

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO KANALLARDA AKIŞ HIZI ÖLÇÜMÜNDE CCD
KAMERANIN ÖZELLİKLERİNİ KULLANARAK MİKRO-PIV
SİSTEMİNİN PERFORMANSININ ARTTIRILMASI**

BAŞAK AKSELLİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İSMAİL TEKE**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO KANALLARDA AKIŞ HIZI ÖLÇÜMÜNDE CCD
KAMERANIN ÖZELLİKLERİNİ KULLANARAK MİKRO-PIV
SİSTEMİNİN PERFORMANSININ ARTTIRILMASI

Başak AKSELLİ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.05.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Oktay ÖZCAN
Kemerburgaz Üniversitesi

Doç. Dr. Sabiha YILDIZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan Demir
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, TÜBİTAK-UME tarafından “G2AL-E1-02-2-I UME mikro-PIV sisteminin kurulması ve geliştirilmesi” i projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Günümüzde, mikro ve nano ölçekteki teknolojiye olan ilginin artması ve kullanım alanlarının tıptan, çevreye kadar yaygınlaşması nedeni ile mikro kanallarda akışı incelemek günümüzdeki çalışmalara destek olabilecek bir çalışma alanı olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, mikro ölçekte akış hızlarını ölçmek için, tanecik izlemeli hız ölçer (PIV-particle image velocimetry) sistemi kurulmuş ve çeşitli açılardan performansları incelenmiştir.

Bütün bu çalışmaları yaparken bana yön veren değerli hocalarım, Prof. Dr. İsmail Teke, Prof. Dr. Oktay Özcan, Prof. Dr. Seyhan Onbaşioğlu ve Dr. Vahit Çiftçi'ye çok teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarına her türlü desteği veren, Dr.Humbat Nasibov ve Dr. Alisher Kholmatov'a da tezimdeki emekleri için teşekkür eder, her zaman beraber çalışmayı dilerim.

Tüm çalışmalarım boyunca bana destek veren, anneme ve arkadaşlarıma da teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Haziran, 2016

Başak AKSELLİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.1.1 Tanecik Tabanlı Akış Görüntüleme Teknikleri	2
1.1.2 DPIV'in Çalışma Prensibi	4
1.1.3 Mikro-PIV	7
1.1.4 DPIV Ölçümlerinde Duvara Yakın Akış	7
1.1.5 DPIV Ölçüm Performansını Etkileyen Faktörler.....	9
1.1.6 DPIV Kullanımında Hata Kaynakları	12
1.1.7 CCD Kameralar	14
1.1.7.1 Çift-Çekimli Kameralar	15
1.1.7.2 CCD Binning	18
1.1.8 Tanecik Yerdeğişimi Hesaplamaları.....	23
1.1.8.1 Binned Tanecik Görüntülerinin Özilinti Fonksiyonu	24
1.1.8.2 Dairesel Görüntü Durumunda Piksel Altı İnterpolasyon.....	26
1.1.8.3 Eliptik Görüntü Durumunda Piksel Altı İnterpolasyon	27
1.1.9 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Çözüm	28
1.1.9.1 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Çözümlerin Geçerliliği	28
1.1.9.2 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Hesaplama.....	30
1.2 Tezin Amacı.....	32
1.3 Hipotez.....	33

BÖLÜM 2

SAYISAL ANALİZLER	34
2.1 Sayısal Analiz için Kanal Çözüm Ağı(Mesh) Oluşturulması	34
2.2 Gelişme Boyu Analizi	35
2.3 Literatürde Yer Alan Denklemler ile Gelişme Boyu Tespiti	37
2.4 Tanecik Konsantrasyonundan Hız Profiline Etkilenmesinin FLUENT ile Sayısal Analizi.....	37

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
3.1 Deney Düzenğinde Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri	41
3.2 Binning Özelliği Kullanımı	46
3.3 40 µm × 400 µm Kesitli Mikro Kanalda Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması	48
3.4 200 µm × 200 µm Kesitli Mikro Kanalda Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması	53
3.5 30 µm × 300 µm Kesitli Mikro Kanalda Çift Çekimli Kamera ile Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması	56
3.6 Mikro Kanalda Farklı Derinliklerde Hız Profillerinin Çıkarılması ve Basınç Düşüşü Hesaplamalarının Yapılması	63
3.6.1 Dikdörtgen kesitli Kanal	64
3.6.2 Kare Kesitli Kanal	76
3.7 Hata Hesaplamaları	82

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
4.1 Sonuçlar	87
4.2 Öneriler	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	95

SİMGE LİSTESİ

u_s	Yerçekimi etkisindeki parçacığın sürüklenme hızı
d_p	Tanecik çapı
ρ_p	Tanecik yoğunluğu
ρ_f	Akışkanın yoğunluğu
μ	Akışkanın dinamik viskozitesidir
ΔX_p	İki boyutlu konum vektörü
M	Optik büyütme
Δt	İki kare arasında geçen zaman
V_p	Parçacığın hız vektörü
σ	Minimum çözülebilen tanecik yer değişimi
l	Difüzyon mesafesi
D	Brownian difüzyon katsayısı,
t	Zaman
k	Boltzman sabiti
T	Sıvının sıcaklığı
d_p	Beslenen parçacığın çapı
s^2	Parçacığın Brownian hareketinden dolayı gerçekleşen yer değişiminin ortalama karesel hatası
U	Karakteristik hız
ε_B	Brownian hareketi yüzünden birinci dereceden hata
δz_m	Mikroskop objektifinin odak derinliğini
NA	Mikroskop objektifinin sayısal açıklığı
n	Ortamın kırınım indisi
λ	Işığın dalga boyu
θ	Mikroskopun görme açısı
d_s	Sonsuz düzeltmeli mikroskop optiğinin kırınım sınırlamalı nokta boyutu
f	Lensin odak numarası
d_e	Taneciğin efektif çapı
$I(x, y)$	İki boyutlu gerçek fonksiyon
$\otimes$	İlinti operatörü
x', y'	Bağımsız integral parametreleri
θ	Akış yönü ile x koordinatı arasındaki açı
σ_x, σ_y	Majör ve minör yarı-eksenler
L_e	Gelişme boyu
D_h	Hidrolik çap

ρ	Akışkanın yoğunluğu
b_i	Birim kütle başına kütleli kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
$\hat{p}$	Hidrodinamik basınç
P	Basınç
Q	Hacimsel debi
a, b	Kanalın genişlik ve yükseklik değerlerinin yarısı

KISALTMA LİSTESİ

ACF	Auto correlation function (özilinti fonksiyonu)
CCD	Yarı iletken görüntüleme devresi charge-coupled device
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor(bütünleyici metal oksit yarı iletken)
DHA	Dinamik hız aralığı
DPIV	Digital particle image velocimetry
DSR	Dynamic spatial range (dinamik görüntü aralığı)
FFT	Fast Fourier transform
FOV	Field of view (görüntüleme optiği görüş alanı)
FWHM	Full width at half maximum
LDA	Lazer doppler anemometre
LED	Light emitting diode(ışık yayan diyot)
LSV	Laser surface velocimeter
MEMS	Micro-electro-mechanical systems
NCCF	Standart karşılıklı ilinti fonksiyonu
PIV	Particle image velocimetry
PTV	Particle tracking velocimeter
SNR	Signal to noise ratio(sinyal/gürültü oranı)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	PIV'in şematik gösterimi..... 6
Şekil 1.2	PIV ölçümlerinde görüntü işleme için kullanılan karşılıklı-ilinti(cross-correlation) metodu..... 6
Şekil 1.3	Çift çekimli CCD kameranin çalışma prensibinin şematik gösterimi 17
Şekil 1.4	Binning modunun şematik gösterimi..... 20
Şekil 1.5	Normal CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b)... 21
Şekil 1.6	2×2 kare binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b) 21
Şekil 1.7	1×2 yatay binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b) 22
Şekil 1.8	2×1 dikey binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b) 23
Şekil 1.9	İnceleme pencerelerine bölünmüş t_i zamanında alınan görüntü ve inceleme pencerelerinin araştırılmasında kullanılan t_{i+c} zamanında alınmış görüntü 24
Şekil 1.10	Hız gelişimlerinin incelendiği kanal boyutlandırmaları 31
Şekil 2.1	Çalışmalarda kanallar için FLUENT programında kullanılan çözüm ağından bir görüntü. 34
Şekil 2.2	200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, hız profili gelişimi..... 35
Şekil 2.3	30 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, hız profili gelişimi..... 36
Şekil 2.4	40 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 2,4 mm/s'de, hız profili gelişimi..... 36
Şekil 2.5	200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, suya farklı konsantrasyonlarda 1 μm 'lik tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar 38
Şekil 2.6	200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, suya farklı çaplarda %1'lik konsantrasyonda tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar..... 39
Şekil 2.7	40 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 5 mm/s'de, suya farklı konsantrasyonlarda 1 μm 'lik tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar 39
Şekil 2.8	40 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 5 mm/s'de, suya farklı çaplarda %1'lik konsantrasyonda tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar..... 40

Şekil 3.1	Mikro-PIV sisteminin şematik gösterimi	41
Şekil 3.2	Deney düzeneğinin bir fotoğrafı	42
Şekil 3.3	Kameranin TTL sinyalleri	45
Şekil 3.4	200 μm ×200 μm 'lik kanalda, akışkana beslenen hava kabarcığı fotoğrafları sırasıyla: Normal modda, 2×1 binning modunda ve 3×1 binning modunda	47
Şekil 3.5	40 μm × 400 μm 'lik kanalın ortasında alınan akış görüntüleri: (a) Normal modda, (b) 2×1 binning modunda.....	49
Şekil 3.6	Mikro μPIV ölçümlerinde alınan görüntüler, (a) duvarın yakınında, (b) kanalın ortasında	50
Şekil 3.7	Normal modda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=3,65$ mm/s) elde edilen hız profili, FLUENT çözümü ve analitik çözüm karşılaştırması.....	51
Şekil 3.8	2×1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=6,1$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması	51
Şekil 3.9	3×1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=7,6$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması	52
Şekil 3.10	Normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 1,5 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profilleri	53
Şekil 3.11	Normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 2 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profilleri	54
Şekil 3.12	2×1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=2,85$ mm/s) elde edilen hız verileri ile 3×1 binning ve analitik çözüm verilerinin karşılaştırması	55
Şekil 3.13	3×1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=4,18$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması	55
Şekil 3.14	Çift çekimli kamera ile kurlmuş mikro-PIV düzeneği	57
Şekil 3.15	Normal modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c)	58
Şekil 3.16	2×1 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c).....	59
Şekil 3.17	1×2 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c).....	60
Şekil 3.18	2×2 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c).....	61
Şekil 3.19	Çift çekimli kamera ile 4 farklı binning modunda elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	62
Şekil 3.20	Kanallardaki basınç düşüşü ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği	64
Şekil 3.21	Kanaldaki kuvvet dengesi.....	64
Şekil 3.22	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda orta noktada elde edilen hız profilleri(a ve b) ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	65
Şekil 3.23	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 8 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	66
Şekil 3.24	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 14,4 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	66
Şekil 3.25	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarında farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi	67
Şekil 3.26	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kesitinde($Y=0$ μm) orta noktada elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	68

Şekil 3.27	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 40 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	68
Şekil 3.28	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 86 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	69
Şekil 3.29	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 124 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	69
Şekil 3.30	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 162 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	70
Şekil 3.31	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 186 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	70
Şekil 3.32	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 198 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	71
Şekil 3.33	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarında farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi	71
Şekil 3.34	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği.....	72
Şekil 3.35	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarı için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği.....	73
Şekil 3.36	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için Fluent’de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği	74
Şekil 3.37	40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarı için Fluent’de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği.....	74
Şekil 3.38	Fluent’de hesaplanan 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın alan ağırlıklı ortalama duvardaki kayma gerilmesi değeri	75
Şekil 3.39	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda orta nokta uzaklıkta elde edilen hız profilleri (a ve b)ve analitik olarak hesaplanan hız profili.....	76
Şekil 3.40	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 30 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	77
Şekil 3.41	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 52 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	77
Şekil 3.42	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 68 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	78
Şekil 3.43	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda orta noktadan 94 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili	78
Şekil 3.44	200 μm ×200 μm kesitindeki kanalda farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi	79
Şekil 3.45	200 μm ×200 μm kesitindeki kanal için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği.....	79
Şekil 3.46	200 μm ×200 μm kesitindeki kanal için Fluent’de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği	80
Şekil 3.47	Fluent’de hesaplanan 200 μm ×200 μm kesitindeki kanalın alan ağırlıklı ortalama duvardaki kayma gerilmesi değeri	81

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kanallar için FLUENT’de kullanılan çözüm ağı değerleri	35
Çizelge 3.1 Objektif değerleri.....	43
Çizelge 3.2 Nd:yag darbeli lazerin farklı güç oranlarındaki ışık enerji değerleri.....	43
Çizelge 3.3 ½” silikon Prosilica CCD kamera için; normal, 2×1 ve 3×1 modlarındaki piksel sayısı ve boyutları	44
Çizelge 3.4 Çift-çekimli Pixel Fly Qe siyah-beyaz CCD kamera için; normal ve 2×1 modlarındaki piksel sayısı ve boyutları	44
Çizelge 3.5 40 µm×400 µm kesitindeki kanalın dar kenarı için farklı derinliklerde deneysel hız gradyanları ve duvardaki kayma gerilmeleri.....	67
Çizelge 3.6 40 µm×400 µm kesitindeki kanaldın geniş kenarı farklı derinliklerde deneysel hız gradyanları ve duvardaki kayma gerilmeleri.....	72
Çizelge 3.7 40 µm×400 µm kesitindeki kanalın dar kenarı için çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Z aralıkları ile τ_w değerleri	72
Çizelge 3.8 40 µm×400 µm kesitindeki kanalın geniş kenarı için çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Y aralıkları ile hesaplanan τ_w değerleri	73
Çizelge 3.9 40 µm×400 µm kesitindeki kanal için 0,063 mL/h debide basınç düşüşü.....	75
Çizelge 3.10 200 µm×200 µm kesitindeki kanalda farklı derinliklerde hız gradyanları ve duvardaki kayma gerilmeleri.....	79
Çizelge 3.11 200 µm×200 µm kesitindeki kanalda çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Z aralıkları ile hesaplanan τ_w değerleri	80
Çizelge 3.12 200 µm×200 µm kesitindeki kanal için 0,062 mL/h debide basınç düşüşü.....	81
Çizelge 3.13 Yapılan çalışmalarda Stokes sürüklenmesi hesabı için kullanılan veriler ve belirsizlik değerleri	82
Çizelge 3.14 Yapılan çalışmalarda Brownian hareketi hesabı için kullanılan veriler ve belirsizlik değerleri	83
Çizelge 3.15 Yapılan çalışmalarda odak derinliği hesabı için kullanılan veriler ve odak derinlikleri	84
Çizelge 3.16 Yapılan çalışmalarda tanecik yer-değişimi bulmadan gelen hatalar için kullanılan veriler ve belirsizlikler	85

MİKRO KANALLARDA AKIŞ HIZI ÖLÇÜMÜNDE CCD KAMERANIN ÖZELLİKLERİNİ KULLANARAK MİKRO-PIV SİSTEMİNİN PERFORMANSININ ARTTIRILMASI

Başak AKSELLİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail TEKE

Mikro ve nano ölçüdeki sistemlerin gelişmesi ve özellikle mikroakış cihazlarının uygulama alanlarının artması ile mikro ölçekteki akışkanlar dinamiğinin incelenmesine olan ilgi de artmıştır. Bu inceleme çalışmalarında kullanılan tanecik görüntülemeli hızölçerler (PIV-particle image velocimetry), akış görüntüleme ve analizi için kullanılan güçlü bir ayardır. Ancak endüstriyel PIV sistemleri, hantal ve çok pahalıdır. Bu yüzden de araştırma merkezleri için kolayca ulaşılabilir değildir.

Bu çalışmada, mikro kanallarda metrolojik akış araştırmaları için, ekonomik şekilde mikro-PIV kurulması amaçlanmıştır. Sistemin maliyetini en çok arttıran bileşenlerden biri, yüksek hızlı kameradır. Bu nedenle çalışmada, hızlı kamera yerine çift çekimli CCD kamera kullanılmıştır. Böylece, kameranın binning özelliği ile PIV sisteminin dinamik hız aralığını arttırabilecek ve çift-çekim özelliği ile de mekânsal çözünürlüğü koruyacak bir metot düşünülmüştür.

Yukarıda bahsedilen binning işlemi, dikey, yatay veya her iki yönde de piksel yüklerini birleştirerek daha büyük tek bir yük haline getirme işlemidir. Binning özelliği, seçilen alan boyunca mekânsal çözünürlüğü azaltmasına rağmen, kamera hızını arttırmaktadır. Deneylerle, çözünürlük kaybına rağmen ihmal edilebilir hatalar ile, PIV sisteminin dinamik hız aralığını 2 katına çıkarmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmadaki deney koşullarında, 2×1 ve 2×2 binning modlarında, sistemin normal modda maksimum ölçülebilen hız değeri 1,5 katına, 3×1 modunda ise 2 katına çıkmıştır. Sistemin doğruluğu, çeşitli mikrokannallardaki akış görüntüleri kullanarak

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aynı zamanda geleneksel analitik çözümler ile de karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca binning özelliği mekânsal çözünürlüğü azalttığı için, izleme taneciklerinin boyutunun sistematik hata dağılımına etkisi incelenmiştir. Eğer tanecik boyutu süper pikselin iki katı ise, çözünürlük kaybından gelen hatanın ihmal edilebilir düzeyde olduğu bulunmuştur. Bu bulgu, deney düzeneğini kurarken, yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmada binning moduyla beraber çift çekim modunun kullanılması, mekânsal çözünürlüğün iyileştirilmesini sağlamıştır. Öncelikle geçerli hız vektörlerinin toplam hesaplanan hız vektörlerine oranının arttığı görülmüştür. Şöyle ki; CCD kameradan normal modda elde edilen görüntü çiftlerinin karşılıklı iltintı hesaplamalarının istatistiksel analizi, geçerli hız vektörlerinin toplam hesaplanan hız vektörlerine oranının %80 civarlarında olduğunu göstermiştir. Bu değer aynı aydınlatma seviyesinde, 1×2 ve 2×1 binning modundaki görüntüler için artmıştır. Bu iki binning modu için, geçerli hız vektörlerinin toplam hesaplanan hız vektörlerine oranı sırasıyla, %90 ve %92'ye yükselmiştir. Son olarak 2×2 binning modu için bu oranlar % 95-96 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, çift çekimli CCD kameralarda binning modu kullanımının, en düşük aydınlatma şartlarında bile PIV görüntü kalitesini iyileştirebileceğini göstermektedir. Ayrıca, çift çekim özelliği kullanıldığında, 2×2 binning modu ile çıkılabilen yüksek hızlara normal modda da ulaşılabildiği görülmüştür.

Yine bu çalışmada, Mikro-PIV sistemi ile çıkarılan hız profillerinden basınç düşüşü hesaplamaları yapılmıştır. Bu çalışma için kanalda farklı derinliklerde hız profilleri çıkarılmıştır. Bu değerler, Fluent yazılımı ve analitik denklemden hesaplanan ve basınç farkı ölçerden alınan verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar mikro-PIV sisteminin basınç düşüşü hesaplamalarında düşük hatalar ile kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak bu hesaplamalar, uzun uğraş gerektiren ölçümler ve analizler gerektirmektedir.

Son olarak, suya katılan tanecik oranlarının, değişik tanecik çapı ve kanal kesitlerinde, akış hızı profilini ne ölçüde etkilediği, sayısal analiz programı (Fluent) ile simülasyon yapılarak incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan su-partikül karışımları için tanecik konsantrasyonlarından ve çaplarından gelen hataların ihmal edilebilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Tanecik görüntülemeli hız ölçer, mikro kanal, sıvı akışı ölçümü, binning, yükten bağlaşık aygıt, basınç düşüşü, çift çekimli kamera

ABSTRACT

IMPROVING A MICRO-PIV SYSTEM'S PERFORMANCE BY USING A CCD CAMERA FEATURES AT THE FLOW VELOCITY MEASUREMENT IN MICRO-CHANNELS

Başak AKSELLİ

Department of Mechanical Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. İsmail TEKE

Interest in the negotiation of microfluid dynamics has increased with the progress in micro and nano scale systems development, and especially with the increase in the applications of microfluidic devices. Particle Image Velocimetry (PIV) is a powerful tool used for flow visualization and analysis in these negotiation studies. However, the industrial PIV systems are bulky and very expensive, thus are not easily accessible for the research community.

In this study, constructing a cost effective micro PIV system for metrological flow investigations in microchannels is aimed. One of the components which increases the system's overall cost is the high speed camera. Because of it, a double-shutter CCD (Charge Coupled Device) camera was used instead of a high speed camera in this study. Thus, a method is thought that the dynamic speed range of PIV System would be increased by using a CCD camera binning feature as well as the spatial resolution would also be kept by using double-shutter feature of the CCD camera.

The binning mentioned above is the process which merges the charges of the pixels in vertical, horizontal or both directions to make one bigger charge. The binning feature increases the camera's speed while reducing the spatial resolution of the region of interest. Throughout the experiments, it was shown that it is possible to double the dynamic speed range of the PIV system with the negligible errors despite the resolution loss. For instance, the maximum measurable speed in the normal mode of the system increased by 1,5 times at the 2×1 and 2×2 binning modes, and 2 times at the 3×1 mode

in the experimental conditions of this study. The accuracy of the system was validated by using the flow images in the various size microchannels. The obtained results were also compared with the conventional analytical solutions and it was seen that they were in a good agreement. In addition, since the binning feature reduces the spatial resolution, the effect of tracer particle size on the bias error distribution was negotiated. Thus, it was found that the error due to the resolution loss is negligible if the particle size is twice as big as the size of the super pixel (merged pixels by binning). This finding can be used as a guideline to design a particular experimental setup.

The use of double-shutter mode with the binning mode improved the spatial resolution in this study. First of all, it was seen that the ratio of current velocity vectors to the total calculated velocity vectors increased. For instance, the statistical analysis of the cross-correlation calculation of the image pairs obtained from the CCD camera in the normal mode showed that the ratio of current velocity vectors to the total calculated velocity vectors was about 80%. This value at the same lighting level increased for the images at 1×2 and 2×1 binning mode. For these two binning mode, the ratio of current velocity vectors to the total calculated velocity vectors was increased to 90% and 92%, respectively. Finally, the ratios for the 2×2 binning mode were obtained as 95-96%. These results showed that the PIV image quality can be improved by using double-shutter mode of CCD cameras, even in the lowest lighting conditions. Furthermore, it was seen that it was also possible to reach the high speeds at the normal mode as that of the 2×2 binning mode by using the double-shutter feature.

Moreover, Micro-PIV system was used to calculate the pressure drops obtained from the velocity profiles. For this study, the velocity profiles at the different depths in the channel were omitted. These obtained values were compared with the values calculated on Fluent software and from conventional analytical equations, and the received data from the pressure difference meter. The results showed that the micro-PIV system can be used for pressure drop calculations with low errors. However, these calculations require some effortful measurements and analyses.

Finally, the effect of particles ratios in the water to the flow profile according to the particle diameters and microchannel cross-section was negotiated by using a simulation on Fluent Software. It was seen that the error due to particle concentrations and diameters in the water-particle mixture is negligible in the experiments of this study.

Keywords: Particle image velocimetry (PIV), micro channel, liquid flow measurement, binning, charge-coupled devices, pressure drop, double shutter camera.

1.1 Literatür Özeti

Mikro-sistemler, elektriksel ve mekaniksel operasyonların birleşimi olarak genellikle, mikro elektromekanik sistemlerdir (Micro-electro-mechanical systems-MEMS). “Mikro” genellikle milimetrenin altındaki cihazları kapsadığı halde, tipik MEMS sistemleri boyut aralığı yaklaşık olarak 5 μm - 500 μm arasındadır. Herhangi bir karıştırma, döndürme veya benzeri bir olayla akış etkilenmediği sürece, normalde akış laminar kalmakta ve makro proseslerdekine yakın bir davranış göstermektedir. Bu durumda akış, doğal olarak yumuşak, düzenli ve akış çizgileri düzgündür.

Mikro teknoloji ve MEMS kavramı geniş bir alana sahiptir. DNA analizi, hücrelerin işlenmesi, bakteri ve virüsler gibi biyolojik uygulamalar için kullanılan BioMEMS sistemleri ve bu sistemleri, kimyasal reaksiyon ve analiz cihazlarını tek bir cihazda toplayan mikro laboratuvarlar bunlardan bazılarıdır. Basınç, toplam hız, ivmelenme gibi büyüklükleri ölçen MEMS sensörler ve mikro ısı değiştiriciler de oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Burada sözü edilen mikro akışkan sistemlerin önemli elemanları mikro pompalar, vanalar, mikro karıştırıcılar, akış algılayıcıları, akış yönlendiricileri, mikro iğneler v.b. olarak sayılabilir. Bu sistemler; özellikle akışkan numunesi alma, mikro akışkan taşınımı (sözgelimi ilaçların vücuda zerk edilmesi) kimyasal, biyolojik mikro-lab ortamlarında akışkanların dolaşımı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tür uygulama alanlarının artmasıyla, mikro ölçekteki akışkanlar dinamiğinin incelenmesine olan ilgi artmaktadır. Bu tür çalışmalarda, tanecik tabanlı akış görüntüleme teknikleri, en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir.

1.1.1 Tanecik Tabanlı Akış Görüntüleme Teknikleri

Görüntüleme sensörü üzerine kurulan sayısal kameralar, astronomiden mikroskopiye, proses kontrolden nesnelerin hareketini ölçmeye kadar, endüstri ve bilimin pek çok alanına girmiştir. Bilimsel seviyedeki sayısal kameralar, yüksek hassasiyetleri, lineeriteleri, yüksek sinyal-gürültü oranları ve mükemmel fotometrik parametreleri yüzünden çok hassas ve istikrarlı sensörler olarak tanınmış ve metrolojinin pek çok alanında da kullanılmaya başlanmıştır (Nasibov ve Baytaroglu[1]).

Optik görüntüleme sensörlerinin temel uygulamalarından biri de, akışkanlar dinamiğinin incelenmesi ve tanımlanması alanıdır. Geçen yıllarda, sıvı ve gaz akışı görüntüleme metodundaki ve sayısal kameralar teknolojisindeki paralel gelişmeler ile pek çok uygulamada akış hızlarını ölçmek ve analiz etmek mümkün olmuştur. Lazerlerin icadından önce, akış araştırmaları için kullanılan bütün teknikler, akışa müdahale eden, akış içinde fiziksel olarak bulunan problara ihtiyaç duymaktaydı. 1960'ların başında, lazerin icat edilmesi ile ilk müdahalesiz akış inceleme metotları ortaya çıkmıştır. Örneğin, Lazer Doppler Anemometre (LDA) ilk müdahalesiz akış hızı ölçüm cihazıdır. Tanecik tabanlı popüler ölçüm tekniklerinden biri olan LDA (Laser Doppler Anemometre), küçük bir hacim içinde tek noktada anlık hız ölçümü için kullanılır. Takip eden yıllarda, pek çok doğrudan veya dolaylı olarak, mikro ve makro ölçekte akış hareketi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlerin çoğu, akış hızı ile ilgili bilgiyi tek bir nokta için verebilmiştir.

