B motor kafası üzerinde 1., 2., ve 3. silindirlere yapılan testler 3 defa tekrarlanmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen girdap oranları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



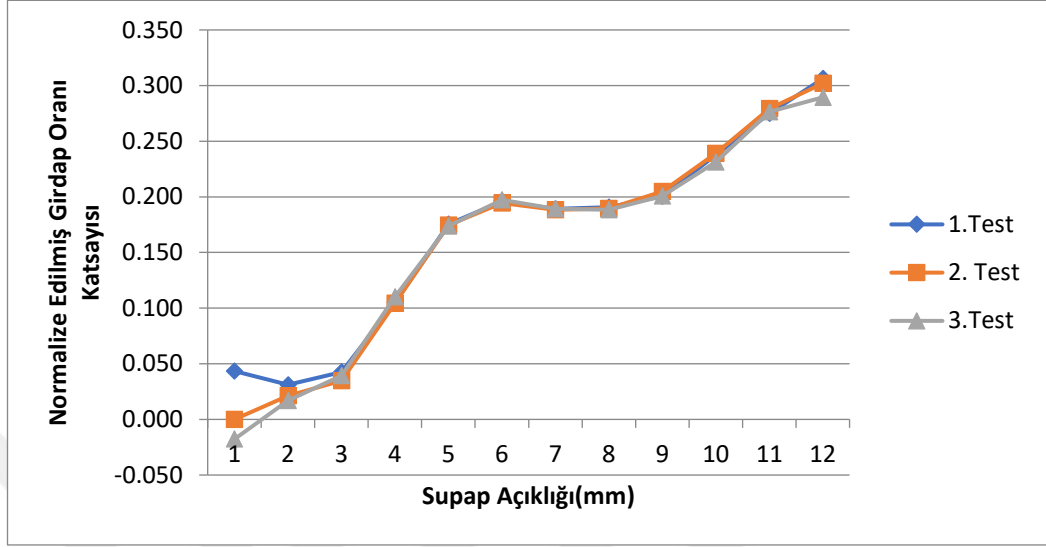
Şekil 7.5. Motor-B 1 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları



Şekil 7.6. Motor-B 2 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları

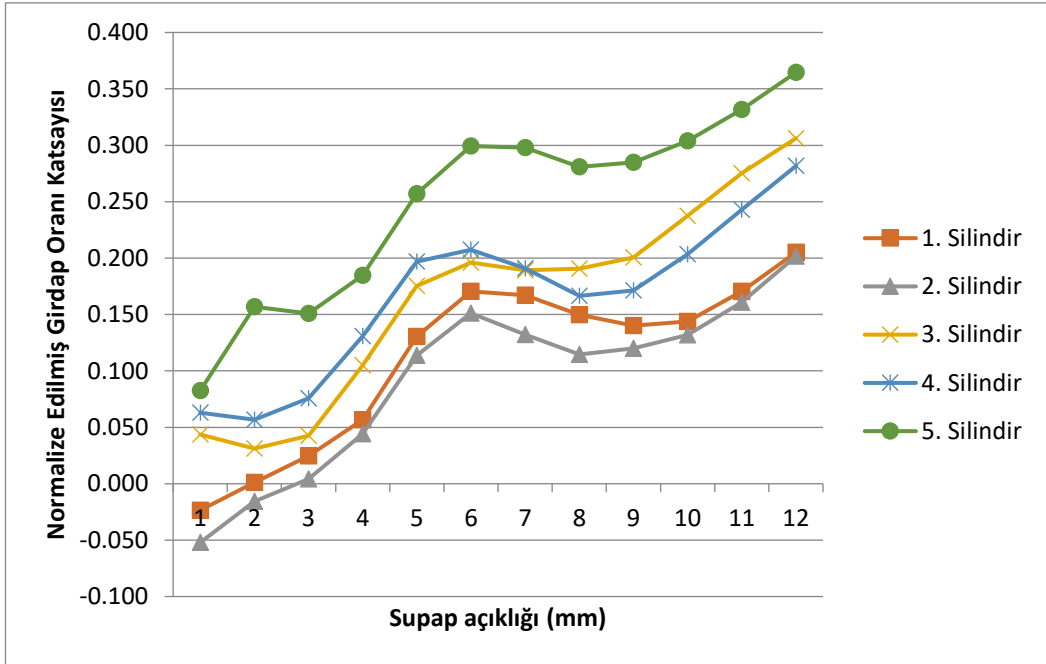
İlk 3 silindirde yapılan testlerin sonuçları gözden geçirildiğinde sonuçların bazı supap açıklıkları için bire bir aynı, bazıları için aradaki farkın ihmal edilebilir ölçüde kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Yapılan testlerin tekrarlanabilir ve güvenilir

olduğunun kanıtlanmasının ardından testler tüm silindirler için devam edilerek tamamlanmıştır.



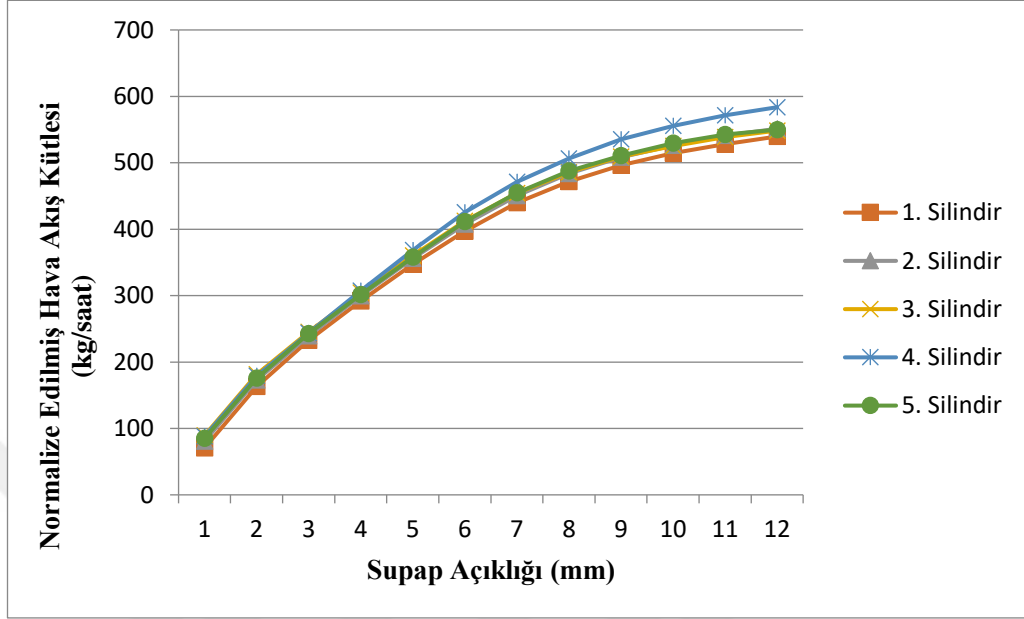
Şekil 7.7. Motor-B 3 nolu silindirin normalize edilmiş 3 tekrarlı girdap oranı ölçüm sonuçları

Motor-B üzerindeki kullanılabilir 5 silindirin emme supabın her 1 mm açıklığı için ölçülen girdap oranı karşılaştırma grafiği aşağıdaki Şekil 7.8’de verilmiştir. Motor-B için ölçülen girdap oranı değerinin 0,20-0,37 aralığında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.8. Motor-B silindir kafası 5 silindirin normalize edilmiş girdap oranı ölçüm sonuç karşılaştırması

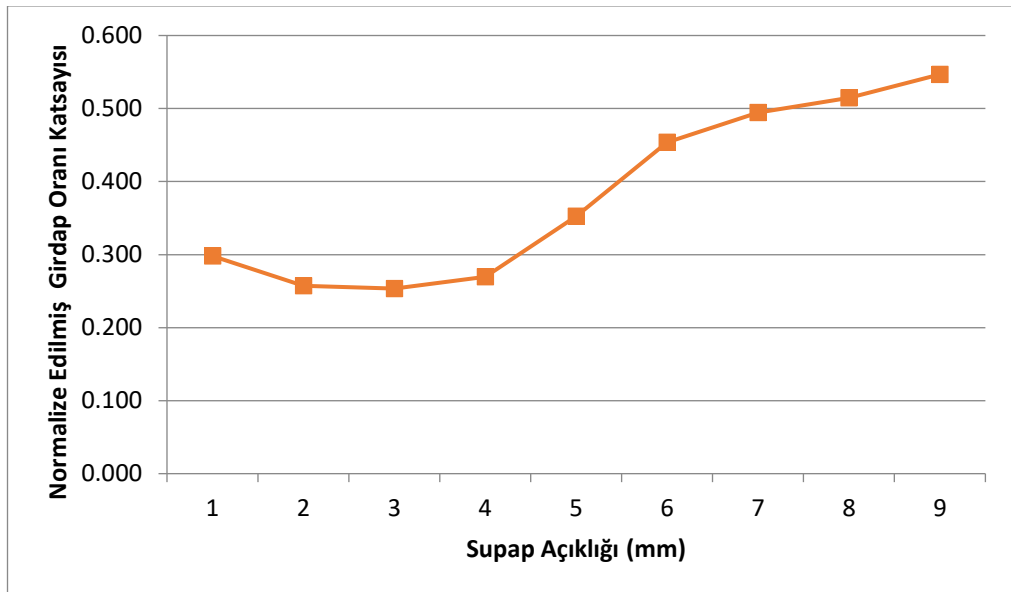
Yapılan testler sırasında ölçülen gerçek hava akış kütle ölçüm değerleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Motor-B silindir kafası 5 silindirin normalize edilmiş hava akış kütle debisi karşılaştırması

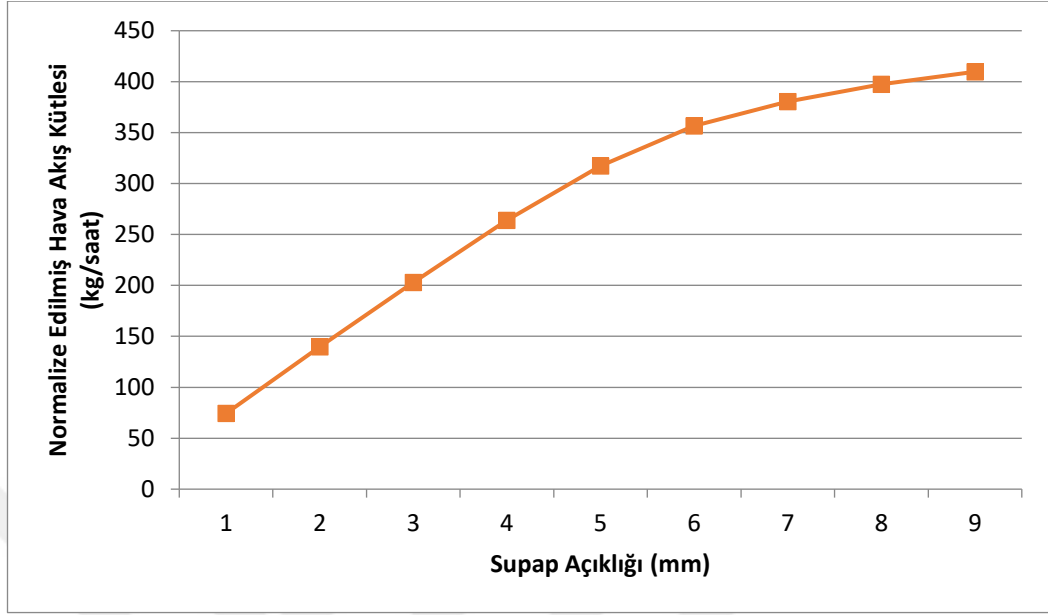
Ölçüm sisteminin tekrarlı ölçüm ile doğrulanmasından sonra Motor-A'yı simüle eden plastik prototip parça üzerinde de girdap oranı ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Yapılan girdap oranı ölçüm sonucu aşağıdaki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 7.10. Motor-A plastik prototip parça normalize edilmiş girdap oranı ölçümü

Hava Akış debisi ölçümü ise aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.11. Motor-A plastik prototip parça normalize edilmiş hava akış kütle debisi ölçümü

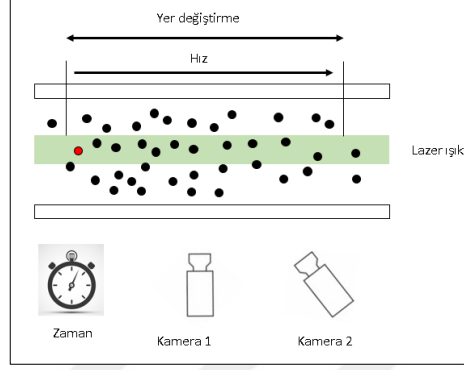
Motor-A plastik prototip parça ve Motor-B silindir kafası üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarına gözden geçirildiğinde Motor-B'deki girdap oranı katsayıları silindirler arasında 0,20-0,37 arasında olduğu görülürken Motor-A plastik prototipte girdap oranı değeri 0,55 olarak ölçüldüğü görülmüştür.

## 7.2. 2D PGHÖ Test Düzenine Kurulması ve Girdap Oranı Ölçümleri

Parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PGHÖ) sistemi, akış alanına müdahale etmeksizin deneysel veri üretebilen bir tekniğe sahiptir. Akış alanının görüntülenmesi ve hız vektörlerinin elde edilmesi, bu ölçüm tekniğinin çıktılarıdır. PGHÖ sistemi, birçok dalda akış alanının incelenmesi, geliştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile elde edilen sonuçların doğrulanması gibi amaçlarla kullanılmaktadır.

PGHÖ sisteminin başlıca elemanları; 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. İlgilenilen akışkan cinsine ve akış koşullarına bağlı olarak boyutu ve yoğunluğu belirlenen parçacıklar, lazer yardımıyla bir düzlem üzerinde aydınlatılmakta ve parçacıklardan saçılan ışık hızlı kamera tarafından art arda kaydedilmektedir

(Şekil7.12). Art arda gelen iki görüntünün incelenmesiyle birlikte parçacıkların belirli zaman aralığındaki yer değiştirme ölçümleri kullanılarak hız vektörleri elde edilmektedir (Şekil 7.13). Bu teknik daha önceki bölümlerde detaylı anlatılan Lagrange yaklaşımına dayanmaktadır.



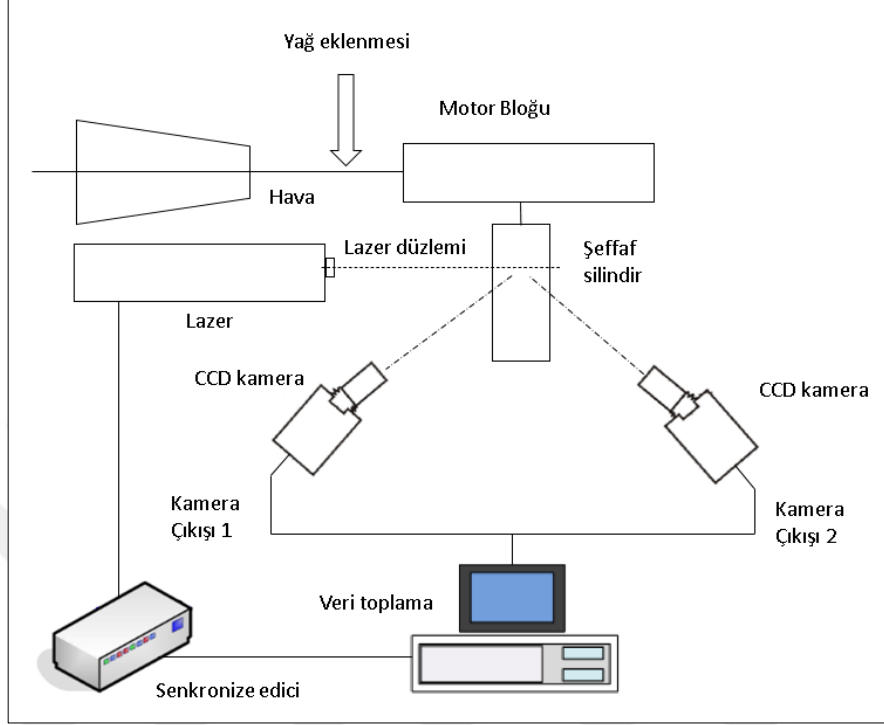
Şekil 7.12. Partikül izleme hızölçeri (PGHÖ) temel çalışma prensibi

Bu çalışma kapsamında Ford Otosan bünyesindeki LaVision şirketine ait PGHÖ sistemi kullanılmıştır. Temel olarak görüntüleme sistemini lazer ışık kaynağı ve yüksek hızlı kameralar oluşturur. Kameralar Phantom yüksek hızlı olup Lavision Flowmaster dijital CCD cihazlarıdır ve 12 bit dinamik aralığa, 1280 sütun ve 1024 satır piksel çözünürlüğüne sahiptir. Kamera lensi olarak 50 mm f/2.8 Nikon kamera lensi ve 532 nm bant geçiren filtre kullanılmıştır. Lazer ışık kaynağı ise çift darbe özelliğinde, frekansı ikiye katlanmış nd: YAG lazerdir. Görüntüleme deneyleri için tipik darbe süreleri 532 nm'de 1 mJ/5-7 ns'dir. Lazerin maksimum onarım hızı 15 Hz'dir. Particle Master System, ultra kısa darbeleri bir lazer olan Led ışığı içermektedir.

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü test düzeneği kurulumu 2 ana başlıktan oluşmaktadır. Bunlar görüntüleme ve lazer sistemlerinin mekanik kurulumu ve Davis yazılımı kullanılarak kalibrasyon işleminin yapılmasıdır. PGHÖ test düzeneği kurulumu akış diyagramı ve detaylı anlatım EK-B'da bulunabilir.

İlk olarak ölçüm alınacak hacmi oluşturan, akışkan parçacıkların içinden geçecek olan şeffaf silindirin test düzeneğine montajı yapılır. Ölçümlerin görüntülemeli sistem ile yapılabilmesi için Şekil 7.14'te gösterildiği gibi silindir duvarı şeffaf bir malzemeyle (plexiglass) üretilmiştir. Bu sayede, iki adet hava emiş supabının açılmasıyla birlikte, silindir içerisinde gerçekleşen hava hareketleri PGHÖ sistemiyle

görüntülenebilecektir. Şeffaf silindir ölçüm sırasında, alttaki bir piston yardımıyla silindir kafasına sabitlenmekte ve hiçbir kaçak oluşmadığından emin olunmaktadır.

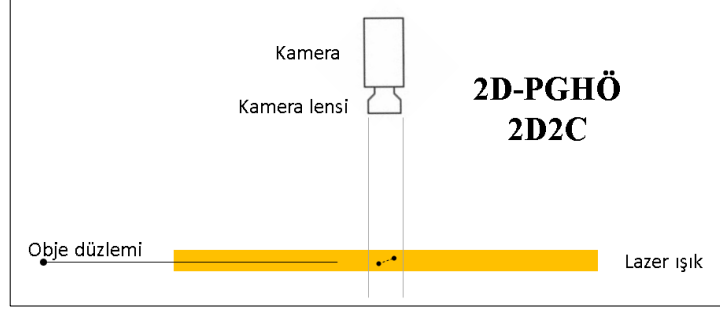


Şekil 7.13. PGHÖ çalışma prensibi

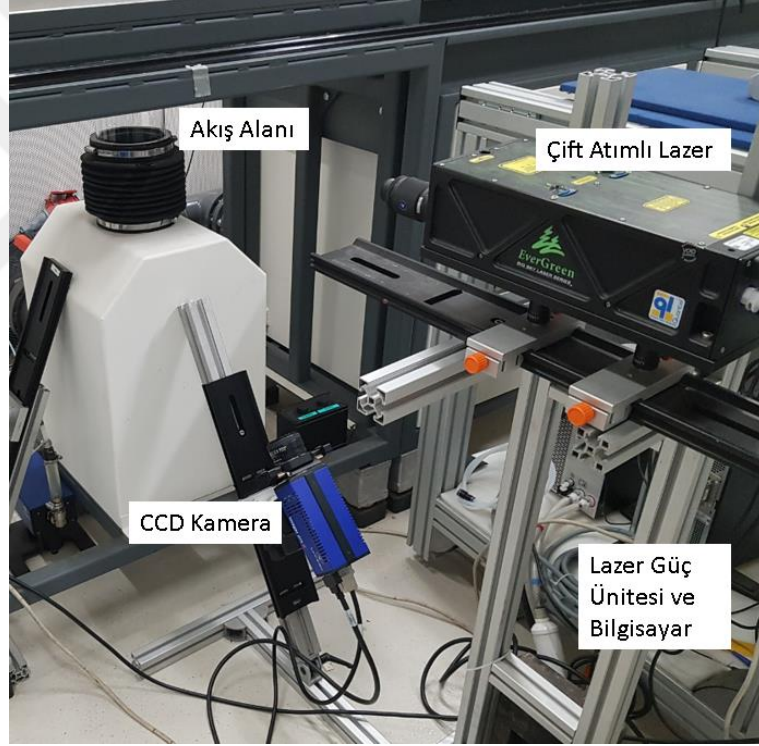


Şekil 7.14. PGHÖ ölçüm sistemi şeffaf silindir duvarı

Oluşturulan lazer düzlemi üzerinde, silindir içerisine gönderilen parçacıklandırılmış hava akışı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi CCD kamera yardımıyla görüntülenecektir (Şekil 7.15, Şekil 7.16).



Şekil 7.15. 2D PGHÖ ölçüm sistemi



Şekil 7.16. 2D PGHÖ ölçüm test sistemi kurulumu

Ölçüm alma işlemine başlamadan önce hızlı kamera ve oluşturulacak olan lazer düzleminin kalibrasyonun yapılması gereklidir. Bu kalibrasyon işlem için aşağıdaki Şekil 7.17’de görülen kalibrasyon düzlemi (106-10) kullanılmaktadır.

Kalibrasyon düzlemi şeffaf silindir duvarı içine kalibrasyon amacıyla aşağıdaki Şekil 7.18’deki gibi yerleştirildikten sonra lazer ışını düzlemi ile kalibrasyon düzleminin eşleştirilmesi ve hızlı kamera ile bu noktaların görüldüğü belirlenmektedir.



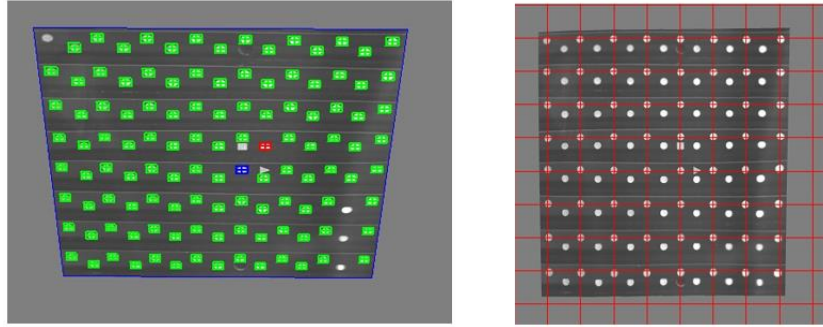


Şekil 7.17. Kalibrasyon düzlemi



Şekil 7.18. Kalibrasyon düzlemi montajlı şekli

Kalibrasyon düzlemi üzerindeki her bir noktanın yazılım tarafından tanımlanarak işaretlenmesi sağlandı. Aşağıdaki Şekil 7.19’da görüldüğü üzere bu açıdaki noktalar belirlenmiş, işaretlenmiş ve x-y düzlemine düzeltmesi matlab programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

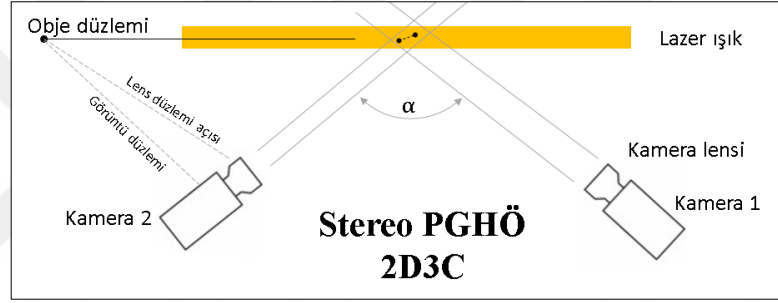


Şekil 7.19. Kalibrasyon düzlemi nokta tarama ve düzeltme görüntüleri

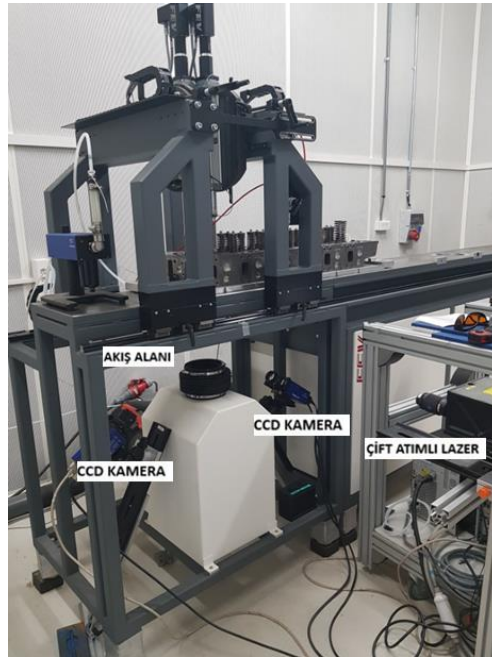
Yapılan test düzeneği kurulumunda hızlı kamera açısı  $44,76^\circ$  olarak ölçülmüştür. Kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon düzlemi test düzeneğindeki şeffaf silindir içinden alınarak deneme olarak bir lazer ışın düzlemi atılarak silindirin yan duvarlarının lazer ışın düzlemi ile aydınlatıldığı kamera görüntüleri ile teyit edilir ve testin gerçekleştirme aşamasına geçilmiştir. 2D PGHÖ ölçümü Motor-A'yı simüle eden prototip parça ve Motor-B silindir kafası üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### 7.3. 3D PGHÖ Test Düzeneğinin Kurulması ve Girdap Oranı Ölçümleri

3 Boyutlu PGHÖ girdap oranı ölçümlerinde 2 boyut ölçümlerden farklı olarak 2 adet hızlı kamera kullanılmaktadır. Şematik gösterimi aşağıdaki Şekil 7.20.'de, ölçüm sistemi kurulumu ise Şekil 7.21'deki gibidir.



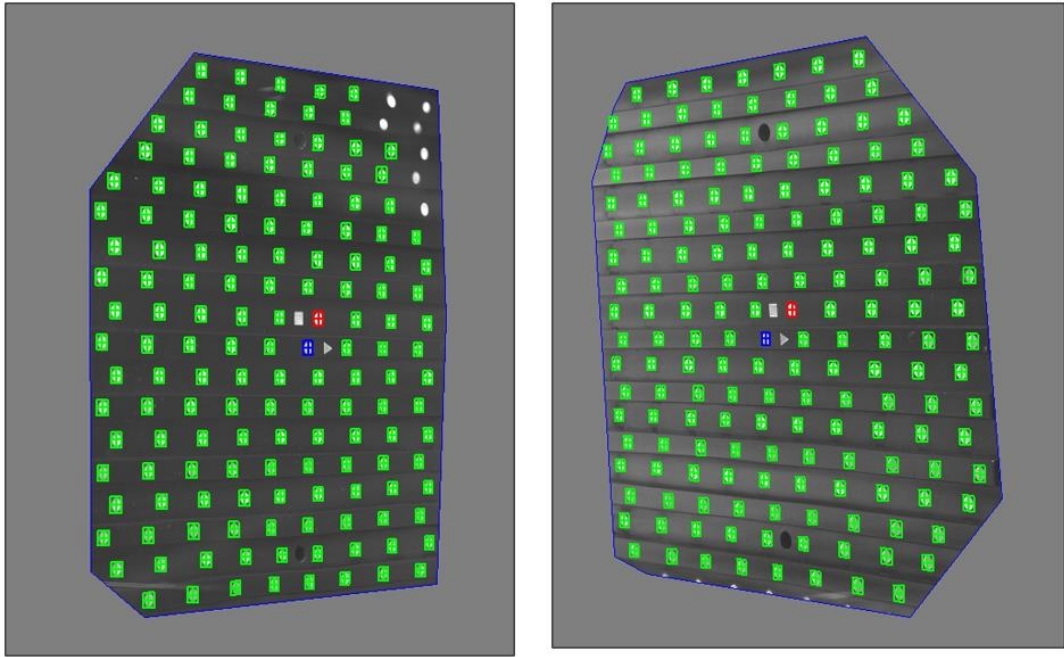
Şekil 7.20. 3D PGHÖ ölçüm sistemi



Şekil 7.21. 3D PGHÖ ölçüm sistemi kurulumu

Testin gerçekleştirilmesi için 2 boyutlu kurulumdan farklı olarak 2 adet hızlı kamera kurulmuş ve kalibrasyon düzlemi kullanılarak aynı kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak 2 kamera kullanılan 3 boyutlu PGHÖ kalibrasyon sisteminde her iki kamera için ayrı ayrı kalibrasyon düzlemindeki noktaları belirleyip düzeltme işlemi yapılmış (Şekil 7.22), ardından 2 görüntü üst üste referans noktalar kullanılarak bindirilmiş ve matlab’de tek düzlem görünmesi sağlanmıştır (Şekil 7.23).