Akış hareketi incelemelerindeki önemli adım, görüntüleme ve kayıt metotlarının gelişmesi ile olmuştur. Belki de akış görüntülemenin kullanıldığı en eski deneyler, 1883'de Reynolds'un boru içinde basınçla hareket eden akışta, türbülansa geçişi incelemesidir. Akış görüntülemedeki asıl amaç, akışkanın hareketinin değişmediği zamandaki, akışkandaki değişimi tespit etmektir. Bu amaçla pek çok görüntüleme metotları mevcuttur. Ancak bunlardan, sayısal ve tanecik tabanlı akış görüntüleme metotları baskındır. Sayısal tabanlı görüntüleme metotları Reynolds'dan günümüze kadar yaygın şekilde kullanılmıştır.

İzlenen taneciklerin kaydedilen iki görüntüsünden, bilinen zamanda ve görüntünün korelasyonu ile, istatistiksel olarak analizi yapılarak tanecik yer değişiminin belirlenmesi, ilk olarak Meinhart tarafından gerçekleştirilmiştir (Meinhart vd.[2]). Bu tekniği mikro ölçekteki akışa, Santiago (1998) mikro-PIV olarak uygulamıştır. 120 mikronluk kare

kanalda 300 nm çapındaki krsel taneciklerle yapılan ilk hız ölçümü alışması Santiago vd. tarafından 1998’de yapılmıştır (Santiago vd.[3]). Nd:yag lazerin ilk kullanımı ise, 1986’da Kompenhans ve Reichmuth tarafından olmuştur (Adrian [4]). Bu lazerlerin on nano saniye düzeylerinde olan bir darbelerindeki ıkışları, 100 mJ’a ulaşmaktadır.

PIV sisteminin dinamik hız aralığını arttırmak amacıyla da çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada hem yavaş hem hızlı hareket eden akış bölgelerini bulmada, video tabanlı piv kullanılmıştır. Bu tür geniş lme aralığındaki çalışmalarda, çözünürlük problemleri baş gösterdiğinden, dinamik hız aralığını arttırmak için, çoklu kare ve tek karede çoklu poz kullanımı birleştirilmiştir (Lin ve Rockwell [5]). Diğer bir çalışmada, dinamik hız aralığını ve uzamsal çözünürlüğünü belirleyen faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Ortamın znrlğ parçacık görüntüsünün çapı ile eşleştiği zaman, optik kayıt ortamının bilgi depolama kapasitesin en iyi şekilde kullanıldığı tespit edilmiş ve bu durumu sağlayan büyütme ve ilgili f değerler bulunmuştur. Kayıt ortamına bağlı olarak, 100-500 mikron mertebelerinde uzamsal çözünürlük çeşitli konfigürasyonlarda elde edilebilmiştir (Adrain [6]). Ticari bir video kamera ile gelişmekte olan satır aralarına yazan transfer tipindeki CCD kameranın, yüksek hızlardaki performansının karşılaştırıldığı çalışmada, kamera ile 0,38 s çekim zaman aralığına kadar inilmiş ve 250 m/s akış hızlarına kadar çıkılmıştır(Lai vd. [7]).

Yüksek hız mikro-PIV tekniği ile yapılan bir çalışmada, sistem yüksek hızlı kamera ve sürekli lazer kombinasyonu ile geliştirilmiştir. Bu şekilde, 500 s zaman çözünürlüğü ve $2,2 \times 2,2 \mu m^2$ uzamsal çözünürlükle, birbirine zıt yönlü akmakta olan su ve butil asetat görüntülenmiş ve vorteks benzeri hareketler, çok açık şekilde çekilmiştir (Shinohara vd. [8]). Li vd. yaptıkları çalışmada, yüksek parlaklıktaki alevlerde akış ölçümlerinde kullandıkları PIV sisteminin kamerasına mekanik kesici ilave ederek kullanmışlardır. Bu şekilde görüntü alanı küçülmesine karşılık, piv verilerinin hassasiyeti değişmemiş ve yüksek parlaklıktaki alevde de ölçümler almışlardır (Li vd. [9]).

Vorteks halkalarına su damlasının etkisinin yüksek çekim hızlı PIV kullanılarak incelenmesinde, 1 kHz hızında (ift çekimli) yüksek hızlı video kamera kullanılmıştır. CCD kameralara göre ışık hassasiyeti düşük olan bu kameraların, ışık hassasiyetlerinin her bir piksel için daha geniş alan sağlayarak arttırılabileceği belirlenmiştir. Burada, ift çekim (frame straddling) arasındaki zaman ayarlaması, lazer atılımları ile senkronize

edilerek, iki görüntü arasında izleme parçacığının hareket mesafesi çeşitlendirilebilmiştir (Liow ve Cole [10]).

Bu çalışmadaki ölçüm tekniği, tanecik tabanlı akış görüntüleme metodunu kullanan Sayısal Partikül İzlemeli Hız Ölçerdir (DPIV-Digital Particle Image Velocimetry).

1.1.2 DPIV'in Çalışma Prensibi

Tanecik tabanlı görüntüleme metodlarında, incelenen akışkana izleme tanecikleri beslenir. Görüntüleme metodunda bu taneciklerin iki özelliği önemlidir: Gravitasyonel ve optiksel. Gravitasyonel özelliğinin önemi, parçacığın akışkan ile beraber hareket ederken, akış çizgilerinden kaymadan ilerleme görevini yerine getirebilmesi gerektiğindendir. Yerçekimi etkisindeki parçacığın sürüklenme hızı, Stokes sürüklenmesinin gerçekleştiğini düşünürsek, şu şekilde ifade edilir (Prasad [11]):

$$u_s = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (1.1)$$

Burada, d_p tanecik çapı, ρ_p ve ρ_f sırasıyla tanecik ve akışkanın yoğunluğu, μ akışkanın dinamik viskozitesidir. Burada u_s 'nin mümkün olduğu kadar küçük olması, geçerli akış hızını kıyaslamada gereklidir. Eşitlik (1.1)'den de görüldüğü gibi bu hızın küçük olması için de, akışkanın ve parçacığın yoğunluklarının birbirine yakın olması gereklidir. Daha sonraki adımlarda bu sürüklenme hızını daha da azaltmak için, tanecik çapını küçültmek gerekir.

İzleme parçacığının optik özelliği ile ilgili ihtiyaç, uygulanan optik ölçüm tekniğine bağlıdır. Saçılma tabanlı teknikler için, parçacığın yüksek yansıtmalı olması gerekir. Parçacığın kaplandığı maddenin yansıtma katsayısı, akışkanınkinden daha yüksek olması gerektiğinden, oldukça yüksek olmalıdır. Bu yönden gümüş ile kaplanmış içi boş cam küre, akış görüntüleme deneylerinde ve gravitasyonel özellikleri yönünden de su ile deneylerde kullanılmaya uygundur (Melling [12]).

Diğer geniş kullanım alanına sahip izleme parçacığı, floresan polisitiren mikro küreciklerdir. Polisitiren küreler, floresan boya ile kaplıdır. Floresan kaplı mikro küre, belli bir dalga boyundaki elektromanyetik radyasyon ile aydınlatıldığında (uyarılma dalga boyunda), tanecikler verilen ışığın dalga boyundan farklı dalga boyunda fotonlar yayarlar. Yayılan fotonların dalga-boyu, gönderilen ışığın dalga-boyundan daha büyük

olduğunda, bu etki Stokes kayması olarak adlandırılır. Genellikle, PIV çalışmalarında iki tip floresan tanecik kullanılır. Birinin emme piki 470 nm ve yayma piki 510 nm civarındadır. İkincisinin emme piki yaklaşık 535 nm ve yayma piki 570 nm'dir (Stokes kayması 40 nm'den fazla). Bu taneciklerin ilgili dalga-boyundaki kırınım katsayısı yaklaşık 1,58'dir. Polisitiren taneciklerin çapı, yüz nanometrelerden on mikrometrelere kadar çeşitlidir. Bu mikro küreciklerin yoğunluğu suyun yoğunluğuna çok yakındır, bu yüzden distile su ile deneylerde kullanmak için uygundur.

Bu çalışmada kullanılan polisitiren taneciklerin yoğunluğu, 1,05 gr/cm³'tür ve su akış hız ölçümleri için iyi bir seçimdir. Bu tez çalışmasındaki şartlar için sürüklenme hızı, 0,1 µm/s ve daha düşük olarak hesaplanmıştır.

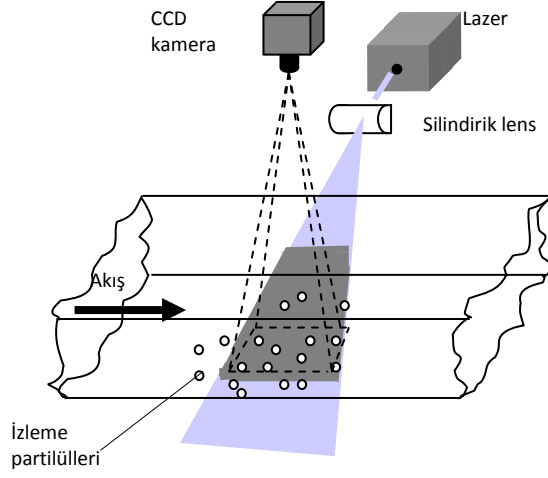
DPIV, akış vektörünün doğrultu ve sayısal ölçümünü, geniş bir akış bölgesi için eş zamanlı olarak gerçekleştirir. Bu nedenle, akışın bir bölümü, parlak bir ışık demeti ile aydınlatılır. Işık demeti görüntülenecek düzleme paralel ve görüntüleme sisteminin görüş alanından büyük olur. Işık demetinin yüksekliği, PIV sisteminin görüş derinliğini belirler. Burada, boyutun aksine, ışık demetinin kalınlığı, görüntüleme sisteminin odak derinliğinden az olmalıdır, böylece sadece odaktaki tanecikler aydınlanacaktır. Işık demetini istenen kalınlığa getirmek için, ışık kaynağı ile görüntülenecek bölge arasına silindirik lensler yerleştirilir. Genellikle aydınlatma için, izleme taneciklerinin uyarılma dalga boyundaki, yüksek güçte lazerler kullanılır (Şekil 1.1). PIV çalışmalarında görüntü almada, kare çekim zamanının kısa olması gerekir. Bu da yüksek yoğunlukta çift kaviteli darbeli lazer kullanımını gerektirmiştir.

Epifloresan görüntüleme optiklerinin tam görüş alanı (FOV), aydınlatılmış alanı incelemek için kullanılır. Lazerin dalga boyundan büyükleri ve parçacığın floresan yayma dalga boyundan küçükleri kesen, belli bir dalga boyunu geçiren cam filtreler, görüntüleme sensörünün önüne yerleştirilir. Böylece lazerin aydınlatması elimine edilip, sadece parçacığın yaydığı ışık kaydedilir.

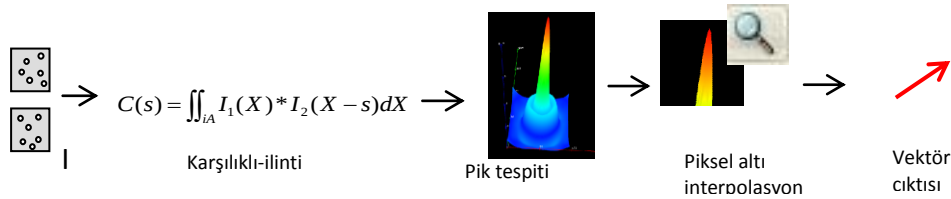
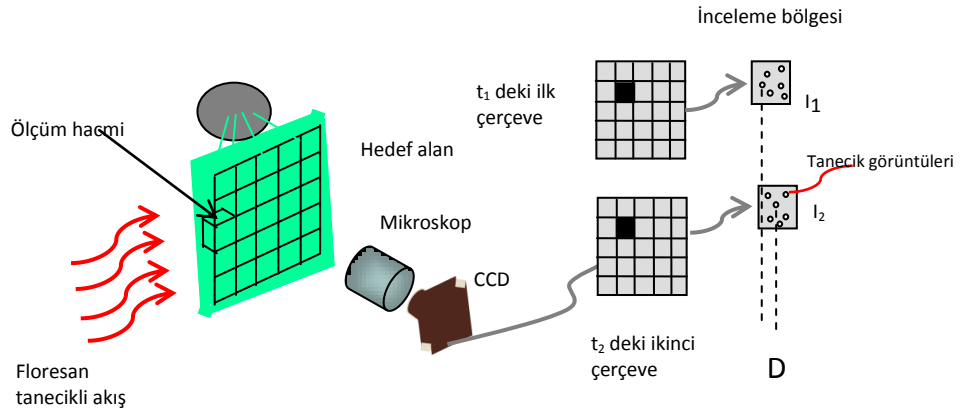
PIV'de, belli bir tanecik grubunun bilinen zaman aralığındaki minimum iki konumunun, görüntü kaydetme sistemi tarafından kaydedilmesi gerekir. Sonra, iki görüntü karesinden elde edilen tanecik yer değiştirmeleri, akış hızını bulmak için kullanılır (Adrian [13]):

$$\Delta X_p \cong V_p \times M \times \Delta t \quad (1.2)$$

Burada, ΔX_p iki boyutlu konum vektörü, M optik büyütme, Δt iki kare arasında geçen zaman, V_p parçacığın hız vektörüdür.



Şekil 1.1 PIV'in şematik gösterimi



Şekil 1.2 PIV ölçümlerinde görüntü işleme için kullanılan karşılıklı-ilinti(cross-correlation) metodu

İzleme parçacığının yer değişim vektörünü hesaplamak için, ilgili görüntü karesi inceleme pencerelerine bölünür (Şekil 1.2). Bütün tanecik yer değiştirme vektörleri, karşılıklı-ilinti (cross-correlation) tabanlı metotlar ile çözülür (Keane vd. [14], Scarano [15]).

1.1.3 Mikro-PIV

İlk PIV sistemi, milimetrik ve daha yüksek ölçeklerde akış hareketleri için tasarlanmıştır. Ancak, mikro mekanik ve mikro elektronik teknolojilerinin gelişmesi ile mikro ve nano akış sistemleri de gelişmiştir. Bu cihazlarda, kanallardan akışkan geçişi boyutu mikronlara inmiştir (Meldrum ve Holl [16]). Mikro ölçekteki cihazlardaki DPIV ölçümleri, ışık demetinin kalınlığı ile sınırlıdır. Mikron boyutundaki kanalın sadece bir bölümünü aydınlatma yaklaşımı, lazer ışığını mikron boyutlarında ayarlamak zor olduğundan, pratik olmamaktadır. Bu yüzden, mikro-kanallardaki hız ölçümlerinde hacim aydınlatması olarak adlandırılan yöntem uygulanmıştır ve ölçüm bölgesi mikroskop objektifinin odak derinliği ile tanımlanmıştır (Santiago vd. [3], Meinhart vd. [17], Devasenathipathy vd. [18], Shinohara vd. [8], Bown vd. [19]). Diğer bir deyişle, mikron çözünürlükte PIV, tüm hacmin aydınlatıldığı ve hız ölçüm derinliğinin mikroskobun odak derinliği ile belirlendiği modifiye edilmiş PIV'dir.

Tipik bir mikro-PIV Sistemi, CCD (charge-coupled device) kamera, floresan filtreli bir mikroskop, akışı aydınlatmak için gerekli optik malzemeler ile donatılmış bir ışık kaynağı (genellikle lazer) içerir.

1.1.4 DPIV Ölçümlerinde Duvara Yakın Akış

Öncelikle akışkanın ve kanalın etkileşimine bağlı olarak, yüzeyde bir kayma meydana gelebilmektedir. Bununla ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tretheway ve Meinhart, 2002'de kayma akışı çalışmaları yapmıştır. Bunun için bir normal, bir de yüzeyi su tutmayan malzeme ile kaplanmış şekilde $30 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ dikdörtgen kanal ile hız profilindeki değişimleri mikro-PIV sistemi ile gözlemlemiştir. Yüzeyi su seven (kaplanmamış cam) kanalda ölçülen hız profili, kayma olmayan koşullardaki Stokes eşitliğinden hesaplanan ile uyumlu bulunmuştur. Ancak, yüzeyi kaplanmış (su sevmeyen) kanalda yapılan ölçümlerde, hızda yaklaşık %10'luk bir fark tespit etmişlerdir (Tretheway ve Meinhart [20]). Kayma akışı çalışmalarına diğer bir örnek, 2003 yılında Koo ve Kleinstreuer tarafından yapılmıştır. $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitli kanal için, Maxwell eşitliğini kullanarak, ortalama hızın 100 mm/s olduğu durum için, maksimum kayma hızını $14 \mu\text{m/s}$ olarak bulmuşlardır. Bu da ortalama hızın % 0,0014'dür ve mikro kanallarda suyun kayma akışının ihmal edilebileceğini göstermişlerdir (Kao ve Kleinstreuer [21]). Mikro ve nano kanallar için kayma akışının moleküler dinamik

simülasyon ile de incelemişlerdir. Bu çalışmada da, su seven yüzeylerde, sınırdaki hızların oldukça küçük, ancak yüzey pürüzlülüğü arttıkça bu hız değerlerinin daha da azaldığı görülmüştür. Su sevmeyen yüzeyde ise çok büyük miktarda kayma akışı hızı tespit etmişlerdir (Cao vd. [22]).

Duvar yakınındaki akış alanını ve etkileşimleri çözmek için aşağıdaki noktalar önemlidir (Adrian [6], Kähler vd. [23], Kähler vd. [24]):

- Akışkanın hareketini takip eden uygun partiküller ile duvar boyunca olan akışı yeterli hassasiyetle örneklemek.
- Mikroakışkanlarda olduğu gibi floresan mikropartiküller kullanmak veya uygun şekilde parlatılmış duvar boyunca yüzeysel aydınlatma yapmak
- Partikülleri uygun bir lens veya mikroskop objektifi ile görüntülemek, böylece partikül sinyali sayısal kamerada iyi örneklenebilsin.
- Partikül görüntü yerdeğişimini, sayısal partikül yerdeğiştirme analiz yöntemi ile tespit etmek.

3 farklı köklü değerlendirme yöntemi vardır:

Birincisi, anlık akış alanını araştırmak veya ortalama akış özelliklerini belirlemek için tek bir görüntü çiftini değerlendiren, pencere-korelasyon yöntemidir. Bu yöntemdeki sakınca, dinamik görüntü aralığının(DSR-dynamic spatial range) düşük olmasıdır. Diğer bir sakınca da partikül görüntülerinin duvar çevresinde düzgün dağılmamasından kaynaklanmaktadır.

Duvara paralel yön X , duvarın normali yönü Y olsun. İnceleme penceresi ne kadar büyükse, duvara paralel kayma vektörü bileşenin bulunmasındaki sistematik hata o kadar büyüktür. Bunun büyüklüğü duvar normali yönündeki korelasyon penceresi boyutunun fonksiyonudur. Duvara paralel kayma vektörü bileşeninin, duvara inceleme penceresinin yüksekliğinin yarısından daha yakın yerlerde olduğu düşünülür. Sistematik hatanın büyük bir kısmı ortalama partikül görüntü yerdeğişiminden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, eğer gerçek yerinde vektör elde edilemediyse, pencerenin merkez konumu ile ilgilidir. Bu yüzden, ideal şartlar altında bile (sabit akış gradyeni, homojen partikül dağılımı, ideal partikül yoğunluğu ve boyutu), duvar yakınında, duvarın normal yönündeki inceleme penceresinin yarısından daha küçük güvenilir bir yerdeğişimi

mesafesi tespit edilmesi beklenemez. Örneğin, 16×16 piksel inceleme penceresi için, vektörün yeri Y yönünde 8 piksel kaymış olarak bulunması beklenir (Kähler vd. [23]).

Bu çalışmada borosilikat cam malzemeden üretilmiş cam kanallar kullanılmıştır. Bu cam kanalların yüzeyi su seven malzeme olduğu için kayma etkisi ihmal edilmiştir.

1.1.5 DPIV Ölçüm Performansını Etkileyen Faktörler

PIV deneylerinin amacı, tanecikler görüntüleme sisteminin görüş alanındayken bilinen bir zaman aralığında, belirli bir grup izleme parçacığının pozisyonunu yüksek hassasiyetle kaydetmektir. PIV deneylerinde yer değişimini kaydetmek için iki metot vardır (Janesick [25]):

1) Tek kare-çoklu çekim: Bu metot ilk PIV ölçümlerinde geniş olarak yer almaktaydı. Islak-film fotoğraflaması ile izleme taneciklerinin görüntüleri kaydediliyordu. Çekimler arasındaki geçiş uzun olduğundan, tek çerçeveye çoklu çekim, çoğunlukla kayıt metodu olarak tercih ediliyordu. Negatiflerin hazırlanma ve analiz işlemleri, basma ve görüntüyü sayısallaştırma ve yer değişimlerini tespit etmek, birkaç saat süren, zorlu bir çalışma gerektiriyordu. Bir PIV deneyinde yüzlerce görüntü işlendiği dikkate alınırsa, zaman kaybı çoktu.

2) Çoklu kare-tek çekim: PIV tabanlı akış incelemelerde sayısal görüntü kaydetme sistemleri (CCD, CMOS vb.) kullanıldığından, yaygın olarak bu metot kullanılır. Sayısal kameralar, ayrı karelerde akışın sayısal görüntülerini almayı sağlar ve otomatik analiz için bilgisayara anında sayısal sinyal gönderir. Bütün görüntüleri sayısallaştırma, bilgisayara transfer etme ve tanecik yer değişimini tespit etme işlemleri, birkaç saniye içinde gerçekleşir. Sayısal görüntüleme sistemlerinin kullanılmasıyla beraber akış araştırmalarında, PIV en hızlı, en hassas ve baskın aletlerden biri haline gelmiştir ve adı DPIV(Digital particle image velocimetry) olmuştur. DPIV’de, parçacığın hareketlerinin iki veya daha fazla çekimi (her biri ayrı karede) çok kısa bir zaman aralığında yapılır.

DPIV’in iki temel dinamik karakteristiği, dinamik mekânsal çözünürlük ve dinamik hız çözünürlüğüdür. Bu özellikler güçlü bir şekilde, kullanılan kameraya bağlıdır. Dinamik mekânsal aralık (kapasite), nesne alanındaki görüş alanının, en küçük çözülebilir mekânsal değişime oranı olarak tanımlanır (Adrian [6]). Bu aralık, görüş alanındaki kesit alanı boyunca yapılan ölçümlerde, üst üste gelmeyen yer değişimi vektörlerinin

sayısından sorumludur. Daha yüksek mekânsal aralık için, geniş ölçekteki akışkan hareketindeki, küçük ölçekli değişimleri daha hassas tespit etme ihtiyacı vardır.

DPIV sisteminde kullanılan sayısal kameranın ana özelliğini, elektronik görüntüleme sensörü (solid state array detector) belirler. Genellikle, elektronik görüntüleme sensörü, emilen ışığı, ölçülebilen elektrik sinyallerine çeviren iletme sistemi olarak değerlendirilebilir. Kamera sensörü, piksel adı verilen ışığa hassas detektörler içerir. Pikseller, dikdörtgen şeklinde iki boyutlu alan olarak düzenlenmiştir. Piksellerin sayısı, CCD kameranın mekânsal çözünürlüğünü belirler. Günümüzde, bir pikselin boyutu 4 μm 'lere kadar inmiştir ve toplam sayısı bir milyondan (mega piksel) fazla olanları oldukça yaygındır. Mekanik özelliklerinin yanı sıra, görüntü sensörünün, fotonları ölçülebilir elektronlara çevirme kabiliyetleri (spectral hassasiyet), kuyu dolma kapasitesi (biriktirilen elektronların maksimum sayısı), biriktirilen elektronların bit derinliğine ve okuma mekanizmasına göre, yükten gerilime dönüştürerek transfer etmesi, diğer önemli özellikleri arasındadır. Üç temel, yük üretme, yük toplama ve yük transferi prosesleri süresince, sinyale görüntü kalitesini etkileyecek çeşitli tipte gürültüler (karanlık akımı gürültüsü, kuantum gürültüsü, okuma gürültüsü, vb.) ilave olur. Sayısal kameraların sinyal-gürültü oranı, DPIV sisteminin hem mekânsal hem de dinamik hız aralığını etkileyen diğer bir faktördür.

PIV sisteminin dinamik hız aralığı, maksimum ölçülebilen hızın tespit edilebilen minimum hıza oranıdır (Adrian [6]). DPIV sistemlerinde, minimum tespit edilebilir hız, CCD kameranın sinyal-gürültü oranına ve mekânsal çözünürlüğüne bağlıdır. Minimum tespit edilebilir hızın belirlenmesinde diğer önemli etken de Brownian hareketidir. Brownian hareketi, ölçülebilir akış hızının alt limitini tanımlayan temel etkilerden biridir. Yapılan çalışmalarda, beslenen izleme taneciklerinin Brownian hareketinin, DPIV ölçümlerini belirli koşullarda etkileyebileceği gösterilmiştir (Olsen ve Adrian [26]).

Hız ölçümlerinde DPIV'in üst limiti, özel sistemlerin karakteristiği ile sınırlanır. Sürekli dalga boylu lazerler ile aydınlatılmış sistemlerde mikro-PIV'in dinamik hız aralığını belirlemede, iki faktör, ışığın aydınlatma şiddeti ve kameranın tam kare hızı, anahtar rol oynar. Düşük ışıkla aydınlatma durumlarında, inceleme zamanını arttırarak, değerlendirilebilir sinyal-gürültü oranı elde etmek mümkündür. Ancak, kameranın hızını azaltma riskinin yanı sıra, hareketleri daha geç algıladığı için görüntüdeki

bulanıklık artar. CCD kameranın görüntü alma hızı, temel olarak okuma zamanı ve yükleri sensörden bilgisayara aktarmak için gerekli zamanla sınırlanmıştır. Klasik kameralar için, bu zaman 50 ms veya daha fazladır. Kameranın kare alma hızı, ölçülebilir hız aralığının üst limitini sınırlandırır. Düşük kamera hızı yüzünden, iki kare arasındaki tanecik yer değiştirmesi, mikroskobun görüş alanının yarısından büyük olduğunda, kayıp tanecik çiftleri yüzünden tutarsız hız bilgileri elde edilir.