Yapılan test sistemi kurulumunda 1 nolu kameranın açısı  $46,76^\circ$ , 2 nolu kameranın açısı ise  $45,7^\circ$  olarak ölçülmüştür.



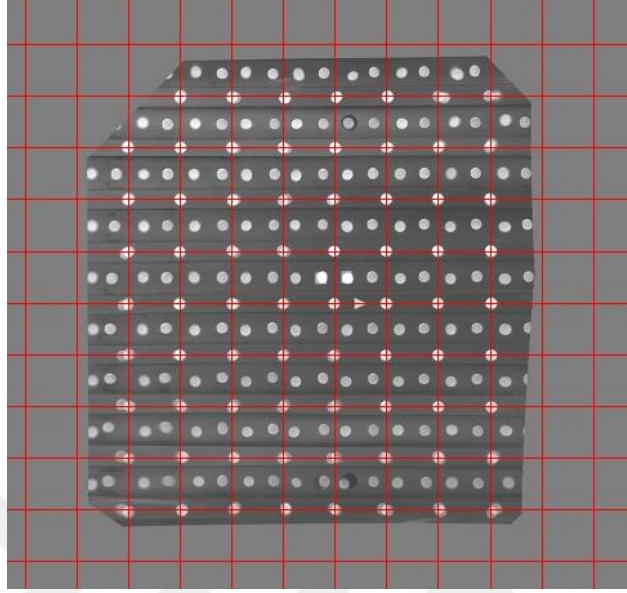
Şekil 7.22. 1 ve 2 nolu kameraların kalibrasyon düzlemi nokta tarama görüntüleri

Her iki kamera tarafından da taranan ve belirlenen noktaların referans noktalar kullanılarak üst üste bindirilmiş görüntüsü Şekil 7.23’teki gibidir.

Kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon düzlemi test düzeneğindeki şeffaf silindir içinden alınarak deneme olarak bir lazer ışın düzlemi atılarak silindirin yan duvarlarının lazer ışın düzlemi ile aydınlatıldığı kamera görüntüleri ile teyit edilir ve testin gerçekleştirme aşamasına geçilir.

Testler sırasında akışı parçacıklandırmak için DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) kullanılmıştır. Kokusuz, renksiz bir sıvıdır ve suda çözünmez. Parçacık ortalama

boyutu 1 µm'dir. 0.91g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir ve basınçlı bir parçacıklandırma ünitesi ile akışa içine içine dahil edilmektedir.



Şekil 7.23. 1 ve 2 nolu kameraların kalibrasyon düzlemleri birleştirilmiş görüntüsü

#### 7.4. Belirsizlik Analizi Hesaplamaları

Bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerin doğruluğunu belirleyebilmek için belirsizlik analizi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

##### 7.4.1. Port ölçüm belirsizlik analizi

Girdap katsayısı değeri boyutsuz bir akış değeridir. Bu nedenle basınç düşümünden, ortam basınç ve sıcaklık değerlerinden bağımsızdır.

Girdap katsayısı formülü daha önce açıkladığı üzere aşağıda verilmiştir;

$$D = \frac{M \cdot R_{cyl}}{\rho_{cyl} \cdot V_{cyl}^2} = \frac{M \cdot R_{cyl} \cdot \rho_{cyl}}{\dot{m}^2} \quad (7.1)$$

Her bir test aynı şartlarda üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçların standart sapması hesaplanıp %95 güven seviyesi için bulunan katsayı ile çarpılarak rastgele hata belirlenmiştir. Diğer taraftan ise deney düzeneğinde kullanılan test ölçüm cihazlarının üretici firma tarafından belirtilen ölçülen parametreler için hata oranları dikkate alınarak sistematik hata ortaya çıkartılmıştır.

#### 7.4.2. Sistematik belirsizlik

Deneyler sırasında ölçülen parametreler; hava debisi, sıcaklık, basınç ve tork değerleridir.

Bu parametre ölçümleri için imalatçı firmanın verdiği hata 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%

Girdap katsayısının belirsizlik değerini bulmak için D değeri formülü hatırlanacak olursa;

$$D = \frac{M * R_{cyl}}{\rho_{cyl} * V_{cyl}^2} \quad (7.2)$$

$$\rho_s = \frac{p_1}{R * T} * \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (7.3)$$

$$D = \frac{M * R_{cyl}}{\frac{p_1}{R * T} * \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}} * V_{cyl}^2} \quad (7.4)$$

Belirsizlik denklemi ise;

$$w_D = \pm \left[ \left( \frac{\partial D}{\partial M} w_M \right)^2 + \left( \frac{\partial D}{\partial T} w_T \right)^2 + \left( \frac{\partial D}{\partial P} w_P \right)^2 + \left( \frac{\partial D}{\partial V} w_V \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.5)$$

$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[ \left( \frac{w_M}{M} \right)^2 + \left( \frac{w_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{w_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.6)$$

Benzer şekilde kütleli debi ve akış katsayısı içinde belirsizlik analizi için hesaplanan formüller Tablo 7.2’de verilmektedir.

Girdap oranı için belirsizlik analizi sayısal hesaplaması yapılır ise;

Motor-B ölçümleri için;

$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[ \left( \frac{0.1}{70.36} \right)^2 + \left( \frac{0.5}{26.64} \right)^2 + \left( \frac{0.0005}{679,19} \right)^2 + \left( \frac{0.02}{514,67} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.7)$$

Belirsizlik 0,019 olarak hesaplanmıştır. Bu değerin elde edilmesi, basınç, sıcaklık, debimetre ve torkmetre ölçüm sensörlerinden gelen hataların birleşimi ile olmaktadır. Ölçülen değerin büyüklüğü ile bağlantılı olarak sensör hassasiyeti önemli rol oynamaktadır. En büyük katkı sıcaklık sensöründen kaynaklanmakta, en küçük katkı ise basınç sensöründen gelmektedir.

Tablo 7.2.Belirsizlik analizi formülleri

Kütleli Debi	$\dot{m}_{ölçülen} = \dot{V} * \frac{p}{R * T}$	$\frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \pm \left[ \left( \frac{w_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{w_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
Akış Katsayısı	$\alpha_k = \frac{\dot{m}_{ölçülen}}{\dot{m}_{teorik}}$	$\frac{w_D}{D} = \pm \left[ \left( \frac{w_M}{M} \right)^2 + \left( \frac{w_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{w_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
Girdap Oranı	$D = \frac{M * R_{cyl}}{\rho_{cyl} * V_{cyl}^2}$	$\frac{w_D}{D} = \pm \left[ \left( \frac{w_M}{M} \right)^2 + \left( \frac{w_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{w_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

Motor-A'yı simüle eden prototip parça ölçümleri için;

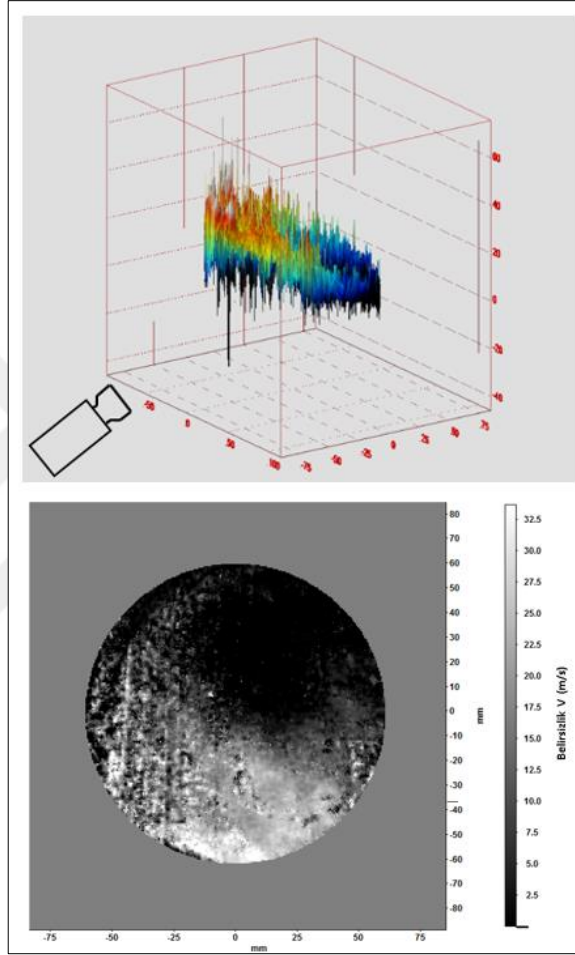
$$\frac{w_D}{D} = \pm \left[ \left( \frac{0.1}{90.44} \right)^2 + \left( \frac{0.5}{27.92} \right)^2 + \left( \frac{0.0005}{610,39} \right)^2 + \left( \frac{0.02}{396,07} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.8)$$

Belirsizlik 0,018 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sensörlerinin hassasiyetleri aynı olmasına rağmen ölçülen değer farklılığından dolayı hesaplanan Motor-A ve Motor-B girdap oranı belirsizlik değerlerinde minimal bir farklılık görülmektedir.

### 7.4.3. PGHÖ ölçüm sonuçları ve belirsizlik analizi sonucu

Yapılan 2D ve 3D (stereo) PGHÖ ölçümlerinin hata oranının ve belirsizlik içeren bölgelerin belirlenmesi amacıyla belirsizlik analizleri Davis belirsizlik analiz modülü ile gerçekleştirilmiştir.

LaVision firması, korelasyon istatistiklerine dayalı bir belirsizlik niceleme yöntemi uygulamıştır. Bu teknik, düzlemsel 2D ve Stereo- PGHÖ için bireysel anlık hız vektörleri için bir belirsizlik değeri sağlayabilmektedir. DaVis'deki tüm işleme parametresi ayarları için çalışmakta ve kaydedilen PGHÖ görüntülerinde bulunan hata kaynaklarını kapsamlı bir şekilde yakalayabilmektedir [80].



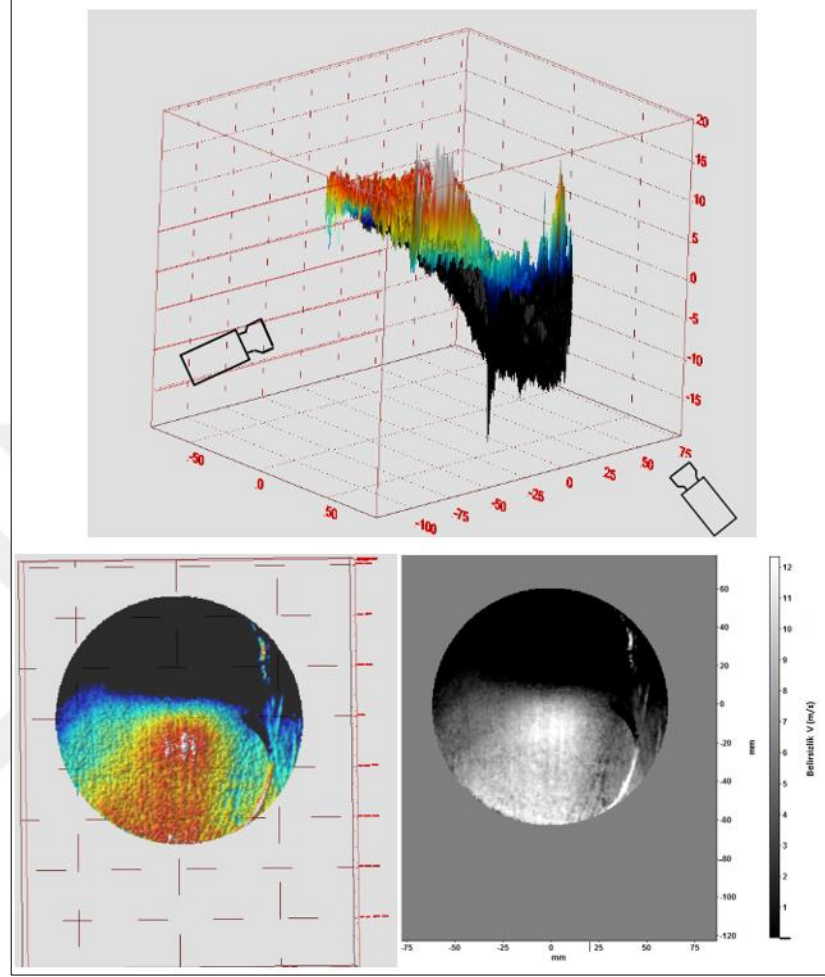
Şekil 7.24. Motor-A 2D PGHÖ ölçüm belirsizlik analizi sonucu

Motor-A silindir hacmine sahip prototip parça üzerinde 2 boyutlu PGHÖ teknikleri ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Şekil 7.24'te gösterilmektedir.

2D PGHÖ tekniğinde bir kamera kullanılmaktadır. Kameranın silindirdeki ölçüm kesitine olan bakış açısı Şekil 7.24'te gösterildiği gibidir. Grafikteki yüksek uçlu çıkıntılı noktalar ölçüm yüzeyindeki belirsizlik miktarını vermektedir. Özellikle beyaz renkli olan uç kısımlar belirsizliğin en fazla olduğu bölgelerdir. Dolayısıyla silindir



kesitindeki kameraya yakın olan bölgede hız ölçümündeki belirsizlik daha fazladır. Bunun nedeni olarak silindir yüzeyindeki yansıma belirtilebilir.



Şekil 7.25. Motor-A 3D (Stereo) PGHÖ ölçüm belirsizlik analizi sonucu

3D (Stereo) PGHÖ yönteminde silindir içindeki ölçüm kesitini Şekil 7.25’de gösterildiği gibi karşıt pozisyonlarda farklı açılardan görüş açısına ait olan 2 kamera kullanılmaktadır. Her iki kameranın da gördüğü noktadaki hız vektörleri birleştirilerek nihai ölçüm sonucu elde edilmektedir. 2D PGHÖ yöntemine göre daha az oranda belirsizlik içermesine rağmen en yüksek çıkıntılı ve yüzeyi beyaz olan bölgelerde belirsizlik alanı olduğu görülmektedir.

Özellikle 2D PGHÖ ölçüm sistemindeki ölçüm kalitesini etkileyen konulardan biri silindir duvarı üzerindeki yansımadan (Şekil 7.26), diğeri ise tek kameranın açısız bakışından kaynaklanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı tek kamera kenar bölgeleri iyi

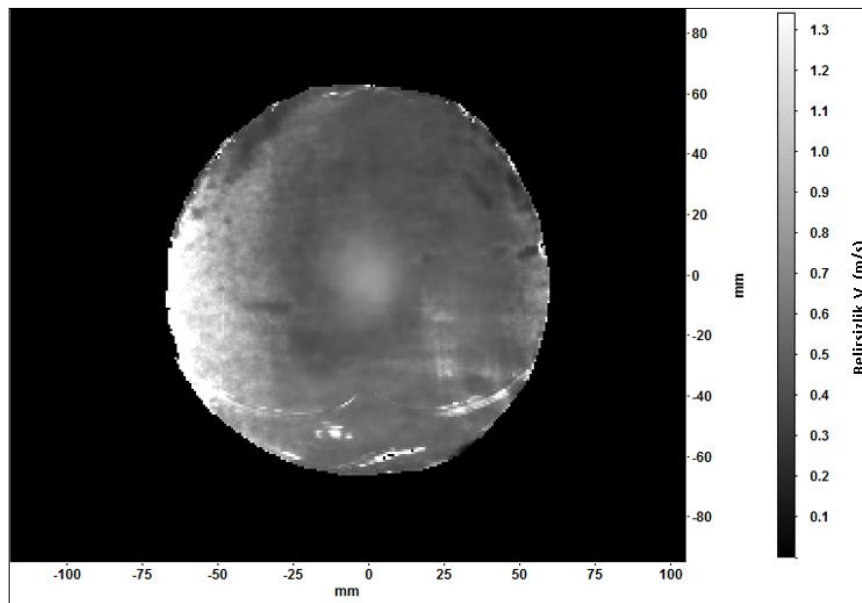


görememektedir. Tek kamera ile yapılan ölçümdeki akışkan taneciklerin hızları kenar bölgelerde tam olarak tespit edilememektedir.



Şekil 7.26. PGHÖ ölçüm sistemi şeffaf silindir duvarındaki yansıma

Bunu doğrulayan stereo PGHÖ belirsizlik analizi sonucu Şekil 7.27'de gösterilmektedir.



Şekil 7.27. Motor-B 2D ve Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları

DaVis programında yapılan Stereo PGHÖ belirsizlik analizi sonuçlarına göre merkezde ve kenar bölgelerde belirsizlik seviyesinin çok düşük olduğu görülmektedir. Sadece yine yansımadan dolayı en kenar bölgelerde kısıtlı sayıda noktada belirsiz noktalar oluşmuş olduğu gözlemlenmiştir.

Belirsizlik kaynağı olarak silindir yüzeyi üzerindeki yansıma, lazer ışığının silindir içindeki kesitteki saçınıklığa uğraması ve kameraların bakış açılarından dolayı kalibrasyon eksikliği sayılabilir.

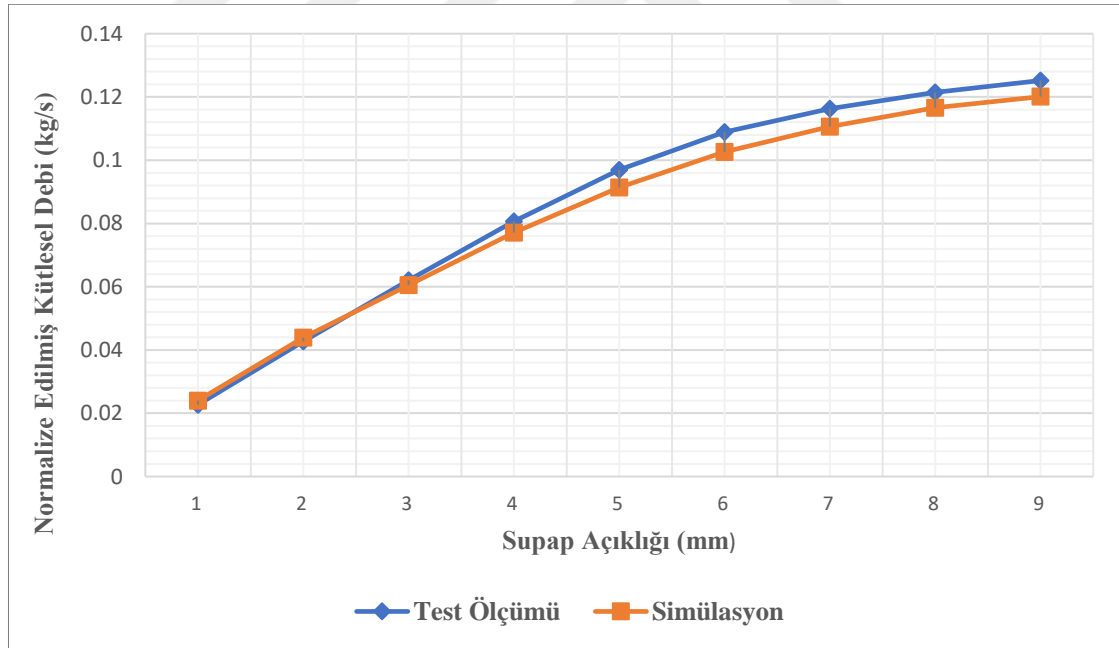


## 8. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÖLÇÜM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Tez çalışması kapsamında hem Motor-A hem de Motor-B geometrileri için analiz modelleri oluşturulmuştur. Her iki analiz modeli, Motor-A ve Motor-B silindir kafaları üzerinde gerçekleştirilmiş olan test sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

### 8.1. Simülasyon ve Port Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması

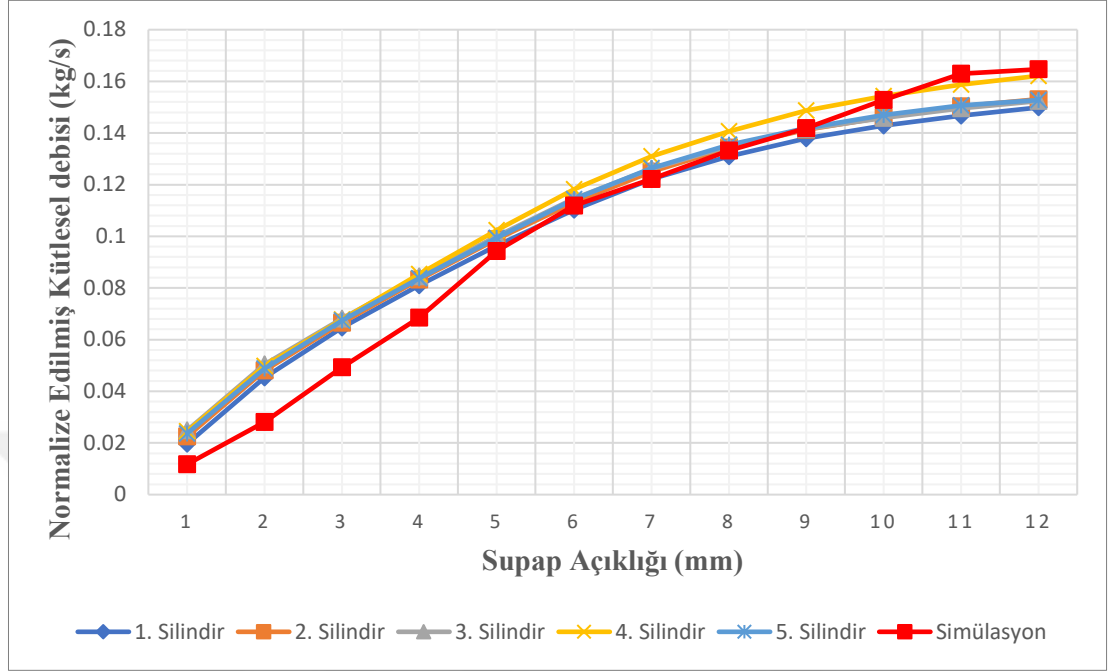
Her iki motor içinde 1 mm supap açıklığından başlanarak Motor-A'da 9mm supap açıklığına kadar, Motor-B için 12 mm supap açıklığına kadar her bir supap açıklığı için analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz ve testler sonucunda elde edilen kütle debisi değerleri aşağıdaki Şekil 8.1 ve Şekil 8.2' de gösterilmektedir.



Şekil 8.1. Normalize edilmiş Motor-A HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen kütle debi değerleri karşılaştırılması

Motor-A için yapılan kütleli debi karşılaştırılması incelendiğinde HAD analizlerinde en fazla %5,2'lik bir farkla hesaplanabildiği görülmektedir. Aradaki bu fark

simülasyon ve motor yüzeyleri arasındaki pürüzlülük farkından ve türbülans modelinden kaynaklanmaktadır.

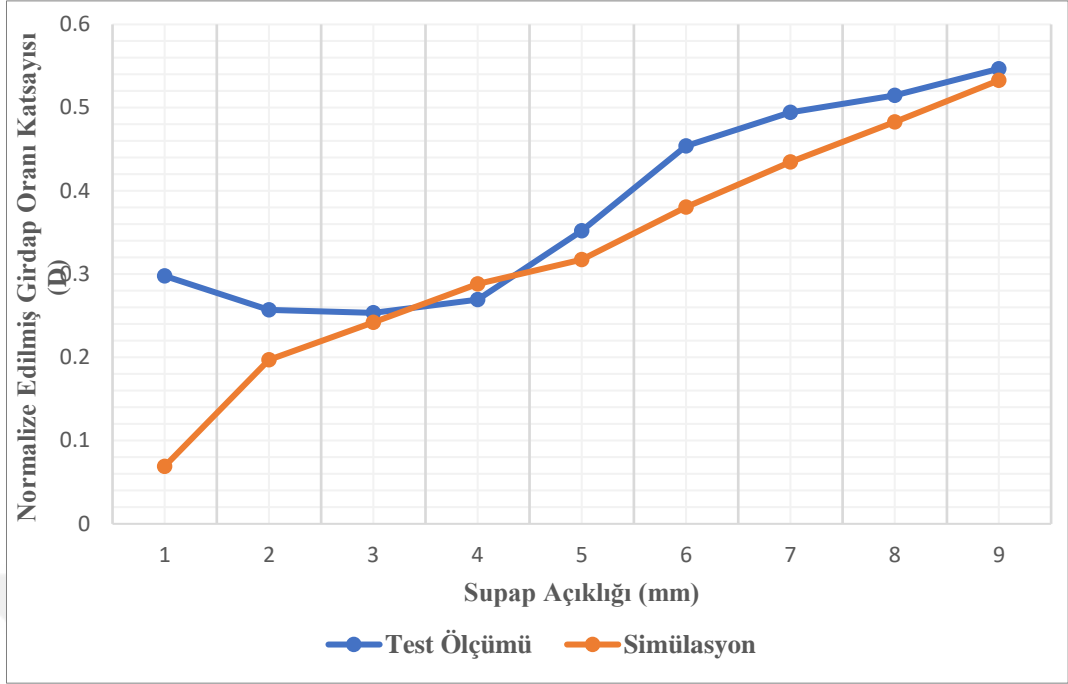


Şekil 8.2. Normalize edilmiş Motor-B HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen kütle debi değerleri karşılaştırılması

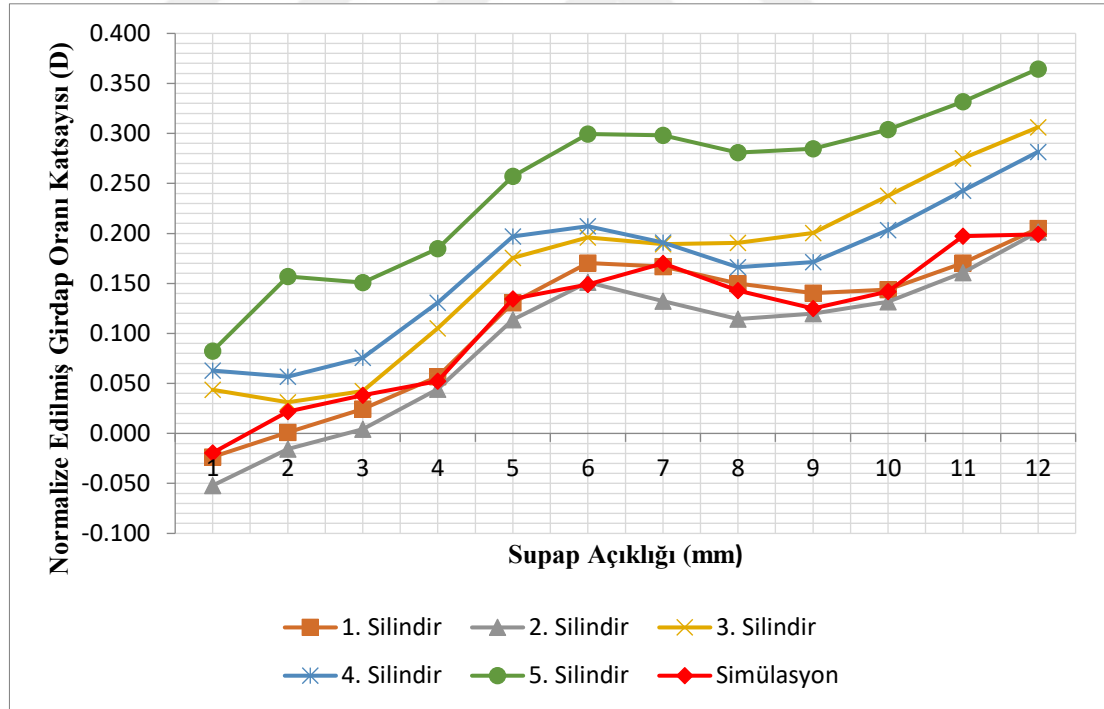
Motor-B için yapılan kütleli debi karşılaştırılması incelendiğinde HAD analizlerinde ilk dört supap açıklığında, %15-%40 arasında, sonraki tüm açıklıklarında maksimum %8'luk bir farkla hesaplanabildiği görülmektedir. Supap ilk açılıştaki ağ yapısı ve sayısı gibi parametreler simülasyonda en fazla zorlandığımız nokta olduğu için oluşan bu farkın nedeni olarak gösterilebilir. Bununla birlikte test sonuçlarındaki parabolik eğrinin simülasyon sonuçları ile yakalanabildiği, simülasyon ve test sonuçları arasında güzel bir korelasyon olduğu görülmektedir.

Girdap oranı ölçüm ve HAD analiz sonuçları karşılaştırması aşağıdaki Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te görülmektedir.

Motor-A girdap oranı ölçüm ve HAD analiz sonuçlarında, 2- 9 mm supap açıkları arasında kabul edilebilir yakın sonuçlar alındığı görülmüştür. Supap ilk açılıştaki açıklıkta test datası ve simülasyon sonucu arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak benzer şekilde supap ilk açılma koşulundaki ağ yapısı, grid sayısı gibi zorluklar gösterilebilir.



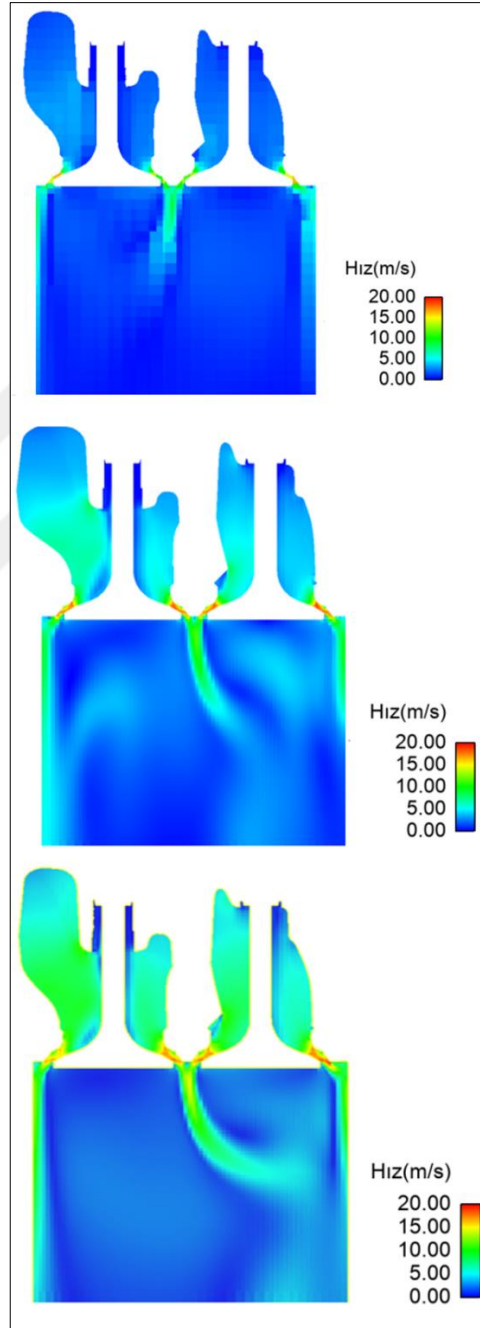
Şekil 8.3. Normalize edilmiş Motor-A HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen girdap oranı değerleri karşılaştırılması



Şekil 8.4. Normalize Edilmiş Motor-B HAD analiz ve test ölçümleri ile elde edilen girdap oranı değerleri karşılaştırılması

Motor-B girdap oranı ölçümleri 5 silindir için gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.4' te gösterilen ölçümlerin sonuçlarında 1 ve 2 nolu silindirlerin aynı girdap oranı değerlerine sahip oldukları, 3, 4 ve 5 nolu silindirlerin benzer trendi izlemekle birlikte

farklı değerlere sahip oldukları görülmüştür. Aynı motordaki silindirler arasında bir varyasyon belirgin olarak görülmektedir. Silindirler arasındaki bu fark geometri ve yüzey kalitesi farklılıklarından, imalat teknolojisi toleranslarından kaynaklanmadır. HAD sonuçları ile ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında aralarındaki farkın 12 mm supap açıklığına kadar kabul edilebilir mertebede olduğu görülmektedir.



Şekil 8.5. Supap merkezinden alınan kesitte sırasıyla 1mm,2mm ve 3mm supap açıklıkları için dağılımları

Gerçekleştirilen analizdeki türbülans modelinin doğru çalışma koşullarında kullanıldığının teyidi ve analizin doğruluğunun tespiti için sayısal sonuçlar gerçekleşen hız değerleri açısından incelenmiştir. Bu konudaki referans değer Mach sayısıdır. Mach sayısı akış hızını tanımlayan boyutsuz bir değerdir. Denklem (8.1)'de görüldüğü üzere akış hızının, ses hızına oranı olarak tanımlanmaktadır;

$$Mach\ sayısı = \frac{Akış\ Hızı}{Ses\ Hızı} \quad (8.1)$$

Burada ses hızı deniz seviyesinde ve oda sıcaklığındaki havada 346m/s değerindedir. Akış özelliği, eğer Mach=1 ise ses hızında (sonik), Mach<1 ise sesaltı hızda, Mach>1 ise süpersonik hızda, Mach>5 ise hipersonik olarak tanımlanmaktadır. Yapılan analizde özellikle hızların maksimum olduğu düşük supap açıklıklarında akış yapısı ve karakteristiği incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 8.5'te görüldüğü üzere emme supapları merkezinden geçen bir kesit düzleminde 1mm, 2mm ve 3mm supap açıklıkları için hız dağılımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1mm için 89.3m/s, 2mm için 102.5, 3mm için 117.6m/s maksimum hız değeri görülmektedir. Bu değerler ses hızından düşük olması nedeniyle mach sayısı maksimum 0,34 olarak hesaplanmış ve sesaltı hız seviyelerinde çalışılmakta olduğu teyit edilmiştir. Mach sayısının 0.7-0.8'den büyük çıktığı durumda transonik hesaplama yapılması gerekmektedir.

## 8.2. Simülasyon Sonuçları İncelemesi

HAD analiz çalışmasında her iki motorun 3 farklı supap açıklıkları (Motor-A 3mm, 6mm, 9mm, Motor-B için 4mm, 8mm ve 12mm) için gerçekleştirilmiştir. HAD analizi sonuç görselleri olarak hem dikey hem de yatay düzlemde kesitler alınarak hız vektörleri incelenmiştir. Silindir eksenine paralel olarak, Şekil 8.6'da görülen supapların merkezlerinden geçmekte olan A-A düzleminde ve silindirin merkezinden geçen B-B düzleminde kesit görüntüleri alınmıştır.

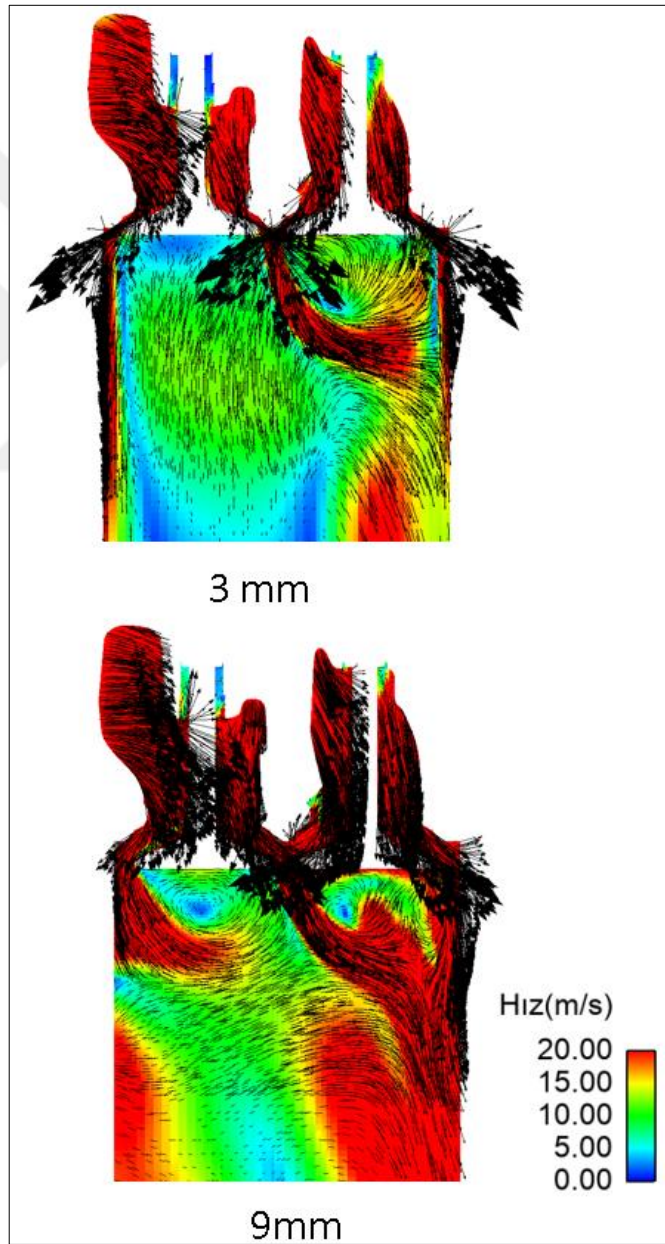
Şekil 8.6'da A-A kesitinin merkezlerinden geçtiği iki emme supabından soldaki supap helisel, sağdaki supap ise düz yapıya sahiptir.

HAD analizinde Motor-A'nın 3mm ve 9mm supap açıklıkları için supap merkezlerinden geçen A-A kesitinden alınan hız vektörleri görüntüsü Şekil 8.7 ve

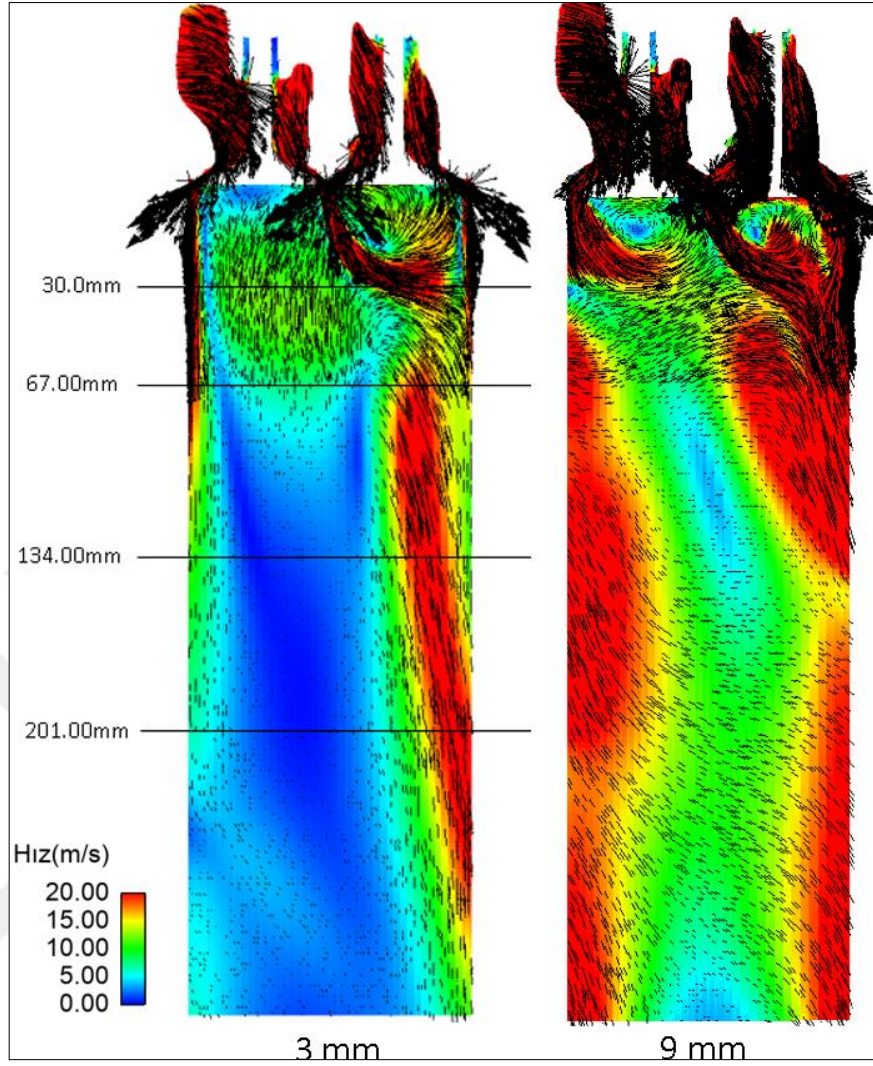




hareket eden akışın hızını yaklaşık 100mm sonra kaybettiği, 201mm sonra akışın durağan hale geldiği (stagnation) görülmektedir. Her iki supaptan silindire girdikten sonra birleşen akışın ise aşağı yönde hızını kaybetmeden silindir çeperi boyunca hareket ettiği görülmektedir. Supap merkezinden alınan görüntüde silindir merkezinde bir girdap merkezi oluşmadığı görülmektedir. 9mm supap açıklığından ise hem sol hem de sağ taraftaki akışın hızını kaybetmeden en alt noktaya kadar silindir iç yüzeylerinden ilerlemekte olduğu ve silindir merkezinde bir girdap merkezi oluşturmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 8.7. Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri



Şekil 8.8. Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri

Silindirin merkezinden geçen düzlemden alınan B-B kesit görüntüleri Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da görülmektedir. Şekil 8.9'da 3 mm supap açıklığı için sol taraftaki helisel yapıya sahip kanaldan silindir içine giren akışın silindir duvarı boyunca aşağı yönde azalan bir hız bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Bu hızın bölgesinin hemen üzerinde akışa paralel durağan bir bölge oluşmuştur. Çevresel yöndeki akış hızı silindir ortasında daha düşüktür. Bundan dolayı düz yapıya sahip kanaldan silindir içine giren hava akışı ile birleşip silindir duvarına doğru değil, aşağı yönde ilerleyebilmektedir. Kısa mesafede etkisini kaybedip büyük ölçekte durağan bölgeler oluşturmuştur. Aynı zamanda helisel akışın silindire girdiği bölgenin altında bir düşük şiddette vorteks oluşmuştur. Düz kanaldan silindire giren akışın hemen altında daha güçlü bir vorteks oluştuğu görülmektedir. 9mm supap açıklığında ise helisel hava kanalından silindire

giren akışın daha güçlü etkisi ile düz kanaldan giren havayı silindir duvarına yönlendirmiş ve hemen üzerinde daha yüksek derecede bir vorteks oluştururken esas olarak silindir duvarından aşağı doğrultuda yönlendirilen akış, silindir çevresinde bir girdap oluşturmaktadır. Silindirin merkez eksenini çevresinde de durağan bir bölge oluşumu gözlenmektedir.

Silindir boyunca oluşan akış yapısı Şekil 8.10'da görülmektedir. 3mm supap açıklığında helisel ve düz yapıları kanallardan gelen akışın birleşerek silindirin sağ tarafında düşük mertebede hızlanarak aşağı yönde hareket ettiği ancak silindirin orta bölgesi ve sol tarafında geniş bir durağan alan oluştuğu görülmektedir. 3mm supap açıklığından silindir içine giren akışın etkisi silindir içinde bir girdap oluşturabilmek için yeterli gelememektedir. 9mm supap açıklığında ise, silindir kafasına yakın kısımlarda bölgesel durağan alanlar oluşmasına rağmen, silindirin iç çeperinde çevresel olarak akış hızının korunduğu ve aşağı yönde ilerlerken silindir için girdap oluşumunu gerçekleştirdiği görülmektedir. Özellikle silindir kafasına yakın bölgede silindir iç yüzeyine çarparak aşağı yönde akan akışın bu girdap hareketinin oluşumunda dominant olduğu görülmektedir. Girdap hareketinin orta noktası olan silindir eksenini çevresinde akış hareketi hızının düştüğü ve silindir eksenini boyunca durağan bir bölge oluşturduğu belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

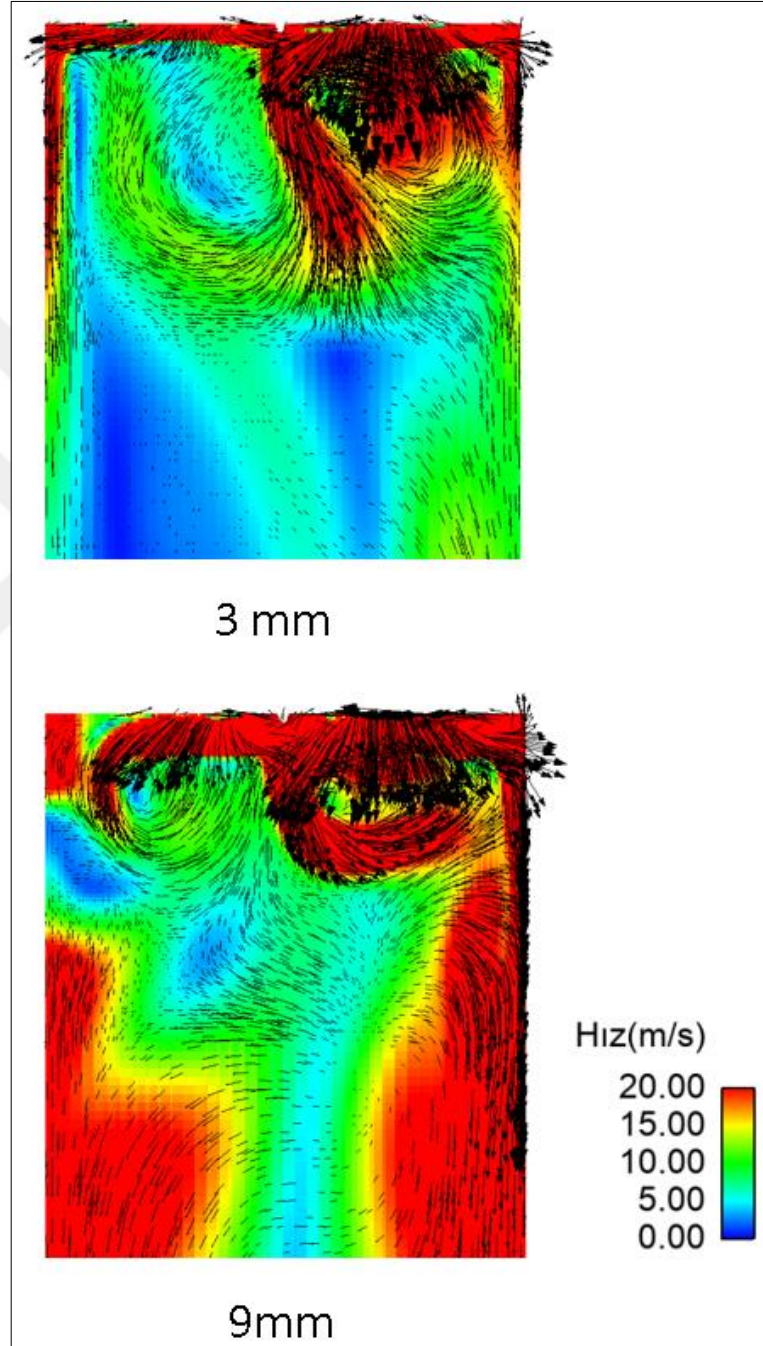
Tablo 8.1'de özetlendiği üzere; HAD analizi sonuç görüntülerinde silindir eksenine dik düzlemde silindir kafasından 30mm, 67 mm, 134 mm, 201 mm uzaklıklardaki kesit görüntüleri alınarak hız vektörleri incelenmiştir.

Tablo 8.1. Motor-A HAD analizi silindir eksenine dik düzlem kesitleri

		Supap Açıklıkları		
		3 mm	6 mm	9 mm
Kesit düzlemlerin silindir kafasından uzaklıkları	30 mm	X	X	X
	67 mm	X	X	X
	134 mm	X	X	X
	201 mm	X	X	X

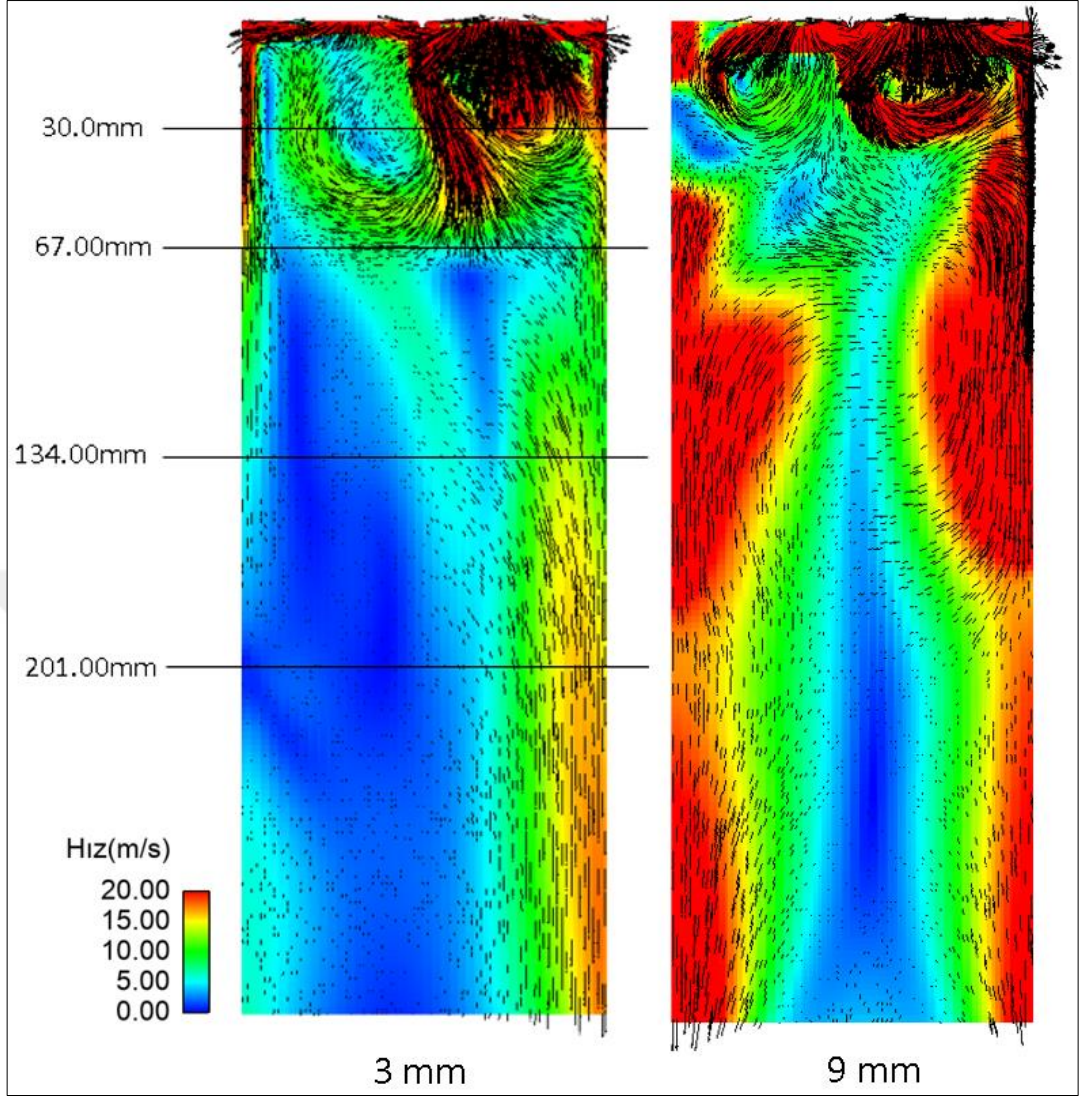
3mm,6mm ve 9mm supap açıklıkları için silindir kafasından 134mm uzaklıkta alınan kesit görüntüleri Şekil 8.11'de, 201mm uzaklıkta alınan kesit görüntüleri Şekil 8.12'de gösterilmektedir. 30mm ve 67mm uzaklıktan alınan kesit görüntüleri tezin ekler

bölümüne EK-D'ye eklenmiştir. Her kesit görüntüsüne sürekli çizgi ile emme supapları konumları, kesikli çizgi ile egzoz supapları konumları gösterilmektedir. x-y düzlemindeki alınmış olan kesitler -z ekseninden bakış ile alınmıştır. Helisel ve düz özellikteki hava kanallarına ait supaplar Şekil 8.11'de gösterilmiştir.



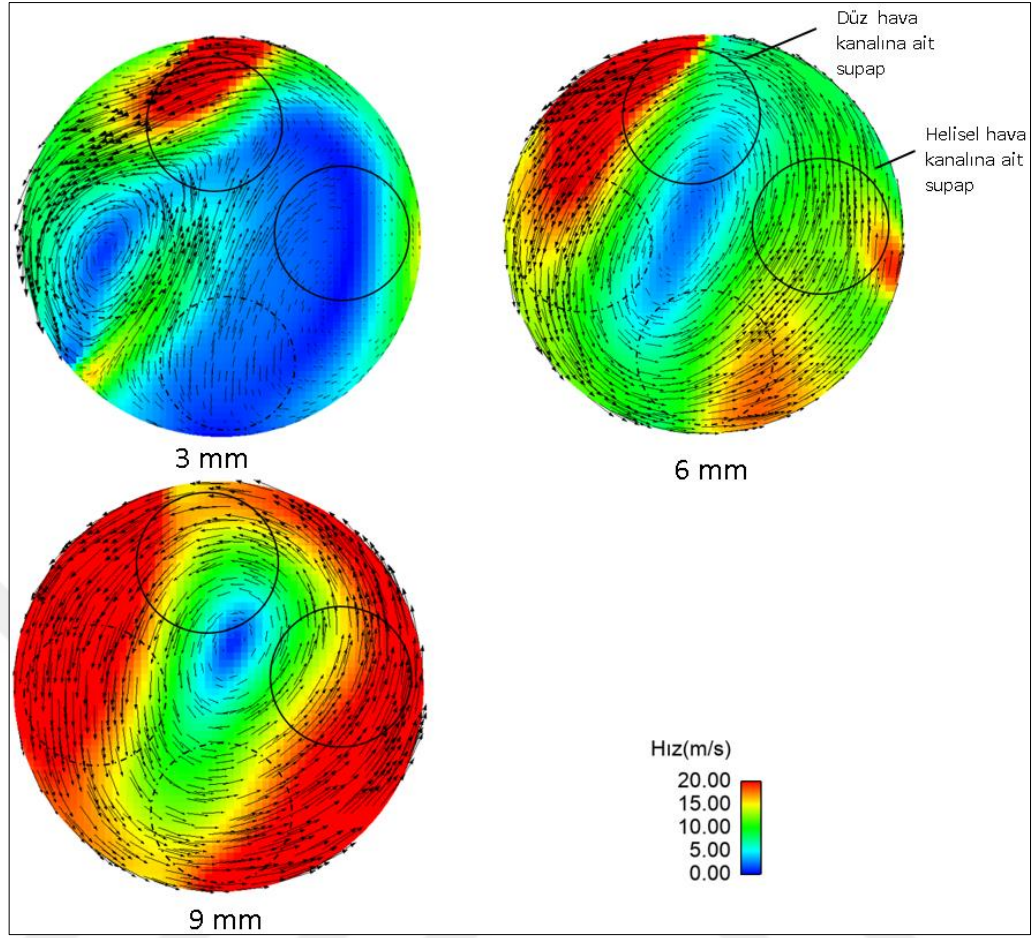
Şekil 8.9. Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri





Şekil 8.10. Motor-A 3mm ve 9mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri

Silindir kafasından 134mm uzaklıktan alınan kesitte supap açıklığı 3mm iken düz hava kanalından silindir içine girerek silindir iç çeperine çarpan havanın yüksek hız kazandığı görülmektedir. Bununla birlikte aynı kesit içinde bir vorteks oluştuğu ve geniş bir durağan bölge (stagnation point) oluştuğu görülmektedir. Supap açıklığı 6mm'ye vardığında durağan bölgenin silindir merkezine doğru daralarak toplandığı ve silindir çeperine çarparak hızlanan akışın silindir içindeki çevresel akışı domine ettiği ve genel anlamda girdap hareketinin belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Supap açıklığı 9mm olduğunda ise, silindir çeperi iç yüzeyindeki çevresel hızın maksimum olduğu, buna bağlı olarak durağan bölgenin merkeze yakın bir noktada odaklandığı ve girdap hareketinin kararlı bir görünüme sahip olduğu görülmektedir.