Yukarıda belirtildiği gibi, kamera hızı, DPIV sisteminin dinamik hız aralığını tanımlayan anahtar faktörlerden biridir. Dinamik hız aralığı (1.3) formülü ile verilmiştir(Adrian [6]):

$$DHA = \frac{u_{\max}}{u_{\min}} \quad (1.3)$$

Sürekli lazer veya LED ile çalışıldığında, mikro-PIV'in dinamik hız aralığını belirlemede, olabilecek en yüksek ve en düşük hızlar aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$u_{\max} = M * \Delta x_{\max} / \Delta t \quad (1.4)$$

$$u_{\min} = M * \sigma / \Delta t \quad (1.5)$$

Minimum çözülebilir tanecik yer değişimi:

$$\sigma = \sqrt{\Delta s_{\text{bias}}^2 + \Delta s_{\text{rms}}^2} \quad (1.6)$$

Geçtiğimiz yıllarda, bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, birkaç mikro saniye gecikmeler ile görüntü alan çift-çekimli kameralar geniş kullanım alanı bulmuştur (Honkanen ve Nobach [27], Hain ve Kähler [28]). Çekimden sonra, ilk kare derhal kameranın kendi hafızasına aktarılır ve sensörü ikinci kareyi almak için bırakır. İkinci karenin çekim zamanı, ilk karenin okunma zamanı ile belirlenmektedir. Son olarak, ikinci kare de çıkışa gönderilir. Teknoloji iki kare arasındaki gecikmeyi, mikro saniyelere kadar düşürerek minimize etmeye izin vermektedir. İki çift ardışık karenin arasındaki geçen zaman, sensörün okuma zamanının iki katıdır. Eğer binning seçeneği uygulanırsa, okuma zamanı her bir kare için yarıya ineceğinden, doğal olarak çift-çekimli hızı dört kat artacaktır.

1.1.6 DPIV Kullanımında Hata Kaynakları

Brownian hareketi ile ilintili hatalar genel olarak, sistematik hata ve bulanıklık hatası olarak ele alınır. Sistematik hata, görüntüler arası zaman çok kısa olduğunda etkindir. Bulanıklık hatası, görüntünün çekim zamanı çok uzun olduğunda artar. Küresel besleme tanecikleri için, oda sıcaklığındaki sudaki difüzyon mesafesi, Brownian difüzyon katsayısı ile tanımlanabilir (Santiago vd. [3]):

$$l = \sqrt{Dt} \quad (1.7)$$

Burada D, Brownian difüzyon katsayısı, t zamandır. Brownian difüzyon katsayısı Einstein-Stokes tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \quad (1.8)$$

Burada, $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K olan Boltzman sabiti, T sıvının sıcaklığı, d_p beslenen parçacığın çapı ve μ suyun dinamik viskozitesidir.

Brownian hareketi yüzünden birinci dereceden hata, parçacığın bir yöndeki yer değiştirmesi ile ilişkilidir (Santiago vd. [3], McQuarrie [29]):

$$\varepsilon_B = \frac{\sqrt{s^2}}{\Delta x} = \frac{1}{U} \frac{\sqrt{2D}}{\Delta t} \quad (1.9)$$

Burada, s^2 parçacığın Brownian hareketinden dolayı gerçekleşen yer değişiminin ortalama karesel hatası, U karakteristik hız, Δt kareler arası zamandır. Liu'nin çalışmasında, $\varepsilon_B < \%1$ olduğu gösterilmiştir (Liu vd. [30]).

Mikro-PIV'deki odak dışı tanecikler yüzünden meydana gelen arka plan gürültüsü, büyük oranda tanecik konsantrasyonuna bağlıdır (Olsen ve Bourdon [31]). Mikro-PIV literatüründe, mikroskop objektifinin odak derinliğini belirlemede farklılıklar vardır. Meinhart ve Wereley (Meinhart ve Wereley [32]), mikro-PIV deneylerinde odak derinliğini aşağıdaki eşitlikle tanımlamıştır:

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2,16d_p}{\tan \theta} + d_p \quad (1.10)$$

Burada, NA- mikroskop objektifinin sayısal açıklığı, n ortamın kırınım indisi, λ ışığın dalga boyu, d_p parçacığın gerçek boyutu, θ mikroskopun görme açısıdır.

Tanecik yer-değişimini bulmadan gelen hatalar da, mikro-PIV’de diğer hata kaynaklarından biridir. Prasad vd.’ne göre (Prasad vd. [33]) CCD sensörünün üzerine düşen tanecik görüntüsünün çapı yaklaşık olarak 3-4 piksel olduğunda, ölçüm hatası minimuma indirilebilir. Bu durumda, korelasyon pikinin konumu tanecik görüntüsü çapının onda-biri kadar hassasiyetle tanımlanabilir. Mikro-PIV uygulamalarında kullanılan, sonsuz düzeltmeli mikroskop optiğinin kırınım sınırlamalı nokta boyutu d_s , aşağıdaki bağıntıda verilmiştir (Meinhart vd. [17]):

$$d_s = 1,22 \times M \times \frac{\lambda}{NA} \quad (1.11)$$

Burada M büyütme, λ ışığın dalga boyu, f lensin odak-numarasıdır. CCD’nin görüntüleme düzlemine düşen parçacığın, efektif çapı de aşağıdaki şekilde verilmiştir (Prasad vd. [33], Adrian ve Yao [34]):

$$d_e = \sqrt{M^2 d_p^2 + d_s^2} \quad (1.12)$$

Burada, d_p tanecik çapıdır.

PIV ölçümlerinde sonuçlar, güçlü bir şekilde efektif çapın piksel boyutuna oranına ($r=d_e/a$) bağlıdır. Sistematik hataya uyan Gaussian piki, eğer $r < 2$ ise r ile ters orantı göstermektedir. Ancak, $r \geq 2$ olduğunda r ’nin etkisi kaybolmaktadır (Westerweel [35]).

Bu çalışmadaki deneylerde, $0,5 \mu m$ çapındaki tanecik için, 2×2 binning modunda, $r \approx 1$, normal moda $r \approx 2$ ’dir. Durum değerlendirildiğinde, 2×2 binning modunda bir zayıflık olduğu, normal modunun ise piksel-altı hesaplamalar için yeterli düzeyde olduğu görülmektedir. 2×2 binning modunun ciddi şekilde örnekleme-altı durumda olmasından dolayı, rastgele korelasyon piklerinin görülmesi mümkün olabilecektir.

Önceki çalışmalara göre (Westerweel [35], Huang vd. [36], Astartia ve Cardone [37]), CCD sensörü üzerindeki tanecik görüntü çapının yaklaşık olarak 3-5 piksel olması durumunda, PIV ölçümlerinde hatanın minimize edilebileceği görülmektedir. Bu durumda, korelasyon pikinin konumu parçacığın görüntü çapının %10’u hassasiyetinde tanımlanabilir. Piksel-altı interpolatörlerin çoğu, büyüyen tanecik çapı ile (5 pikselin üstünde), konumlama hassasiyeti kötüleşmektedir (Astartia ve Cardone [37]). Nobach vd.’nin çalışmasında, Gaussian interpolatör diğer interpolasyon şemaları ile karşılaştırılmıştır (Nobach vd. [38], Nobach ve Honkanen [39]). Piksel-altı yer

değişimini bulmada, Gaussian interpolasyonunun doğruluğu az da olsa arttırdığı bulunmuştur.

1.1.7 CCD Kameralar

Görüntüleme aleti, gerçek görüntü yüzeyinde bulunan hedeften yayılan ışığı toplayan ve ışığa duyarlı ortamda görüntü oluşturan (fotoğraf filmi, elektronik görüntü sensörü gibi) lensler gibi görüntülemeye yarayan optik kısımlardan oluşur.

Bir elektronik görüntü sensörü pikselde olduğu gibi, oksit kaplı silikon malzeme üzerinde oluşan kapasitör benzeri depolama ünitelerinden oluşur (Janesick [25], Gerald [40]). Bu tip sensörler metaloksit yarıiletken (MOS) sensörler olarak bilinirler ve çalışma mekanizmaları silikonun ışık demetini elektriksel yüke dönüştüren fotoelektrik özelliğine dayalıdır. Optik görüntü görüntüleme sensörü üzerine gönderilirken, her bir piksele ulaşan protonlar genellikle elektronların bulunduğu elektriksel bir yük oluşturur, bu oluşumun büyüklüğü söz konusu piksel üzerindeki ışığın yerel yoğunluğu ile orantılıdır. Sensör bir süre (işlenme veya maruziyet süresi) ışığa maruz kaldıktan sonra yüklerin görüntüsü pikselde toplanır (bir şekil oluşur). Daha sonra yüklerin görüntüsü depolama aleti tarafından okunur ve böylelikle sensör diğer bir görüntüyü yakalamak için serbest hale gelir. En çok bilinen MOS sensör türleri bütünleyici metal oksit yarı iletken (CMOS) ve çift-yüklü sensördür (CCD). Bu iki sensör de aynı zamanda kullanıma sunulmuştur fakat CMOS'nin yapısının daha karmaşık olmasından dolayı, CCD teknolojisi daha hızlı gelişmiştir ve CCD sensörleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Okuma mekanizmasına göre, tam ekran iletimli ve satır iletimli olmak üzere yaygın olarak iki tip CCD kamera vardır. Tam ekranlılarda cihaz iki tane birbirinin aynısı dizilime sahiptir, ilki ışığa duyarlı ve ikincisi ışıktan korumalı depolama dizilimidir. Işığa duyarlı dizilim, çekim zamanı boyunca yükleri toplar ve sonra bu yükleri opak depolama alanına aktarır. Yükler aktif dizilimden depolama dizilimine aktarılırken, bir elektromekanik kesici, ışığa duyarlı dizini kapatır. Okuma zamanı içinde, yükler depolama dizininden çıkış yükseltgecisine aktarılırken, ışığa duyarlı kısım bir sonraki çekimin yük toplama işlemini yapar. Satır transferli CCD'lerde ise, ışık izoleli depolama alanı, CCD'nin aktif alanında ışığa duyarlı piksel kolonlarının arasında konumlandırılmıştır. Çekim zamanı boyunca ışığa duyarlı pikseller yük toplar ve

sonunda her bir pikseldeki yük, depolama alanındaki izoleli piksellere aktarılır. Buradan da çıkış yükseltgeycisine aktarılır. Daha çok, satır transferli CCD'ler, DPIV çalışmalarında tercih edilir. Bu sensörlerdeki okuma prosesi iki adımda gerçekleşir. İlki, çekim zamanının sonunda gerçekleşen paralel okuma adımlarıdır. Her bir pikselden yükler eş zamanlı olarak depolama bölgesindeki kuyulara aktarılır. İkincisi, depolama bölümündeki yüklerin satır satır, yükten gerilime çevrildiği ve yükseltgeyici birimlere aktarıldığı seri okuma adımıdır (Adrian [13], Janesick [25], Gerald [40]).

CCD görüntü sensörleri kullanılmasından oluşan maksimum görüntü hızındaki başlıca sınırlama görüntüleme sensöründen elde edilen görüntülerin okunması için gerekli olan zaman tarafından ortaya çıkmaktadır. Çoğunlukla CCD kameralarının okuma süresi 10 ve 40 MHz arasında değişmektedir. 10 MHz olanı en yaygın olarak kullanılanıdır. Örneğin 1 megapiksel algılayıcı için 10 MHz okuma hızına sahip olma tüm resmi okumak için 0,1 saniye zaman alması demektir. Yüksek okuma hızına sahip olma yüksek oranda gürültü oluşmasına da yol açacaktır. Bu nedenle eğer gerekli değilse yüksek okuma hızına sahip sensörler tercih edilmemelidir.

1.1.7.1 Çift-Çekimli Kameralar

Çift-çekimli kameralar özellikle DPIV çalışmaları için düşünülmüştür. Bu kameralar, bir çift tam çözünürlükteki kareyi, 50 ns ara ile çekmektedir. PIV ölçümlerinde, çift çekimin kareler arası zamanlaması, öyle ayarlanır ki, her bir kare çifti, çift-kaviteli darbeli lazerin bir darbedeki aydınlatmasına denk getirilir(Li vd. [9]).

Kısa süreli aydınlatma atımlarının kullanımı iki görüntünün çok hızlı ardışıklıkta kaydedilebildiği çift-çekimli (dual-frame) olarak bilinen özel bir modda görüntü karesi transferine ya da satır aralarına yazan CCD'lere imkân tanır. Bu modda ilk görüntü, nesneden ilk ışık atımı geldiği anda yakalanır ki bu tipik olarak ilk çerçevenin poz zamanının sonuna yakın bir zamanda gerçekleşir ve bu görüntünün saklama bölümüne aktarılmasının hemen sonrasında ikinci ışık atımı ikinci çerçevenin poz zamanı süresince nesneyi ortaya çıkarmak(ışıklandırmak) için kullanılır. Şekil 1.3 bu modda kamera pozu için zamanlama ve ışık atımlarını göstermektedir. İlk görüntü karesinin çekiminin daha önce tanımlanmış olan elektronik ışık kesme tekniğiyle kontrol edilir ve ikinci karenin çekimi ilk görüntü karesinin saklama bölümünden okunması için geçen süre boyunca devam eder. Ne var ki ikinci karenin poz zamanı çok uzun olsa da

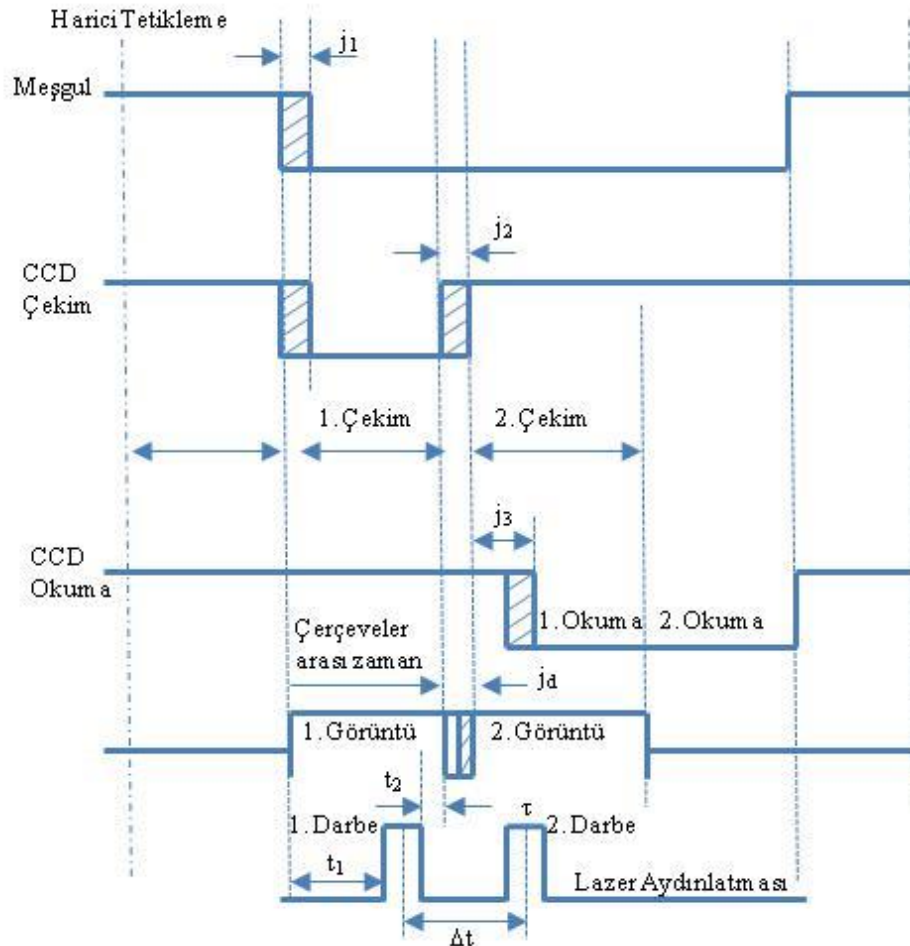
aydınlanma atım süresi etkin poz zamanını tanımlar. Bu yaklaşım birinin görüntü bölümünde diğerinin ise saklama bölümünde yer aldığı bir görüntü çiftinin elde edilmesine imkân sağlar (Janesick [25]). Böylece çift-çekimli modunda kamera çok hızlı bir ardışıklıkta iki kare yakalayabilir ve sonrasında diğer bir görüntü çiftini yakalamadan önce yüzlerce milisaniye (iki çerçevenin okunma zamanı) beklemek zorundadır. Görüntüler arası minimum zaman, görüntülerin aktarım zamanı ile sınırlıdır ki son zamanlardaki modeller için bu 50 ns gibi oldukça küçük değerlerdir. Görüntü karelerinin aktarım zamanını minimize etmek için optimize edilmiş ve yukarıda anlatılan modda çalışan kameralar çift-çekimli kameralar olarak adlandırılırlar ve bu kameraların birçok çeşidi ticari olarak piyasada bulunmaktadır.

Şekil 1.3'deki $j(jitters)$ ile ifade edilen bölgeler geçişler arasındaki belirsizliği göstermektedir. Dolayısıyla lazer darbelerinin sürelerini ayarlarken bu geçiş belirsizliklerini göz önüne almak gerekir. Bu çalışmada kullanılan lazerde süre ayarlama seçeneklerinde bu tür belirsizliklerin dikkate alınması için imkânlar mevcuttur. Ayrıca kullanılan kamera özel olarak çift-çekim için yapıldığından dolayı bu değerler çok (yaklaşık 1000 kat) daha düşüktür. Sonuç olarak, kullanılan sistemin performansı bu tür belirsizliklerin çok üzerinde olduğu için darbelerin çekim süresinin ortasına ayarlanması yeterli olmaktadır.

Dikkate alınması gereken nokta aydınlatmanın çerçeve aktarımının başlamasından önce sona eren bir atım formunda olması gerektiğidir ki buradaki amaç görüntünün etrafındaki hareket izlerini önlemektir. Aksi halde, görüntü aktarımı süresince izler çok fazla olacaktır. Çünkü görüntü aktarım zamanı etkin poz zamanı (örneğin aydınlatma atımı boyunca geçen süre) ve görüntüler arası ayırma ile karşılaştırıldığında küçük değildir. Açıkça görülmektedir ki bu görüntü kaydetme metodu ışık miktarı düşük olan ortamlar için daha uygundur. Bunun nedeni ikinci görüntünün gerçek poz zamanının nispeten uzun olmasıdır. Bu kameraların izin vereceği minimum görüntüler arası zamanda (görüntü karesi aktarım zamanı da denir) işlem gerçekleştirmek için ilk görüntünün aktarımının hemen öncesi ve hemen sonrasında olmak üzere bir ışık atımı görüntü aktarım zamanının küçük bir bölümü oranındaki bir sürede CCD'ye yeteri kadar vuracak miktarda parlak ışık veren kaynaklar tarafından sağlanmak zorundadır. Atımlı lazerlerin birkaç nanosaniye kadar kısa bir atım boyunca 1 J'e kadar aydınlatma sağlama kapasitesine sahip aydınlatma kaynakları olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Eğer tek bir lazer başlığı çok yüksek tekrar oranlarından atım dizisi üretmek için kullanılırsa her atımdaki enerji çok küçük olacaktır ve çoğu görüntüleme uygulaması için yetersiz olacaktır. Bu nedenle çok kısa atımlar arası ayırmanın olduğu çoklu atımlara ihtiyaç varsa birden çok senkronize lazer başlıkları kullanılır. Çift-çekimli kameralar genellikle yüksek hız akışlarında PIV için çift atımlı (çift kaveteli) Nd:YAG lazerlerle bağlantılı olarak kullanılır. Bu tip kameralar tam çözünürlüklü kaliteli görüntü yakalama yeteneğine sahiptirler. Ancak maksimum görüntü çekim hızı, görüntü aktarım zamanıyla sınırlıdır ve elde edilebilir görüntü karesi sayısı ikiyle sınırlıdır.

Yüksek hızda kameralar ve çift çekimli kameralar kullanan DPIV sistemlerinin dinamik hız aralığı, görüş alanı boyunca önemli ölçüde hız değişimi olan türbülanslı akışı karakterize etmek için yeterlidir.



Şekil 1.3 Çift çekimli CCD kameranın çalışma prensibinin şematik gösterimi

1.1.7.2 CCD Binning

Kameranın kare alma hızını, çekim ve okuma zamanının toplamı belirler. Genel olarak paralel okumada harcanan zaman mikro saniyelerden azdır ve seri okuma ile kıyaslandığında CCD piksel çözünürlüğüne bağlı olarak ihmal edilebilir. Daha açıkçası, sensör dizimindeki satırların sayısını azaltarak, okuma zamanını azaltmayı ve CCD'nin poz alma hızını arttırmayı sağlar (Janesick [25], Gerald [40]).

Binning (yani komşu piksellerin ortalamasının alınması) ve pencereleme (ROI- region of interest) görüntünün boyutunu düşürmek ve nihayetinde çekim hızını artırmak için yüksek çözünürlüklü CCD'lerin kullanıldığı tekniklerdir. ROI seçiminde, genellikle “alt pencereleme” olarak adlandırılan, görüntünün belli bir bölümünü seçmek mümkün olur ve sadece ilgili bölgeden yükler okunur. Böylece, piksel sayısı azaldığından, poz hızı artar. Ancak, PIV ölçümlerinde bu modda görüntüleme sisteminin görüş alanında (FOV-field of view) da azalma meydana getirir. Bu yüzden, artan poz çekim hızı ile azalan FOV dengelenmelidir. Diğer bir CCD görüntü alma modu olan binning, ROI'nin aksine kamera sisteminin FOV'unu korur.

Binning, dikey, yatay veya her iki yönde de piksel yüklerini birleştirerek daha büyük tek bir yük haline getirme işlemidir. Bu yüke “binned piksel” veya “süper piksel” denir. Binning işlemi CCD'deki çipin seri ve paralel kaydedicilerinin, görüntüyü önce çip üzerinde sayısallaştırmak için, çekim zamanından sonra özel olarak kontrolü ile gerçekleştirilir. Süper pikselin yükü, binning işlemine tabi tutulan bütün piksellerin yüklerinin toplamını temsil eder. CCD binning işlemi çözünürlük, hassasiyet, sinyal/gürültü oranı ve poz hızını etkiler. Binning dereceleri arasındaki değer, artış ve ilişki, sensör tipine bağlıdır. 3 tip binning modu vardır: 1) $n = m > 1$ - karesel binning, 2) $n > m$ ve $n > 1$ - dikey binning, 3) $n < m$ ve $m > 1$ - yatay binning. Burada, n ve m süper pikseli oluşturan yatay ve dikey piksellerin sayısını temsil eder (Janesick [25], Gerald [40]).

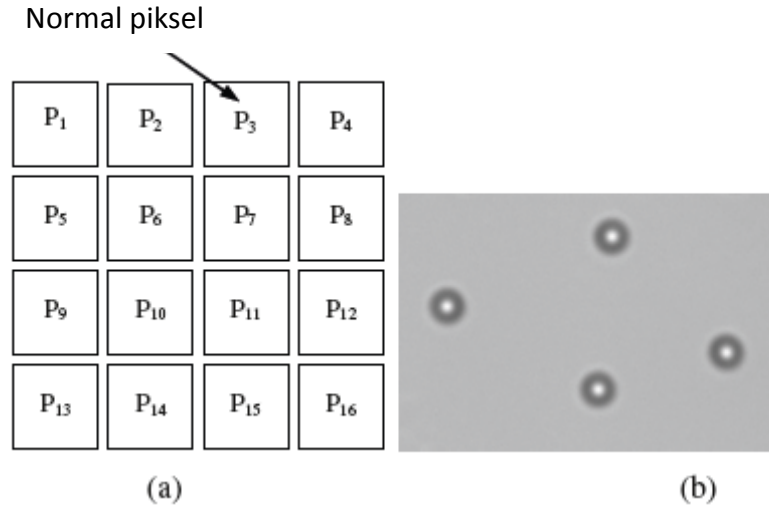
$n \times m$ binning modunda, her bir süper piksel, n tane dikey ve m tane yatay piksel olan dikdörtgensel alanı tanımlar. Buna bağlı olarak, sensörün çözünürlüğü, n kez dikey ve m kez yatay yönde azalır. Buna bağlı olarak görüntü büyüklüğü de, n kez dikey, m kez yatay yönde azalır. Herhangi bir binning modu, görüntüleme optiklerinin tam FOV'unu korur. Kare binning modunda, görüntünün doğal ölçeği korunarak, hem çözünürlük hem

de görüntü boyutu, her iki yönde de n kez azalır. Herhangi bir asimetric binning modunda ise, görüntüde ölçek bozulumu da gerçekleşir.

Çekim zamanı boyunca ışığın yarattığı elektronlar kuyularda toplanır. Tam kuyu kapasitesi, piksellerin tutabildiği maksimum elektron sayısını belirler ve CCD'nin dinamik aralığının belirlenmesinde baskın bir rol alır. Eğer çekim zamanı boyunca, fotonlardan üretilen yüklerin sayısı, pikselin kuyu kapasitesini aşarsa, yükler, komşu hücrelere akacaktır. Eğer hücreler yüke doymuşsa, yükler bir sonraki piksele akar ve bu böyle devam eder. Bu işlem görüntü üstünde tam doymuş çizgilere neden olur. Pek çok CCD'de, aktif pikselin tam kuyu kapasitesi ve maksimum yük transfer kapasitesi, depolama kısmının kapasitesi ile kıyaslandığında aynıdır. Bilimsel kameralarda, depolama kuyuları, piksel kuyularından daha yüksek kapasitelidir. Piksel kuyu kapasitesi, sensörün fiziksel özelliği olduğundan binning işlemi kuyu kapasitelerini etkilemez. Böylece herhangi bir binning modundaki süper pikselin tam kuyu kapasitesi, tek bir pikselin tam kuyu kapasitesi ile aynı özellikte ve eşit yük kapasitesinde olacaktır.

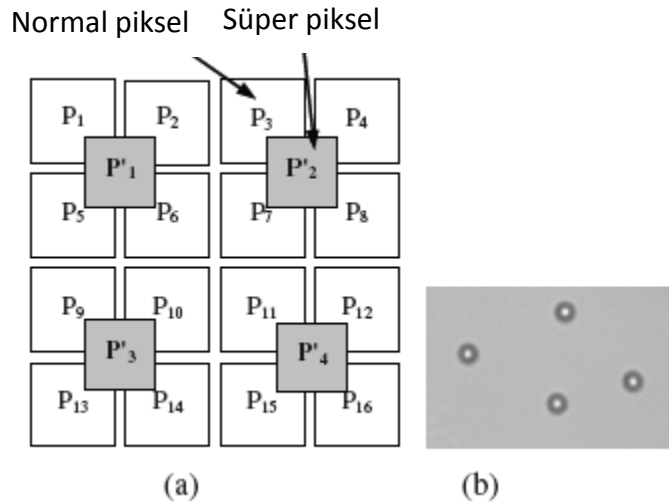
Diğer yandan, binning modunda (Şekil 1.4) ışık algılayıcı alanın genişlemesi nedeniyle ($n \times m$ kadar), süper pikselin ışığa hassasiyeti artar. Buna bağlı olarak, belli zamandaki ışıktan elde edilen yükler (süper pikseldeki) artar ve kuyu dolum işlemi daha hızlı olur. Böyle doyum etkilerinden kaçınmak için çekim zamanını düşürmek gerekmektedir.

Binning işlemi, sinyal/gürültü oranını düşürür ve gürültüyü azaltıp sinyali güçlendirir. Gürültü kaynakları iki gruba ayrılır: İntegrasyon zamanına bağlı gürültüler ve okuma gürültüleri. Süper pikseli oluşturan her bir pikselin sinyal ve gürültüleri, süper pikselin sinyal ve gürültülerinden bağımsız olarak katkıda bulunacaktır. Bir $n \times m$ piksel seti için, her bir piksel aynı yük ve gürültü seviyesine sahiptir. Süper pikseldeki toplam gürültü miktarı, her bir pikselin tek başına sahip olduğundan $\sqrt{n \times m}$ kez daha büyük olacaktır. Ancak çekim zamanı, $n \times m$ kez düşeceğinden, ortalama mekanizmasından dolayı süper pikseldeki bütün gürültü $\sqrt{n \times m} / (n \times m)$ yani $1 / \sqrt{n \times m}$ kadar azalacaktır.