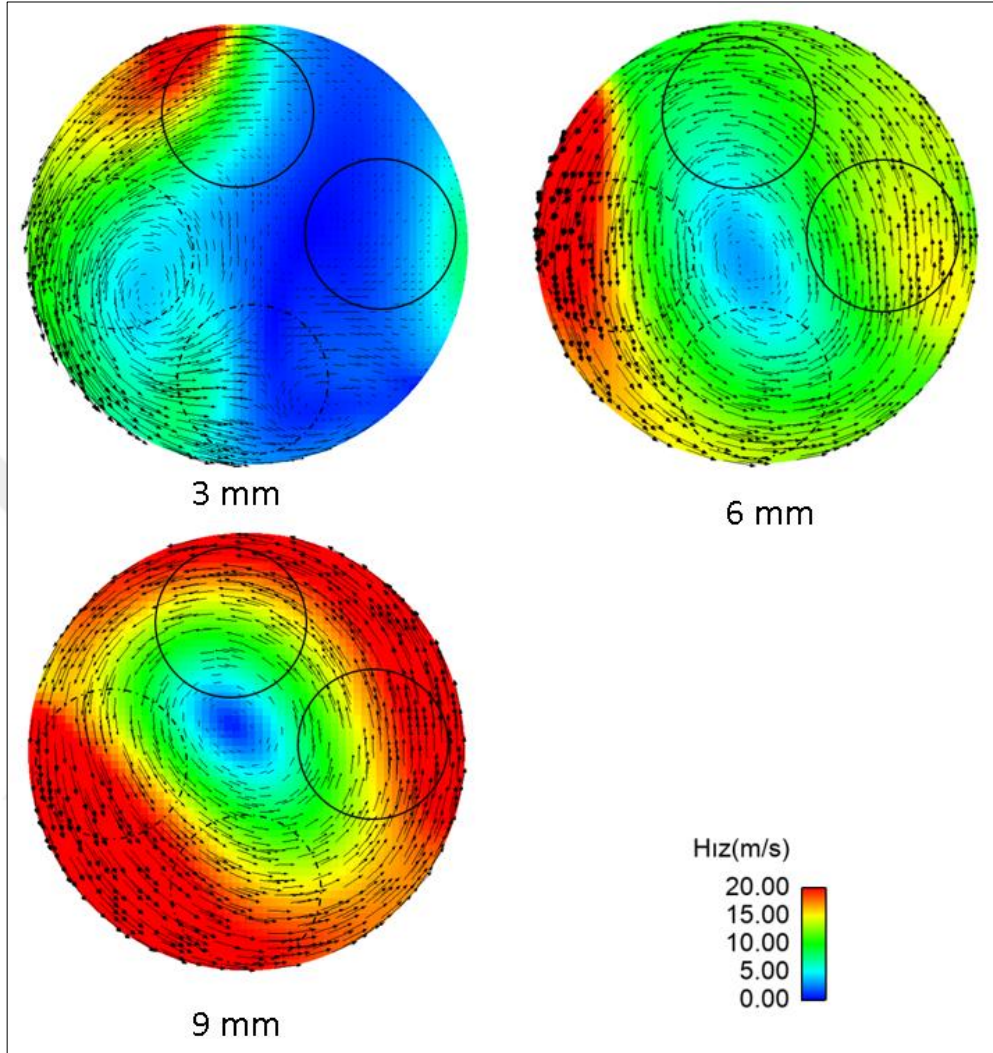


Şekil 8.11. Motor-A silindir kafasından 134 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için)

Silindir kafasından 201 mm uzaklıkta silindir eksenine dik düzlemden alınan 3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için kesit görüntüleri Şekil 8.12’de gösterilmektedir. Supap açıklığı 3 mm iken 201 mm uzaklıktaki kesitte silindir iç çeperine çarpan akışın hız vektörlerinin şiddeti azalmış olsa da hala belirgindir. Durağan bölgenin hacmi bu kesitte daha fazladır. Vorteksin etkisinin daha zayıf olduğu görülmektedir. Supap açıklığı 6mm iken silindir içi çevresel hızların tüm kesitte çevresel olarak arttığı ve girdap hareketinin 201mm uzaklıktaki kesitte dahi oluşmaya başladığı görülmektedir. 9mm supap açıklığında ise silindir için çevresel hızların iyice arttığı ve girdap hareketinin bu kesitte de hala belirgin olarak görüldüğü gözlemlenmektedir.

Aynı HAD analizi Motor-B için 4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları gerçekleştirilmiştir. 4mm ve 12mm supap açıklıkları için supap merkezlerinden geçen A-A kesitinden alınan hız vektörleri görüntüsü Şekil 8.13 ve Şekil 8.14’te, B-B kesitinden alınan hız vektörleri görüntüsü Şekil 8.15 ve Şekil 8.16’da gösterilmektedir.

8mm supap açıklığı için yapılan analizin kesit görüntüleri ayrıca tezin ekler bölümüne EK-E'ye eklenmiştir.



Şekil 8.12. Motor-A silindir kafasından 201 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için)

Aynı HAD analiz çalışması Motor-B içinde 3 farklı supap açıklıkları sağlanarak (4mm, 8mm ve 12mm) için gerçekleştirilmiştir. HAD analizi sonuç görselleri olarak hem dikey hem de yatay düzlemde kesitler alınarak hız vektörleri incelenmiştir. Silindir eksenine paralel olarak, Şekil 8.5'te görülen silindirin merkezinden geçmekte olan A-A düzlemi ve supapların merkezlerinden geçen B-B düzleminde olmak üzere kesit görüntüleri alınmıştır.

Şekil 8.13'te supap açıklığının 4mm olduğu koşulda helisel hava kanalına sahip supaptan silindire çevresel yönde hava akışı olduğu görülmektedir. Silindir iç duvarına



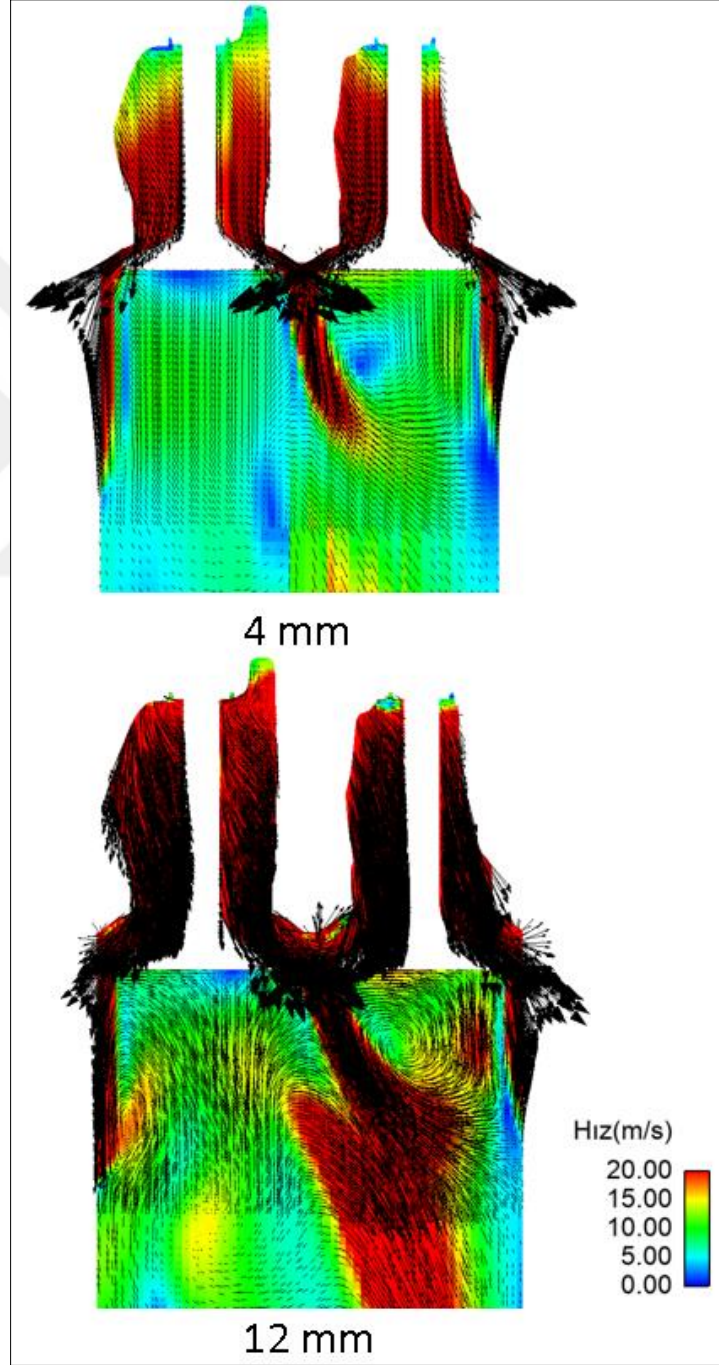
çarparak aşağı yönde ilerleyen akış kısa mesafede etkisini kaybetmiştir. Silindir çeperi boyunca olan hız bölgesine paralel durağan bir bölge oluşmuştur. Ayrıca supap altındaki bölgede yine durağan bölge oluşurken, daha alt bölgesinde düz hava kanalına sahip supaptan silindire giren hava akışının sahip olduğu hızın etkisiyle orta seviyede bir hız bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Helisel hava kanalına sahip olan supaptan giren havanın düz hava kanalına sahip olan supaptan giren hava ile karşılaşması sonucu birleşik hız akışı silindir çeperine doğru yönelmektedir. Ancak hız seviyesi yeterli gelmediği için silindir çeperine ulaşmadan aşağı ve yukarı olmak üzere iki yöne ayrılmaktadır. Yukarı yönde harekete devam eden kısmın bir vorteks oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca her iki supabın alt bölgelerinde ayrı iki hız bölgesinin oluştuğu görülmektedir. 9mm supap açıklığında ise düz hava kanalına sahip supap altındaki vorteksin daha belirgin ve güçlü hale geldiği, birleşik hava akışının yüksek hız seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Buna ek olarak her iki supap açıklığında da düz hava kanalına sahip supap tarafındaki silindir için iç çeper boyunca oluşan durağan bölgenin varlığını koruduğu görülmektedir.

Motor-B'nin 4mm ve 12 mm supap açıklıkları için supap merkezlerinden alınan A-A kesitindeki silindir boyunca olan genel akış hareketleri Şekil 8.14'te gösterilmiştir. 4mm supap açıklığında silindir kafasına yakın durağan bölgeler oluşmakla birlikte helisel hava kanala sahip supap tarafında özellikle silindir kafasından 75mm uzaklıkta geniş bir durağan bölge oluştuğu görülmektedir. Buna karşın silindirin karşı yarısında ise akışın hızlanmakta olduğu ve geniş bir hız bölgesinin oluşmakta olduğu gözlenmektedir. 12mm supap açıklığında ise her iki supaptan silindir içine giren akışların oluşturduğu birleşik akışın hızlanarak güçlendiği, açılı hareket ederek silindir kafasından yaklaşık 150 mesafede silindir iç çeperine çarparak etkisini ve hızını kaybederek yön değiştirdiği görülmektedir. Kararlı ve güçlü bir girdap hareketinin oluştuğu söylenemez. Ayrıca silindir boyunca bölgesel durağan (stagnation) akış bölgeleri gözlemlenmiştir.

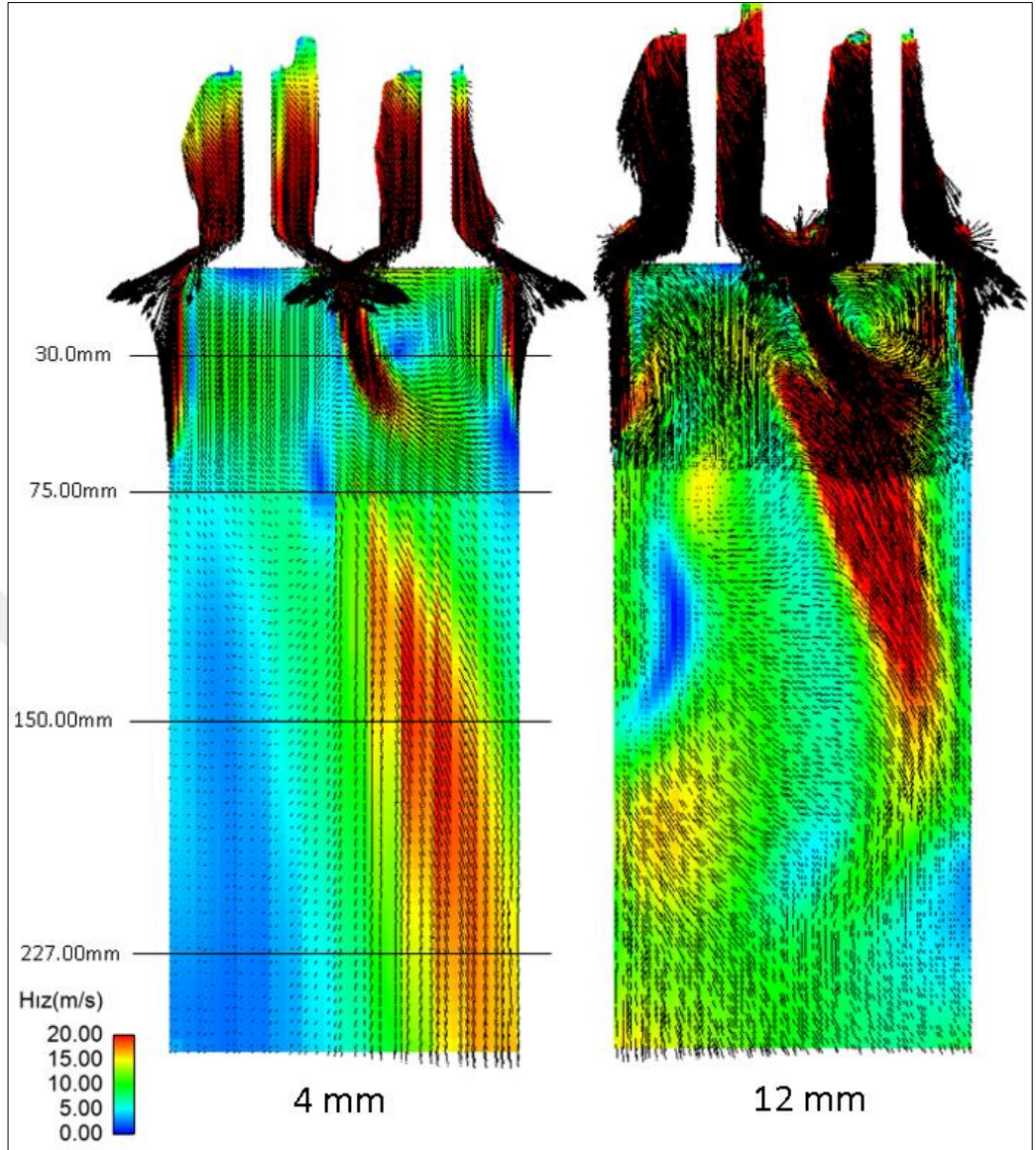
Silindirin merkezinden geçen düzlemden alınan B-B kesit görüntüleri Şekil 8.15 ve Şekil 8.16'da görülmektedir. Şekil 8.15'te 4mm supap açıklığı için helisel hava kanalından silindire dairesel olarak giren hava akışının hem silindir iç duvarında kısa süren bir hız bölgesi ve ardından yön değiştirerek bir vorteks oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca supap altında durağan bir bölge oluştuğu görülmektedir. İlave



olarak düz hava kanalına sahip supaptan silindire giren hava ile birleşmesi sonucu daha güçlü bir vorteks oluşturmaktadır. 12mm supap açıklığında ise helisel hava kanalına sahip supaptan silindire giren havanın silindir iç yüzeyine çarparak aşağı yönde güçlü bir akış alanı oluşturduğu, bununla birlikte supap altındaki bölgede güçlü bir vorteks oluşumuna neden olduğu görülmektedir. Her iki supaptan gelen hava akışının birleşmesi sonucu daha güçlü bir vorteks oluşturmuştur.



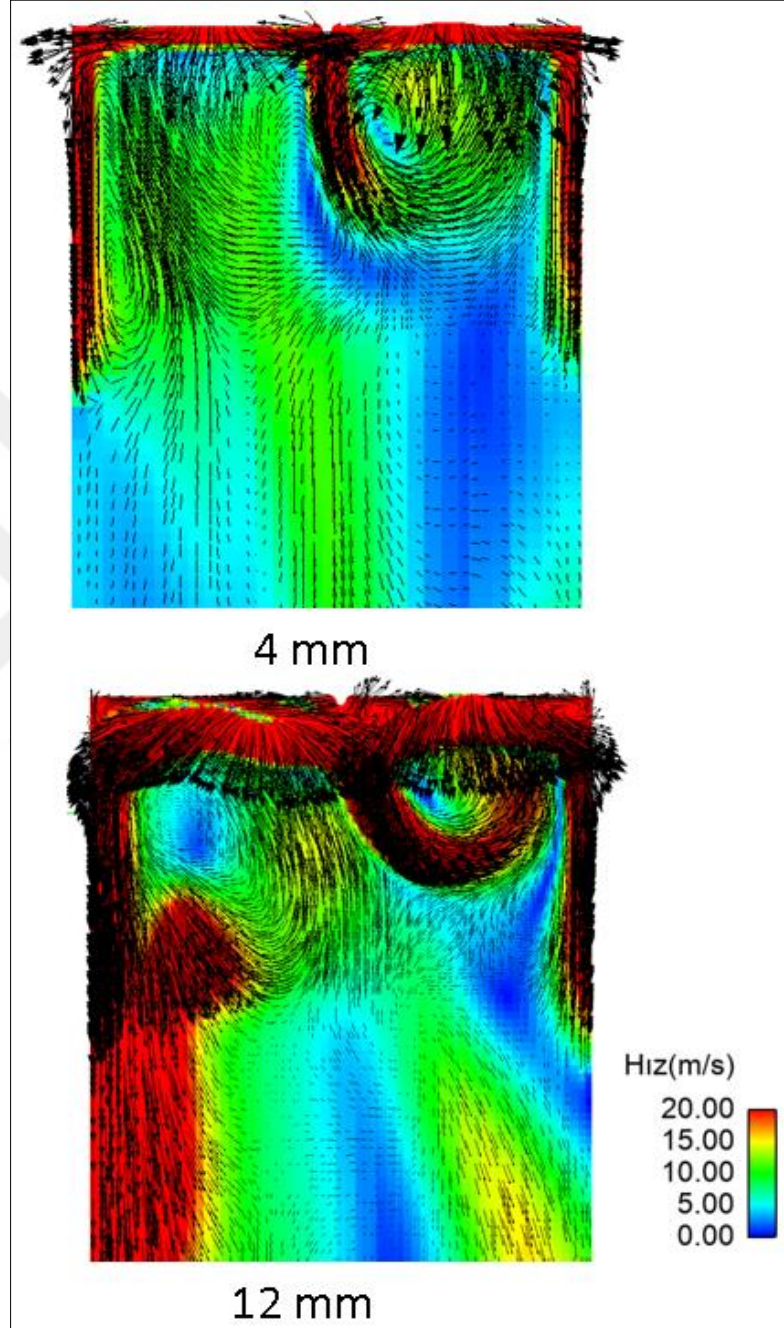
Şekil 8.13. Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri



Şekil 8.14. Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri

Şekil 8.16’da gösterilen 4 mm supap açıklığı için silindir boyunca olan akış hareketleri incelendiğinde, her iki supaptan da silindire giren akışın etkilerini ve hızlarını silindir kafasından yaklaşık 75mm sonra kaybetmekte olduğu, silindir içinde geniş durağan bölgeler olduğu görülmektedir. 12mm supap açıklığında ise helisel hava kanalına sahip supaptan silindire giren havanın silindir iç çeperi boyunca güçlü bir akış alanı oluşturduğu, buna karşın düz hava kanalından silindire giren hava akışının supap altındaki bölgede vorteks oluşturduğu ve silindir iç çeperi boyunca kısa sürede etkisini ve hızını kaybettiği görülmektedir. Silindir orta noktasına yakın bölgede silindir merkezinden yaklaşık olarak 100-200mm uzaklık arasında durağan bir bölge olduğu

gözlemlenmektedir. Girdap hareketine en yakın akış silindir kafasından 150mm civarında görülmektedir. Ancak bu kesitte akış hızının bir tarafta çok daha fazla, diğer tarafta daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 8.15. Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri

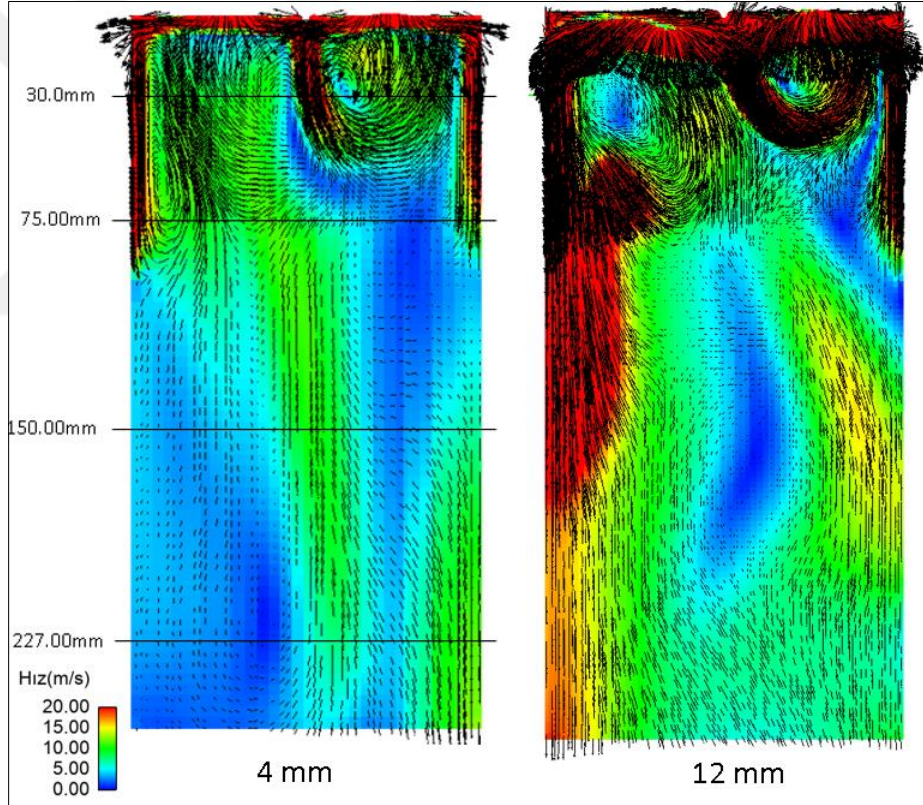
Motor-B HAD analizinde, silindir eksenine dik kesitlerdeki hız vektörleri incelemeleri için kesit görüntüleri silindir kafasından 30mm, 75mm, 150mm ve 227mm uzaklıklardan alınarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 8.2’de özetlenmiştir.



Tablo 8.2. Motor-B HAD analizi silindir eksenine dik düzlem kesitleri

		Supap Açıklıkları		
		4 mm	8 mm	12 mm
Kesit düzlemlerin silindir kafasından uzaklıkları	30 mm	X	X	X
	75 mm	X	X	X
	150 mm	X	X	X
	227 mm	X	X	X

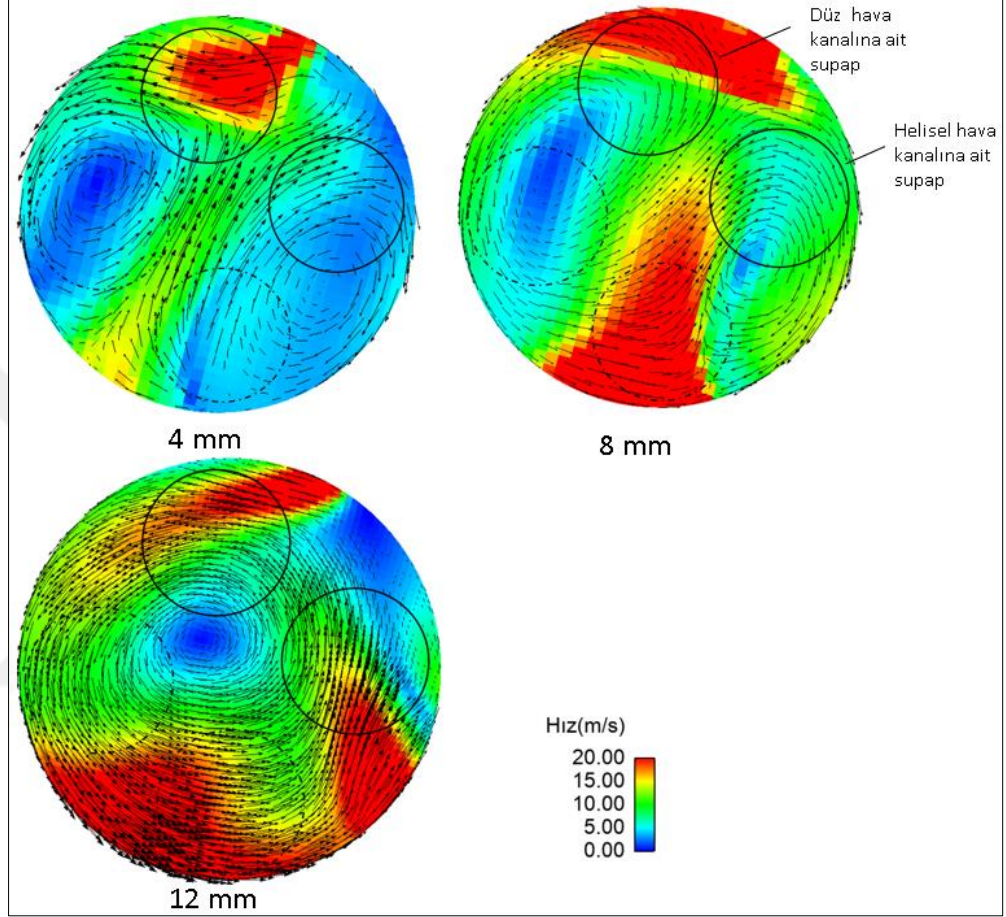
4mm,8mm ve 12mm supap açıklıkları için silindir kafasından 150mm uzaklıkta alınan kesit görüntüleri Şekil 8.17’de, 227mm uzaklıkta alınan kesit görüntüleri Şekil 8.18’de gösterilmektedir. 30mm ve 75mm uzaklıktan alınan kesit görüntüleri tezin ekler bölümüne EK-F’ye eklenmiştir.



Şekil 8.16. Motor-B 4mm ve 12mm supap açıklıkları için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri

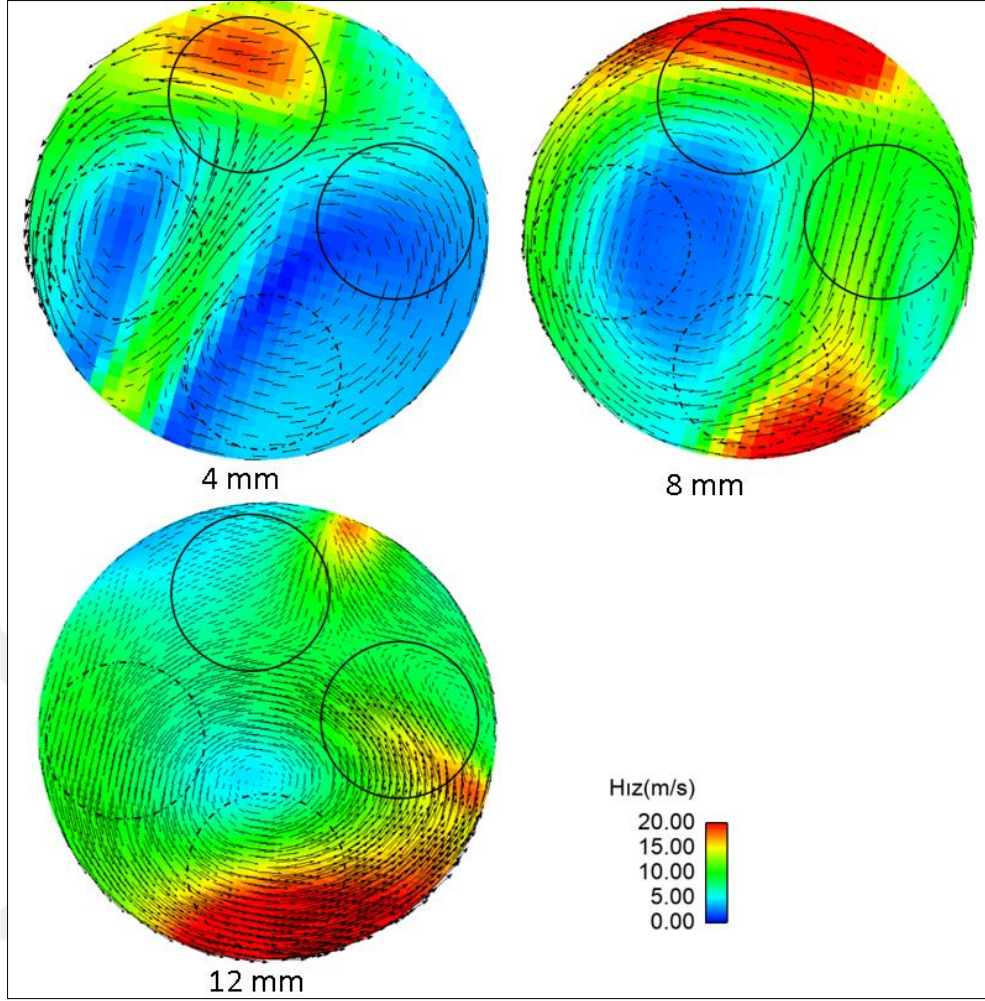
Şekil 8.17’de silindir kafasından 150mm uzaklıktaki 4mm supap açıklığı olan gösterimde silindir kesitinin iki yarısında da oluşan duragan bölgeler ve vorteksler belirgin bir şekilde görülmektedir. Supap açıklıkları 8mm olduğunda silindir iç çeperlerindeki akış hızının ve alanının arttığı, buna karşın vortekslerin küçüldüğü

varlıklarını devam ettikleri görülmektedir. 12mm supap açıklığında girdap hareketine en yakın akış özelliği elde edilmiştir. Girdap merkezi çevresindeki hız dağılımları homojen değildir, durağan bir bölgenin oluşumu bile söz konusudur ancak bir girdap merkezi oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8.17. Motor-B silindir kafasından 150 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için)

Şekil 8.18'de silindir kafasından 227 mm uzaklıkta 4mm supap açıklığı için alınan kesitte akışın şiddetini kaybettiği ve durağan bölgelerin arttığı ve vortekslerin devam ettiği görülmektedir. Supap açıklığı 8 mm olduğunda vorteks merkezlerinden birinin silindir merkezine yaklaştığı, diğer vorteksin ise oldukça zayıfladığı görülmektedir. Yüksek hızlı akışların ile silindirin iki tarafında silindir iç çeperinde devam ettikleri gözlemlenmektedir. Aynı kesitte supap açıklığı 12mm için zayıf şiddette bir girdap merkezinden bahsedilebilir. Akış hızları da silindirin bir tarafında birikmiş olup silindirin diğer tarafında durağan bölge oluşumu gözlemlenmeye başlanmıştır.