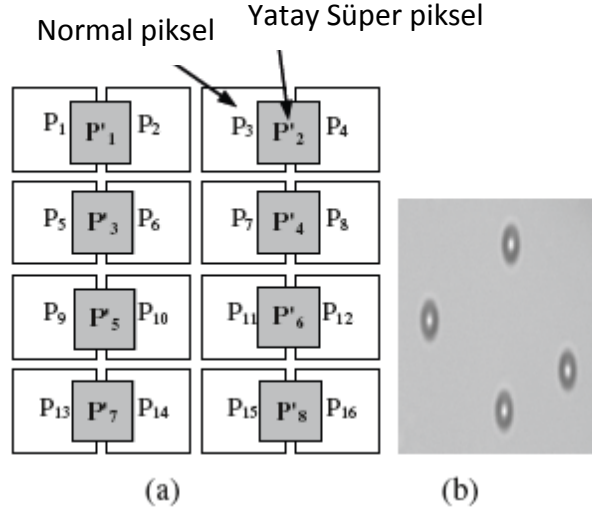
Şekil 1.5 Normal CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b)

Tek piksel moduna göre 2×2 binningde, tanecik büyüklüğü her iki yönde de iki kez azalır. Bu tanecik görüntü büyüklüğündeki azalma, mikroskobun büyütmesi iki kat artırılarak elimine edilebilir. Mikroskop ile büyütme ile çözünürlük iki kat artar ancak, aydınlanma 4 kat, FOV da iki kat azalır (sadece bir yönde). Aydınlatmadaki 4 katlık azalma, 4 komşu pikselden yüklerin toplanması ile giderilebilir. Çoğu CCD’de 2×2 modu, efektif poz hızını iki kat arttırmaktadır, bu da FOV’daki azalmayı elimine etmektedir. Fakat aşırı ışıktan dolayı, 2×2 binningde sinyal/gürültü oranı (SNR), binned pikselin sayısının karekökü kadar, yani burada 2 kat artmaktadır (Şekil 1.6).



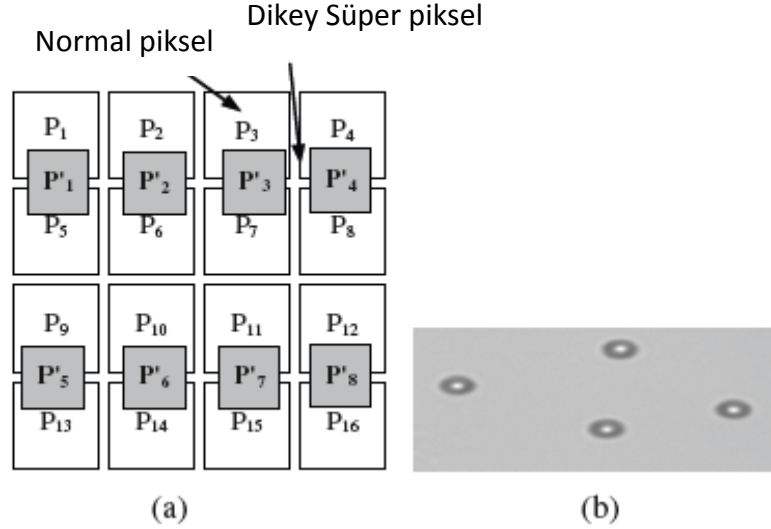
Şekil 1.6 2×2 kare binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b)

Şekil 1.7’de, 1×2 yatay binning modunu gösteriyor, yatay yönde çözünürlük 2 kez azalıyor. Bu modda sütunların sayısı yarıya iniyor, satırlar aynı kalıyor. Daha öncede belirtildiği gibi, sıralı transferli CCD, okuma zamanı satırlar tarafından belirlenmektedir, bu yüzden yatay binning çekim hızını etkilememektedir.



Şekil 1.7 1×2 yatay binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b)

Şekil 1.8, dikey yönde çözünürlüğün iki kez azaldığı 2×1 binning modunu göstermektedir. Dikey binningde sütunların sayısı değişmez, satırlar yarıya iner, okuma zamanı azalır ve buna bağlı olarak poz hızı artar. Hepsinin ötesinde dikey binning, artmış SNR, korunmuş FOV ve yatay yönde değişmeyen çözünürlük ve özellikle laminar akışlarda PIV sisteminin geliştirilmesinde kullanılabilecek artan poz hızı elde edilmesini sağlamaktadır.



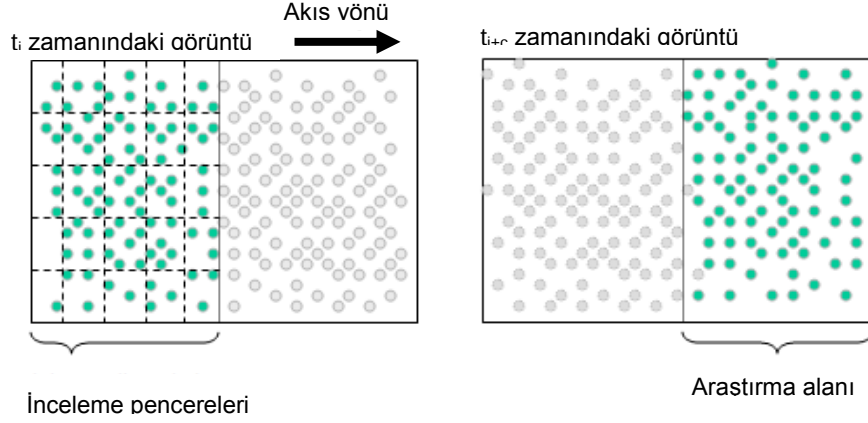
Şekil 1.8 2×1 dikey binning CCD piksel düzeninin şematik görünümü(a) ve ilgili görüntü(b)

1.1.8 Tanecik Yerdeğişimi Hesaplamaları

Hız profili hesaplamalarına, ardışık görüntüler arasında taneciğin yer değişimini hesaplama ile başlanmıştır. t_i zamanında alınan görüntü inceleme pencerelerine bölünmüş ve her bir pencerenin yer değişimi, t_i+c zamanında alınan görüntüye uyan kısımdan hesaplanmıştır. Şekil 1.9, iki ardışık görüntünün üst üste gelen bölgelerini göstermektedir. Her bir inceleme penceresi, bir sonraki görüntüdeki araştırma bölgesinde, karşılıklı-ilinti yöntemiyle incelenmiştir. Pencerenin başlangıç konumu ile korelasyon pikinin yeri arasındaki Euclidian uzaklık, ardışık kareler arasındaki akışın yer değişimini vermektedir.

Burada iki tanecik arasındaki fark, ilgili taneciklerin korelasyon pikleri arasındaki mesafe olarak hesaplanmıştır. Standart karşılıklı ilinti fonksiyonu (NCCF), PIV de sık kullanılan bir metottur. NCCF katsayısı $C(u,v)$, I görüntüsü ve I' dan (u,v) koordinatları kadar ilerideki T görüntüsü için aşağıdaki gibidir(Raffel vd. [43]):

$$C(u,v) = \frac{\sum_{x,y} (I(x,y) - \bar{I}(u,v))(T(x-u, y-v) - \bar{T}(u,v))}{\sqrt{\sum_{x,y} (I(x,y) - \bar{I}(u,v))^2} \sqrt{\sum_{x,y} (T(x-u, y-v) - \bar{T}(u,v))^2}} \quad (1.13)$$



Şekil 1.9 İnceleme pencerelerine bölünmüş t_i zamanında alınan görüntü ve inceleme pencerelerinin araştırılmasında kullanılan t_{i+c} zamanında alınmış görüntü

$\bar{I}(u, v)$ ve $\bar{T}(u, v)$, sırasıyla, T ile çakışan I 'nın ve T 'nin ortalama değerleridir. NCCF'in hesaplanması, hassas bir işlem dizisidir ve işlemin hızını arttırmak için Lewis'in hızlı korelasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Denklemin özelliğinden dolayı, NCCF'deki pik ayrık konumda olduğundan, standart karşılıklı ilinti fonksiyonu kullanılarak, yer değişimi kabaca hesap edilmiştir. Başka bir deyişle, korelasyon pikleri $\pm 0,5$ piksel hata ile bulunmuştur. PIV'de yer değişimi belirsizliğini azaltmak için, korelasyon piklerini, piksel altı çözünürlükte yerleştirmek gerekir (Huang [36], Nobach vd. [38], Nobach ve Honkanen [39], Alexander ve Ng [44], Keane ve Adrian [45], Roesgen [46], Cholemar [47]). Piksel altı interpolasyon çeşitlerinin en çok kullanılanları, parabolik eğri oturtma, kütlelerin merkezi, Gaussian eğri oturtmadır. Ayrıca Nobach'ın çalışmasında, eliptik şekilde tanecik görüntüleri veya korelasyon pikleri için önerdiği bir metot da vardır.

Piksel-altı (Sub-piksel) yer değişimini bulmak için, korelasyon fonksiyonu pikinin çevresindeki bölgeye uyan Gaussian yüzeyi bulunur. Korelasyon pikimizi temel alan x , y koordinatlarına göre, pikimize en fazla uyan Gaussian yüzeyi, Δx , Δy de konumlanmıştır. Gaussian yüzeyi uydurmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır, ancak burada hızlı ve güvenilir olduğu için açık metot tercih edilmiştir (Nobach vd. [38], Nobach ve Honkanen [39]).

1.1.8.1 Binned Tanecik Görüntülerinin Özilinti Fonksiyonu

CCD binning özelliğini tanecik görüntülerine uygulama sonucu oluşan bozulum çeşitleri, klasik özilinti fonksiyonu (ACF-auto correlation function) uygulanarak analiz edilmiştir. ACF genelde, hızlı Fourier dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform)

bağlamında tanımlanır. Nesne boşluğunda sonlu enerjili sürekli fonksiyon için ACF (Nobach vd. [38], Nobach ve Honkanen [39]), şu ifade ile verilmiştir:

$$I(x, y) \otimes I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x', y') I(x + x', y + y') dx' dy' \quad (1.14)$$

Burada, $I(x, y)$ - iki boyutlu gerçekte fonksiyon (sinyal), $\otimes$ - ilinti operatörü, x' ve y' bağımsız integral parametreleridir.

$I(x, y)$ iki boyutlu gri düzeyi (pikselin parlaklığına karşılık gelen sayısal değer) dağılımı fonksiyonu olsun, görüntünün özilinti fonksiyonu (ACF), görüntüdeki iki ayrı bölgenin, iki ayrı yoğunluk değerlerini bulma olasılığı olarak yorumlanabilir.

PIV ölçümlerinde olduğu gibi hız, belirlenen parçacığın parlaklık yoğunluk dağılımından merkez konumu tanımlayarak bulunur. Görüntüler, ayırık türde kamera ile alınır. Bu ACF için iyi bir uygulamadır. Bu durumda, taneciklerin görüntüdeki yoğunluğundan olan, piksellerin gri-seviye değerlerinin dağılımı, ayırık sinyal kavramı ile ilişkilendirilir. Ayırık formda ACF için verilen bağıntı:

$$ACF(u, v) = (1/MN) \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} I(x, y) I(x + u, y + v) \quad (1.15)$$

Burada, M ve N , görüntünün genişlik ve yüksekliği, $I(x, y)$, (x, y) noktasındaki gri seviye yoğunluğu, u ve v bağımsız parametrelerdir.

Burada, ACF iki nokta istatistik metodudur. Bu, görüntünün kendi ile karşılıklı eşleştirilmesi çalışması olarak görülebilir ve görüntü üzerindeki farklı pikseller arasındaki ilişkiyi sayısallaştırır. ACF' in ve görüntü girişinin, iki boyutlu fonksiyonlar olmasına ve boyutlarının da tam aynı olmasına rağmen bu kendi kendisiyle karşılaştırma işlemi, $\sqrt{u^2 + v^2}$ mesafesindeki, görüntünün bütün nokta nokta benzerliklerini toplar. $u \in [0, M-1]$ ve $v \in [0, N-1]$. Sonuç olarak bu toplama işlemi, verilen görüntüdeki saklanmış gerçekte benzerlikleri toplar ve yeniden organize eder. ACF kullanımının avantajlarından biri, sistematik olmayan bir karakterde (görüntünün analiz için bölünmesi gerekmez) ve gürültüyü bastırma kabiliyetinde olmasıdır. ACF maksimum değerini 0 kaymada alır [$u = v = 0$]. Bunun nedeni, ilgili parçacığın uyarma yoğunluğunu yansıtarak, görüntünün kendisiyle uyuşmamasıdır. Böylece, tanecik

görüntüsünün özilinti fonksiyonu hesaplanarak, parçacığın floresan uyarılımı şekli ve alanı, arka plan gürültüleri varlığında bile tahmin edilebilir.

u ve v'nin küçük kaymaları için, ACF değerleri, bulunan piksellerin beklentisine göre dikkate alınır. Aynısı veya komşusunun gri-seviye yoğunluğu u ve v kadar mesafe ile ayrılır. u ve v'nin küçük kaymaları için, ACF, ilgili bölgedeki optik yoğunluk ile benzerlik gösterir. Bu, parçacığın şeklini tanımlamak için kullanışlıdır. Ortalama tanecik özelliklerinin yanında, ACF piki, görüntü sisteminin transfer fonksiyonunu da içerir. Böylece, eşit görüntüleme koşullarında (odak ve aydınlatma), ACF, binning yüzünden olan görüntü bozulmaları bilgisini sağlayabilir. Asimetrik binning modları, görüntünün doğal ölçeğini korurken, şeklini bozar. Diğer yandan, PIV/PTV deneylerinde, sadece belirlenen taneciğin merkez konumunun bilinen zamandaki yer değiştirmesi önemlidir. Böylece izleme taneciklerinin tam bir portresine ihtiyaç kalmaz. Görüntüdeki herhangi bir bozulma, bu bozulmanın doğasını tanımlayıp, ona göre düzeltmeler yaptığımız zaman, taneciğin yer değiştirme bilgisini etkilemez.

$(\Delta x, \Delta y)$ de merkezlenmiş, genel eliptik Gaussian fonksiyon (Nobach ve Honkanen [39]):

$$z(x, y) = A e^{-(b_{20}(x-\Delta x)^2 + b_{11}(x-\Delta x)(y-\Delta y) + b_{02}(y-\Delta y)^2)} \quad (1.16)$$

Burada,

$$b_{11} = \sin^2 \theta / 2\sigma_x^2 + \cos^2 \theta / 2\sigma_y^2 \quad (1.17)$$

$$b_{20} = \cos^2 \theta / 2\sigma_x^2 + \sin^2 \theta / 2\sigma_y^2 \quad (1.18)$$

$$b_{02} = -\sin 2\theta / 4\sigma_x^2 + \sin 2\theta / 4\sigma_y^2$$

(1.19)

θ - akış yönü ile x koordinatı arasındaki açı, σ_x , σ_y , majör ve minör yarı-eksenlerdir.

1.1.8.2 Dairesel Görüntü Durumunda Piksel Altı İnterpolasyon

Bu tez çalışmasında, normal ve 2×2 binning modlarında, 2 boyutlu Gaussian interpolasyonu kullanılmıştır.

Piksel altı (sub-pixel) yer değişimini tespit etmek için Gaussian yüzey, ilinti fonksiyonu pikinin çevresindeki bitişik noktalara uydurulur. Gaussian yüzeyinin maksimum değeri,

$(\Delta x, \Delta y)$ 'dedir ve x_0, y_0 konumundaki korelasyon pikine uyar. Korelasyon pikinin Gaussian dağılıma sahip olduğunu düşünülerek, korelasyon pikinin yeri hassas bir şekilde, şu ifade ile bulunur:

$$x=x_0+\Delta x/2 \text{ ve } y=y_0+\Delta y/2 \quad (1.20)$$

Burada:

$$\Delta x = \frac{\ln C(x_0 - 1, y_0) - \ln C(x_0 + 1, y_0)}{2(\ln C(x_0 - 1, y_0) + \ln C(x_0 + 1, y_0) - 2 \ln C(x_0, y_0))} \quad (1.21)$$

$$\Delta y = \frac{\ln C(x_0, y_0 - 1) - \ln C(x_0, y_0 + 1)}{2(\ln C(x_0, y_0 - 1) + \ln C(x_0, y_0 + 1) - 2 \ln C(x_0, y_0))} \quad (1.22)$$

1.1.8.3 Eliptik Görüntü Durumunda Piksel Altı İnterpolasyon

Eliptik şekilli durumlardaki piksel altı interpolasyon için, genel eliptik Gaussian fonksiyonu kullanılmıştır. Burada, eksenel olamayan şekilde meydana gelmiş tanecik görüntüsü veya korelasyon piki söz konusudur. (1.16) denklemi, maksimum pik konumunun koordinatlarının iki boyutlu bağlanım analizini yapacak, (1.23) denklemine dönüştür(Nobach ve Honkanen [39]):

$$z(x, y) = e^{-(c_{00}+c_{10}x+c_{20}x^2+c_{01}y+c_{11}xy+c_{02}y^2)} \quad (1.23)$$

Dikey ve yatay binning modlarında, elde edilen tanecik görüntüleri ve ilgili korelasyon piklerinin şekli, elipse dönüşerek bozulmuştur, ancak hala x ve y eksenleri yönündedir. Bu faktör göz önünde bulundurularak, c_{11} katsayısı 0 alınıp, eksenel yönlü tanecik görüntüsü veya korelasyon piki olarak, (1.24) denklemi ile ele alınabilir (Nobach ve Honkanen [39]):

$$z(x, y) = e^{-(c_{00}+c_{10}x+c_{20}x^2+c_{01}y+c_{02}y^2)} \quad (1.24)$$

Dikey, 2×1 binning modu dikkate alındığında, tanecik görüntüsü veya korelasyon piki y eksenini boyuncadır ve 1:2 oranında şekli bozulmuştur. İki boyutlu bağlanım hesaplaması uygulayarak, maksimum pikin, piksel altı konumu şu şekilde elde edilir:

$$x=x_0+\Delta x \text{ ve } y=y_0+\Delta y/2 \quad (1.25)$$

Dikey, 3×1 binning modunda da, tanecik görüntüsü veya korelasyon piki y eksenini boyuncadır ve 1:3 oranında şekli bozulmuştur. İki boyutlu bağlanım hesaplaması uygulayarak, maksimum pikin, piksel altı konumu şu şekilde elde edilir:

$$x=x_0+\Delta x \text{ ve } y=y_0+\Delta y/3 \quad (1.26)$$

Benzer şekilde, yatay, 1×2 binning modunda, tanecik görüntüsü veya korelasyon piki x eksenini boyuncadır ve 2:1 oranında şekli bozulmuştur ve maksimum pikin, piksel altı konumunu, (1.26)'de verilen denklemler ile bulabiliriz:

$$x=x_0+\Delta x/2 \text{ ve } y=y_0+\Delta y \quad (1.27)$$

1.1.9 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Çözüm

1.1.9.1 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Çözümlerin Geçerliliği

Basınç düşüşü, debi ve kayma gerilmesi ilişkisi çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Bazı yazarlar mikro kanallar içindeki tek fazlı basınç düşüşünün hala geleneksel teori ve makro ölçekli çözümlere uyduğunu açıklamıştır. Gao 0,1mm-1mm arası yüksekliğe sahip geniş aralıklı dikdörtgen çapraz kesitli kanallardaki tek fazlı akışı ve ortak(birleşik) ısı transferini incelemiştir. Akışkan olarak demineralize su kullanmışlardır. Sürtünme faktörlerini geleneksel teoriye uyduğunu bulmuşlardır (Gao vd. [48]). 8 µm'den 990 µm'ye kadar değişen hidrolik çaplar ve 0,002 ile 5000 arasında değişen Reynolds sayısı ile 150 makale (500 veri seti) Steinke ve Kandlikar tarafından gözden geçirilmiştir (Steinke ve Kandlikar [49]). Mikrokanallarda genellikle geleneksel teoremin geçerli olduğu sunucuna varmışlardır. Son vd. farklı kenar oranlarındaki dikdörtgen kesitli kanalları incelediği çalışmada debi ve basınç düşüşü değerlerinden kayma gerilmesi ve kayma hızı değerlerine geçişin güvenilirliğini göstermiştir. W/H=10 için %10, W/H=20 için %5 gibi hatalar ile çalışmıştır(Son [50]). Costaschuk vd. 169 µm hidrolik çap ve 230 ile 4740 arasında Reynold sayılarına sahip alüminyum bir dikdörtgen mikrokanal içinde akan suyu incelemiş ve Poiseuille sayılarının geleneksel teoriyi doğruladığını bulmuştur(Costaschuk vd. [51]). Silverio vd. farklı kesitli ve 200 µm-500 µm arasında değişen hidrolik çaplarda mikro kanallarda tek fazlı tam gelişmiş akış için basınç düşmesi ve ısı yayılımı üzerinde çalışmıştır. Akışkan su ve Re=800 idi. Laminer teoriden sapmanın gözlemlenmediğini ifade etmişlerdir (Silverio ve Moreira [52]). Mirmanto tek fazlı akış için su ile dikdörtgen kesitli kanalda basınç düşüşü ve

sürtünme katsayısı için çalışmalar yaptı. Hidrolik çapın basınç düşüşü üzerinde etkisinin büyük olduğunu ancak sürtünme katsayısında o kadar etkili olmadığını tespit etti (Mirmanto [53]). Sürtünme katsayısı bulunmasında laminar akış için giriş bölgesi düzeltilmesi yapıldığında kabul edilebilir sonuçlar verdiğini görmüştür.

Bunun yanında, bazı çalışmalar geleneksel teoremin mikro kanallara uygulanabilir olmadığını gösterdi. Pfund vd. 128 μm ile 521 μm arasında değişen yüksekliklerde ve 10 mm genişlikte mikro kanallar içindeki basınç düşmelerini 60-3450 arasında değişen Reynolds değerlerinde su ile incelediler. Sonuç analizlerinde deneysel belirsizlikler ve sistematik hatalar göz önünde bulundurulsa da geleneksel teoriden sapma yüksekti (Pfund vd. [54]). Bahrami vd. hidrolik çapı 89 μm -95 μm olan farklı kesit geometrilerine sahip kanallar ile $Re=16-64$ aralığında deneyler yapmış ve farklı matematik modeller ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Burada %10 civarında farklılıklar bulmuştur (Bahrami vd. [55]). Jiang vd. 900 $\mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ kesitinde 80 mm uzunluğunda mikro kanallarda akışkan akışı ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde çalıştılar (Jiang vd. [56]). Buldukları sürtünme faktörleri teorik değerin %20 ila %30'u arasında idi. Bulunan kritik Reynolds sayısı da 1100'dü. Bu sayı geleneksel teoreminkinden düşüktü. Toh vd. akışkan olarak su ile çalışarak mikro kanallar içindeki akışkan akışının ve ısı transferinin sayısal hesaplamasını yaptı. Kanal genişliği ve derinliği sırasıyla 50 μm ile 64 μm ve 280 μm ile 320 μm arasındaydı (Toh vd. [57]). Mikro kanallar 150-200 kanallı paralel silikon mikro kanallardı. Sıcaklığın artırılmasının basınç düşüşünü azalttığını ve dolayısıyla Poiseuille sayılarını da düşürdüğünü buldular. Kohl vd. (Kohl vd. [58]) akış yönü boyunca entegre minyatür basınç sensörleriyle düz kanal test bölümleri kullanarak hidrolik çapları 25 μm ile 100 μm arasında olan kanallarda, Reynolds değeri 4,9 ile 2068 arasındaki akışlarda inceleme yaptılar. Bu teknik, giriş etkileri ve hidrodinamik ilerleyen akışı hesaba katmak için bir yol sağladı. Yazarlar mikro kanallar için sürtünme faktörünün standart geniş kanalların verilerine bakılarak doğru bir şekilde belirlenebileceğini ileri sürdüler. İlave olarak, önceki araştırmadaki tutarsızlığın cihaz hatalarından ve sıkıştırılabilirlik etkilerinden olabileceğini açıkladılar. Buna ek olarak, ilerleyen akışa sahip kanal içindeki basınç düşüşünün tümüyle ilerlemiş olan akış basıncı düşüşünün %17'sinden yüksek olduğunu açıkladılar. Shen vd. 300 $\mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ kesitinde pürüzlü duvar yüzeylerine sahip mikro kanallar içindeki akış ve ısı transferi üzerinde, deionize su ile $Re=162-1257$ arasındaki akışta çalıştılar (Shen vd. [59]). Laminar akış üzerindeki yüzey pürüzlülüğünün etkisinin

önemli olduğunu ve basınç düşüşü üzerinde giriş sıcaklığının etkisini gösterdiler. Ayrıca, bulunan Poiseuille sayısı geleneksel teorininkinden daha büyük ve Reynolds sayısına bağlı olduğunu görmüşlerdir. Akbari vd. (Akbari vd. [60]) en-boy oranı 0,13 ile 0,76 arasında ve Reynolds sayıları 1 ile 35 arasında değişen dikdörtgen mikro kanalda su akışının basınç düşüşü üzerine deneyler yaptılar. Onların bu analitik model ve deneysel verilerine göre, Poiseuille sayıları sadece test edilen Reynolds sayıları aralığında kalan mikro kanal geometrisinin bir fonksiyonu olarak bulundu. Sürtünme faktörleri bu nedenle geleneksel teorininkilerden farklıydı. Bharati ve Bux(Bharati ve Bux [61]), 215 µm × 821 µm kesitindeki kanalda Re=140-941 arasında çalışmıştır. Deneysel verilerini ANSYS ile elde ettiği veriler ile karşılaştırmış ve yüksek Re değerlerinde sayısal çözüm ile uyumun azaldığını görmüşlerdir. Bütün bu çalışmaların bu tez çalışmasından farkı daha yüksek Re değerlerinde gerçekleştirilmiş olmaları ve deneysel çalışmanın mikro-PIV ile yapılmasıdır.

1.1.9.2 Dikdörtgen Kesitli Mikro Kanallar İçin Analitik Hesaplama

Sıkıştırılamayan Newtonian akışkan için süreklilik ve Navier–Stokes denklemleri aşağıdaki gibidir (White [62]):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + b_i \quad (1.29)$$

u_i – i yönündeki (u,v,w) anlık hız bileşeni

ρ - akışkanın yoğunluğu

μ - akışkanın dinamik viskozitesi

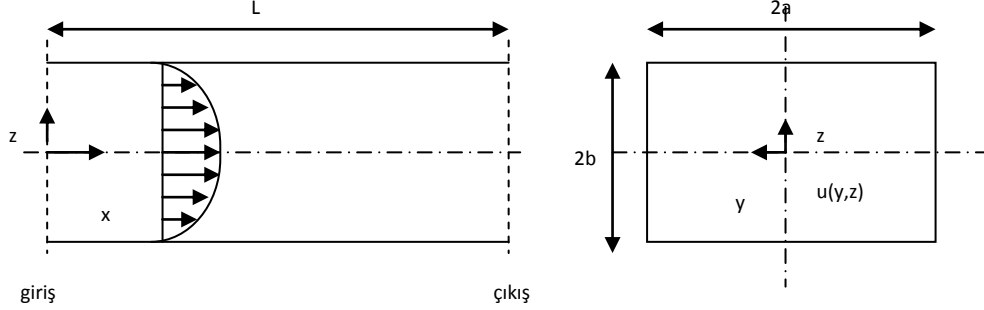
b_i – birim kütle başına kütleli kuvvet

Burada viskozite sabit kabul edilmiş ve sıcaklığa göre hesaplanmıştır. x, y, z sırasıyla, akış yönü, kayma yönü ve derinlik yönü olarak alınmıştır (Şekil 1.10).