Şekil 8.18. Motor-B silindir kafasından 227 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için)

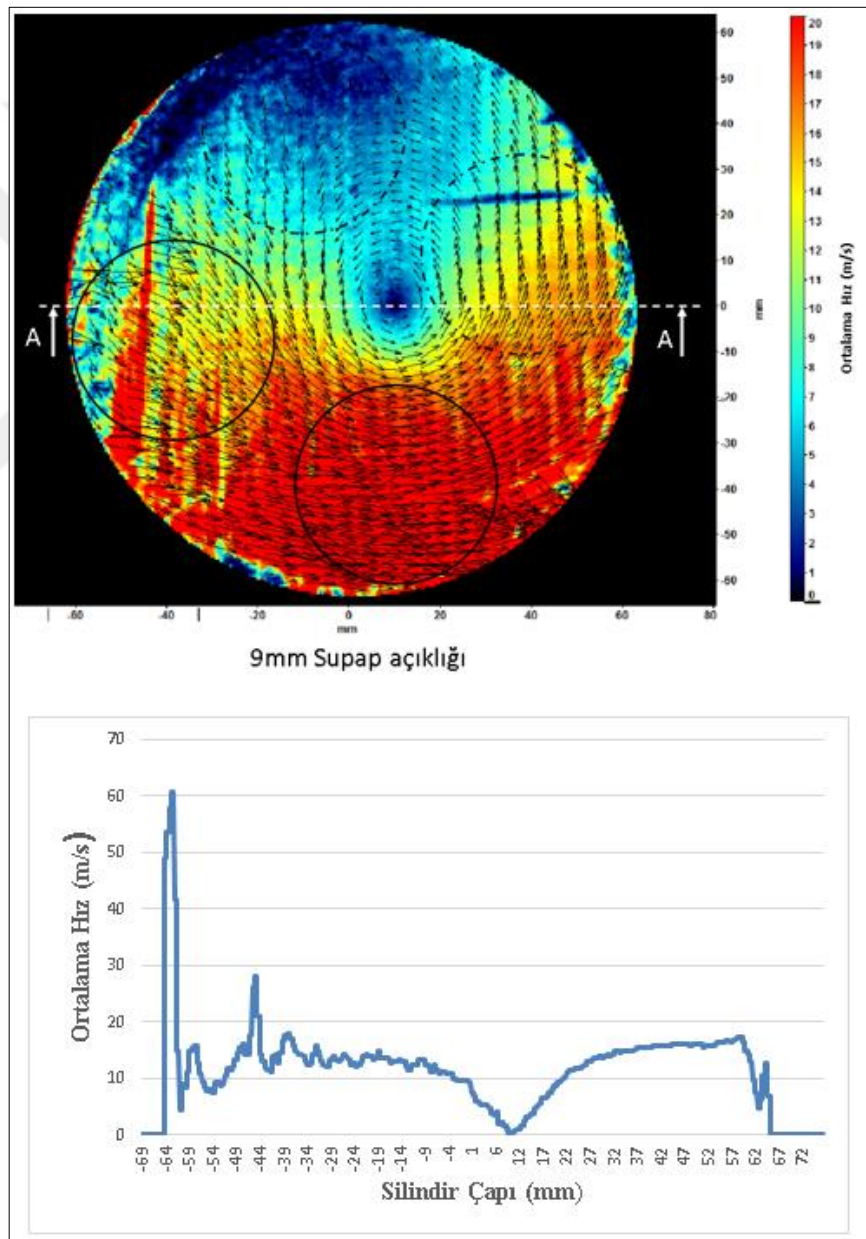
### 8.3. 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere parçacık görüntülemeli hız ölçümler hem Motor-A hem de Motor-B’de 2D ve 3D (stereo) olarak farklı supap açıklıkları için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerin sonrasında alınan ölçümlerin değerlendirilmesi yapılmış. Davis programı aracılığı ile hız vektörleri elde edilerek akış yapısı incelenmiştir. Ayrıca silindir merkezinden bir düzlem geçirilerek A-A kesitindeki hız dağılımı için grafik çizdirilmiş ve incelenmiştir.

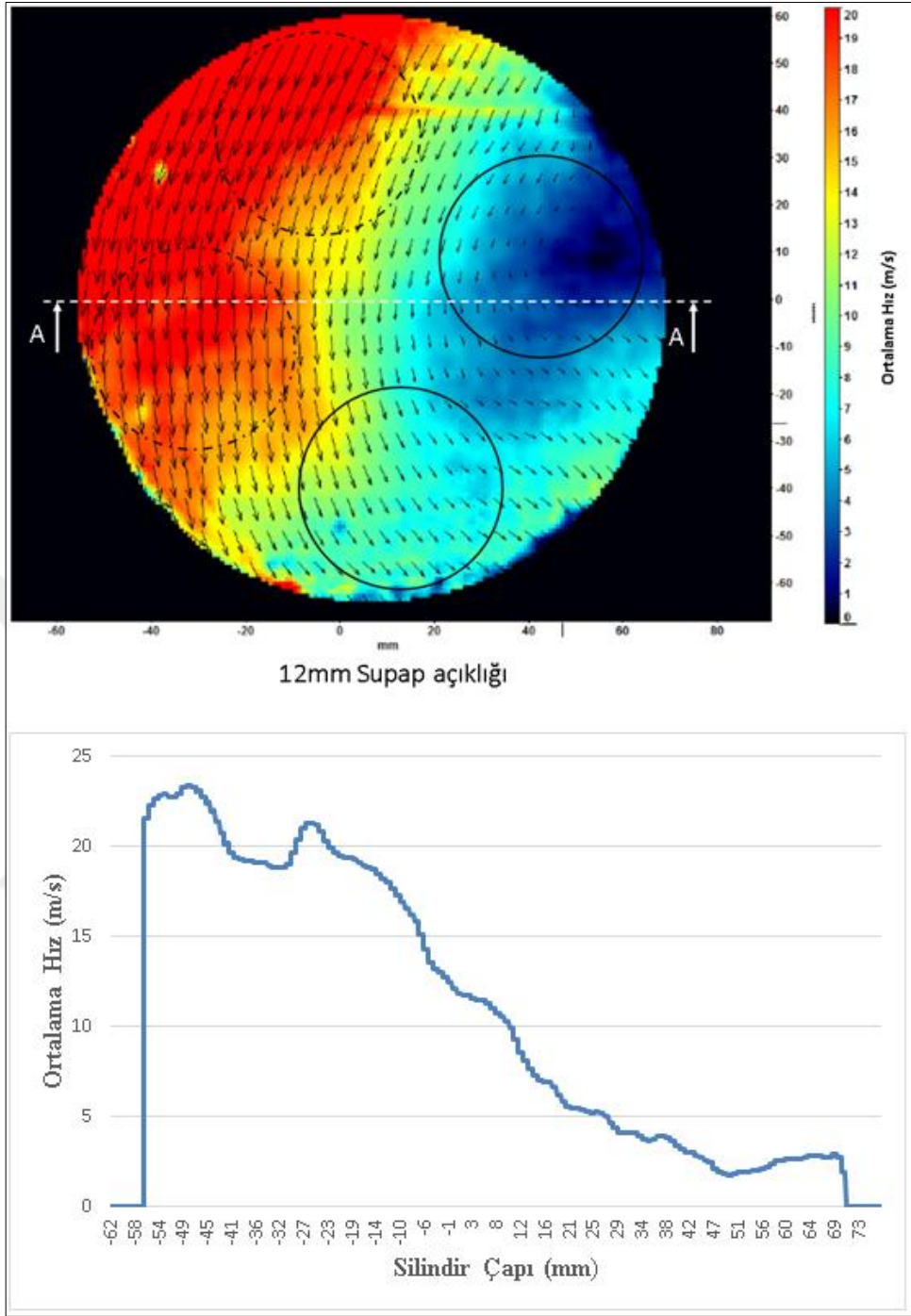
Bu kapsamda, Motor-A üzerinde 3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için ölçümler alınmıştır. 9 mm supap açıklığı 2D PGHÖ girdap oranı ölçümü ve A-A kesitindeki hız vektörleri grafiği Şekil 8.19’da gösterilmektedir. 3mm ve 6mm supap açıklıkları için elde edilen ölçüm sonuçları ekler kısmında EK-G’ye eklenmiştir.



Şekil 8.19’da yüksek hız dağılımının silindirin bir tarafında biriktiği ve silindirin tam diğer bölgesinde geniş bir durağan bölge (stagnation) olduğu görülmektedir. Silindirin merkezine yakın noktada bir girdap merkezi oluşmuştur ama silindirin içinde sürekli bir girdap hareketinin var olduğundan bahsedilemez. Ayrıca silindirin iç çeperinde, yani akışın en dış bölgelerinde akış hızının farklılık gösterdiği bölgelerin varlığı görülmektedir. Buna ilave olarak A-A kesitinden alınan hız vektörleri grafiğinde 60m/solarak ölçülen ve akışın genel yapısına uymayan çizgisel bölgeler saptanmıştır.



Şekil 8.19. Motor-A motor 9 mm supap açıklığı için 2D PGHÖ ölçüm sonuçları

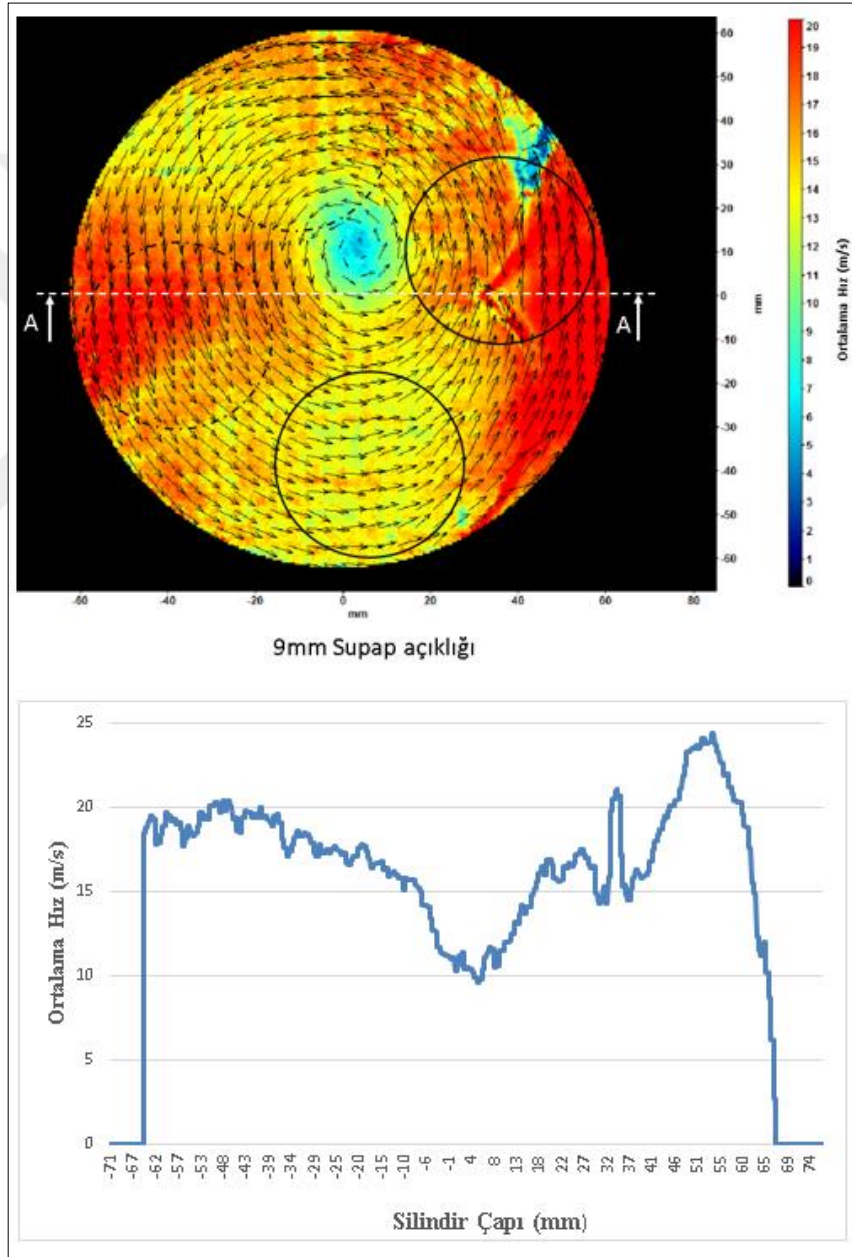


Şekil 8.20. Motor-B 12 mm supap açıklığı için 2D PGHÖ ölçüm sonuçları

Motor-B içinde benzer şekilde 4mm, 8mm ve 12mm olarak üzere farklı supap açıklıkları için testler gerçekleştirilmiştir. 12mm supap açıklığı için 2D PGHÖ girdap oranı ölçümü ve A-A kesitindeki hız vektörleri grafiği Şekil 8.20’de gösterilmektedir. 4mm ve 8mm supap açıklıkları için elde edilen ölçüm sonuçları ekler kısmına EK-G’ye eklenmiştir.

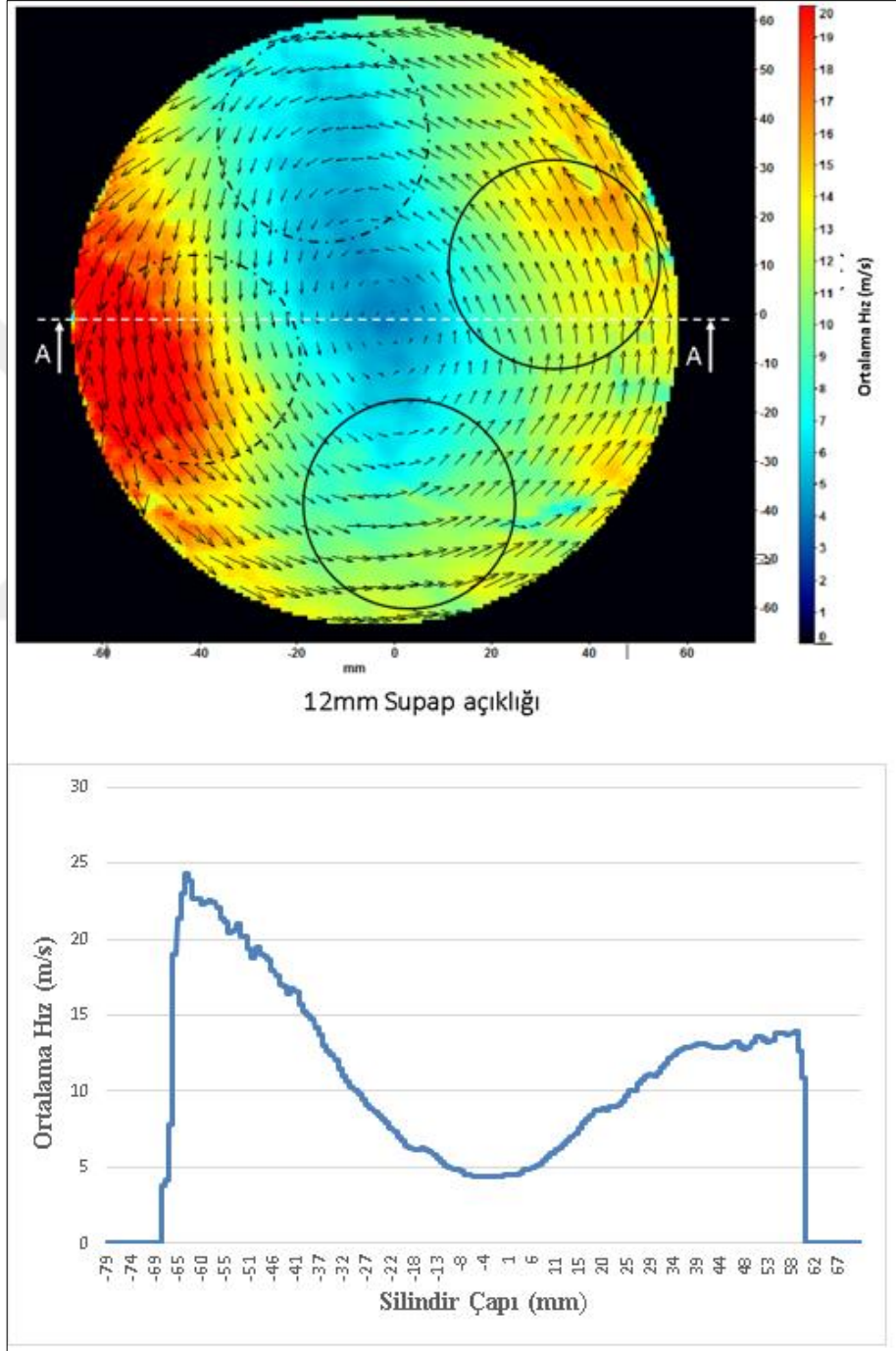


Şekil 8.20’de yüksek hızlı akış alanının silindirin bir yarısında olduğu görülmektedir. Bu yüksek hız alanındaki maksimum hız değeri 23.4m/s olarak ölçülmüştür. Silindirin diğer yarısında ise hız vektörlerinin şiddetleri azalarak düşük hız bölgesi oluşmuştur. Silindir iç çeperine yakın bir bölgede merkezi 0m/s hıza yakın geniş durağan bölge (stagnation) oluşmuştur. Hem ölçüm sonucu hem de A-A kesitinden alınan düzlemdeki hız vektörleri incelendiğinde bir girdap merkezi oluşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla vorteks hareketinden bahsedilemez.



Şekil 8.21. Motor-A 9 mm supap açıklığı için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları

2D PGHÖ' lerinin tamamlanmasının ardından aynı şekilde Motor-A için 3mm, 6mm, 9mm ve Motor-B için 4mm, 8mm, 12 mm supap açıklıkları için Stereo PGHÖ'leri tamamlanmıştır. Motor-A 9mm supap açıklığı ölçüm sonucu Şekil 8.21'de, Motor-B için 12mm supap açıklığı için ölçüm sonucu Şekil 8.22'de verilmiştir. Diğer supap açıklıkları için elde edilen ölçüm sonuçları tezin ekler bölümüne EK-H'ye eklenmiştir.



Şekil 8.22. Motor-B 12 mm supap açıklığı için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları

Şekil 8.21’de Motor-A için 9 mm supap açıklığında Stereo PGHÖ grafiği ve A-A kesit düzleminden alınan hız vektörleri grafiği görülmektedir. Silindirin merkezinde yakın bölgede bir girdap merkezi oluşmuştur. Silindir içinde hareket incelendiğinde güçlü bir girdap oluştuğu belirtilebilir. Silindir içindeki maksimum hız bölgeleri A-A kesiti alınan düzlemin iki yanında oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte diğer bölgelerdeki hızlar yüksek mertebede olup 13-14m/s civarındadır. Bu bölgelerde herhangi bir durağan hız bölgesi yoktur. Yapılan ölçümde maksimum hız 24.3m/s olarak ölçülmüştür. PGHÖ ölçüm grafiğinde ve hız vektörleri grafiğinde 34mm civarında dairesel bir ani hız bölgesi oluştuğu görülmüştür. Dikkatle incelendiğinde bu bölgenin supap yüzeyinden kaynaklanan yansımadan olduğu belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirilirken bu sebeple gözardı edilmelidir. Maksimum hızın oluştuğu bölgenin hemen üzerinde silindir iç çeperine yakın bir bölgede bir durağan akış bölgesi oluştuğu görülmektedir.

Şekil 8.22’de Motor-B için 12 mm supap açıklığında Stereo PGHÖ grafiği ve A-A kesit düzleminden alınan hız vektörleri grafiği görülmektedir. Silindir içinde ölçülen maksimum akış hızı 24.3m/s’ dir. Yüksek hız bölgesi silindir bir tarafında toplanmıştır. Silindirin diğer bölgesinde de 13.9m/s hız mertebesinde bir hız bölgesi oluşmuştur. Silindir merkezinde girdap merkezi olarak tanımlanabilecek bir durağan hız bölgesi (stagnation) olduğu görülmektedir. Akış vektörleri incelendiğinde bir vorteks oluştuğu gözlemlenmektedir. Vorteks merkezi, hız vektörleri grafiğinde de belirgin olarak gözükmemektedir.

#### **8.4. Simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ Girdap Oranı Ölçüm Sonuçları Karşılaştırması**

Bu tez çalışmasında, önceki bölümlerde Motor-A ve Motor-B için farklı supap açıklıkları için silindir içi akış incelenmesi amacıyla HAD teknik kullanılarak simülasyonlar yapılmış ve her bir durum için akış ve hızlar detaylı olarak incelenmiştir. Ardından aynı motorlar için 2D ve 3D (stereo) PGHÖ test metodu ile farklı supap açıklıkları için testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen ölçüm sonuçları detaylı olarak incelenmiştir.

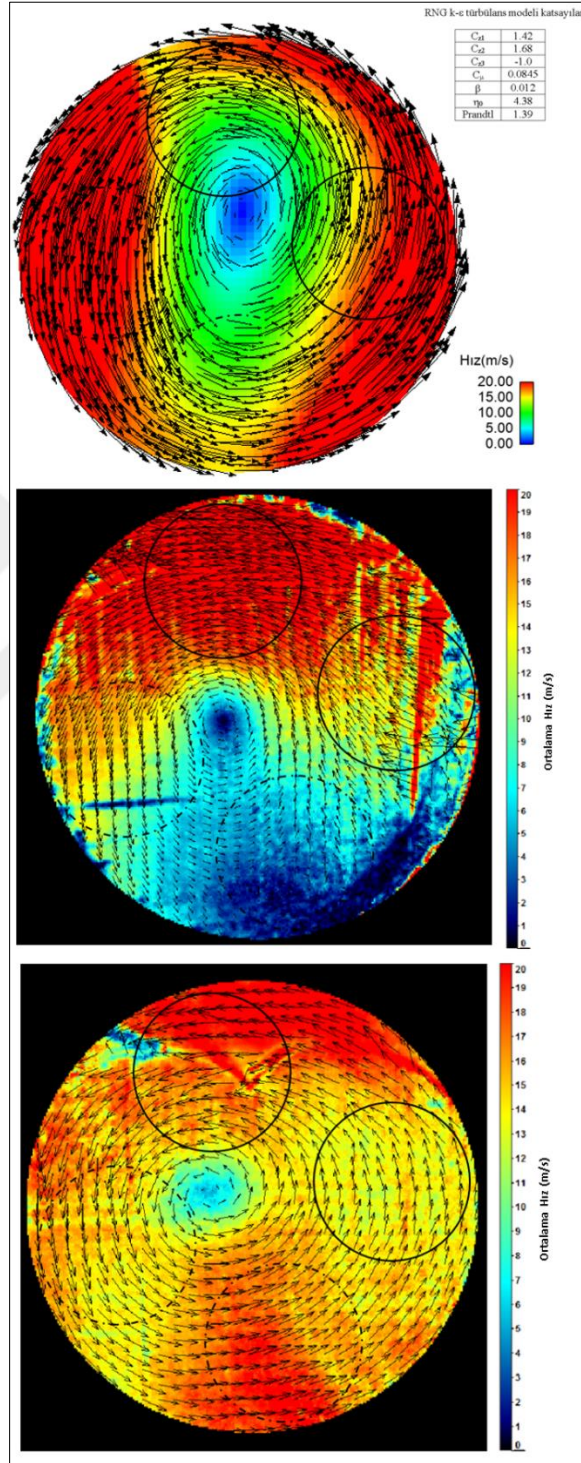
Bu bölümde ise, belirli bir supap açıklığı için simülasyon, 2D ve 3D (stereo) PGHÖ testleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bunun için emme

supapları her şekilde aynı konumda olacak şekilde grafikler döndürülmüş ve hız seviyelerini sağlıklı karşılaştırabilmek için hız skalası aynı değerde olacak şekilde ayarlanmıştır. Simülasyon sonucu olarak silindir kafasından 150 mm uzaklıktaki kesitten elde edilen hız vektörleri kullanılmıştır. 2D ve 3D (stereo) PGHÖ test sonuçları ise silindir kafasından 150 mm uzaklıktaki düzlemden ölçülmüştür.

Şekil 8.23'te Motor-A'nın 9mm supap açıklığı için sırasıyla simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları görülmektedir. Hem simülasyon sonucunda hem de 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçüm sonucunda hız mertebesi ve dağılımı yakınlık göstermektedir. Her ikisinde de girdap merkezi silindir merkezine yakındır ancak aynı noktada değildir. Simülasyon sonucunda yüksek hız vektörleri silindir içinde çevresel olarak daha yoğundur. 2D PGHÖ ölçüm sonucunda ise silindirin bir tarafında yüksek hız bölgesi görünürken, diğer bölgede geniş bir durağan hız bölgesi görülmektedir. Bir girdap merkezi varlığından bahsedilebilir ancak çevresel olarak girdap hareketi oluşumu görülmemektedir. Bunun nedeni kullanılmakta olan tek kameranın yakalayabildiği hız alanının kısıtlı olması ve silindir içindeki ölçüm kesitindeki tüm hız vektörlerini yakalayamamasıdır. Ayrıca 2D PGHÖ ölçüm sonucunda sebebi ışık yansımaları olan fazlaca bozulmuş hız bölgeleri görülmektedir. Buna ilave olarak 3D (Stereo) PGHÖ ile karşılaştırıldığında 2D PGHÖ ölçüm sonucunda silindir iç yüzeyinde kenar bölgelerde bozuk bölgelerin daha fazla olduğu görülmektedir.