Kütle kuvveti b_i için, başka bir dış kuvvetin etkisi olmadığında sadece yerçekimi kuvveti ($b_z = -gz$, $b_x = b_y = 0$) dikkate alınır ve basınç ile beraber tek bir büyüklük olarak hidrodinamik basınç olarak alınır(White [62]):

$$\hat{p} = p + \rho gz \quad (1.30)$$

z- dikey koordinattır.



Şekil 1.10 Hız gelişimlerinin incelendiği kanal boyutlandırmaları

Tam gelişmiş akış koşullarında, hız akış yönü koordinatı x'den bağımsızdır. Eksenel hız, sadece y ve z'nin fonksiyonudur. Kanalın eksen boyuncası akış tek yönlüdür ve böylece z ve y yönündeki hız bileşenleri v ve w sıfır olur. Böylece eşitliğin solundaki taşınım terimleri yok olur ve akış doğrultusundaki (x-ekseni) momentum denklemi şu şekilde sadeleşir:

$$0 = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1.31)$$

y ve z yönlerinde, basınç hariç bütün terimler yok olur. Basınç gradyeni sadece x'in fonksiyonudur. Aynı zamanda toplam hidrodinamik basınç, statik basınç olarak alınabilir, çünkü yerçekimi kuvvetlerinin x'e göre türevi 0'dır:

$$\frac{d\hat{p}}{dx} = \frac{d(p + \rho gz)}{dx} = \frac{dp}{dx} \quad (1.32)$$

Böylece :

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \text{ olur.} \quad (1.33)$$

Bu denklem dikdörtgen kesit alan için çözüldüğünde aşağıdaki hız ifadesi elde edilir (White [62], Nguyen ve Wereley [63]):

$$u_1(y, z) = \frac{16a^2}{\mu \pi^3} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{(i-1)/2} \left[1 - \frac{\cosh(i\pi z / 2a)}{\cosh(i\pi b / 2a)} \right] \frac{\cos(i\pi y / 2a)}{i^3} \quad (1.34)$$

$$Q = \frac{4ba^3}{3\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \left[1 - \frac{192a}{\pi^5 b} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh(i\pi b/2a)}{i^5} \right] \quad (1.35)$$

Burada Q hacimsel debi, a ve b kanalın genişlik ve yükseklik değerlerinin yarısı, μ dinamik viskozitedir.

Hız profilini çıkarmak için boyutsuz sayılar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$y^* = \frac{y}{L}, \quad z^* = \frac{z}{L}, \quad \alpha_n = \frac{(2n-1)\pi}{2k}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (1.36)$$

Boyutsuz hız profili için (Panton [64]) aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$v^* = \frac{(k^2 - z^{*2})}{2} + \frac{2}{k} \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^n}{\alpha_n^3} \cos(\alpha_n z^*) * \frac{\exp(y^* - 1) + \exp(-\alpha_n(y^* + 1))}{1 + \exp(-2\alpha_n)} \quad (1.37)$$

Buradan $v(y,z)$ aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$v = v^* * \frac{L^2}{\mu} * \frac{dp}{dx} \quad (1.38)$$

Kanalın kesit alanına ait geniş kenar $2L(y\text{-yönü})$, dar kenar $2kL(z\text{-yönü})$ olarak ifade edilmiştir. Debi bilindiği ve akış tam gelişmiş ve daimi kabul edildiği için, (1.35) numaralı formül ile dp/dx hesaplanmıştır. (1.37) ve (1.38) kullanılarak, belirli koordinatlardaki hız profilleri çıkarılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, mikro kanallarda metrolojik akış araştırmaları için, mikro kanallarda sıvı akışının incelenmesi için kullanılan mikro-PIV'i ekonomik şekilde kurmak, yüksek yatırımlar gerektirmeden, sistemin performansını arttırmaktır. Bir PIV sisteminin hassaslığını ve hesaplama kabiliyetini etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunun için de farklı kesitlerdeki kanal ve farklı çaptaki tanecikler ile çeşitli şartlarda ölçümler yapılacaktır.

İzleme taneciklerinin besleme oranlarının akışı ne kadar etkilediği ve gelişme boyunun etki mesafesinin girişten ne kadar olduğunun tespit için de, sayısal analiz programı kullanılarak değerlendirmeler yapılacak ve çalışmadaki deney koşulları için, bu parametrelerden ölçüm sonuçlarını etkileyip etkilemeyeceği tespit edilecektir.

Mikro kanallarda basınç düşüşü tespitinde, sayısal analiz metodları ve deneysel sonuçlarla uyumluluğu kontrol edilecektir.

1.3 Hipotez

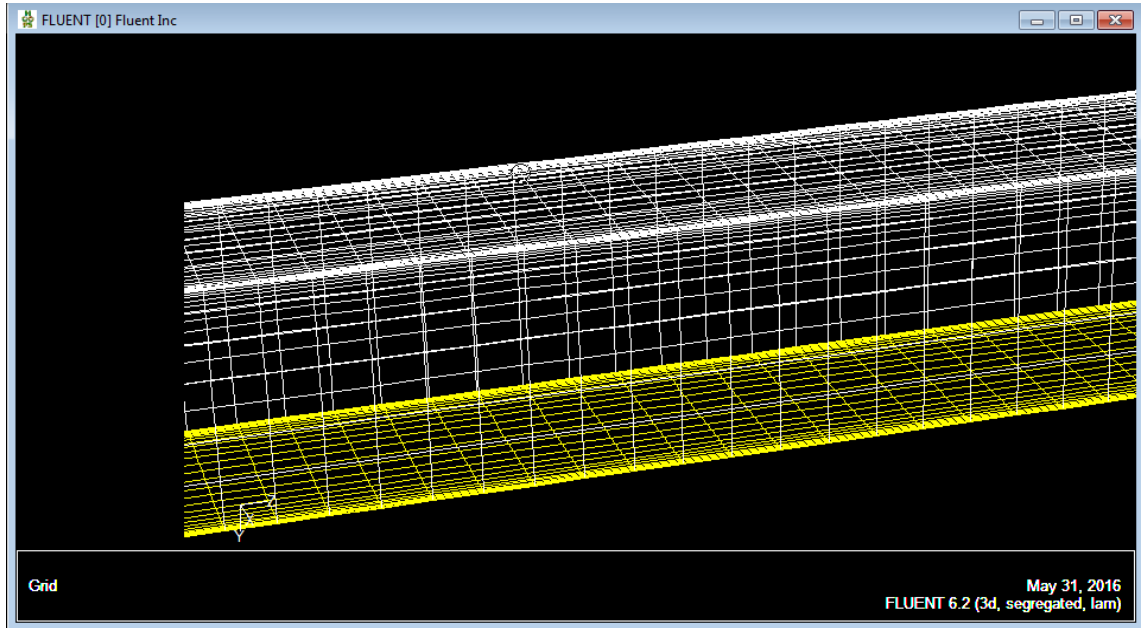
Sistemin maliyetini en çok arttıran, yüksek güçteki lazer ve hızlı kameralardır. Bu çalışmada, hızlı kamera yerine çift çekimli CCD kamera kullanılmış ve PIV(PIV-particle image velocimetry) sisteminin dinamik hız aralığını, kameranın binning özelliği ile arttırabilecek ve kameranın çift-çekim özelliği ile de mekânsal çözünürlüğü koruyacak bir metot düşünülmüştür. Binning, dikey, yatay veya her iki yönde de piksel yüklerini birleştirerek daha büyük tek bir yük haline getirme işlemidir. Binning özelliği, seçilen alan boyunca mekânsal çözünürlüğü azaltmasına rağmen, kamera hızını arttırmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan maliyeti yüksek hızlı kameralar yerine, maliyeti daha düşük olan normal hızdaki CCD kameralar ile kameraların CCD binning ve çift-çekim özelliği bir arada kullanılarak mevcut hızları arttırıldığında da iyi sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Daha düşük maliyetli sistemin kapasitesi bu şekilde arttırılmış ve ölçüm hataları aynı düzeyde tutulmuş olacaktır.

BÖLÜM 2

SAYISAL ANALİZLER

2.1 Sayısal Analiz için Kanal Çözüm Ağı(Mesh) Oluşturulması

Sayısal analiz çalışmaları için öncelikle kanalların çözüm ağı oluşturulmuş ve kenarlara yakın daha sık ölçüm hücreleri tanımlanmıştır(Şekil 2.1). Çizelge 2.1’de çözüm ağlarına ait bilgiler görülmektedir.



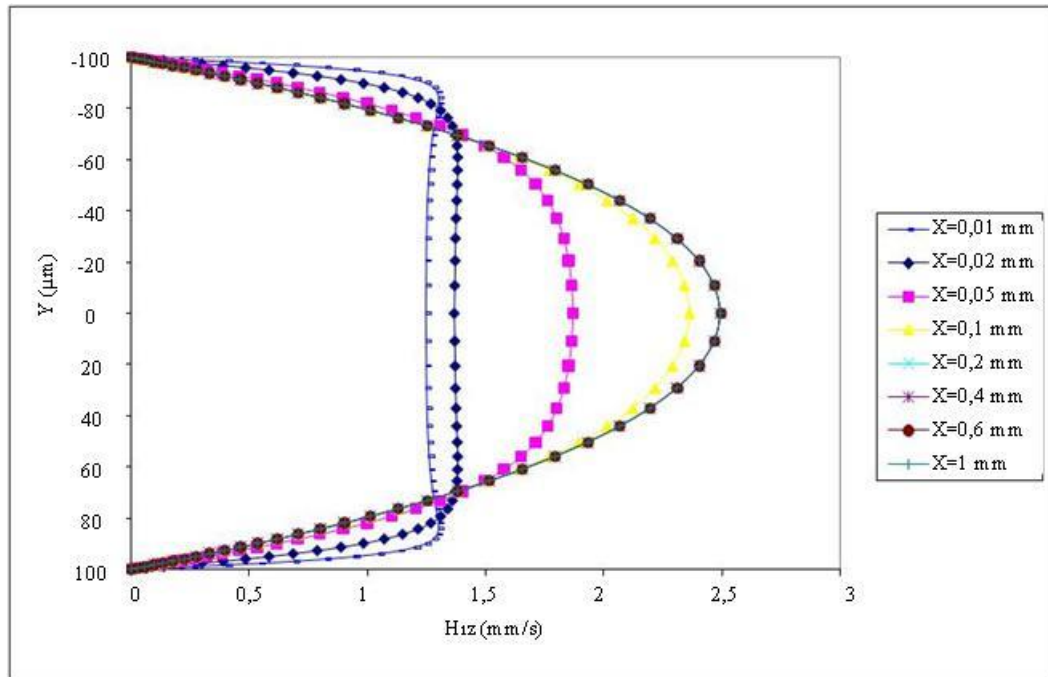
Şekil 2.1 Çalışmalarda kanallar için FLUENT programında kullanılan çözüm ağından bir görüntü.

Çizelge 2.1 Kanallar için FLUENT’de kullanılan çözüm ağı değerleri

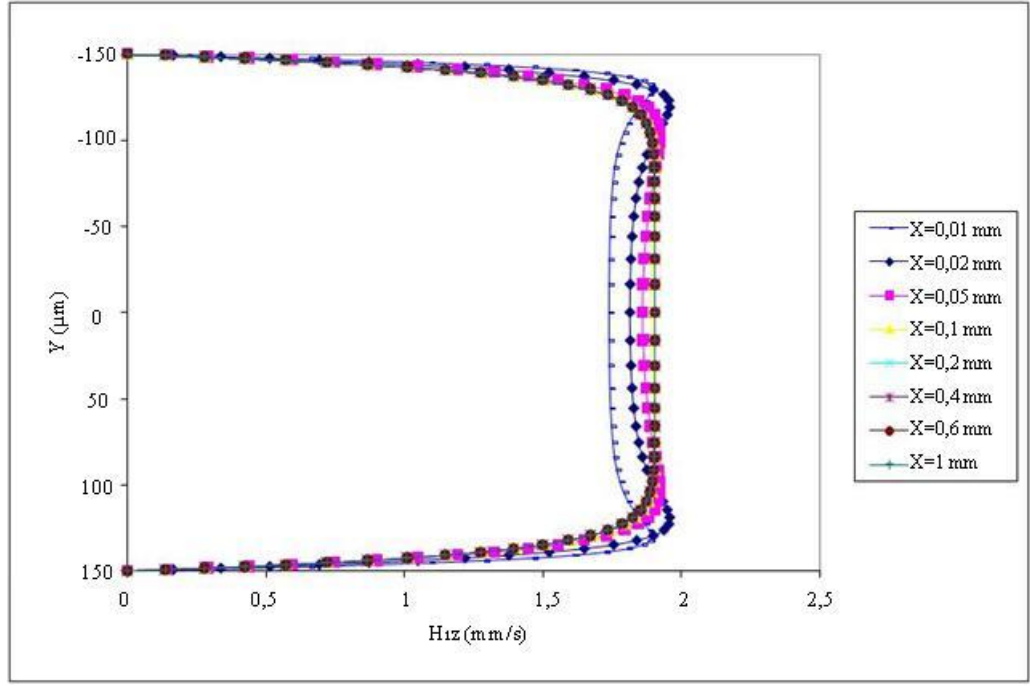
Kanal	Hücre	Yüzey	Nokta
200 μm $\times$ 200 μm	1049580	3259116	1162500
30 μm $\times$ 300 μm	1500000	4700300	1705341
40 μm $\times$ 400 μm	1500000	4700300	1705341

2.2 Gelişme Boyu Analizi

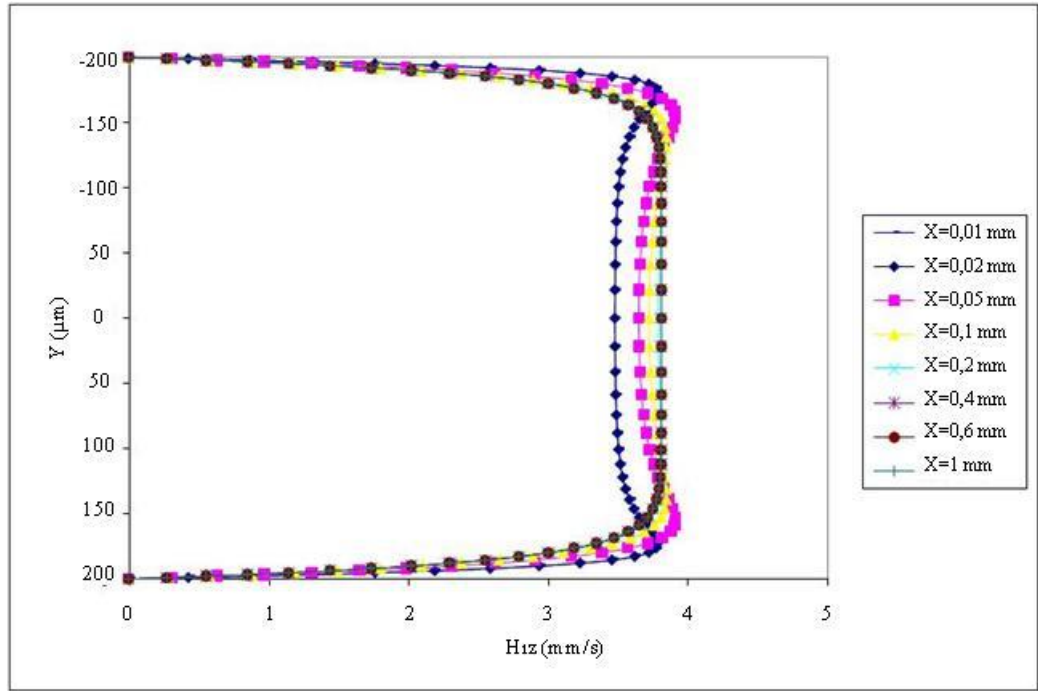
FLUENT programı kullanılarak, Şekil 2.1’de görülen çözüm ağı kullanılarak çalıştığımız kanallar için, tam gelişmiş laminar akış ve Newtonian akışkan için, hız profilleri çıkarılmıştır. FLUENT’de, “Models” menüsünde “solver” kısmında, formül “implicit”, “solver” “segregated”, “gradient option” “cell based” olarak seçilmiştir. Daha sonra çalışılan debi bilgisi girilerek program iterasyona başlatılmıştır. FLUENT’den alınan hız verilerden, kanalların ortasındaki hız profili verileri seçilerek, 30 μm $\times$ 300 μm , 40 μm $\times$ 400 μm ve 200 μm $\times$ 200 μm kesitlerindeki kanallar için bu analizler gerçekleştirilmiştir(Şekil 2.2-Şekil 2.4).



Şekil 2.2 200 μm $\times$ 200 μm 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, hız profili gelişimi



Şekil 2.3 30 μm $\times$ 300 μm 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, hız profili gelişimi



Şekil 2.4 40 μm $\times$ 400 μm 'lik kanalda, ortalama akış hızı 2,4 mm/s'de, hız profili gelişimi

FLUENT programında, yaklaşık çalıştığımız hızlarda, kullandığımız kanallar için çıkarılan hız profillerinden, x-ekseni olarak tanımlanan akış yönünde 0,1 mm – 0,2 mm arasında gelişimin gerçekleştiği ve akışın tam gelişmiş olduğu görülmektedir. Bu çalışmada 50 mm uzunluğundaki kanalın çalışılan bölgesi yaklaşık orta noktalardadır.

Bu da girişten 20 mm kadar uzaklıkta çalışıldığı için gelişme boyunun etkisinde kalınmayacağını göstermektedir.

2.3 Literatürde Yer Alan Denklemler ile Gelişme Boyu Tespiti

Literatürde, dikdörtgen kesitli düşük Re sayılı mikro kanallar için verilen bazı gelişme boyu formüllerine göre yapılan hesaplamalarla, deneysel yapılan çalışmalar sonucunda çıkan gelişme boyları arasında, % 30'luk bir fark olduğu tespit edilmiş. Bunlara bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

Atkinson (Shah ve London [65]):

$$\frac{L_e}{D_h} = 0,59 + 0,056 Re \quad (2.1)$$

Chen (Shah ve London [65]):

$$\frac{L_e}{D_h} = \frac{0,6}{1 + 0,035 Re} + 0,056 Re \quad (2.2)$$

30 μm $\times$ 300 μm 'lik kanal için, $D_h = 54,5 \mu\text{m}$ ve 1,2 mm/s hız için $Re = 6,47 \times 10^{-2}$ alındığında, (2.1) ve (2.2) denklemleri kullanılarak, sırasıyla $L_e = 0,0320$ ve 0,0325 mm bulunmuştur. Şekil 2.3'den görüldüğü gibi, 30 μm $\times$ 300 μm 'lik kanal ve 1,2 mm/s ortalama hız için, L_e yaklaşık 0,1 mm'dir. Ancak her iki durumda da bu gelişme boyu oldukça küçüktür ve bu tez kapsamındaki deneyler kanal girişinden yaklaşık 20 mm uzaklıkta alındığından, akışın karlılığının sağlandığı bölgede yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmada deney düzeneği uygun olmadığı için gelişme boyu ile ilgili deneysel çalışma yapmak mümkün olmamıştır.

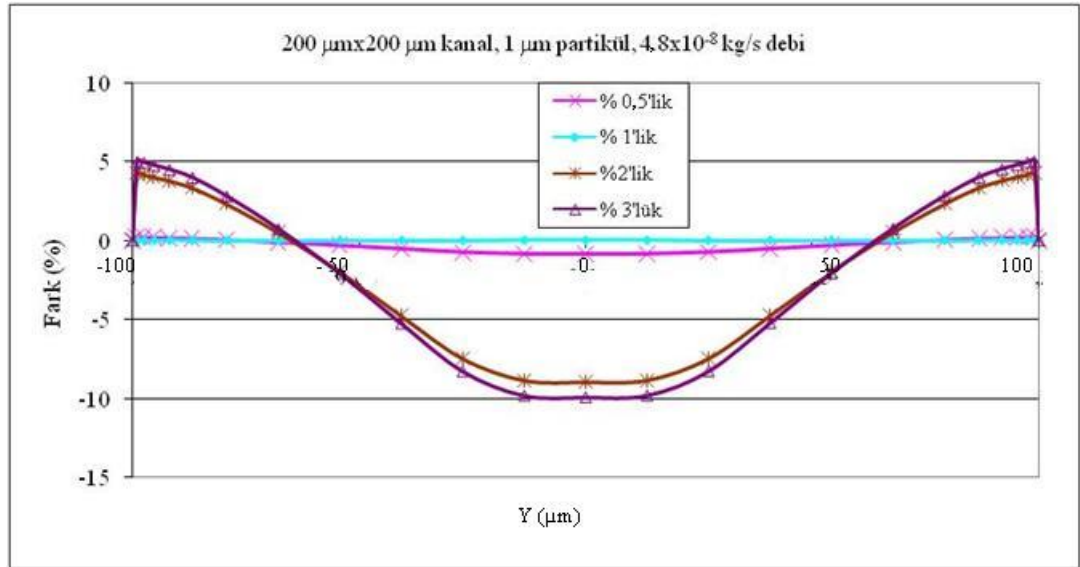
2.4 Tanecik Konsantrasyonundan Hız Profilinin Etkilenmesinin FLUENT ile Sayısal Analizi

FLUENT ile çalışmalarda kullanılan, 40 μm $\times$ 400 μm ve 200 μm $\times$ 200 μm kesitlerindeki mikro kanallar için, 0,5 μm , 1 μm ve 2 μm çaplarındaki tanecik ve farklı akışkan hızlarında hesaplamalar yapılmıştır. Burada, suya farklı konsantrasyonlarda tanecik beslenmiş ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2.1'de tanımlanan çözüm ağı kullanılarak üç boyutlu analizler yapılmıştır. Öncelikle deneylerde kullanılan polisitiren taneciğin yoğunluk bilgisi, FLUENT veri

tabanına girilmiştir. Daha sonra, “discreate phase” seçiminde homojen bir “injection” olarak, beslenen taneciklerin çap ve kütleli debi bilgileri girilmiştir. “Models” menüsünde “solver” kısmında, formül “implicit”, “solver” “segregated”, “gradient option” “cell based” olarak seçilmiştir. “Viscous model” menüsünden akış laminar olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde kütleli hız tanımlandıktan sonra itersyon yapılmıştır. Her bir hız, tanecik çapı, kanal kesiti ve konsantrasyon oranı için hesaplar yapılmıştır. FLUENT’den alınan hız verilerden, kanalların ortasındaki hız profili verileri seçilerek, akışkanımız olan suyun içinde hiç tanecik olmadığı durumla karşılaştıracak şekilde Şekil 2.5’den Şekil 2.8’e kadar olan grafikler elde edilmiştir.

Bu sayısal analiz çalışmasındaki yüksek konsantrasyon oranları, farkları daha rahat görebilmek için kullanılmıştır. Genellikle, sudaki tanecik konsantrasyonu artışı ile hızlardaki bağıl hata artmıştır. Ancak bu fark 0,5 μm çapındaki tanecikler hariç, pek kayda değer değildir. 0,5 μm çapındaki tanecikler için de, % 0,5’in altında kabul edilebilir sınırlar içindedir. Bu çalışmada 1 μm ve 3 μm çapındaki tanecikler kullanıldığı için, çapla ilgili etkiler ihmal edilmiştir.

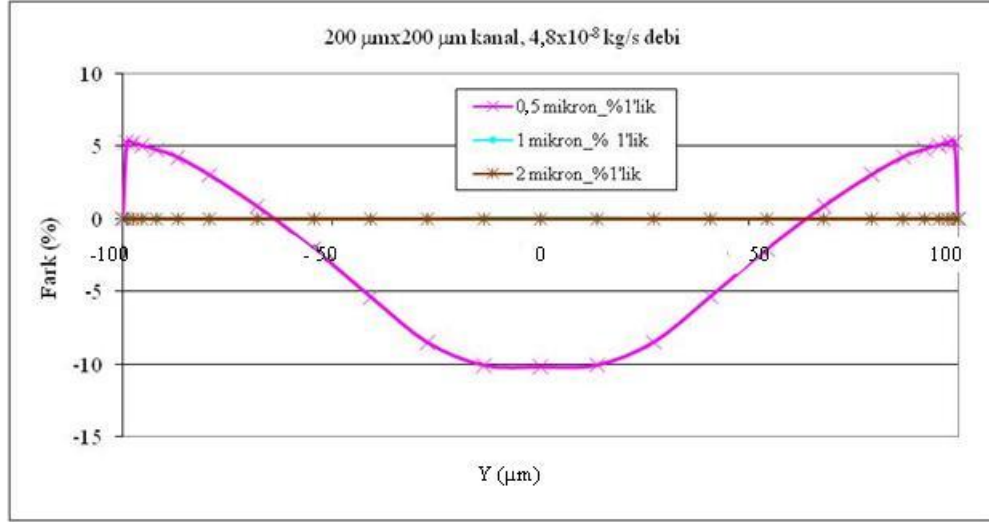


Şekil 2.5 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, suya farklı konsantrasyonlarda 1 μm 'lik tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar

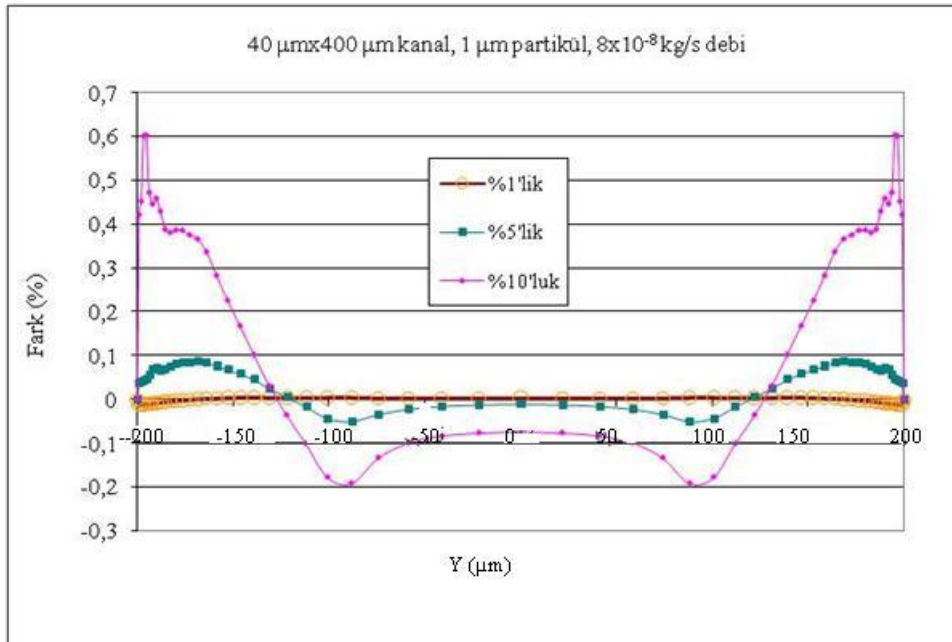
Tanecik çaplarına göre değerlendirdiğimizde, küçük taneciklerde konsantrasyonun etkisi daha fazla olmaktadır. 0,5 mm çapındaki taneciklerin kullanımında, hızdaki bağıl hata %10'lara varabilmektedir. (1.7) ve (1.8) numaralı denklemlerden de görüldüğü

gibi, Brownian hareketinden dolayı olan difüzyon mesafesi, tanecik çapının küçülmesi ile artmaktadır (Olsen ve Adrian [26], Olsen ve Bourdon [66]).

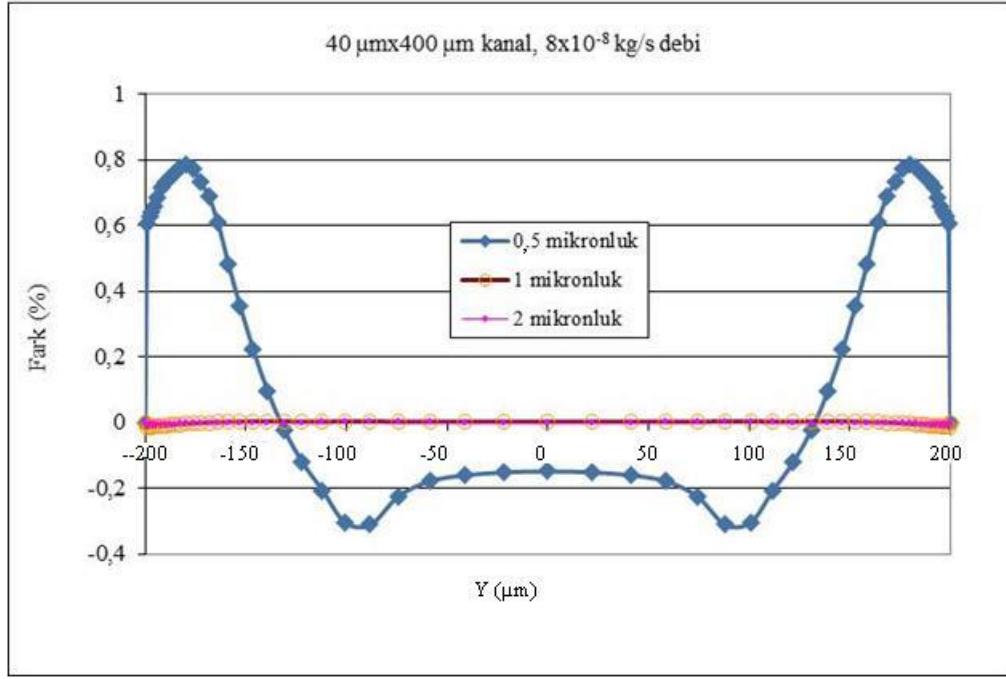
Dikdörtgen ve kare kesitli kanallarda, %1 ve altında tanecik oranına sahip akışkan kullanıldığında hız ölçümlerindeki hatalar sıfıra yakın olmaktadır.



Şekil 2.6 200 µm × 200 µm'lik kanalda, ortalama akış hızı 1,2 mm/s'de, suya farklı çaplarda %1'lik konsantrasyonda tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar



Şekil 2.7 40 µm × 400 µm'lik kanalda, ortalama akış hızı 5 mm/s'de, suya farklı konsantrasyonlarda 1 µm'lik tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar

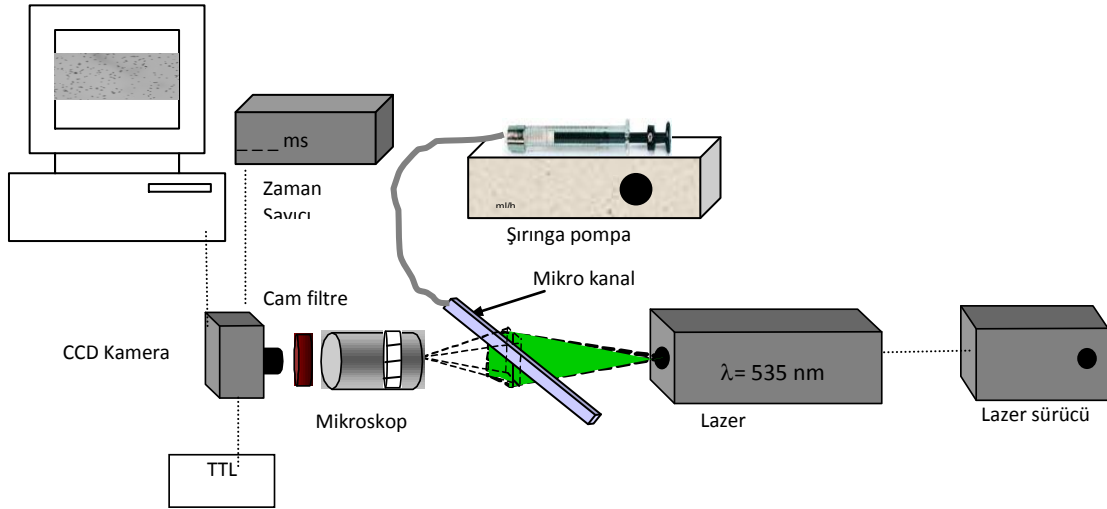


Şekil 2.8 40 µm × 400 µm’lik kanalda, ortalama akış hızı 5 mm/s’de, suya farklı çaplarda %1’lik konsantrasyonda tanecik beslendiğinde tanecik bulunmayan suya göre farklar

Bu çalışmada ve literatürdeki çalışmalarda, % 0,5’in üzerinde tanecik konsantrasyonu kullanılmamaktadır. Buradaki sonuçlara göre, tanecik konsantrasyonunun akış profilini bozmaması açısından güvenli bölgede çalışılmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR**3.1 Deney Düzenğinde Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri**

Bu çalışmada kullanılan mikro-PIV düzeni Şekil 3.1’de görülmektedir. Mikro-PIV sistemi, bir ışık kaynağı, mikroskop, kamera, cam filtre ve görüntü işleme yapabilen bir programdan oluşur. Akış için ise izleme partikülleri, kanal ve pompa gereklidir (Şekil 3.2).



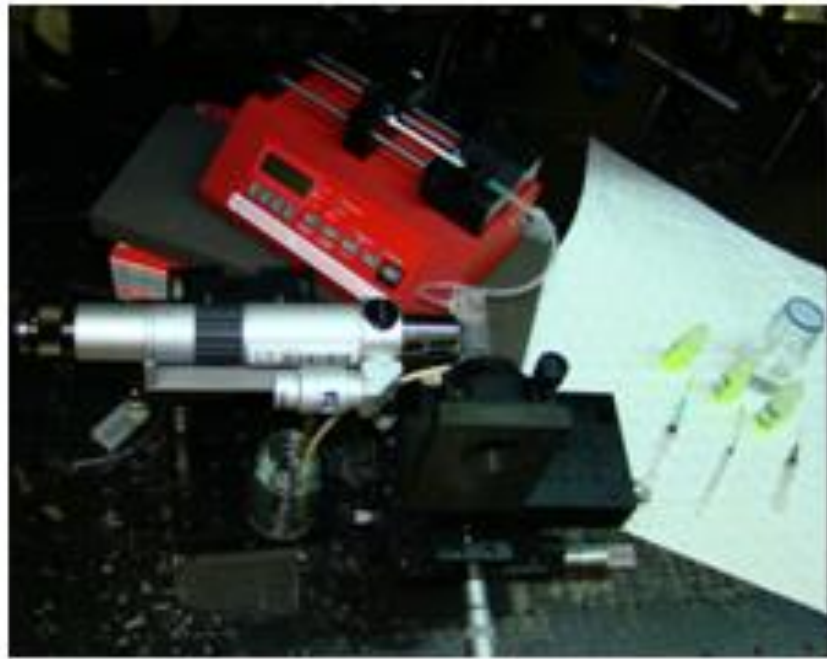
Şekil 3.1 Mikro-PIV sisteminin şematik gösterimi

Akış çalışmalarında, 50 mm boyundaki, $30 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ve $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitinde dikdörtgen ve kare borosilikat camdan mikro kanallar kullanılmıştır.

Besleme için şırınga pompa kullanılmıştır. Programlanabilir şırınga pompa: NE-1000, New Era Pump Systems, 1 cc şırınga ile 0,73 $\mu\text{l/h}$ den, 60 cc şırınga ile 2120 ml/h debiye kadar çalışma aralığı sağlanabilmektedir.

Mikro-PIV sisteminde izleme partikülleri olarak, 1 μm - 3 μm arasındaki çap larda kırmızı ve floresan yayınıma sahip, polisitiren mikro kürecikler (Duke Scientific, USA) kullanılmıştır. Yoğunluğu, $\rho_p=1,05 \text{ g/cm}^3$ ve ilgili dalga boyunda kırınım indeksi 1,58'dir. Kırmızı mikro küreciklerde, uyarılma 542 nm, yayma 612 nm dalga boyundaki ışık ile olmaktadır. Üreticinin sertifikasına göre tanecik boyut dağılımının standart sapması, 0,011 μm civarındadır.

Burada floresan özellik, fotoğraflamada kareye giren taneciklerin dışındaki görüntüleri elemek amacıyla kullanılır ve filtre ile de sadece bu taneciklerin yaydığı ışığın algılanması sağlanır. Sistemde, 1 $\times$ -10 $\times$ arasında büyütme yapan bir mikroskop ve yüksek hassasiyetli hızlı silikon CCD kamera kullanılmaktadır. Sisteme beslenen taneciklerin görüntüsü, akışın iyi değerlendirilmesi için yüksek numaralı, sınırlı kırınımdaki optikle ve yüksek büyütme oranıyla resimlenmiştir.



Şekil 3.2 Deney düzeneğinin bir fotoğrafı

10 $\times$ Zoom Lense sahip sonsuzluğa düzeltilmiş (infinity correct) Hirox Coaxial MX-10C mikroskop iki farklı objektif ile kullanılmıştır ve eş eksenli dikey aydınlatmalıdır. OL-700II objektif, 700 $\times$ -7000 $\times$ arasında ayarlanabilir büyütme yapabilmektedir. Diğer bir objektif olarak, 140 $\times$ -1400 $\times$ arasında büyütme yapabilen OL-140II kullanılmıştır. Bu objektiflere ait değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Objektif değerleri

Objektif lens	OL - 140 II	OL - 700II
Büyütme	140 - 1400x	700 - 7000x
Çalışma Mesafesi	12 mm	3,4 mm
Horizontal View	(2,21 – 0,23) mm	(440 – 40) μ m

Çalışmalarda ışık kaynağı olarak, 6 W gücünde 532 nm dalga boyunda Nd:yag Coherent Verdi V6 sürekli lazer ve enerji değerleri Çizelge 3.2’de verilen çift kaviteli Nd:yag darbeleri(pulse) Ekspla NL301D lazer kullanılmıştır. Nd:yag darbeleri lazer darbe enerjilerini ayarlayabilen bir ünite ile kullanılmıştır. Bu ünite kullanarak lazerin gücü %0-%100 arasında değiştirilebilmektedir. Çizelge 3.2 tek bir lazerin hangi oranda ne kadar enerjide ışık verdiğini göstermektedir. Sürekli lazer kullanılırken gücünün %10-15’inde kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Nd:yag darbeleri lazerin farklı güç oranlarındaki ışık enerji değerleri

Güç Oranı (%)	Darbe Enerjisi (mJ)
10	3
20	4
30	16
50	50
70	83
100	160

Çalışmalarda görüntüleme için iki farklı kamera kullanılmıştır. Biri için ½” silikon Prosilica CCD kamera, diğeri çift-çekimli Pixel Fly Qe siyah-beyaz CCD kameradır. Çift-çekimli kamera, 500 nm – 550 nm dalga boyu aralığında quantum etkinlik değeri %62 civarında olan, düşük ışık görüntü sensörüne (ICX285AL) sahiptir. Kameraların özellikleri sırasıyla Çizelge 3.3 ve 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 ½” silikon Prosilica CCD kamera için; normal, 2×1 ve 3×1 modlarındaki piksel sayı ve boyutları

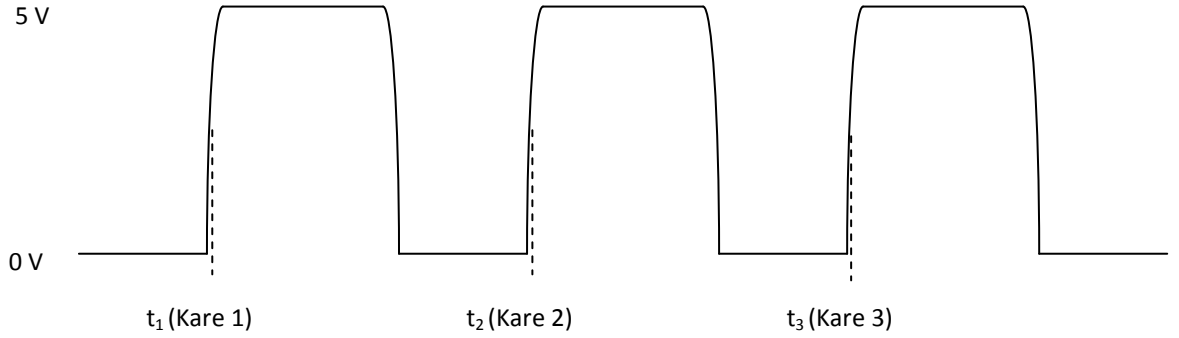
Binning	Piksel Sayısı	Piksel Boyutu	FPS
Normal	1360×1024	4,65 µm × 4,65 µm	20,1
2×1	1360×512	4,65 µm × 9,3 µm	33,4
3×1	1360×341	4,65 µm × 13,95 µm	42,2

Çizelge 3.4 Çift-çekimli Pixel Fly Qe siyah-beyaz CCD kamera için; normal ve 2×1 modlarındaki piksel sayı ve boyutları

Binning	Piksel Sayısı	Piksel Boyutu	FPS
Normal	1360×1024	6,6 µm × 6,6 µm	12
2×1	1360×512	6,6 µm × 13,2 µm	23

Kameranın çıkış sinyali, sayısal olarak direkt bilgisayara aktarılmaktadır. Bu sinyalin 8 bit veya 12 bit olması yazılım ile seçilebilmektedir. Çalışmanın ilk ölçümlerinde 8 bit kullanılmıştır. Görüntüler siyah beyaz olarak işlenmiştir. Kameradan gelen görüntüler doğrudan RAM’e aktarılarak ekranda görüntülenmektedir. Ölçüm sırasında yazılımda hiç bir işlem yapılmamaktadır. Özel yazılım sayesinde, kameradan gelen sayısal sinyaller (görüntüler), önce bilgisayarın RAM’inde ayrılmış olan adreslere yerleştirilmiştir. Bu sinyaller için 1,2 GB bir yer ayrılmıştır. RAM’de ayrılmış olan bu alan kameradan gelen görüntülerle hızla doldurulur ve dolduktan sonra, yazılım görüntü almayı durdurur ve RAM’deki bilgileri sabit diske kaydeder. Bunun sayesinde, sıvı akışı zamanındaki görüntüler yüksek hızla elde edilir. Ayrıca kullanılan kamera, sınırları yazılım yardımı ile belirlenen, merkezi ise kameranin merkezi ile aynı olan daha küçük karelerden görüntü alarak bilgisayara gönderebilmektedir. Görüntüler RAM’de standart (hiçbir sıkıştırma yapmadan ve bilgi kaybetmeden) “bmp” ve “avi” formatında dosyaya kaydedilmektedir. Daha sonra bu görüntüler PIV yazılımı ile açılarak ve ileride bahsedilen algoritmalara uygun olarak işlenmiştir.

1×-10× büyütmelede elde edilen görüntüler incelenmiştir. Mikroskop + CCD kamera sisteminin mutlak büyütme değerleri, UME Optik Laboratuvarı'na izlenebilir plaka üzerinden yapılmıştır. Üzerinde eşit aralıklar ile eşit kalınlıkta çizgiler bulunan (18 µm-18 mm aralığında) plaka hem alttan kolime hem de üstten ortak eksenli aydınlatma ile aydınlatılarak, elde edilen ölçümlerin ortalama değerleri, sonraki hız ölçümlerinde kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Kameranın TTL sinyalleri

Darbeli lazer aydınlatmalı PIV sistemlerinde, iki ardışık görüntü arasındaki zaman ve çekim zamanı, kullanılan lazerin yinelenme hızı ve süresi ile belirlenir. Bu çalışmada olduğu gibi, sürekli lazer aydınlatmalı sistemlerde, mekanik bölücü kullanılarak yaratılan ışık darbeleri, çekimler arası zamanı ve darbe süresini tanımlar. CCD fotoğraf makinelerinin özelliklerinden biri de harici tetikleyicidir. Harici tetikleyici istenilen frekansta ayarlanabilir. Kameranın desteklediği maksimum çekim hızı buradaki üst limittir. Buradaki çalışmalarda, kamerayı tetiklemek için 5V TTL çıkışlı sinyal üretici kullanılmıştır. Ardışık çekimler arasındaki zaman, tetikleme frekansı ölçülerek belirlenmiştir. Aydınlatmanın yeterince güçlü olması neticesinde, kameranın poz zamanı 800-1200 µsaniye aralığında set edilmiştir. İki kare arasındaki zaman, kameranın veri almaya (exposure) başladığı zamanı çıkışa verdiği 5 V TTL sinyalinin yükselme sinyalinin orta (2,5 V) noktaları arasındaki zamana göre hesaplanmıştır (Şekil 3.3). Tetikleme frekansı ve çekim zamanı sayısal osiloskop kullanılarak ölçülmüştür.

Görüntüler ilk önce her bir kare için doğrusal bir görüntü iyileştirme işleminden geçirilerek yeniden avi formatlı dosyaya kaydedilmiştir. Her bir kare için düşük, L_{tr} ve yüksek, H_{tr} eşik değerleri (threshold) bulunmuş, L_{tr} 'den küçük piksel değerleri sıfıra (siyah), H_{tr} 'den büyük piksel değerleri ise 256'ya set edilmiştir.

Sonra tüm pikseller için, (3.1) deklemleri ile histogram denkleştirme işlemi yapılmıştır:

$$I(x, y) = I_o(x, y) \frac{256}{H_{tr} - L_{tr}} \quad (3.1)$$

Bunun neticesinde sinyal gürültü oranı (SNR) arttırılmıştır. İkinci aşamada her bir kare için histogram değerlerinde genel bir eşikleme yapılarak, görüntü kareleri ikili tabandaki verilere çevrilmiştir.

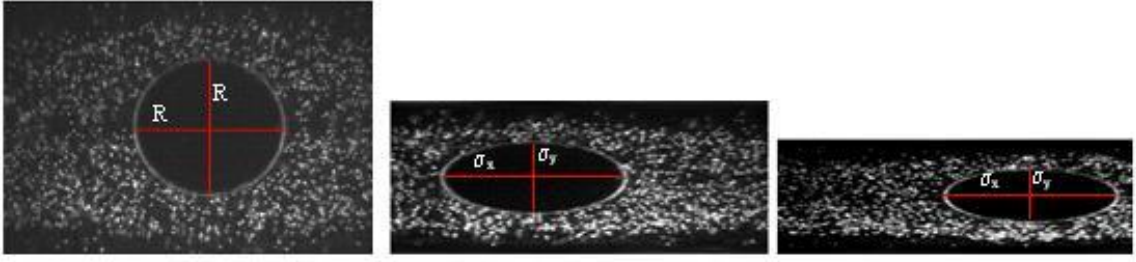
Burada karşılıklı-ilinti (cross-correlation) metotlarından, Gauss filtrelemesi kullanılarak, her iki ardışık kareden, taneciklerin yer değiştirmesi bulunmuştur. Daha sonra elde edilen kareler doğrudan karşılıklı ilinti işlemine tabi tutulmuş ve elde edilen yer değişim bilgilerinden, hız hesapları yapılmıştır.

Hız vektör alanları, grup-ortalaması üzerinden karşılıklı korelasyon algoritmasını kullanan, PIV analiz yazılımı kullanılarak elde edilmiştir (Meinhart vd. [67]). Bu yaklaşım, daimi akışlarda yer değişiminin bulunmasında geniş kullanıma sahiptir. Bu metot, düşük tanecik yoğunluğuna sahip akışlarda ölçümün doğruluğunu büyük oranda arttırmaktadır. Bu çalışmada, korelasyon fonksiyonlarının grup ortalaması kullanılmıştır. İlgili inceleme bölgelerinin anlık korelasyon fonksiyonlarının, pik yeri hesaplamalarına göre ortalaması alınmış ve korelasyon ortalaması ağırlıklı ortalama olarak bulunmuştur.

3.2 Binning Özelliği Kullanımı

Mevcut durumdaki tam kare aktarmalı (full frame) CCD'lerin büyük kısmı, 2×2, 4×4, 8×8, 64×64 şeklinde binning yapılmasına imkân yaratmaktadır. Fakat yüksek binningler, objelerin küçülmesine de neden olduğundan, görüntüde taneciklerin yerinin tespit edilmesini zorlaştırır ve dolayısıyla da mikroskobun büyütmesini arttırmak gerekir. Bunun sonucu görme alanımız azalır ve yüksek hızları ölçmek mümkün olmaz.

Binning özelliğinin kullanımı sırasında taneciklerin görüntüsünde nasıl bir değişim olduğunu görmek amacıyla Şekil 3.1'de görülen deney düzeneğinde, akışın içine bir dizi hava kabarcıkları beslendi. Bunların görüntüleri, normal, 2×1 ve 3×1 binning modlarında kaydedildi (Şekil 3.4). 2-boyutlu kabarcık şeklinin basit geometrik analizi ile, binning modunda kabarcığın daire şeklinin bozularak elipse dönüştüğü görüldü(Akselli ve Teke [68]).



Şekil 3.4 200 μm ×200 μm 'lik kanalda, akışkana beslenen hava kabarcığı fotoğrafları sırasıyla: Normal modda, 2×1 binning modunda ve 3×1 binning modunda

Hem tanecikler hem de hava kabarcıkları için elde edilen 3 boyutlu ACF yüzeylerinin maksimumunun yarısındaki tam genişliğinde (FWHM-full width at half maximum), iki boyutlu kesit alanı incelenmiştir. Elde edilen bulgular şu şekildedir:

- 1) Normal modda, tek parçacığın şekli, $\sigma_x = \sigma_y = R$ yarıçapında dairedir.
- 2) 2×1 binning modunda, tek parçacığın şekli, $\theta=0$ ve $\sigma_x / \sigma_y = 2$ olan, yatay elipstir.
- 3) 1×2 binning modunda, tek parçacığın şekli, $\theta=\pi/2$ ve $\sigma_x / \sigma_y = 0,5$ olan, dikey elipstir.
- 4) 2×2 modunda, tek parçacığın şekli, $\sigma_x = \sigma_y = R/2$ olan, dairedir.
- 5) 3×1 binning modunda, tek parçacığın şekli, $\theta=0$ ve $\sigma_x / \sigma_y = 3$ olan, yatay elipstir.

Burada elde edilen elipslerin eksenlerinin oranı binning değerine eşittir. Buradaki görüntüler için bu değer 0,5'dir.

Bu ön çalışmada, binning faktörleri değiştirilerek alınan değerler ile binning yapılmadan alınan değerler arasında çok büyük farklar olmadığı ve hataların kabul edilir düzeyde olduğu görülmüştür. Bu şekilde çalışarak aynı görüntüleri, 1,5 kat daha hızlı olarak alma avantajı sağlanmıştır ve okuma zamanı düştüğü için piksellerden gelen sinyallerin gürültü seviyeleri azalmış, sinyalin gürültüye olan oranı artmıştır.

Laminer akışta hızın bulunmasında, dikey binning modu (2×1), kamera hızını ikiye katladığı ve çözünürlüğü sadece bu tip akışlar için çok önem taşımayan y ekseninde düşürdüğü için oldukça caziptir. Bu yüzden analizler sadece bu konuya yönlendirilmiş ve bu analiz sonuçları diğer binning modlarına da genişletilmiştir.

3.3 40 μm $\times$ 400 μm Kesitli Mikro Kanalda Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması

Deney Şekil 3.1’de gösterilen düzenekte kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akışkan mikrokana, programlanabilir şırınga pompa (NE-1000, New Era Pump systems, Inc.) ile yönlendirilmiştir. Deneylerde çift-distile suya, floresan mikro tanecikler eklenmiştir. İzleme tanecikleri olarak 3 μm ’lik kırmızı polisitiren mikro kürecikler kullanılmıştır. Deneylerde, hacimsel tanecik konsantrasyonu yaklaşık %0,4 olarak ayarlanmıştır. Ölçümler, $22,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ olarak, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Hirox CX-10 mikroskop, OL-140I objektifi ile kullanılmıştır. Mikroskobun görüş alanı, 532 nm dalga boyundaki Nd:yag lazer ile kanalın arkasından olmak üzere aydınlatılmıştır. Mikroskop ile kamera arasına, sadece floresan ışımayı geçiren, uzun bant cam filtre konulmuştur. Görüntüler, 1360×1024 piksel çözünürlükte, piksel boyutu $4,65 \mu\text{m} \times 4,65 \mu\text{m}$ olan ve tam çözünürlükte hızı 20 fps olan, siyah-beyaz kamera (Prosilica) ile kaydedilmiştir. Kamera, yatay olarak 1×8 , dikey olarak 1×1024 ’e kadar tüm binning modlarını desteklemektedir.

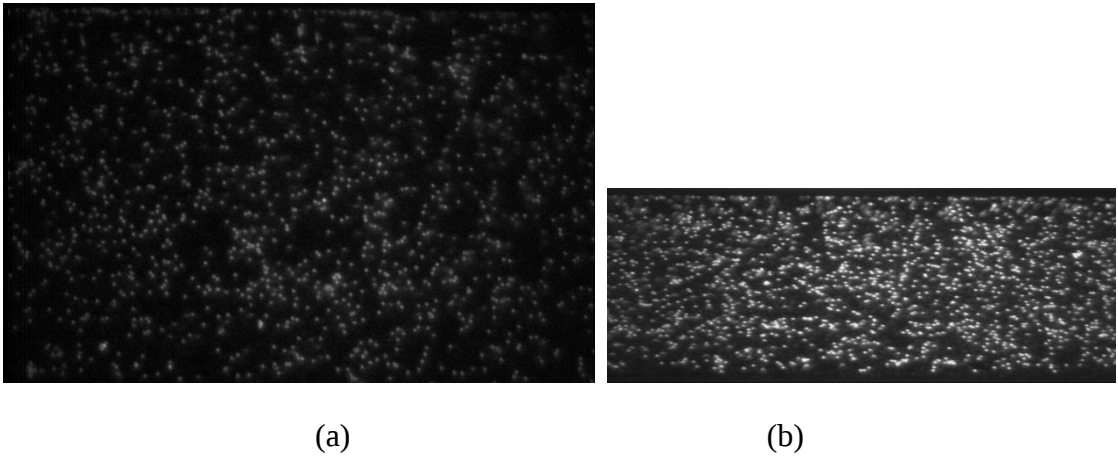
$40 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m} \times 50000 \mu\text{m}$ ’lik mikrokana, tam gelişmiş laminer akış incelenmiştir. Mikro-kanal tutucu, hassas ayarlama mekanizmasına tutturulmuş ve bu şekilde mikroskobun odaklandığı kanal derinliği değiştirilmiştir. Akış tanecikleri, $\sim 20 \mu\text{m}$ derinlikte, yani kanalın ortasında ve akış hızı pompanın hızı ayarlanarak istenen düzeye getirilerek kaydedilmiştir.