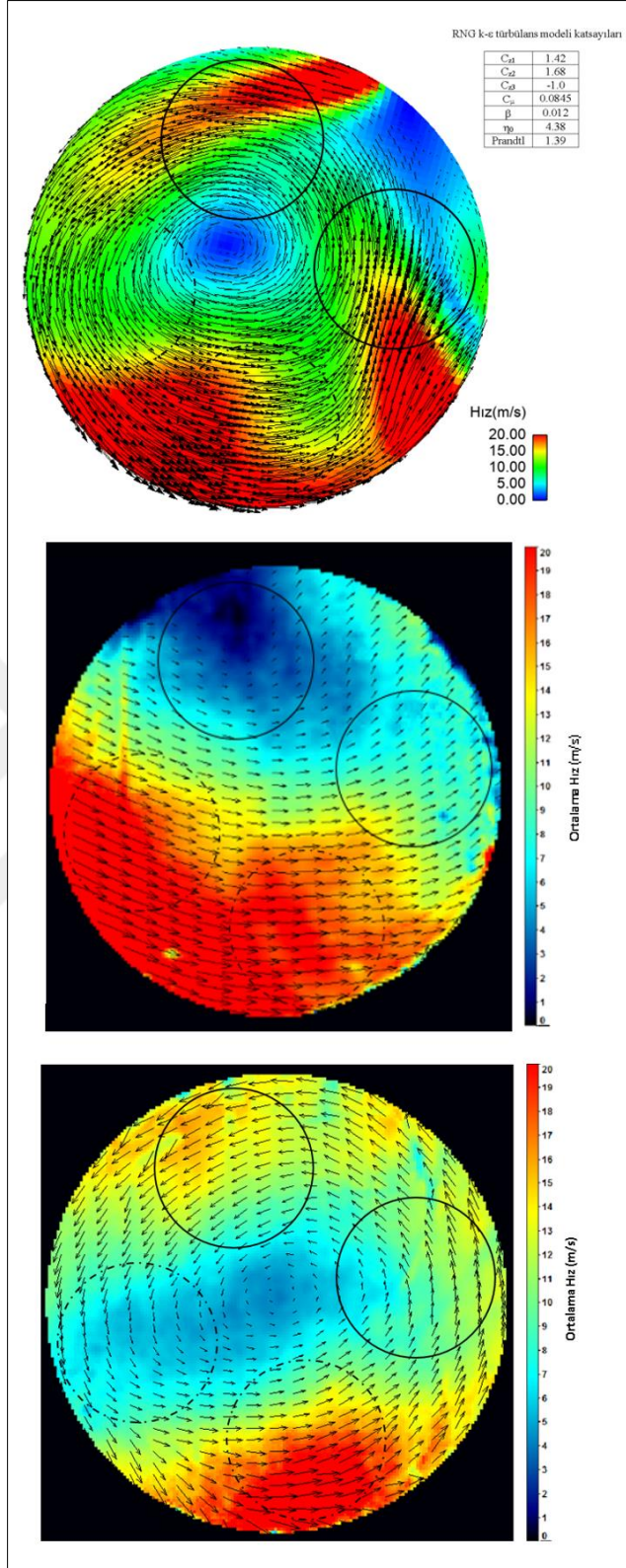
Şekil 8.24'te Motor-B'nin 12mm supap açıklığı için sırasıyla simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları görülmektedir. Simülasyon sonuç grafiğinde silindirin merkez noktasına yakın bir bölgede girdap merkezi oluştuğu ve silindir içindeki girdap hareketi görülebilmektedir. Bununla birlikte çevresel olarak değişken hızlar mevcuttur ve hatta silindir çeperine yakın bir bölgede durağan hız bölgesi oluşmuştur. 2D PGHÖ ölçüm sonucunda belli bir hız bölgesi oluşmuş olmasına rağmen herhangi bir girdap veya vorteks oluşumu görülmemektedir. Silindir içinde farklı bölgelerde durağan hız bölgeleri oluşmuştur. Silindir iç çeper bölgelerinde yansıma ve kamera açılarından dolayı belirsizlikler oluşmuştur. Hız vektörleri ve sürekli olan akış yakalanamayıp, daha çok noktasal ve değişken hız vektörlerinden bahsedilebilir. 3D (Stereo) PGHÖ sonucunda ise simülasyon sonucuna benzer şekilde karşılıklı olan belirgin bir hız bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Akışın

sürekli olduğu ve takip edilebildiği görülmektedir. Simülasyon sonucu kadar belirgin bir girdap olmasa da merkeze yakın bir bölgede bir vorteks merkezi ve çevresinde vorteks oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8.23. Motor-A 9 mm supap açıklığı için simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçümü karşılaştırılması





Şekil 8.24. Motor-B 12 mm supap açıklığı için simülasyon, 2D ve 3D (Stereo) PGHÖ girdap oranı ölçümü karşılaştırılması

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz içten yanmalı motorlarında silindir içi hava yakıt karışımının girdap hareketi araştırmacılar tarafından incelenmekte ve geliştirilmektedir. Bu inceleme çalışmaları sırasında ölçüm ve gözlem amacıyla farklı teknikler kullanılmaktadır. Gelişen lazer ve yüksek hızlı kamera teknolojileri ile birlikte araştırmacılar tarafından kullanılan tekniklerden biri de parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğidir. Bu teknik, tek kameralı düzlemsel (2D 2C), iki kameralı stereo (2D 3C) ve ikiden fazla kamera ile hacimsel veya tomo (3D 3C) olmak üzere farklı şekillerde uygulanabilmektedir.

Tekniğin şu anki olgunluğuna rağmen, özellikle otomotiv uygulamalarındaki gibi karmaşıklığın olduğu anlarda çeşitli sınırlamalara sahiptir. Bunlar arasında aydınlatma ve görüntüleme sistemi için optik erişim, sınırlı ölçüm hacmi, belirsizlik hesapları en ilgili olanları arasında yer alır.

Bu tez çalışması kapsamında, karşılaştırılabilir olarak iki farklı motor için emme portu performansı bal peteği tork ölçümleri ve düzlemsel (2D 2C) ve stereo (2D 3C) parçacık görüntülemeli hız ölçüm teknikleri kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Parçacık görüntülemeli hız ölçümleri, ölçülen alandaki hız büyüklüğü, hız yapısı ve hız indeksi açısından bilgiler sağlamıştır. Bununla birlikte, her iki motor içinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilerek silindir içindeki farklı kesitlerdeki akış ve hız vektörleri incelenmiştir.

Yapılan bal peteği tork ölçümleri, düzlemsel (2D 2C) ve stereo (2D 3C) parçacık görüntülemeli hız ölçümlerinin ardından ölçüm doğrulunun tespiti amacıyla belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bir amacı, port geliştirme çalışmaları sırasında deneysel ve simülasyon tekniklerinin birlikte kullanılabilmesi için metodoloji oluşturmaaktır. Bu amaçla deneysel olarak parçacık görüntülemeli teknikleri olan hız ölçüm ölçümleri 2D

düzlemsel veya 2D 3C stereo tekniklerini detaylı incelemeleri yapılmıştır. Hem Motor-A'yı temsil eden prototip parça, hem de Motor-B üzerinde karşılaştırmalı olarak yapılan deneysel ölçümler, 2 boyutlu düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümünün yüksek girdap oranı içeren motorlarda hız dağılımını ve hız indeksininin yüksek hata oranı ile ölçülebildiği, ancak 2D 3C parçacık görüntülemeli hız ölçümünün hem petek ölçüm yöntemiyle hem de HAD simülasyonları ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir.

Yapılan bu çalışmanın sonucu, deneysel olarak motor girdap ölçümleri için simülasyon ve test metodolojisi oluşturulmuştur. Motor girdap ölçümlerinde öncelikle referans ölçüm için, motor bloğundaki her silindirin supap açma yüksekliğine göre mm bazında bal peteği tork ölçümleri ile tarama yapılarak her supap açıklığı için girdap oranının belirlenmesi gerekmektedir. Ancak girdap oranlarındaki oluşan değerlerin, port veya silindir tasarım parametreleri ile ilişkisini anlamak için silindirin farklı kesitlerinde ölçüm sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bunun için de yüksek girdap oranı supap açıklıkları için iki boyutlu düzlemsel parçacık görüntülemeli hız ölçümü, düşük girdap oranı supap açıklıkları için 2 kamera kullanılarak 3 boyutlu stereo parçacık görüntülemeli hız ölçümlerini gerçekleştirilmelidir.

Ölçüm sonuçlarında otomotivdeki girdap akış ölçümlerinde özellikle hız indeksi ve hız dağılımı gibi ana parametrelerin %10 hata payında ölçülmesi sonucunda iki boyutlu üç komponentli ölçüm metodunun kullanılması gerektiği görülmektedir. Üçüncü komponent olan z komponentinin düşük girdap oranı uygulamalarında girdap ölçümlerine etkisinin olduğu görülmektedir.

Simülasyon metodu olarak zamana bağlı olmayan valf açıklığında yapılan çalışmalar test metoduna swirl ölçümünde yüzde 2,5 hata payı ile yakalayabilmektedir. Girdap merkezlerini ve yapısını da yüzde 10 hata ile simüle edilebildiği için tek noktada ölçüm alıp çalışmaları simülasyonla devam edebilecek doğrulukta data verilebilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Heim, D.M., In-Cylinder Investigation of Engine Size and Speed Scaling Effects, Doktora Tezi, University of Wisconsin, Madison, 2011.
- [2] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, USA, 1988
- [3] Gül, M.Z., Köten, H., Yılmaz, M., Savcı, İ.H., Advanced Numerical and Experimental Studies on CI Engine Emissions, *Journal of Thermal Engineering*, 2018, **4**(4), 2234-2247.
- [4] Vester, A.K., Nishio, Y., Alfredsson, P.H., Unravelling Tumble and Swirl in a Unique Water-Analogue Engine Model, *Journal of Visualization*, 2018, **21**, 557-568.
- [5] Bottom, K.E., PIV Measurements of In-Cylinder Flow and Correlation with Engine Performance, Doktora Tezi, University of Wisconsin, Madison, 2003.
- [6] Kim, Y., Han, Y., Lee, K., A Study on the Effects of the Intake Port Configurations on the Swirl Flow Generated In a Small DI Diesel Engine, *Journal of Thermal Science*, 2014, **23**(3), 297-306.
- [7] Vester, A.K., Nishio, Y., Alfredsson, P.H., Investigating Swirl and Tumble Using Two Prototype Inlet Port Designs by Means of Multiplanar PIV, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, **75**, 61-76.
- [8] Xu, H., Some Critical Technical Issues on the Steady Flow Testing of Cylinder Heads, *SAE Technical Paper*, 2001, 2001-01-1308.
- [9] Park, D., The Influence of Different In-Cylinder Flows on Combustion in an SI Engine, Doktora Tezi, University of Toronto, Toronto, 2005.
- [10] Cosadia, I., Bore' e, J., Charnay, G., Dumont, P., Cyclic Variations of the Swirling Flow in a Diesel Transparent Engine, *Experiments in Fluids*, 2006, **41**, 115-134.
- [11] Rabault, J., Vernet, J., Alfredsson, P.H., A Study Using PIV of the Intake Flow in a Diesel Engine Cylinder, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, **62**, 56-67.
- [12] Doosje, E., Bastiaans, R. J. M., Baert, R., 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*, 2004, 301-313.

- [13] Dwarshala, S. K. R., Vandana, S., Rambhaji, G. P., Computation and Validation of In-Cylinder Flow Field, Swirl and Flow Coefficients for a Naturally Aspirated Single Cylinder Diesel Engine, *SAE Technical Paper*, 2016, 2016-28-0018.
- [14] Gim, Y., Jang, D.K., Sohn, D.K., Kim, H., Ko, H.S., Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry Using Shallow Neural Network for Real-Time Analysis, *Experiments in Fluids*, 2020, **61**(2), 1-8.
- [15] Timmins, B. H., Automatic Particle Image Velocimetry Uncertainty Quantification, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Utah, 2011.
- [16] Sciacchitano, A., Uncertainty Quantification in Particle Image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 2019, **30**(9), 092001.
- [17] Abe, M., Longmire, E.K., Hishida K., Maeda, M., A Comparison of 2D and 3D PIV Measurements in an Oblique Jet, *Journal of Visualization*, 2000, **3**, 165-173.
- [18] Martins, F.J.W.A., Foucaut, J.M., Thomas, L., Azevedo, L.V.A., Stanislas, M., Volume Reconstruction Optimization for Tomo-PIV Algorithms Applied to Experimental Data, *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(8), 085202.
- [19] Warner, S. O., Autocorrelation-Based Estimate of Particle Image Density in Particle Image Velocimetry, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Utah, 2012.
- [20] Sciacchitano, A., Uncertainty Quantification in Particle Image Velocimetry and Advances in Time-Resolved Image and Data Analysis, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft, 2014.
- [21] Wieneke, B., PIV Uncertainty Quantification and Beyond, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft, 2017.
- [22] Özgün, Ö., Kumlutaş, D., Yücekaya, U.A., Üç Boyutlu Arka Plan Konumlandırılmış Yoğunluk Farkı (Schlieren) Yöntemi ile Akış Yapılarının İncelenmesi ve Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü ile Doğrulanması, *Mühendis ve Makina*, 2017, **58**(687), 29-40.
- [23] Panchasara, H. V., Spray Characteristics and Combustion Performance of Unheated and Preheated Liquid Biofuels, Doktora Tezi, The University of Alabama, Alabama, 2010.
- [24] Deniz, O., *İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul, 2008.
- [25] Dülger, Z., *İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2010.

- [26] Özsezen, A. N., *İçten Yanmalı Motorlarda Karışım Oluşturma Ders Notu*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2017
- [27] Savcı, İ. H., Zeren, H. B., Egzoz Sistemlerinde Depozit Testleri ve Depozit Dozlama Haritasının Çıkarılması, *Isı Bilim ve Tekniği Dergisi*, 2019, **39**(2), 163-167.
- [28] Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., *İçten Yanmalı Motorlar Cilt I.*, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara, 1992.
- [29] Eliçin, A. K., Biyodizel Yakıtla Çalıştırılan Küçük Güçlü Bir Dizel Motorun Performans ve Emisyonuna Giriş Hava Basıncı Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 299695.
- [30] Hill, P. G., Zhang, D., The Effects of Swirl and Tumble on Combustion in Spark Ignition Engines, *Progress in Energy Combustion Science*, 1994, **20**(5) 373-429,
- [31] Gürbüz, H., Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Hidrojen Motorunda Yanma Optimizasyonu, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2010, 268718.
- [32] Qi, Y. L., Dong, L. C., Liu, H., Puzinauskas, P. V., Midkiff, K. C., Optimization of Intake Port Design for SI Engine, *International Journal of Automotive Technology*, 2012, **13**(6), 861–872.
- [33] Kent, J., Haghgoie, M., Mikulec, A., Davis G. C., Tabaczynski, R. J., Effects of Intake Port Design and Valve Lift on In-Cylinder Flow and Burnrate, *SAE International*, 1987, **96**(7), 975-987.
- [34] Mandloi, P., Verma, G., Boland, A., Design Optimization of an In-Cylinder Engine Intake Port, Nafems World Congress, Girit, Yunanistan, 16-19 Haziran 2009.
- [35] Ayaz, E., TLM16V185 Tipi Ağır İş Dizel Motoru için Silindir İçi Akış Yapısının Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017, 467046.
- [36] Funken, B., *Port Flow Test Rig Manual*, FEV, Aachen 2014.
- [37] Yılmaz, C., *Akışkanlar Mekaniği I Ders Notları*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Afyon, 2019.
- [38] Bayraktar, S., Çapraz Akıştaki Türbülanslı Jet Akışlarının Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 238157.
- [39] Uz, Y. C., Analytical and Numerical Sensitivity Analysis of Constant Temperature Hot-Wire Anemometre, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2014, 371872.

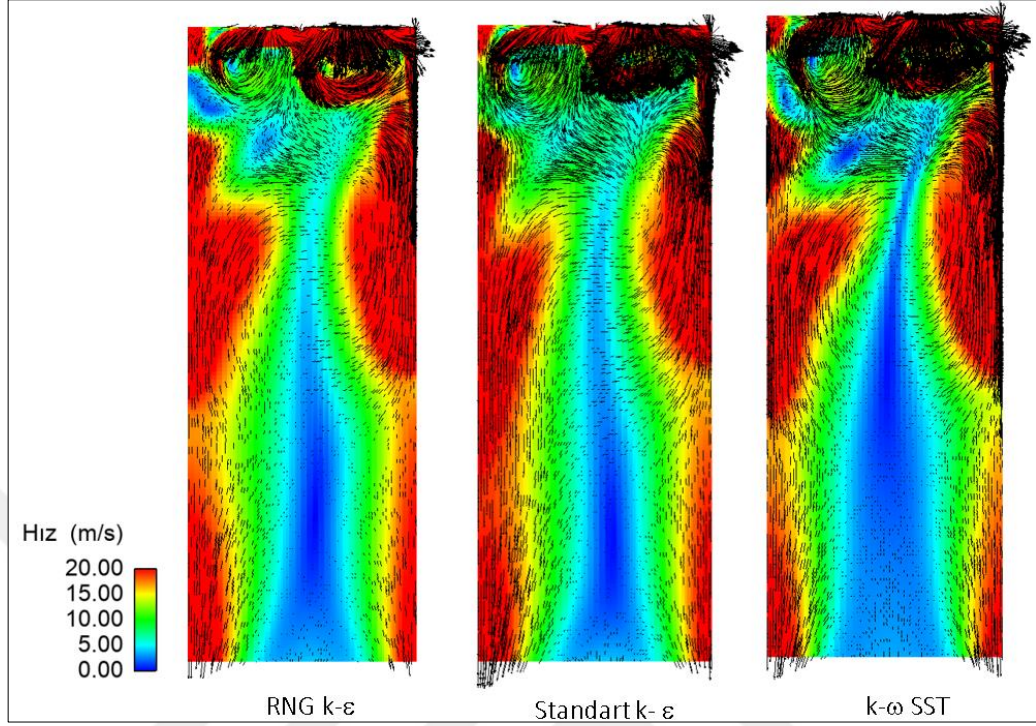
- [40] Bruun, H. H., Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis, *Measurement Science and Technology*, 1996, **7**(10).
- [41] Fontaine, A. A., Laser Doppler Velocimetry, Introduction to Principles and Applications lecture notes, Penn State university, Pennsylvania, 2018.
- [42] Doda, B., LDV-Laser Doppler Velocimetry, [https://velocimetry.net/ldv\\_principles.htm/](https://velocimetry.net/ldv_principles.htm/), (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2020)
- [43] Dantec dynamics, Measurement Principles of LDA, <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/measurement-principles-of-lda/> (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2020).
- [44] Durst, F., Melling, A., Whitelaw, J., Laser Doppler Anemometry, [https://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper\\_techniques/LDA.text.pdf](https://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper_techniques/LDA.text.pdf) /, (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2020).
- [45] Adrian, R. J., Bibliography of Particle Image Velocimetry Using Imaging Methods: 1917–1995, *DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.*, 2011.
- [46] Werle, H., Hydrodynamic Flow Visualization, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1973, **5**(1), 361–386.
- [47] Douglas, H. A., Hide, R., Mason, P. J., An Investigation of the Structure of Baroclinic Waves Using Three-Level Streak Photography, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, **98** (416), 247–263.
- [48] Phillips, D. R., Smith, E. A., Suomi, V. E., An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation, *Journal of Applied Meteorology*, 1972, **11**(4), 752–754.
- [49] Meynart, R., Instantaneous Velocity Field Measurements in Unsteady Gas Flow by Speckle Velocimetry, *Applied Optics*, 1983, **22**(4), 535-540.
- [50] Pickering, C. J., Halliwell, N. A., Speckle Photography in Fluid Flows: Signal Recovery with Two Step Processing, *Applied Optics*, 1984, **23**(8), 1128-1129.
- [51] Adrian, R. J., Yao, C. S., Pulsed Laser Technique Application to Liquid and Gaseous Flows and the Scattering Power of Seed Materials, *Applied Optics*, 1985, **24**(1), 44-52.
- [52] Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z.C., Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 1997, **8**(12), 1441.
- [53] Willert, C., Stereoscopic Digital Particle Image Velocimetry for Application in Wind Tunnel Flows, *Measurement Science and Technology*, 1997, **8**(12), 1465.

- [54] Prasad, A. K., Stereoscopic Particle Image Velocimetry, *Experiments in Fluids*, 2000, **29**(2), 103-116.
- [55] Elsinga, G. E., Scarano, F., Wieneke, B., van Oudheusden, B. W., Tomographic Particle Image Velocimetry, *Experiments in Fluids*, 2006, **41**(6), 933-947.
- [56] Schröder, A., Geisler, R., Elsinga, G. E., Scarano, F., Investigation of a Turbulent Spot and a Tripped Turbulent Boundary Layer Flow Using Time-Resolved Tomographic PIV, *Experiments in Fluids*, 2008, **44**(2), 305-316.
- [57] Violato, D., Scarano, F., Three-Dimensional Evolution of Flow Structures in Transitional Circular and Chevron Jets, *Physics of Fluids*, 2011, **23**(12), 124104.
- [58] La vision, Particle Image Velocimetry, <https://www.lavision.de/de/techniques/piv-ptv/index.php/>, (Ziyaret tarihi: 31 Ağustos 2020).
- [59] Weyna, S., Mickiewicz, W., Pyla, M., Jablonski, M., Experimental Acoustic Flow Analysis Inside a Section of an Acoustic Waveguide, *Archives of Acoustics*, 2013, **38**(2), 211-216.
- [60] Çengel, Y., Cimbala, J. M., *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 2008.
- [61] Westerweel, J., Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 1997, **8**(12), 1379-1392.
- [62] Polat, C., Farklı Dizilimlere Sahip Binalar Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin PIV Yöntemi ile Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 2019, 592442.
- [63] La Vision, *LaVision FlowMaster Product Manuel for Davis8.1*, Göttingen, 2013
- [64] FEV, Flow Test Bench-Special Test Benches, <https://www.fev-sts.com/en/solutions/test-benches/special-test-benches.html/>, (Ziyaret tarihi: 1 Ağustos 2020).
- [65] Demirkesen, C., Dizel İçten Yanmalı Motorlarda Silindir İçerisindeki Hava Hareketlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2018, 535175.
- [66] Onan, C., Boruların Dış Yüzeyindeki Hareketli Sıvı Filminden Olan Isı ve Kütle Transferinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 329587.
- [67] Kline, S. J., McClintock, F., Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, 1953, **75**, 3-8.

- [68] Sadıkhov, E., Kangı, R., Uğur, S., *Ölçüm Belirsizliği*, UME 95-014, Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, 1995.
- [69] Ford Motor Company, *Six Sigma Black Belt Manual*, 2nd Edition, LLC Publication, Arizona, 2011.
- [70] Bhattacharya, S., Charonko, J. J., Vlachos, P. P., Stereo-Particle Image Velocimetry Uncertainty Quantification, *Measurement Science and Technology*, 2016, **28**(1), 015301.
- [71] Arroyo, M. P., Greated, C. A., Stereoscopic Particle Image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 1991, **2**(12), 1181-1186.
- [72] Timmins, B. H., Wilson, B. W., Smith, B. L., Vlachos, P. P., A Method for Automatic Estimation of Instantaneous Local Uncertainty in Particle Image Velocimetry Measurements, *Experiments in Fluids*, 2012, **53**(4), 1133-1147.
- [73] Sciacchitano, A., Wieneke, B., Scarano, F., PIV Uncertainty Quantification by Image Matching, *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(4), 045302.
- [74] Charonko, J. J., Vlachos, P. P., Estimation of Uncertainty Bounds for Individual Particle Image Velocimetry Measurements from Cross-Correlation Peak Ratio, *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(6), 065301.
- [75] Wieneke, B., PIV Uncertainty Quantification from Correlation Statistics, *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(7), 074002.
- [76] Sciacchitano, A., Neal, D. R., Smith, B. L., Warner, S. O., Vlachos, P. P., Wieneke, B., Scarano, F., Collaborative Framework for PIV Uncertainty Quantification: Comparative Assessment of Methods, *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(7), 074004.
- [77] Keane, R. D., Adrian, R. J., Optimization of Particle Image Velocimeters. I. Double Pulsed Systems, *Measurement Science and Technology*, 1990, **1**(11), 1202-1215.
- [78] Schrijer, F. F. J., Scarano, F., Effect of Predictor–Corrector Filtering on the Stability and Spatial Resolution of Iterative PIV Interrogation, *Experiments in Fluids*, 2008, **45**(5), 927-941.
- [79] Demirkesen, C., Colak, U., Savcı, I. H., Zeren, H. B., Experimental and Numerical Investigation of Air Flow Motion in Cylinder of Heavy Duty Diesel Engines, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2020, **13**(2), 537-547.
- [80] LaVision, PIV Uncertainty Quantification, <https://www.lavision.de/en/download.php?id=2347/>, (Ziyaret tarihi: 31 Ağustos 2020).



Ek -A

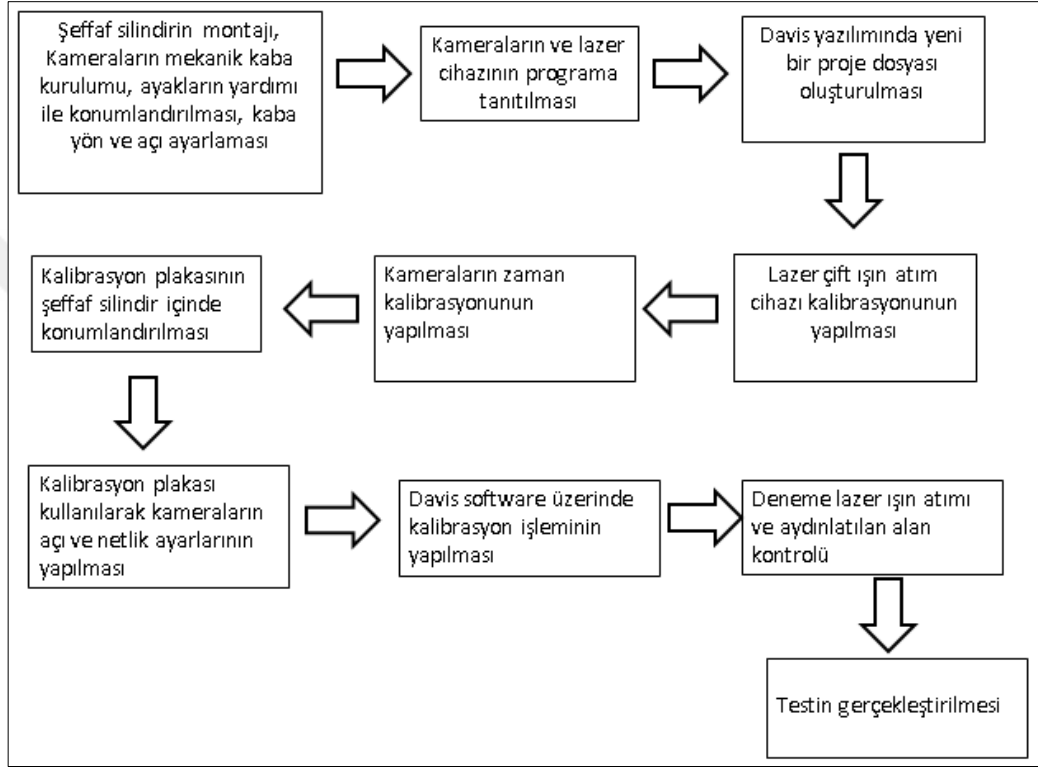


Şekil A.1. Motor-A 9 mm supap açıklığı için türbülans modelleri simülasyon sonuçları (silindir merkezi kesit görüntüsü)



## Ek -B

Parçacık görüntülemeli hız ölçümü test düzeneği kurulumu 2 ana başlıktan oluşmaktadır. Bunlar görüntüleme ve lazer sistemlerinin mekanik kurulumu ve Davis yazılımı kullanılarak kalibrasyon işleminin yapılmasıdır. PGHÖ test düzeneği kurulumu akış diyagramı aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil B.1. PGHÖ test düzeneği kurulumu akış diyagramı

Yüksek hızlı kameraya kullanılacak objektif ve kalibrasyon plakasını daha dik açıdan görmesini sağlayacak aparatın montajı yapılır ve profil ayaklar yardımı ile mekanik kurulumu kabaca tamamlanır. Kameranın açısı ve yönü akış alanı olan şeffaf silindire doğru bakacak şekilde ayarlanır.

Davis yazılımında kullanılacak kamera ve lazer cihazı modelleri seçilerek tanıtımı tamamlanır. Yine aynı programda yeni bir proje klasörü oluşturulur. Yapılan tüm

kamera ve lazer kalibrasyon değerleri bu proje dosyasında saklanmaktadır. Kamera ve ışın kaynağı kabloları bilgisayar ile bağlantıları gerçekleştirildikten sonra “Line configuration” kısmından terminal ve etiket isimleri girilir.

Lazer cihazının kalibrasyonun yapılması için, setup kısmında ışın kaynağı olarak “double pulse Nd: YAG laser” seçilmez. Çift lazer ışığı atımında A ilk atımı, B ise ikinci atımı simgelemektedir. Buna uygun olarak Timing Setup kısmında kameralar ve ışın kaynağı için çift atımı gösteren T1A ve T1B seçilmelidir. Her iki atım içinde minimum ve maksimum güç değerlerinde qswitch gecikmesi  $\mu\text{s}$  olarak girilir. Bu test için her iki ışın atımı içinde maksimum güç değerinde 135  $\mu\text{s}$ , minimum güç değerinde 270 $\mu\text{s}$  olarak girilmiştir.

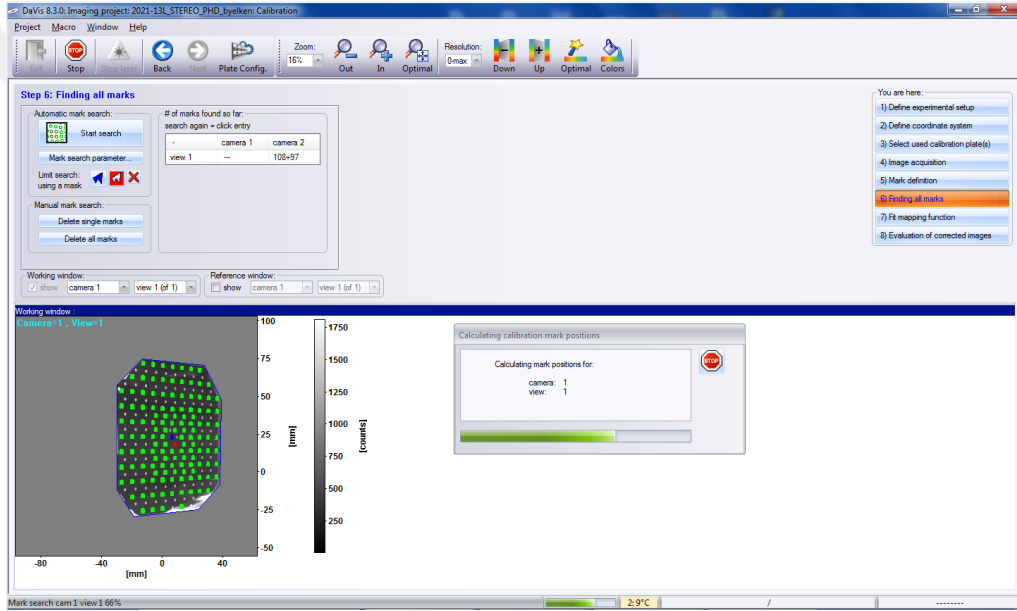
Yüksek hızlı kamera çalıştırılarak, kalibrasyon plakası kullanılarak kameranın netlik ve açı gibi değerlerinin kalibrasyon işlemi başlatılır. Kamera kalibrasyon için ilk yapılması gereken şeffaf silindirin tüm yan duvarını göreceğ şekilde kameranın yatayda şeffaf silindire olan mesafesinin ayarlanmasıdır. Kalibrasyon plakasının üzerindeki üçgen şekil sağ tarafa bakacak şekilde kamera görüntüsü yazılım üzerinden 90 derece çevrilerek ayarlanmalıdır.