Pompa çalışmaya başladıktan 10 dakika sonra kayıtlar alınmaya başlanmış, böylece kanal içinde ölçülen akış, basınç sürmeli, daimi, tam gelişmiş ve sıkıştırılmaz akış olarak kabul edilebilir olmuştur. Ölçümler, normal modda ve 2 farklı binning modunda gerçekleştirilmiştir. PIV görüntüleri kaydedilirken kullandığımız kendi yazılımımızla, önce kamera normal moda ayarlanmış ve 300 farklı tam ekran görüntüleri bilgisayarın RAM’ine aktarılmıştır. Daha sonra kamera istenen binning moduna ayarlanarak, 300 kare daha alınmıştır. Bu çevrimi bitirdikten sonra, kaydedilen kareleri, sıkıştırılmamış TIFF formatında ana belleğe kopyalamış ve bilgisayar sisteminden gelecek gecikmelerden kaçınılmıştır. Görüntülerin analizi MATLAB’de yazdığımız program ile yapılmıştır.

Deneylerde, normal (tam ekran çözünürlüğünde) modda ve 2×1 ve 3×1 binning modlarında görüntüler kaydedilmiştir. Kameramızın hızı, normal modda 20 fps iken, 2×1 modunda 33 fps ve 3×1 modunda 42 fps değerine çıkmıştır.

Piksel-altı interpolasyon hesaplamaları Bölüm 1.1.8’de anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Akışa ait hız alanları elde edilmiştir.

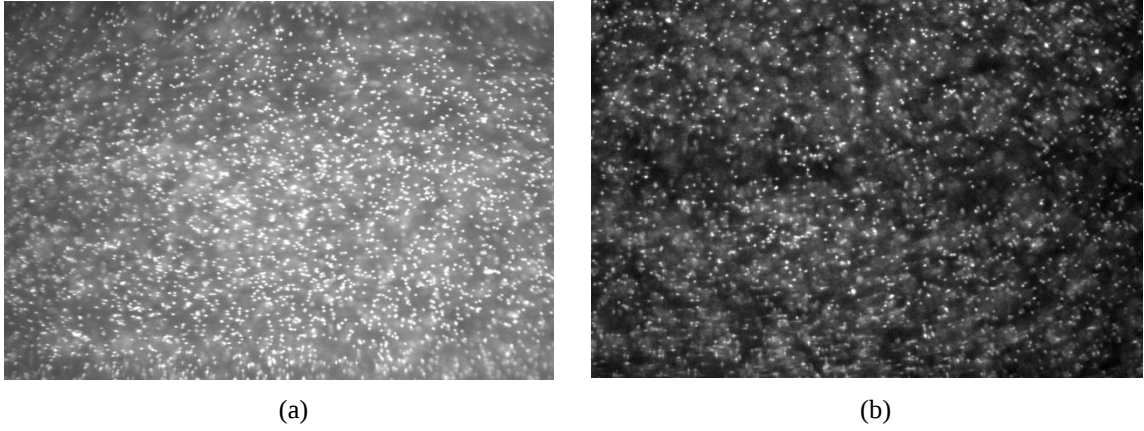
Deneyler sırasında, normal moda, 2×1 ve 3×1 binning modlarında akış görüntüleri kaydedilmiştir. Bu akışlara ait görüntüler, Şekil 3.5 ve 3.6’da görülmektedir. Bu görüntüler, hızın maksimum olduğu yer olan, $40 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ’lik kanalın ortasında (yaklaşık olarak duvardan $20 \mu\text{m}$ uzaklıkta) alınmıştır. Hız vektör alanları, (1.13) numaralı denklemde verilen, grup-ortalaması üzerinden karşılıklı ilinti fonksiyonunu kullanan, PIV analiz yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu yaklaşım, kararlı akışlarda yer değişiminin bulunmasında geniş kullanıma sahiptir. Bu metodun, düşük tanecik yoğunluğuna sahip akışlarda büyük oranda ölçümün doğruluğunu arttırdığı bilinmektedir. Bu çalışmada, korelasyon fonksiyonlarının grup ortalaması kullanılmıştır. İlgili inceleme bölgelerinin anlık korelasyon fonksiyonlarının, pik yeri hesaplamalarına göre ortalaması alınmıştır. Korelasyon ortalaması, ağırlıklı ortalama olarak bulunmuştur.



Şekil 3.5 $40 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ’lik kanalın ortasında alınan akış görüntüleri: (a) Normal modda, (b) 2×1 binning modunda

İnceleme pencereleri boyutları, normal mod, 2×1 ve 3×1 binning modları için sırasıyla, 64×32 , 64×16 ve 64×11 piksel olarak ayarlanmıştır. Akış koordinatları bütün çekim seçenekleri için aynı ayarlanmıştır ve $26,6 \mu\text{m} \times 12,8 \mu\text{m} \times 14,4 \mu\text{m}$ inceleme hacmine sahiptir. Literatürde, mikroskobun görme derinliğinin hesaplanması konusunda kararlı

bir fikir bulunmamaktadır. Burada inceleme hacminin tespitinde kullanılan görme derinliği hesabı için, (1.10) numaralı denklem kullanılmıştır.

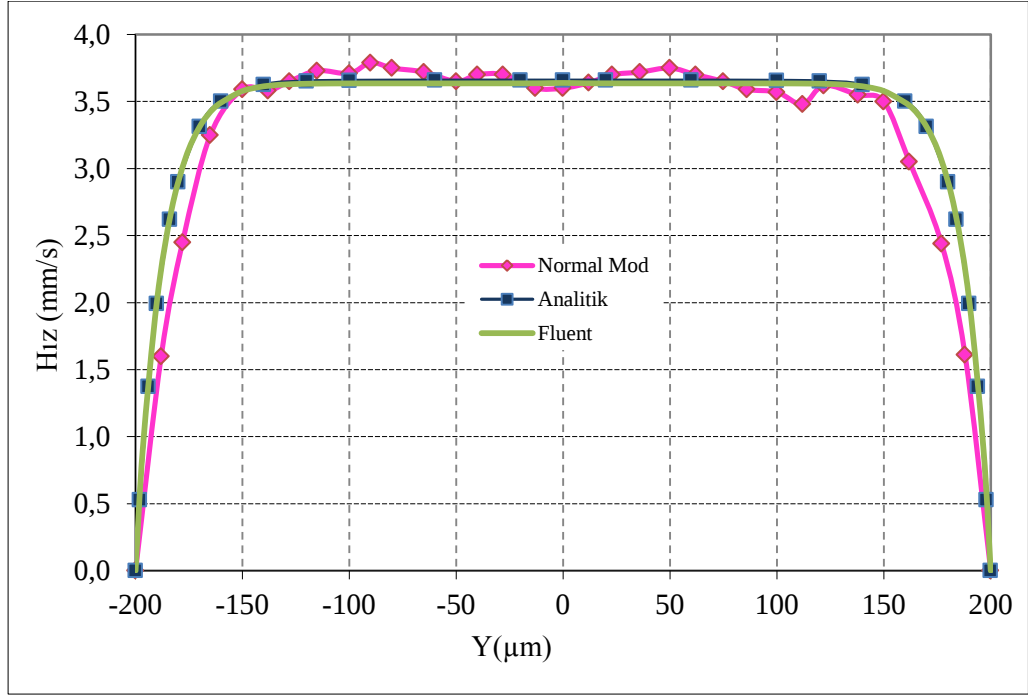


Şekil 3.6 Mikro μ PIV ölçümlerinde alınan görüntüler, (a) duvarın yakınında, (b) kanalın ortasında

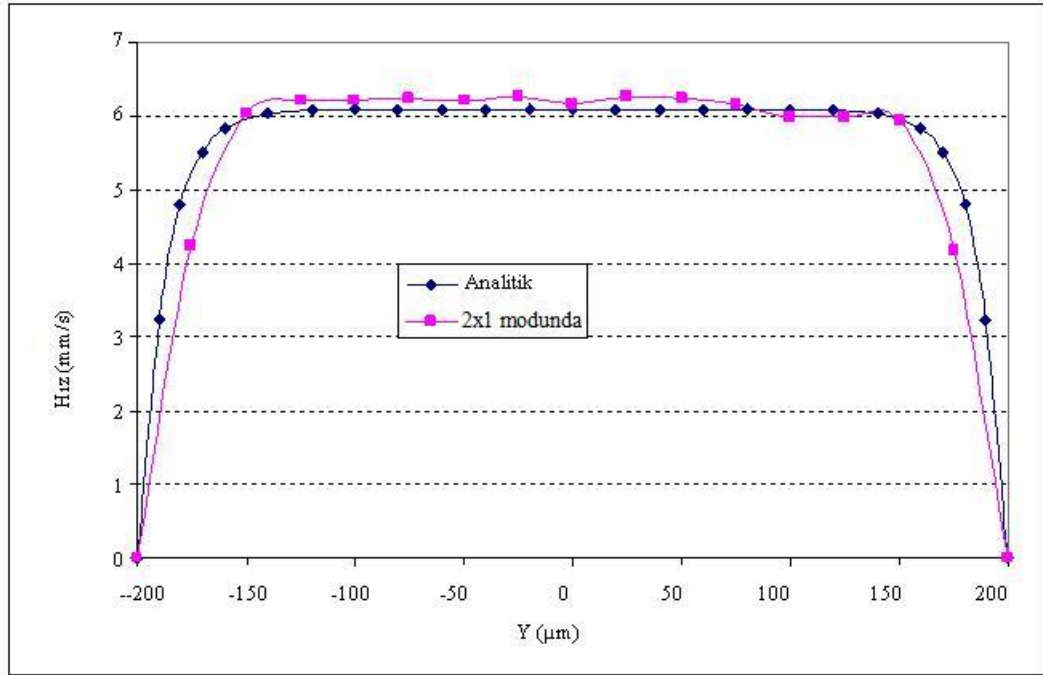
Her bir bölümün akış hızı alanı, 300 ölçümün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Geçerli vektörler elde edilemeyen anlık akış hız alanlarındaki bölgeler, ortalama hesaplamalarına katılmamıştır. Aynı yolla, başlama ve bitiş bölümlerindeki ortalama hızlar arasında %2'den fazla fark olduğunda hesaplamalara katılmamıştır. Sonuç olarak, akış çizgileri hız profilleri, çevrimdeki her bir bölümün ölçülen hız değerlerinin akış çizgisi boyunca ortalamaları alınarak çıkarılmıştır. Analitik çözüm için, Bölüm 1.1.9'da anlatıldığı şekilde hız profilleri çıkarılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'da farklı binning modlarında ulaşılabilen en yüksek hızdaki hız profilleri ile (1.35), (1.36) ve (1.37) numaralı formüller kullanılarak hesaplanan hız profiline karşılaştırıldığı grafikler görülmektedir. Deney koşullarında, normal modda ölçülebilen maksimum hız 3,65 mm/s iken, 2×1 binning modunda 6,1 mm/s ve 3×1 binning modunda 7,6 mm/s'ye çıkmıştır.

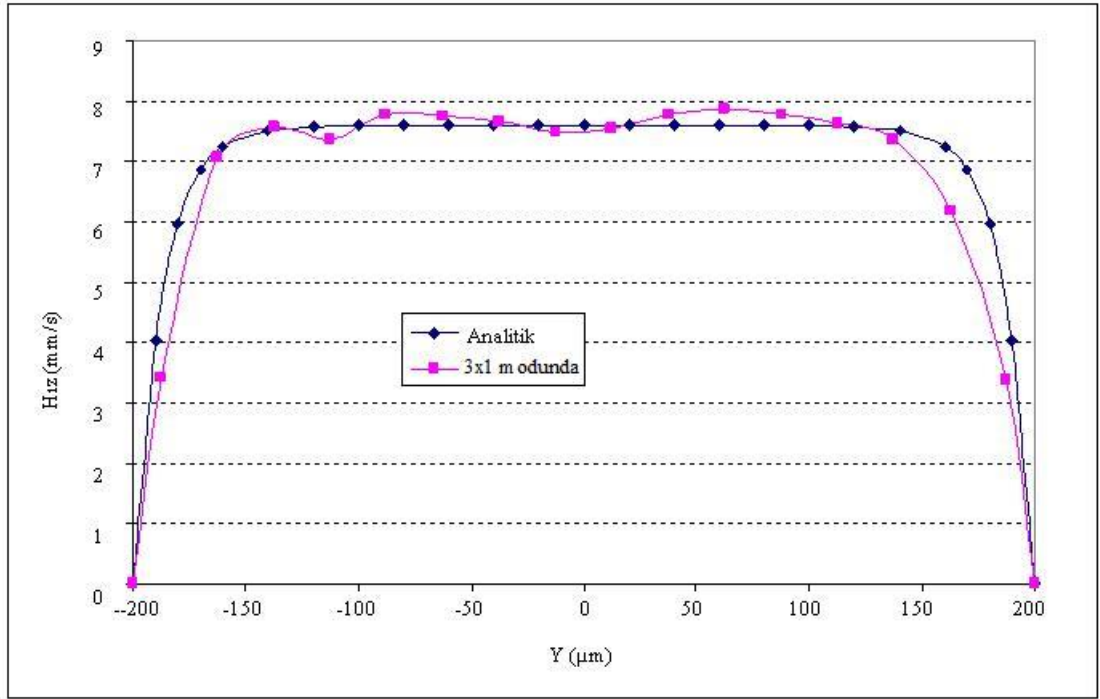
Şekil 3.7'de analitik çözüm ile FLUENT'de yapılan çözümün aynı olduğu görülmektedir. Bu yüzden bundan sonraki hız profili karşılaştırmaları sadece analitik çözüm kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.7 Normal modda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=3,65$ mm/s) elde edilen hız profili, FLUENT çözümü ve analitik çözüm karşılaştırması

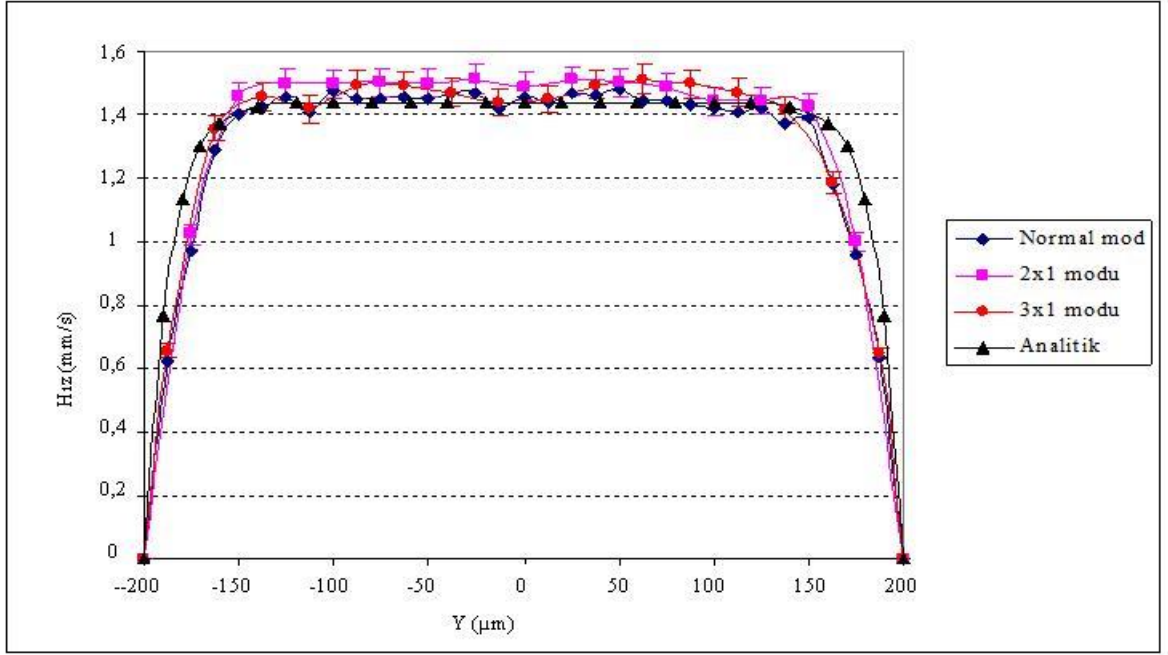


Şekil 3.8 2x1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=6,1$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması



Şekil 3.9 3×1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=7,6$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması

Şekil 3.10, normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 1,5 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profillerini göstermektedir. Burada, 2×1 ve 3×1 binning modlarında elde edilen hız verileri ile normal modda elde edilen hızlar arasındaki standart sapma, 1,5 mm/s hızda % 1,5'i, bağıl hata da % 2,5'i geçmemektedir. Bu sonuçlar, binning seçeneğinin kullanımından dolayı olan mekânsal çözünürlüğün azalması ile meydana gelen hatanın PIV ölçümlerinin doğasında olan toplam hataları geçmediğini göstermektedir(Akselli ve Teke [69]).



Şekil 3.10 Normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 1,5 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profilleri

3.4 200 μm × 200 μm Kesitli Mikro Kanalda Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması

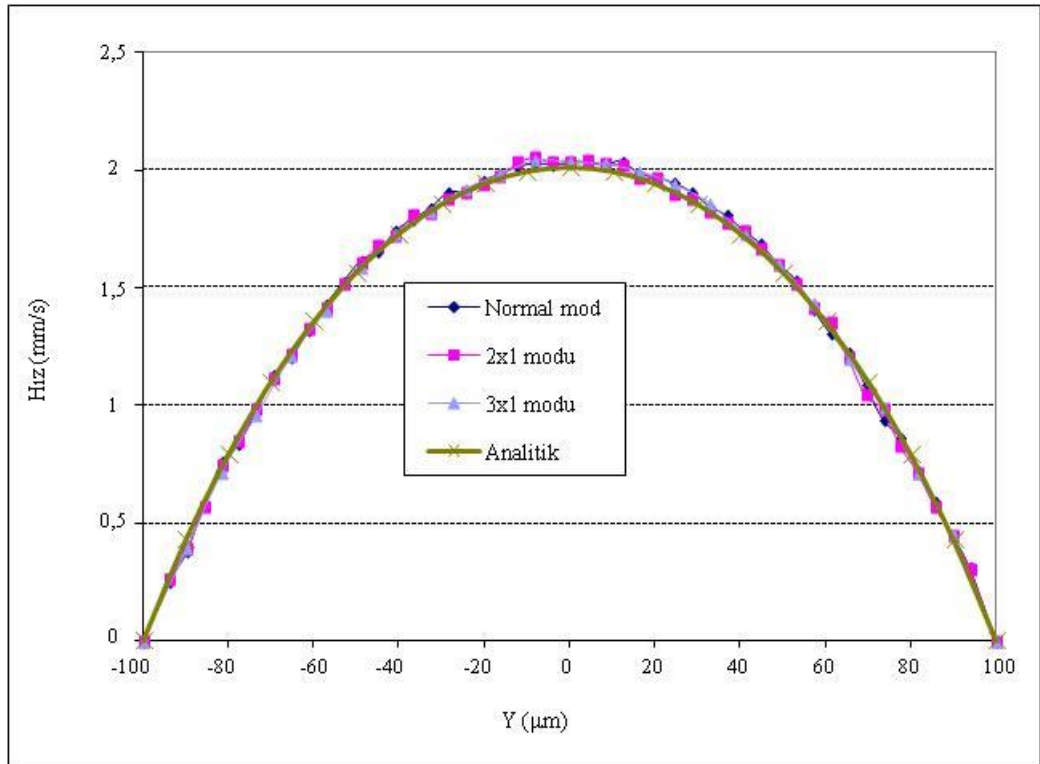
200 μm × 200 μm kesit alana sahip kanalda yapılan hız ölçümleri için, Şekil 3.1’de gösterilen düzenek farklı bir lazer ile kurulmuştur. Bu çalışmada, izleme tanecikleri olarak 1 μm’luk kırmızı polisitiren mikro kürecikler kullanılmıştır. Deneylerde, hacimsel tanecik konsantrasyonu yaklaşık % 0,2 olarak ayarlanmıştır. OL-700II objektif takılan Hirox CX-10 mikroskop ve prosilica CCD kamera kullanılmıştır. 2 W gücünde Nd:yag pulse lazer ile sistemin aydınlatması sağlanmıştır.

Burada, 200 μm × 200 μm × 50000 μm’lik mikrokanalda, tam gelişmiş laminar akış incelenmiştir. Mikrokanal tutucu, hassas ayarlama mekanizmasına tutturularak, mikroskobun odaklandığı kanal derinliği değiştirilmiştir. Akış tanecikleri, ~100 μm derinlikte, yani kanalın ortasında kaydedilmiştir. Akış hızı pompanın hızı ayarlanarak istenen düzeye getirilmiş, önceki deneylerdeki şekilde fotoğraflar çekilip ve hesaplamalar yapılmıştır.

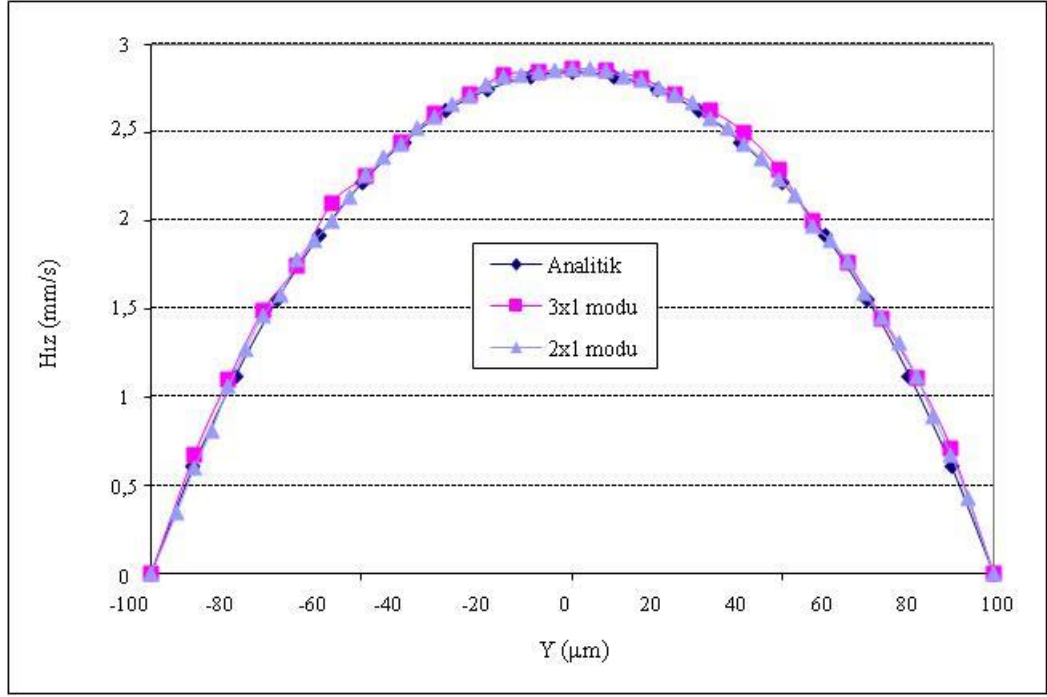
Normal modda, 2×1 ve 3×1 binning modlarında kaydedilen akış görüntüleri, hızın maksimum olduğu yer olan, 200 μm × 200 μm’lik kanalın ortasında (yaklaşık olarak duvardan 100 μm uzaklıkta) alınmıştır.

İnceleme pencereleri boyutları, normal mod, 2×1 ve 3×1 binning modları için sırasıyla, 20×80 , 10×60 ve 14×60 piksel olarak ayarlanmış ve hız vektör alanları bir önceki çalışmadaki gibi bulunmuştur. Deneylerde, normal modda ve 2×1 ve 3×1 binning modlarında görüntüler kaydedilmiştir. Aynı şekilde, kameramızın hızı, normal modda 20 fps iken, 2×1 modunda 33 fps ve 3×1 modunda 42 fps değerine çıkmıştır (Çizelge 3.3).

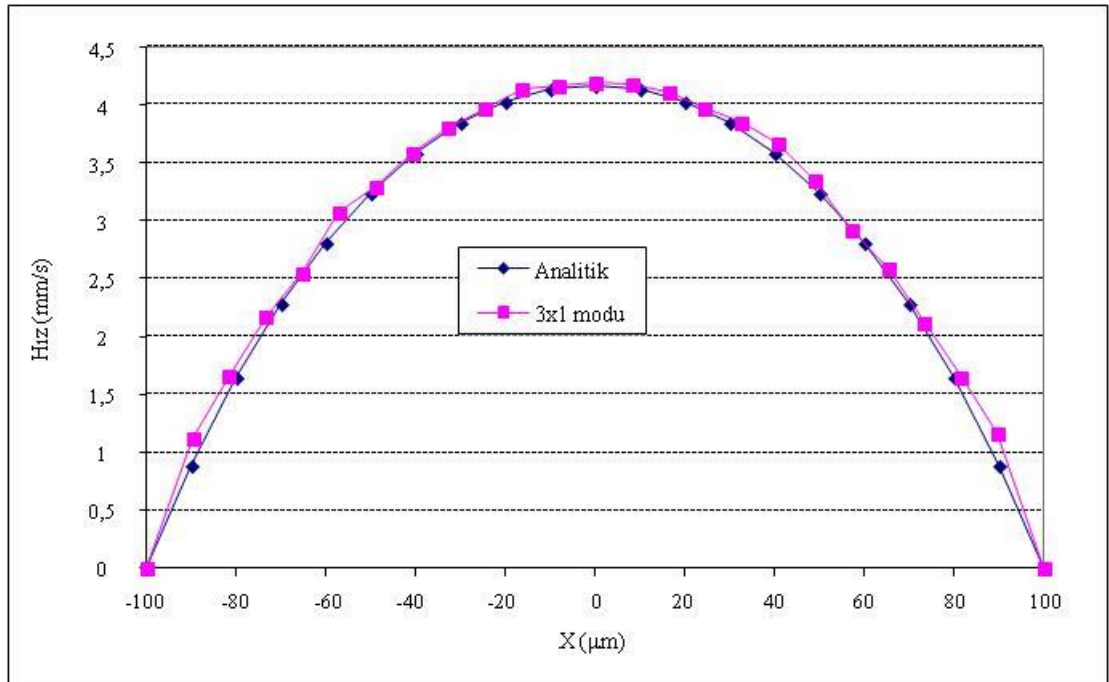
Şekil 3.12, normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 2 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profillerini göstermektedir. Burada, 2×1 ve 3×1 binning modlarında elde edilen hız verileri ile normal modda elde edilen hızlar arasındaki standart sapma, deney şartlarımızda %2'yi, bağıl hata cidara yakın kısımlar dışında, %1'i aşmamaktadır. Bu sonuçlar, binning seçeneğinin kullanımından dolayı olan mekânsal çözünürlüğün azalması ile meydana gelen hatanın PIV ölçümlerinin doğasında olan toplam hataları aşmadığını göstermektedir. Analitik çözüm için aynı şekilde hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılmıştır(Akselli ve Teke [68]).