Kamera objektifi üzerindeki diyafram kullanılarak derinlik alanı ve netlik ayarı kullanılarak kalibrasyon plakası üzerindeki noktaların bilgisayar ekranında görünen görüntüsünün netliği olabilecek en şekilde ayarlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus kalibrasyon plakası üzerindeki her nokta ayrı değerlendirilerek en optimum net görüntü elde edilmelidir. Ekrandaki görüntüdeki netlik, kontrastlık artırılarak ve maksimum derecede büyütülerek piksel görüntülerinden netlik olabilecek en iyi seviyeye getirilir. Bu test düzeneğinde 2D PGHÖ için kullanılacak kamerada en net görüntü yapılan netlik (odaklama) denemeleri sonucu diyafram 5.6, netlik(odaklama) 0,65 olarak ayarlanması ile elde edilmiştir.

Kameranın kalibrasyonu yapılırken dikkat edilmesi gereken bir noktada, kalibrasyon plakasının üzerindeki referans çizgilerinin paralel olmasıdır. Kameranın açısal ayar kolları kullanılarak yazılım ekranında bu çizgiler paralel olacak şekilde kalibrasyon yapılır.

Bu test düzeneğinde kalibrasyon plakası kullandığımız için scaling ayarına ayrıca gerek yoktur.

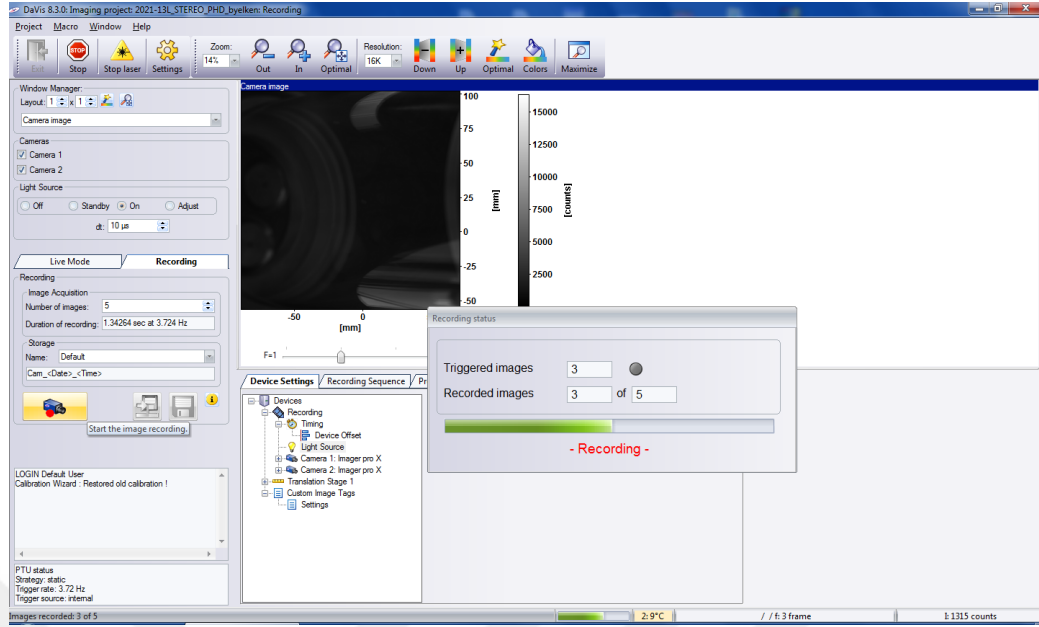
Mekanik kalibrasyonun tamamlanmasından sonra yazılım arayüzündeki “calibration” menüsünden kalibrasyon işlemi başlatılır. Ardarda gelen seçim ekranlarında, kalibrasyon türü “1 camera (2D)” olarak, koordinat sistemi “right handed”, kalibrasyon plakası “106-10 3D” olarak ayarlandı. Ardından gelen adımlarda kameradan görüntü alınır, kalibrasyon plakası üzerindeki noktalar seçilir ve kalibrasyon plakasının sınırları çizilerek belirlendi. Bu seçimlerden sonra kalibrasyon işlemi başlatılır.



Şekil B.2. Kalibrasyon işlemi ekran görüntüsü

Kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon düzlemi test düzeneğindeki şeffaf silindir içinden alınarak deneme olarak bir lazer ışın düzlemi atılarak silindirin yan duvarlarının lazer ışın düzlemi ile aydınlatıldığı kamera görüntüleri ile teyit edilir ve testin gerçekleştirme aşamasına geçilir.

Testin gerçekleştirilmesi sırasında ortalama alınacak görüntü sayısı belirlenir. Test sırasındaki işlem görüntüsü aşağıdaki şekilde gibidir.



Şekil B.3. test sırasındaki işlem görüntüsü

### 3D PGHÖ test düzeneğinin kurulması

Temel olarak 2D PGHÖ test düzeneğinin kurulumu için anlatılan adımlar 3D PGHÖ test düzeneği içinde tekrarlanır. Ancak aradaki fark 3D PGHÖ metodunda 2 adet kamera kullanılmaktadır. Bu nedenle 2 kamera karşılıklı olarak kalibrasyon plakasını görece şekilde konumlandırılır. Yazılımda Timing Setup kısmında her iki kamera ve ışın kaynağı için çift atımı gösteren T1A ve T1B seçilmelidir. Yüksek hızlı kameralar aynı anda çalıştırılarak, kalibrasyon plakası kullanılarak kameraların netlik ve açı gibi değerlerinin kalibrasyon işlemi birlikte gerçekleştirilir. Kalibrasyon plakasının üzerindeki üçgen şekil her iki kameradan alınan görüntüde sağ tarafa bakacak şekilde kameraların görüntüsü yazılım üzerinden 90 derece çevrilerek ayarlanmalıdır.

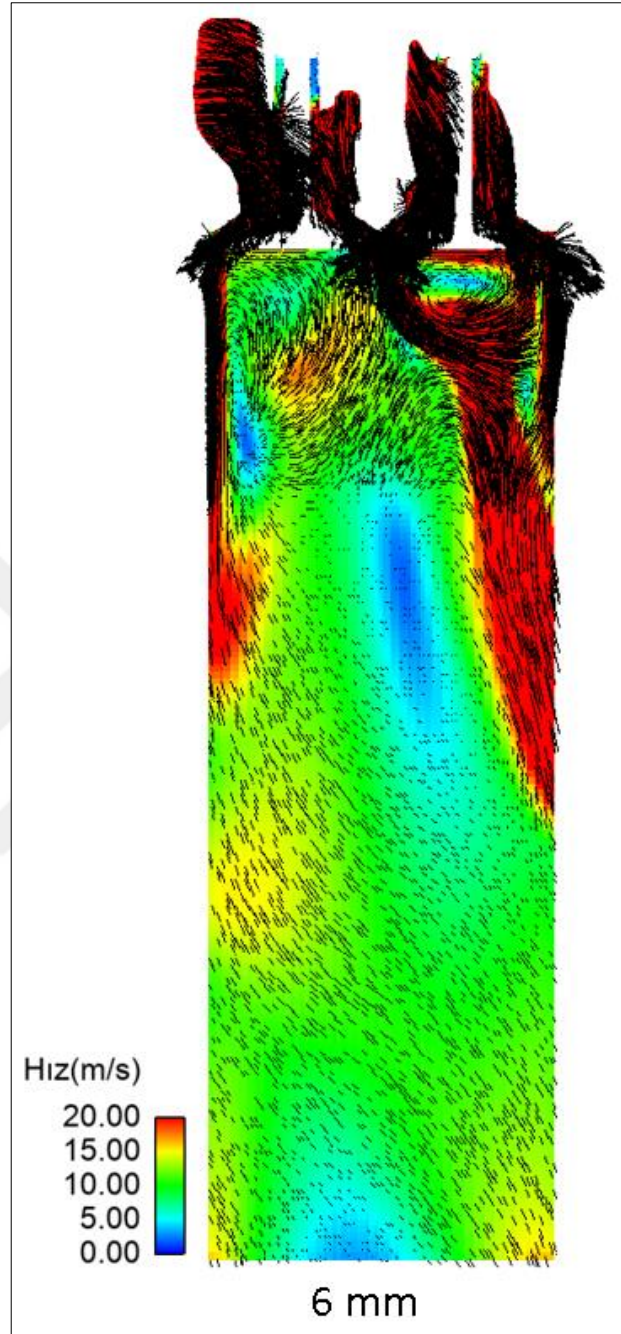
Her iki kamera içinde objektifleri üzerindeki diyafram kullanılarak derinlik alanı ve netlik ayarı kullanılarak kalibrasyon plakası üzerindeki noktaların bilgisayar ekranında görünen görüntüsünün netliği olabilecek en şekilde ayarlanır. Ekrandaki görüntüdeki her iki kamera içinde kontrastlık artırılarak ve maksimum derecede büyütülerek piksel görüntülerinden netlik olabilecek en iyi seviyeye getirilir. Bu test düzeneğinde 3D PGHÖ için kullanılacak kameralarda en net görüntü yapılan netlik (odaklama) denemeleri sonucu 1.kamerada diyafram 5.6, netlik (odaklama) 0,65 olarak, 2. kamerada diyafram 5.6, netlik (odaklama) 0,85 olarak, ayarlanması ile elde edilmiştir.

Mekanik kalibrasyonun tamamlanmasından sonra yazılım arayüzündeki “calibration” menüsünden kalibrasyon işlemi başlatılır. Ardarda gelen seçim ekranlarında, kalibrasyon türü “2 cameras (mapped, stereo)” olarak, koordinat sistemi “right handed”, kalibrasyon plakası “106-10 3D” olarak ayarlandı. Ardından gelen adımlarda her iki kameradan da görüntüler alındı, kalibrasyon plakası üzerindeki noktalar seçildi ve kalibrasyon plakasının sınırları çizilerek belirlendi. Bu seçimlerden sonra kalibrasyon işlemi başlatılarak kalibrasyon düzlemi üzerindeki her bir noktanın yazılım tarafından tanımlanarak işaretlenmesi gerçekleştirildi.

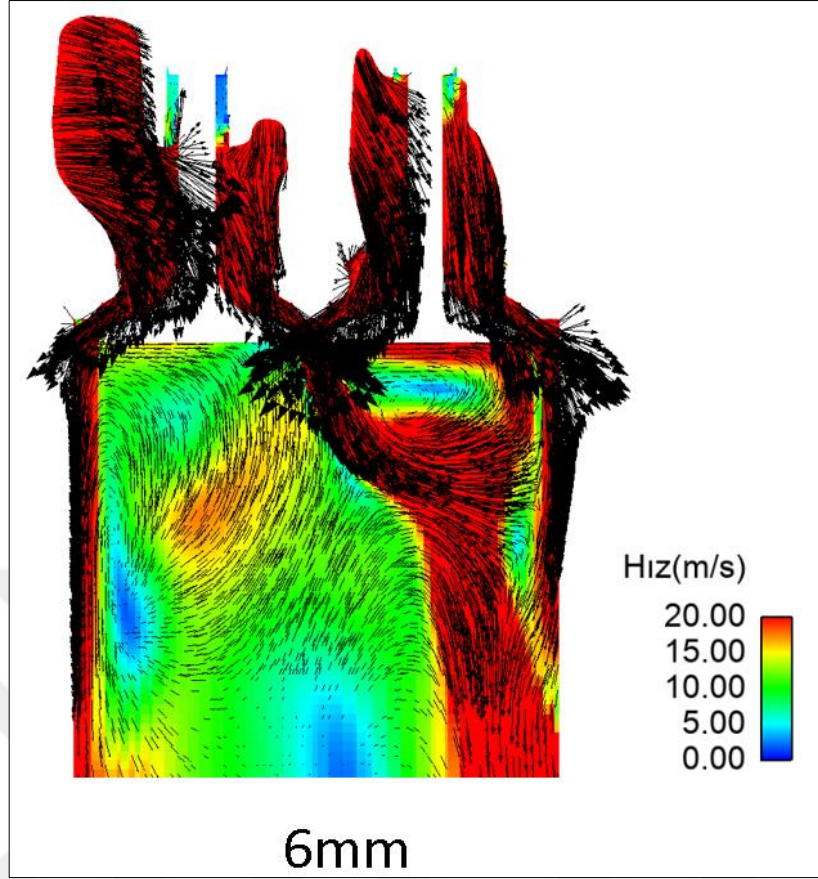
Ancak 2 kamera kullanılan 3 boyutlu PGHÖ kalibrasyon sisteminde her iki kamera için de ayrı ayrı kalibrasyon düzlemindeki noktaları belirleyip düzeltme işlemi yapılmış, ardından 2 görüntü üst üste referans noktalar kullanılarak bindirilmiş ve tek düzlem görünmesi sağlanmıştır.

Kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon düzlemi test düzeneğindeki şeffaf silindir içinden alınarak deneme olarak bir lazer ışın düzlemi atılarak silindirin yan duvarlarının lazer ışın düzlemi ile aydınlatıldığı kamera görüntüleri ile teyit edilir ve testin gerçekleştirme aşamasına geçilir.

Ek -C

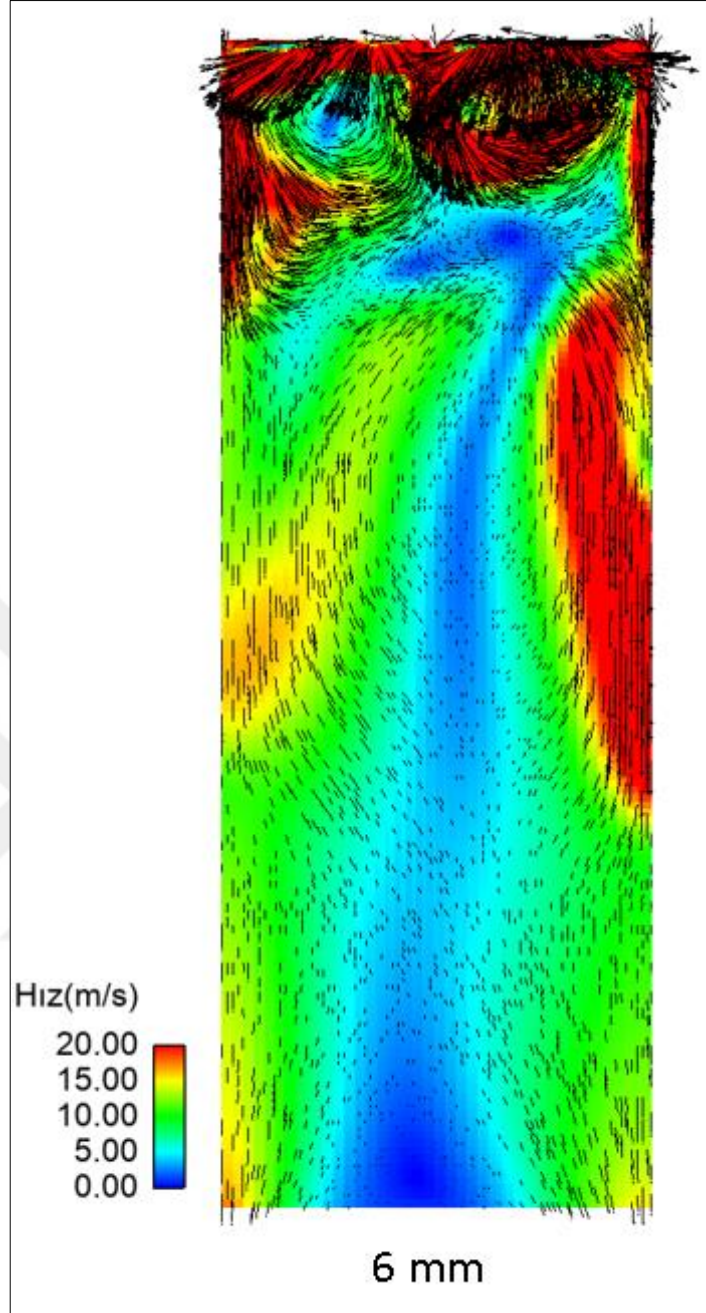


Şekil C.1. Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri



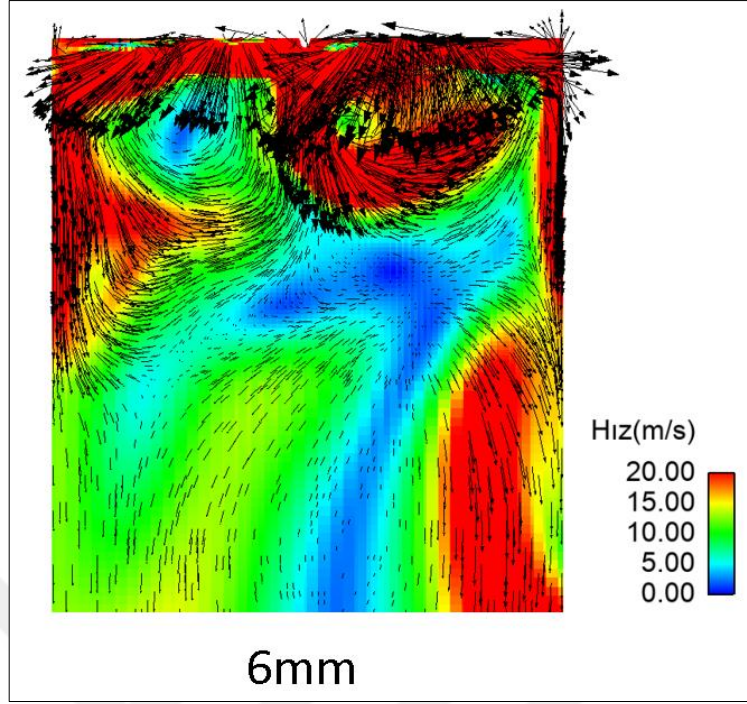
Şekil C.2. Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri





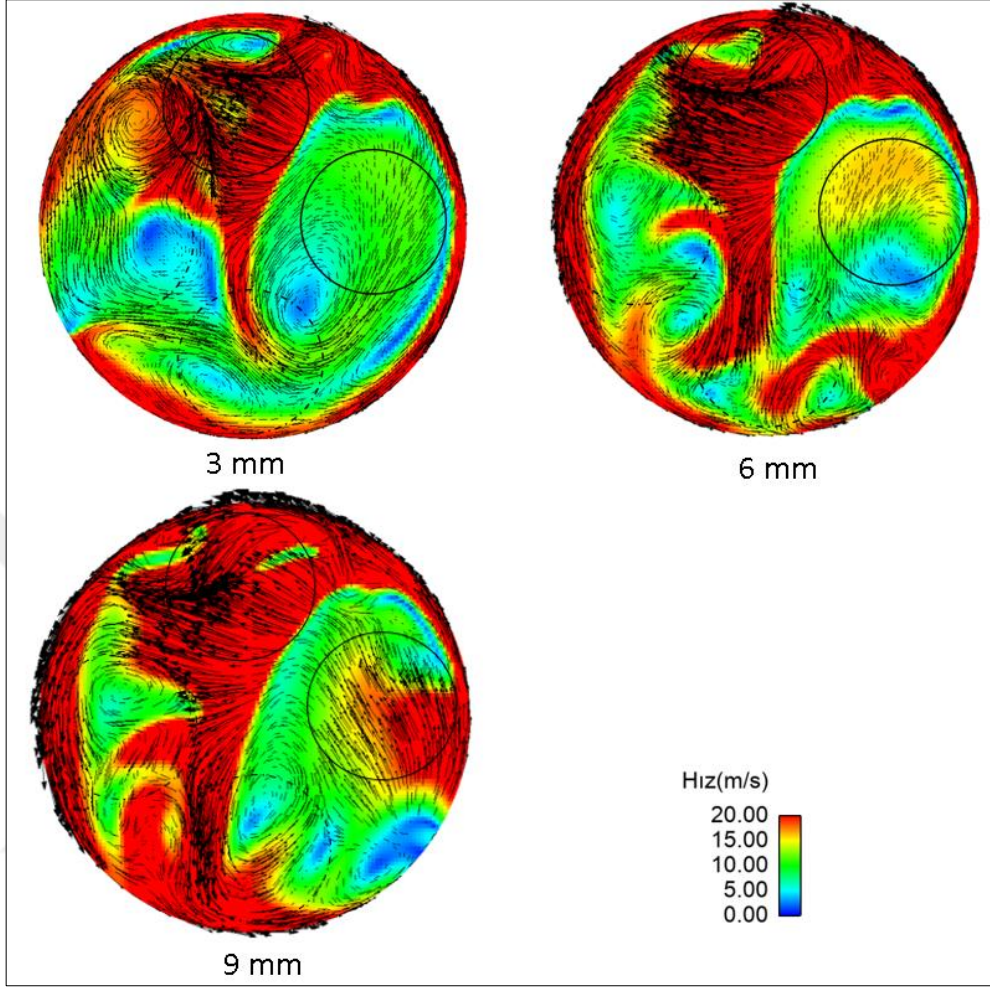
Şekil C.3. Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri



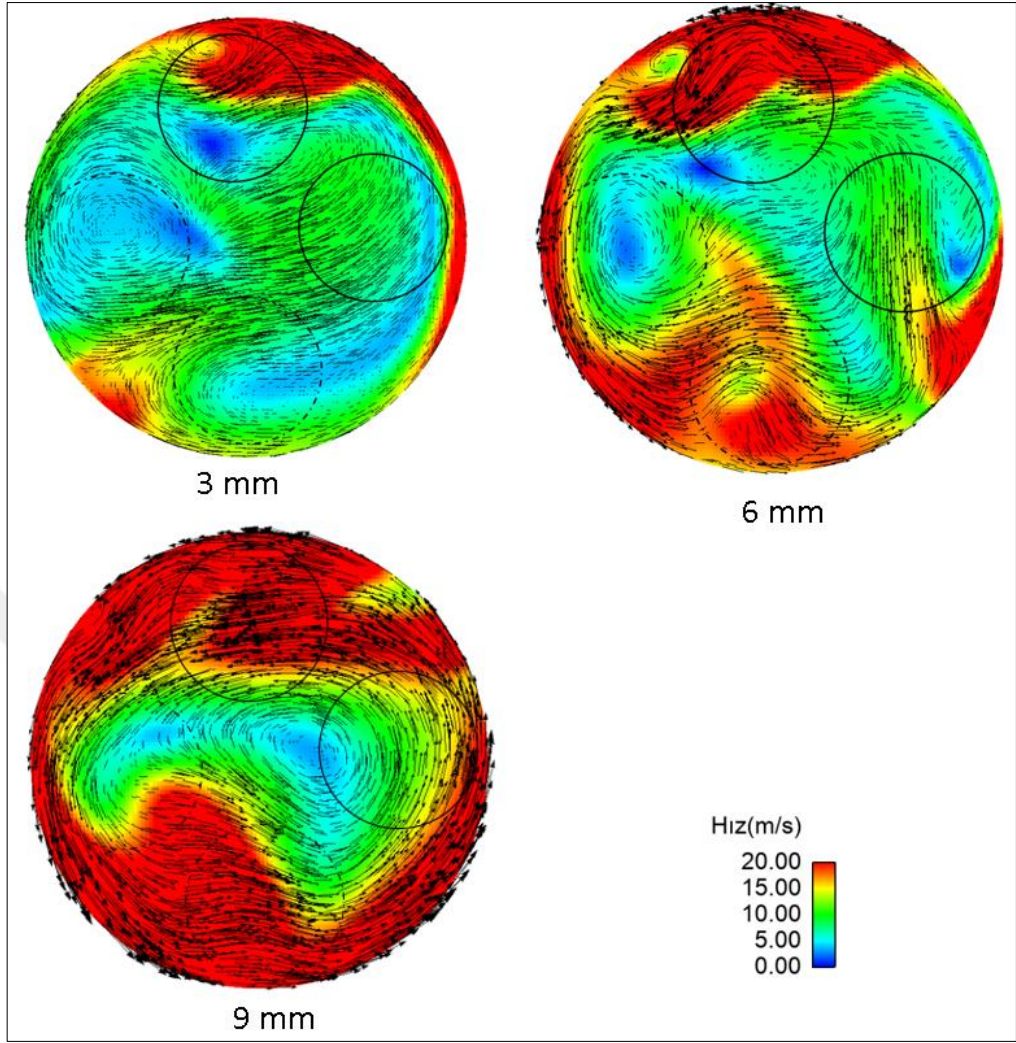


Şekil C.4. Motor-A 6mm supap açıklığı için HAD analizi  
B-B kesit hız vektörleri

Ek -D

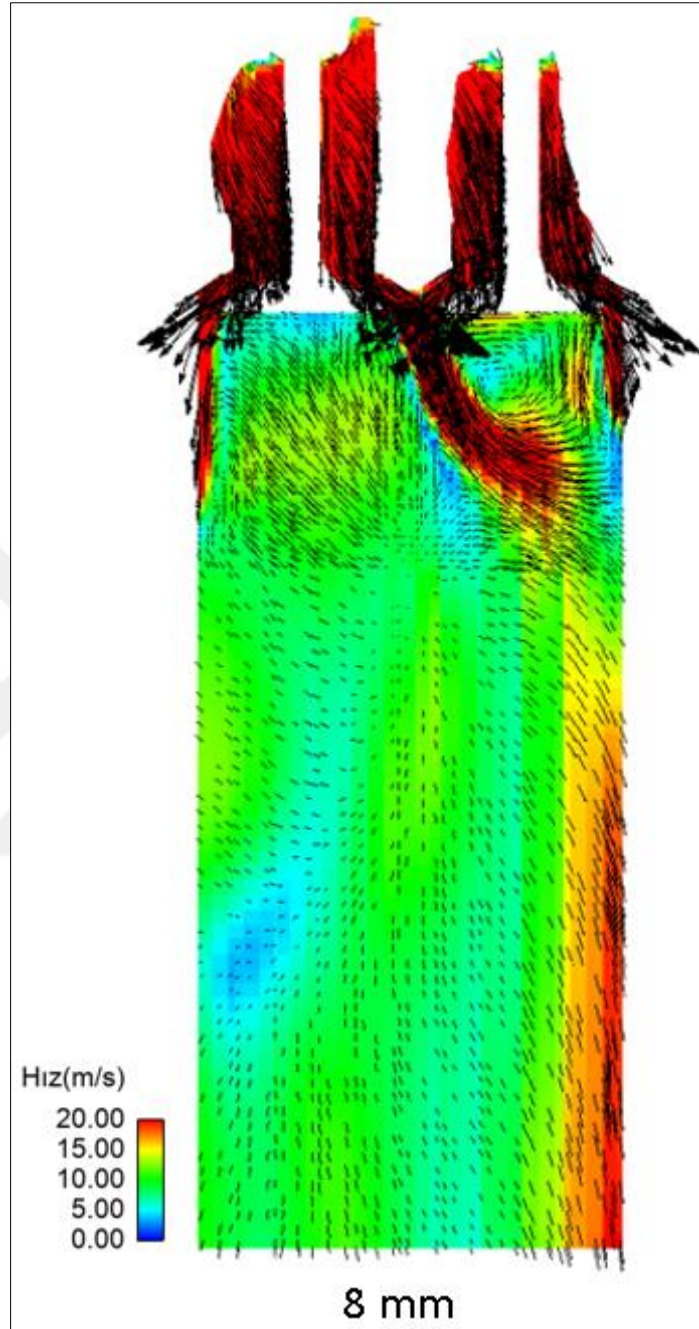


Şekil D.1. Motor-A silindir kafasından 30mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için)



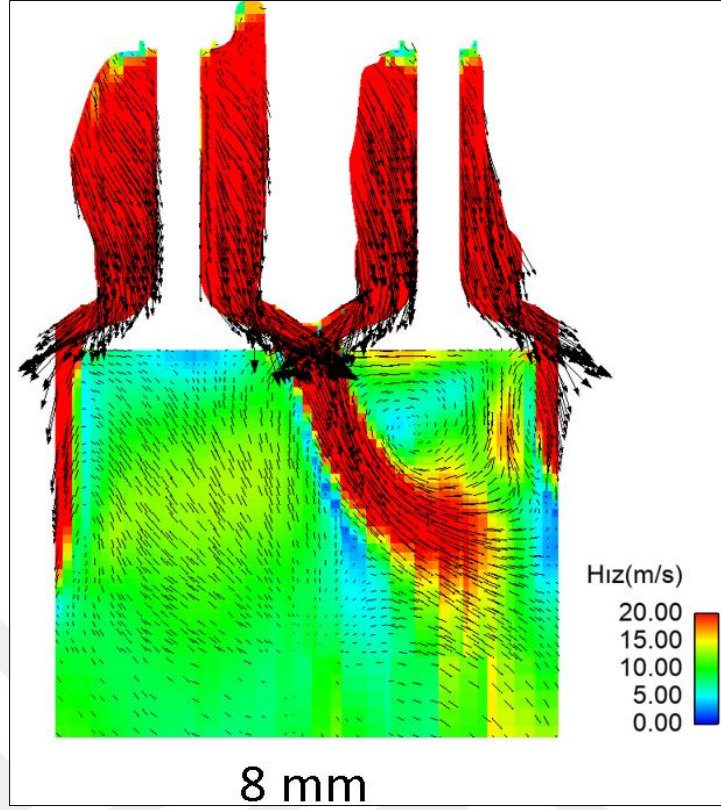
Şekil D.2. Motor-A silindir kafasından 67 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (3mm, 6mm ve 9mm supap açıklıkları için)

Ek-E

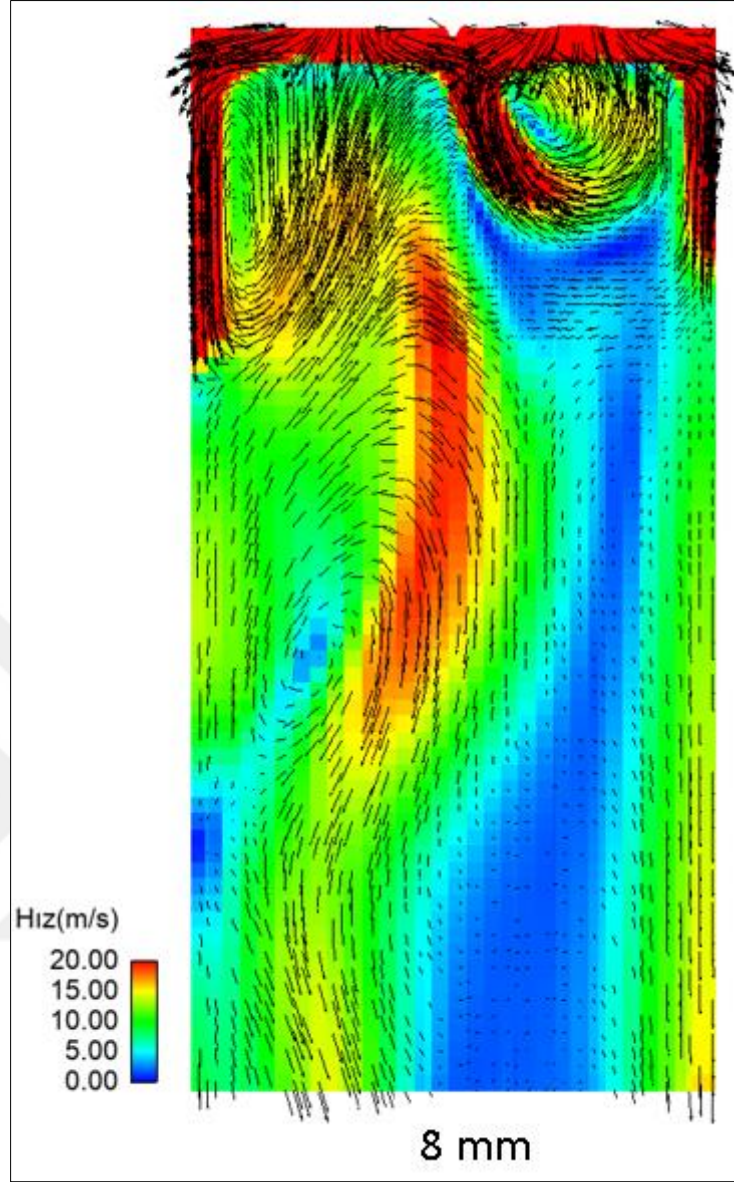


Şekil E.1. Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri

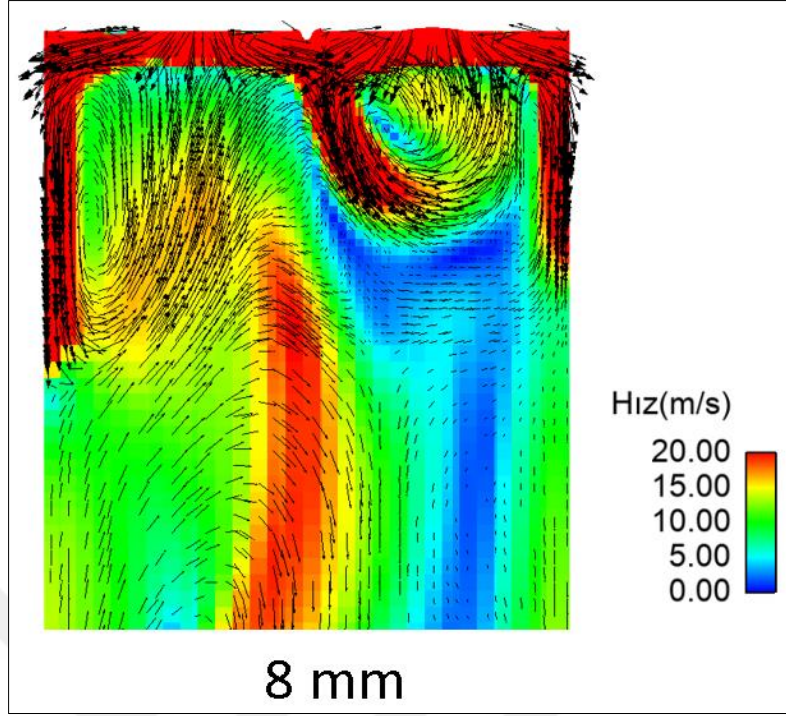




Şekil E.2. Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi A-A kesit hız vektörleri

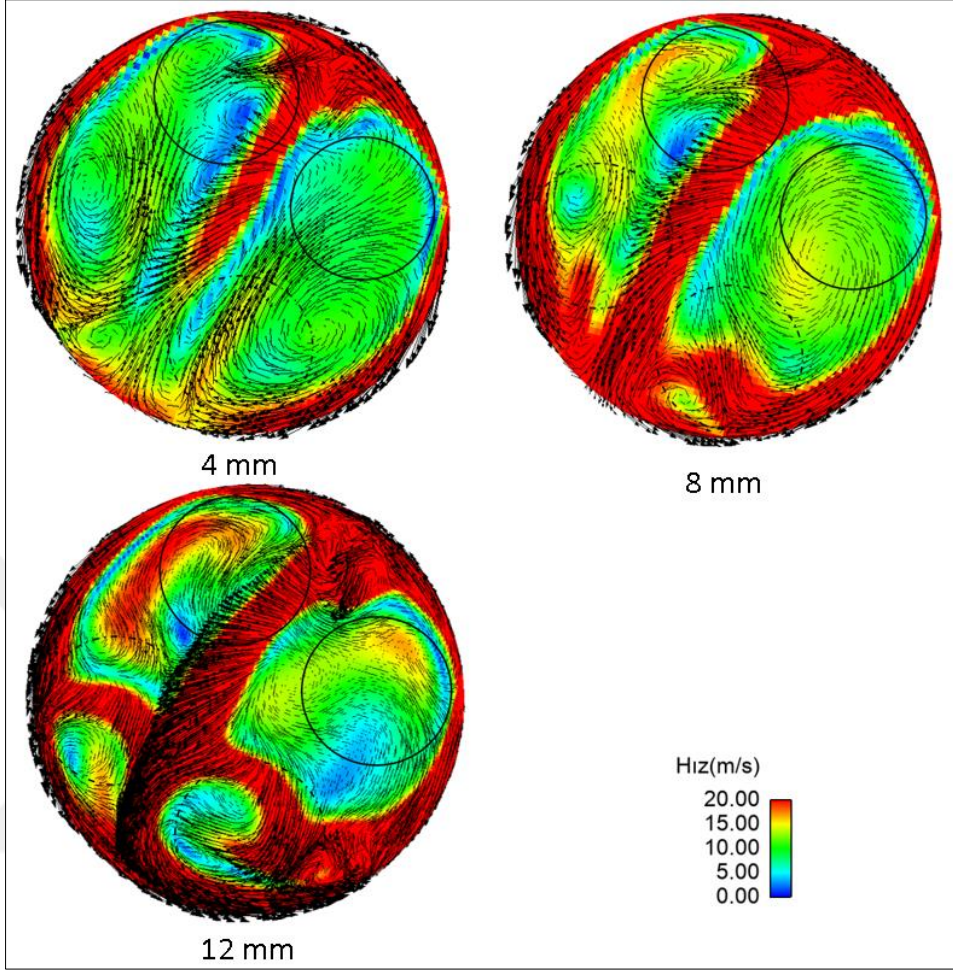


Şekil E.3. Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri



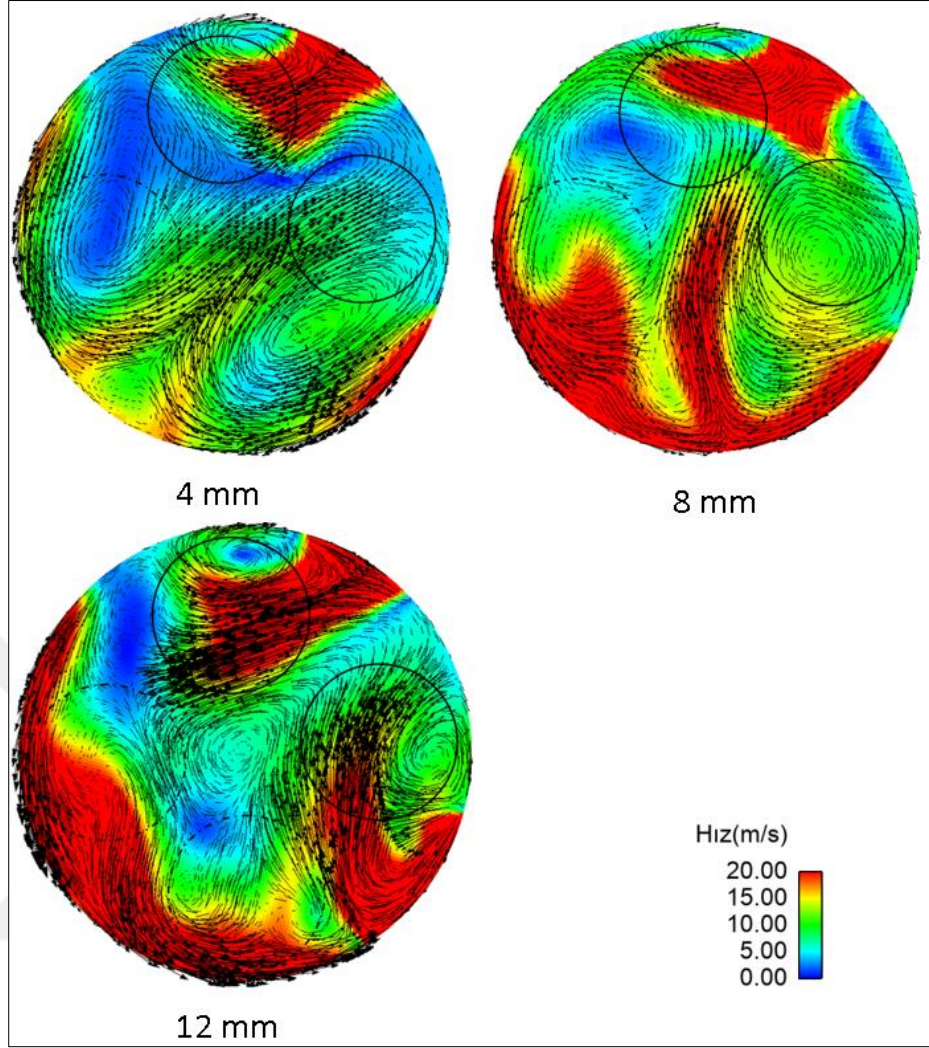
Şekil E.4. Motor-B 8mm supap açıklığı için HAD analizi B-B kesit hız vektörleri

Ek-F



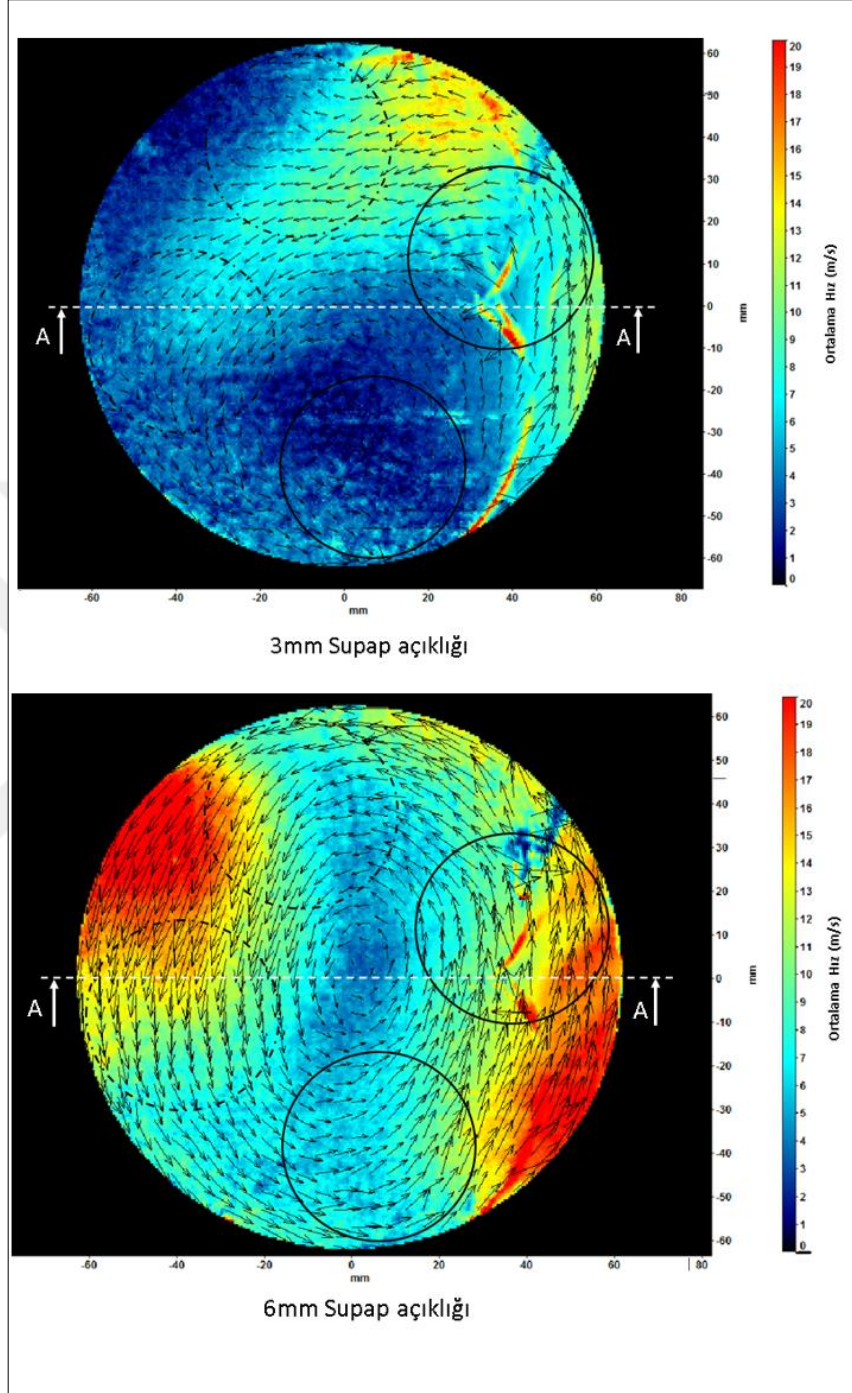
Şekil F.1. Motor-B silindir kafasından 30mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için)



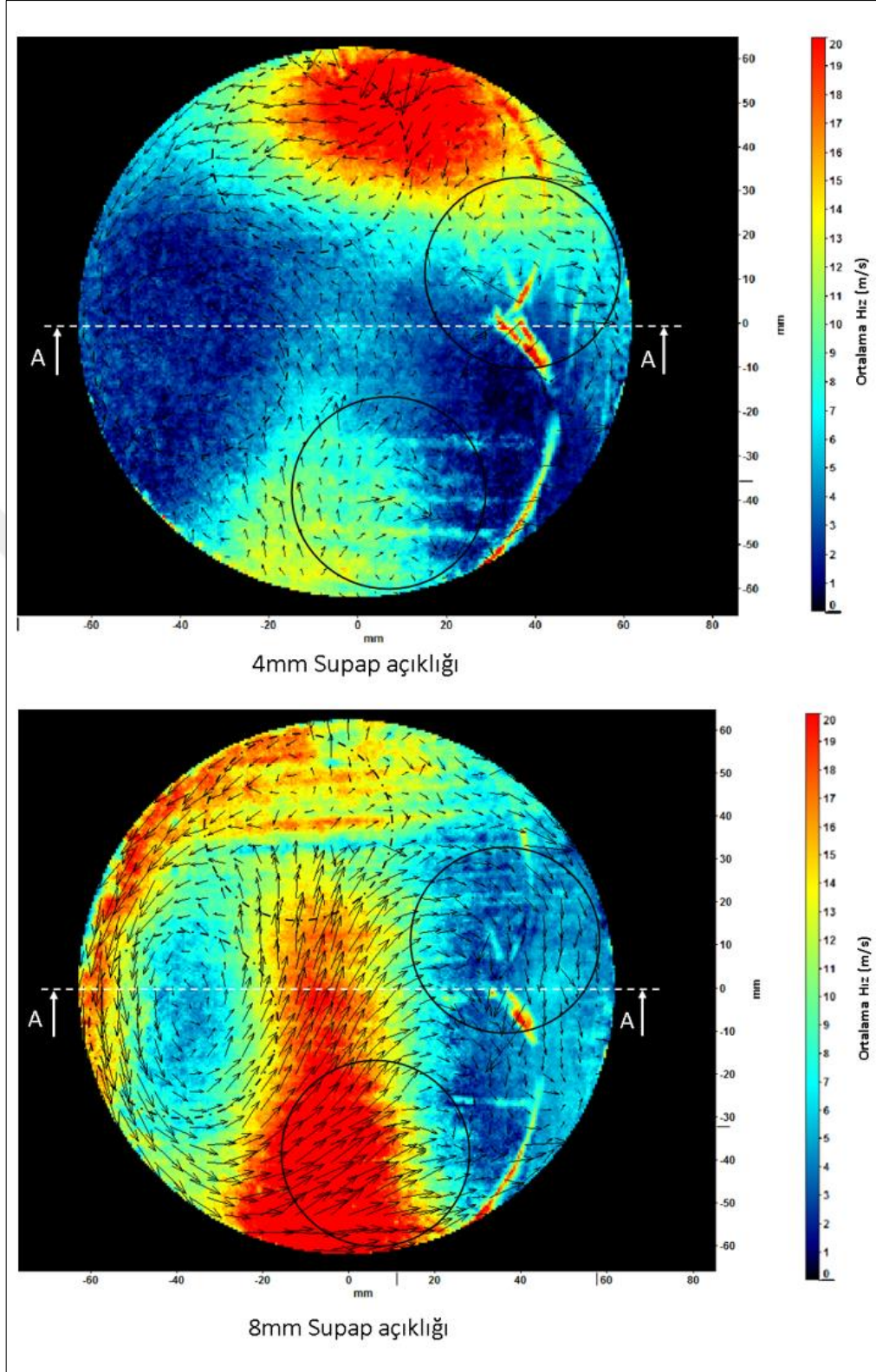


Şekil F.2. Motor-B silindir kafasından 75 mm uzaktaki silindir eksenine dik kesit hız vektörleri (4mm, 8mm ve 12mm supap açıklıkları için)

## Ek-G



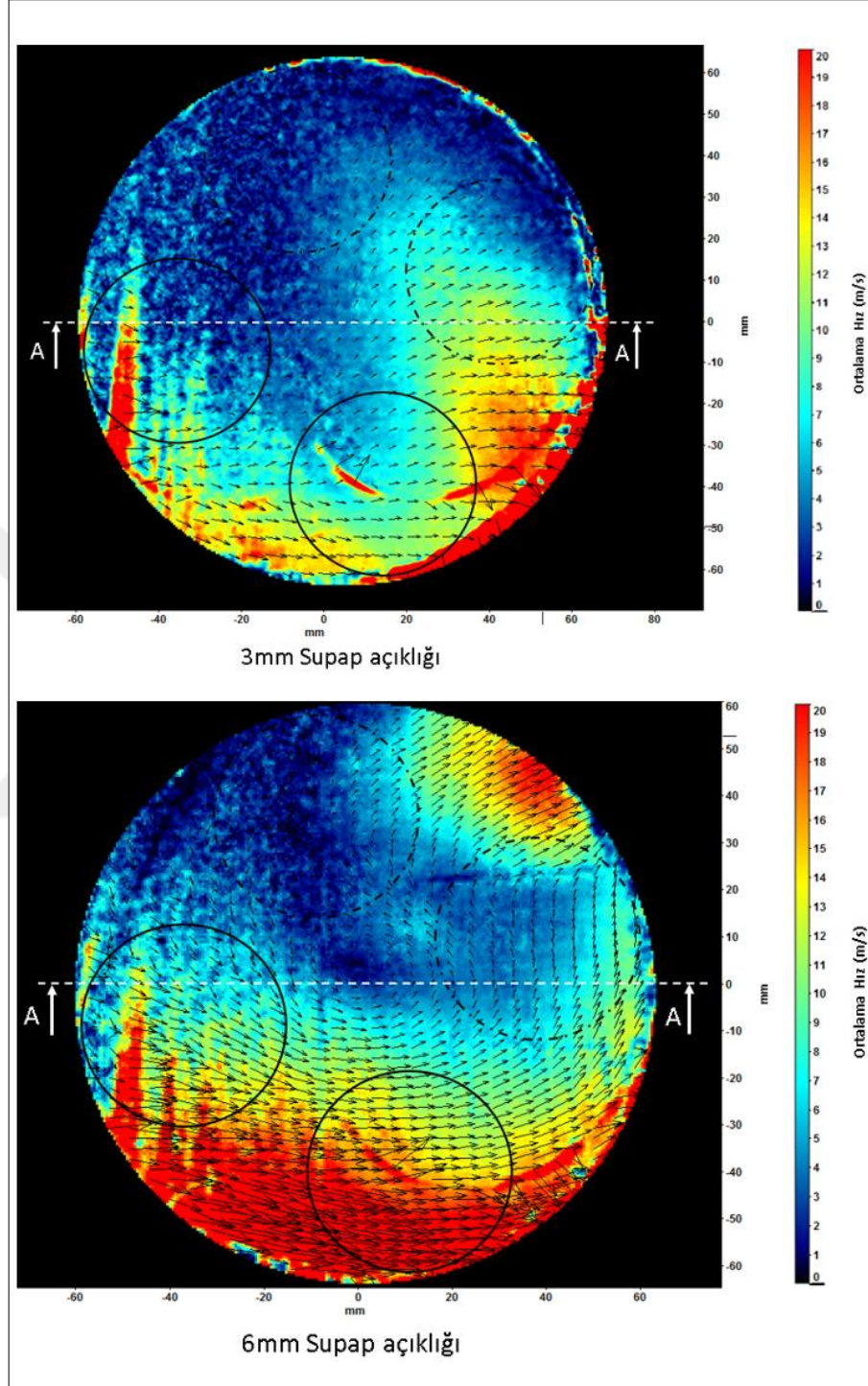
Şekil G.1. Motor-A 3 mm ve 6 mm supap açıklıkları için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları



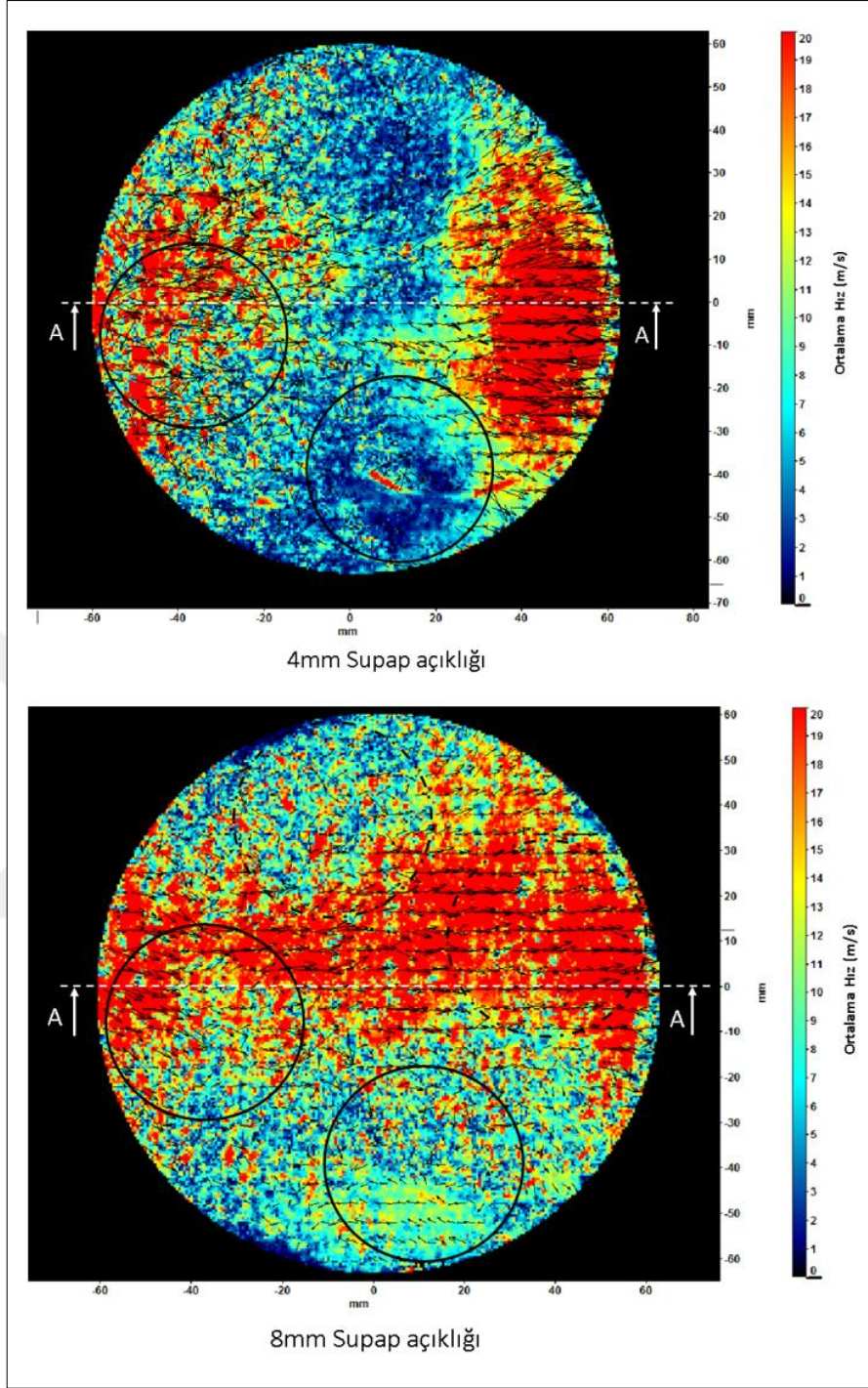
Şekil G.2. Motor-B 4 mm ve 8 mm supap açıklıkları için Stereo PGHÖ ölçüm sonuçları



## Ek-H



Şekil H.1. Motor-A 3mm ve 6mm supap açıklıkları için 2D PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları



Şekil H.2. Motor-B 4 mm ve 8 mm supap açıklıkları için 2D PGHÖ girdap oranı ölçüm sonuçları

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yelken, B.**, Çogun, C., Remodelling, Design and Testing of a Steering System for Improvement of the Characteristics, *International Journal of Vehicle Design*, 2010, **52**(1-4), 237-251.



## ÖZGEÇMİŞ

Orta öğrenimini TED Ankara Koleji ve Ankara Lisesi'nde tamamladı. 1994 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı.

Meslek hayatında otomotiv sektöründe Otokar, Temsa, Autoliv gibi firmalarda ürün geliştirme ve araştırma geliştirme bölümlerinde görev yaptı. 2010 senesinden beri görev yapmakta olduğu Ford Otosan A.Ş. firması Ar-Ge merkezinde ekip liderliği görevini yürütmektedir.