Şekil 3.11 Normal, 2×1 ve 3×1 seçeneklerinde, maksimum hızın 2 mm/s olduğu veri setlerinden elde edilen hız profilleri



Şekil 3.12 2x1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=2,85$ mm/s) elde edilen hız verileri ile 3x1 binning ve analitik çözüm verilerinin karşılaştırması



Şekil 3.13 3x1 binning modunda ulaşılabilen en yüksek hızda($u=4,18$ mm/s) elde edilen hız verileri ile analitik çözüm karşılaştırması

Şekil 3.13 ve 3.14’de, sırasıyla 2x1 ve 3x1 binning modlarında ulaşılabilen en yüksek hızdaki hız profilleri ile analitik çözüm ile hesaplanan hız profilinin karşılaştırıldığı grafikler görülmektedir. Deney koşullarımızda, normal modda ölçebildiğimiz

maksimum hız 2 mm/s iken, 2×1 binning modunda 2,85 mm/s ve 3×1 binning modunda 4,18 mm/s'ye çıkmıştır (Akselli ve Teke [68]).

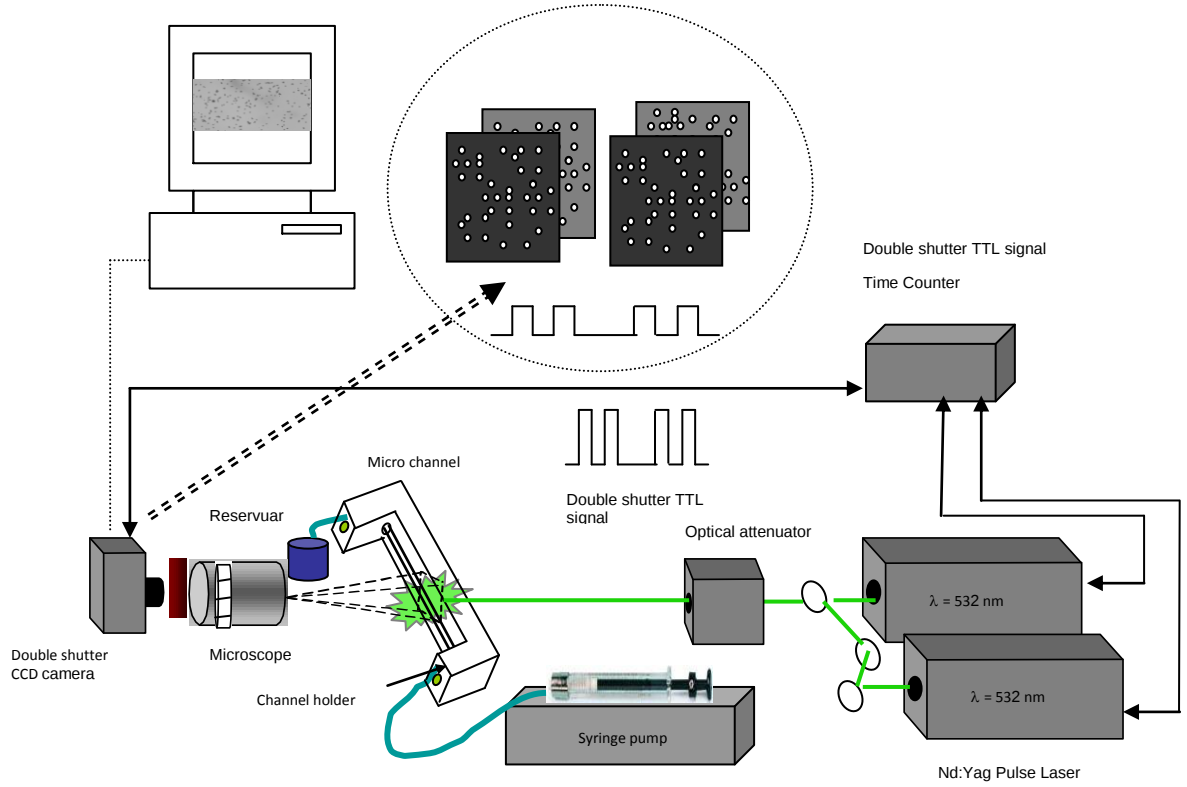
3.5 30 µm × 300 µm Kesitli Mikro Kanalda Çift Çekimli Kamera ile Farklı CCD Binning Modlarında Hız Profillerinin Çıkarılması

Bu deneylerde, 30 µm × 300 µm kesitlerindeki mikrokanallar kullanılmıştır. Kanala şırınga pompa ile yaklaşık % 0,3 konsantrasyonunda 3 µm'lik kırmızı floresan izleme tanecikleri içeren saf su beslenmiştir. Debi ayarlandıktan sonra 10 dakika boyunca akışın kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Ölçümler, oda sıcaklığında yaklaşık 21,0 ± 0,5 °C'de yapılmıştır.

Aydınlatma için, 532 nm dalga boyundaki çift kaviteli Nd:Yag lazer sistemi (NL-310 serisi, Ekspla), görüntüleme için çift çekimli CCD kamera(PCO pixelfly QE) ve HIROX OL-700II mikroskop objektifi kullanılmıştır (Şekil 3.14). Lazer ışını genişletilip, mikroskobun girişine eşeksenli olarak yöneltilmiş ve mikrokanalın incelenen bölümüne odaklanmıştır. Mikroküreciklerin yaydığı ışık (lazerin aydınlatmasını ve artalan ışığını elimine eden kesici cam filtreler ile), çift çekimli CCD kamera ile mikroskop sistemi vasıtasıyla kaydedilmiştir.

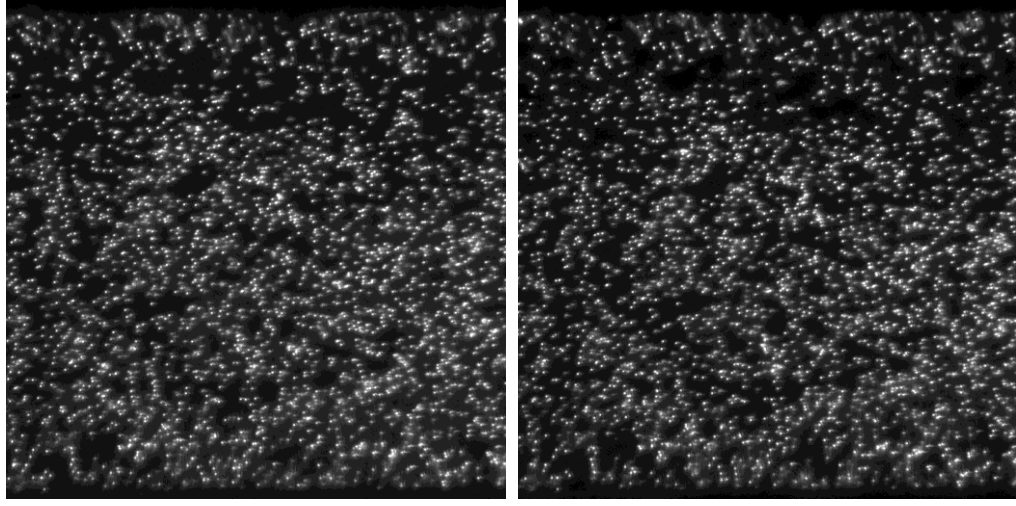
Görüntü işleme programı ile 200 karelik çevrimler halinde, normal, 2×1, 1×2 ve 2×2 modlarında PIV görüntüleri kaydedilmiştir. Her çevrim biter bitmez sıkıştırılmamış TIFF formatında bilgisayarın sabit diskinde depolanmış ve bilgisayar yüzünden oluşabilecek gecikmelerden kaçınılmıştır.

Mikro-PIV çalışmaları, çevrimler halinde ve üç adımda gerçekleştirilmiştir: 1. Adımda görüntüler kameranın normal modunda çekilmiştir. 2. Adımda, kamera hemen istenen binning moduna getirilerek görüntüler kaydedilmiştir. 3. Adımda Kamera tekrar normal moduna getirilmiş ve tekrar görüntüler kaydedilmiştir. Başlangıç ve bitişteki normal moddaki görüntülerden elde edilen ortalama hız bilgileri arasında %2'den fazla bir sapma varsa, bu çevrim ilerde belirtilen hesaplamaların dışında bırakılmıştır. Deney sırasında kameranın çift çekim özelliği kullanılarak normal, 2×1, 1×2 ve 2×2 binning modlarında alınan görüntüler ve çıkarılan hız profilleri Şekil 3.15-3.18'de görülmektedir.



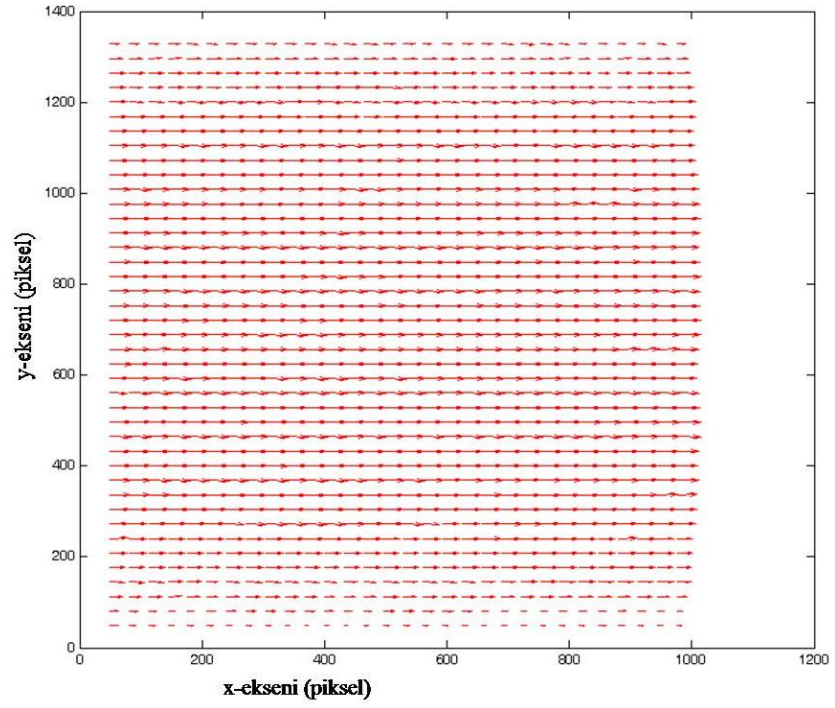
Şekil 3.14 Çift çekimli kamera ile kurulmuş mikro-PIV düzeneği

Mikro kanalın orta kısmında alınan görüntülerde (yaklaşık olarak duvardan 15 μm), ölçülen en yüksek hız 7,8 mm/s idi. Hız profilleri normalize edilmiş karşılıklı-ilinti fonksiyonu uygulanarak çıkarılmıştır. Taneciklerin mesafe değişimini daha hassas şekilde elde etmek için, Bölüm 1.1.8’de anlatıldığı gibi piksel-altı korelasyon kullanılmıştır.



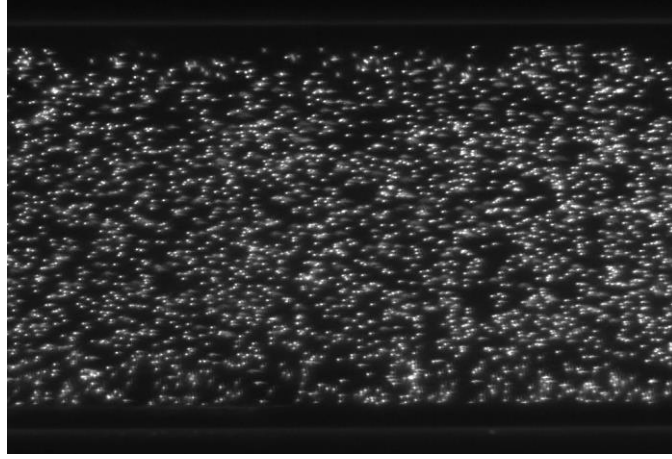
(a)

(b)

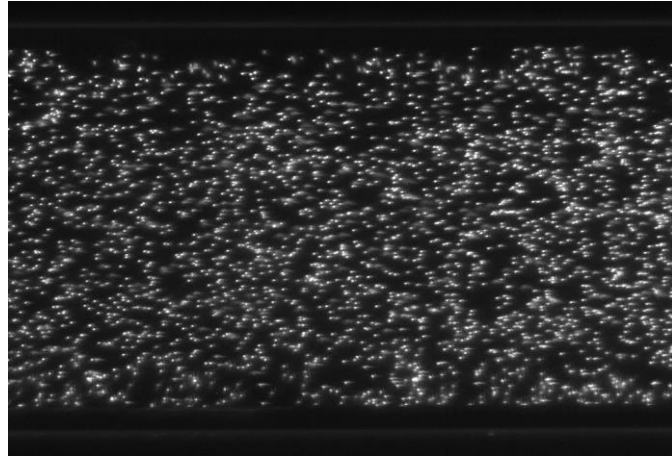


(c)

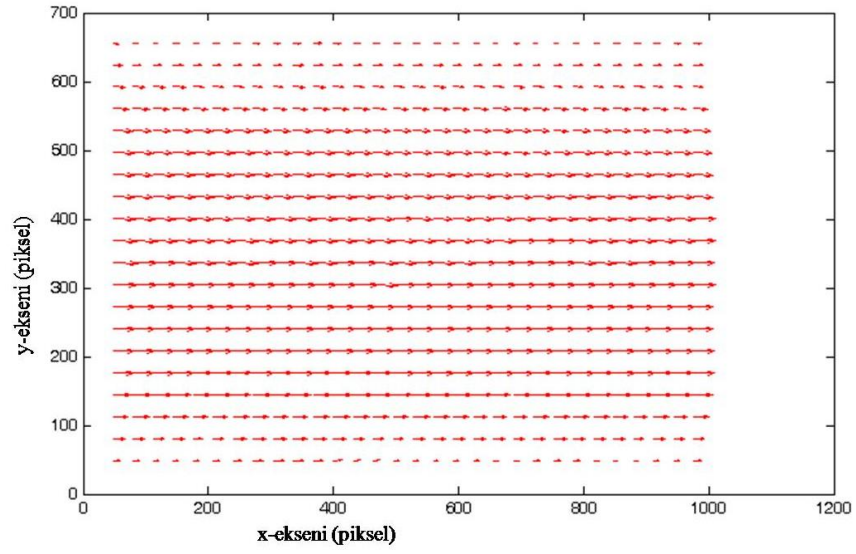
Şekil 3.15 Normal modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c)



(a)

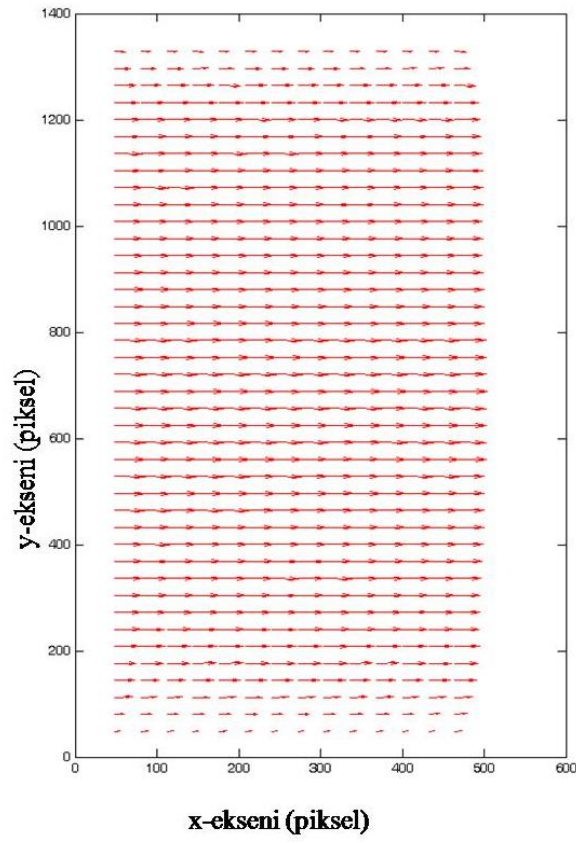
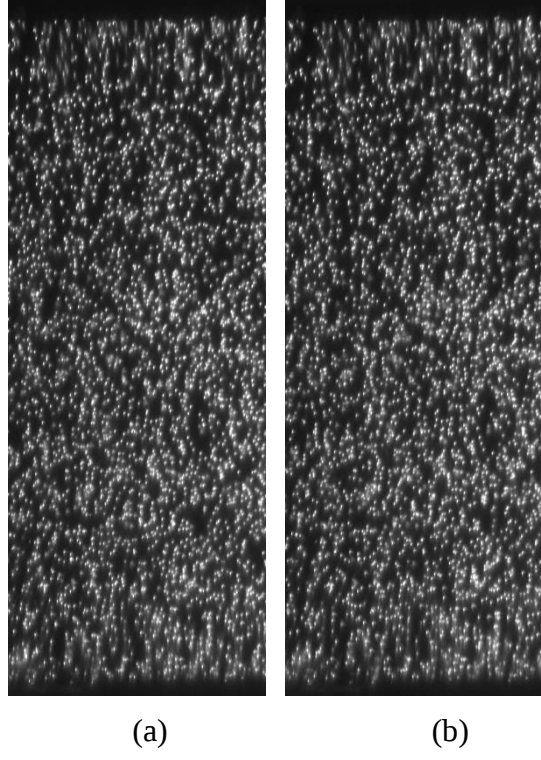


(b)

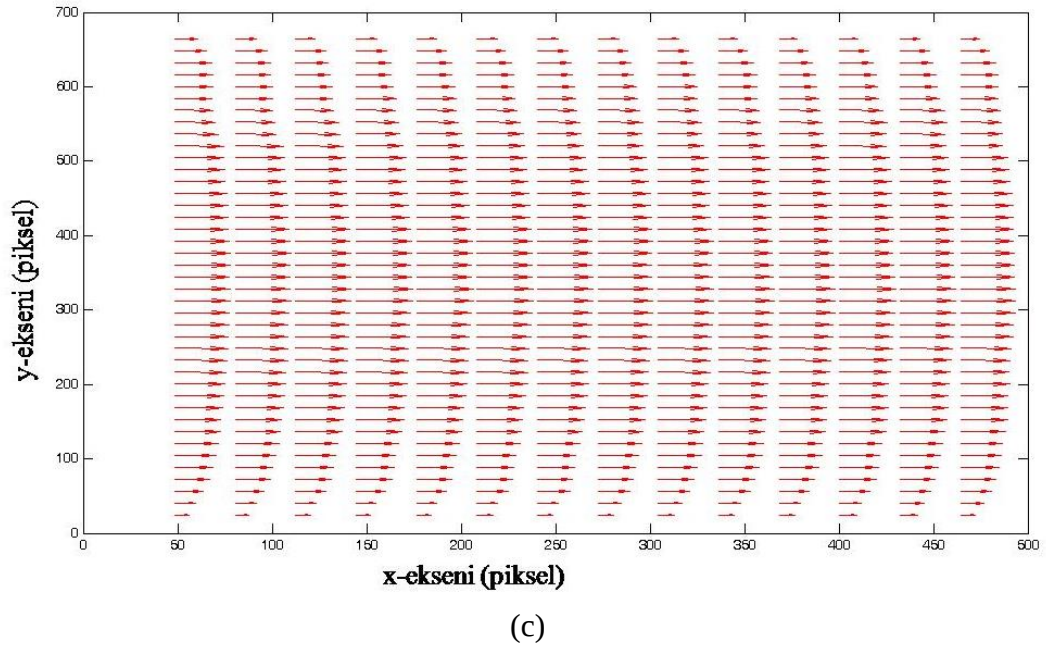
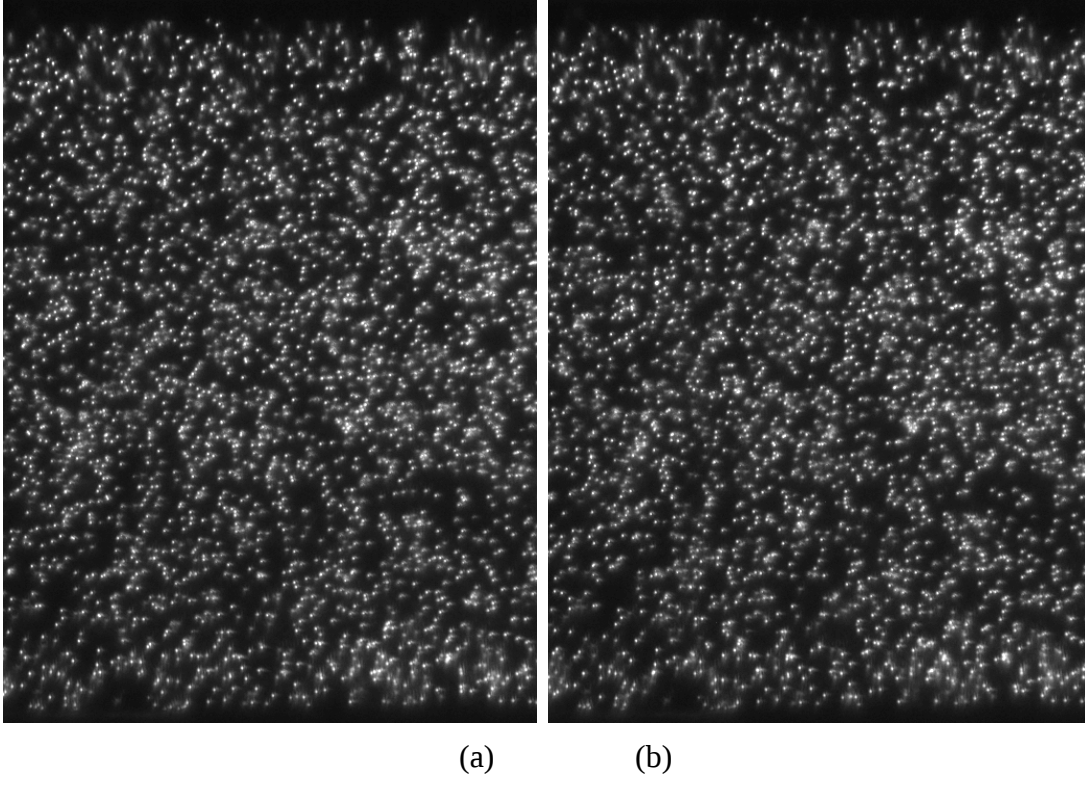


(c)

Şekil 3.16 2×1 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c)

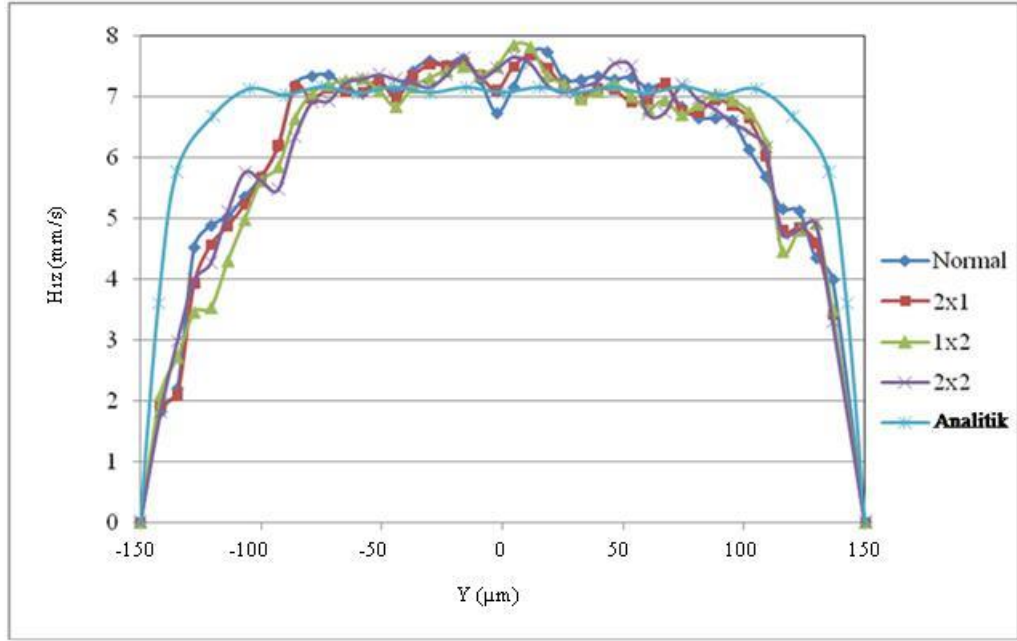


Şekil 3.17 1×2 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c)



Şekil 3.18 2×2 binning modda çift çekimli görüntü örneği (a ve b) ve bu görüntülere ait hız profili (c)

Şekil 3.19’da bu deneysel çalışmada elde edilen 4 farklı binning modundaki hız profillerinin, Bölüm 1.1.9’da anlatıldığı şekilde, analitik olarak hesaplanan profil ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 3.19 Çift çekimli kamera ile 4 farklı binning modunda elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili

İnceleme pencerelerinin boyutları sırasıyla normal mod için 128×64 , 2×2 binning mod için 64×32 , 1×2 için 64×64 ve 2×1 binning modu için 128×32 olarak ayarlanmıştır. Herbir binning modu için 50 çiftten fazla görüntü kaydedilmiş ve incelenmiştir. CCD kameranın normal modda elde edilen görüntü çiftlerinin karşılıklı-ilinti hesaplamalarının istatistiksel analizi, toplam hesaplanan hız profillerinin geçerli hız vektörlerine oranının %80 civarlarında olduğunu göstermiştir. Bu değer aynı aydınlatma seviyesinde, 1×2 ve 2×1 binning modundaki görüntüler için artmıştır. Bu iki binning modu için, bu oran geçerli vektörlerin toplam hesaplanan vektörlere oranı sırasıyla, %90 ve %92'ye yükselmiştir.

Son olarak 2×2 binning modu için bu oran % 95-96 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, çift çekimli CCD kameralarda binning modu seçiminin, en düşük aydınlatma şartlarında bile PIV görüntü kalitesinin artırılmasını sağlayabileceğini göstermektedir (Akselli ve Teke [70]). Çift çekim özelliği kullanıldığında, 2×2 binning modu ile çıkılabilen yüksek hızlara normal modda da ulaşılabilirdiği görülmüştür.

Akış koordinatlarındaki inceleme hacmi, tüm binning modları için aynıdır ve $23,25 \mu\text{m} \times 5,8 \mu\text{m} \times 4,8 \mu\text{m}$ 'ye eşittir.

Sistemin akış hızı karalılığı, çeşitli çevrimlerdeki ortalama hızlar arasındaki standart sapmaya bakılarak kontrol edilmiştir. Bunun da normal moddaki en yüksek hızın %2'si içinde kaldığı görülmüştür.

3.6 Mikro Kanalda Farklı Derinliklerde Hız Profillerinin Çıkarılması ve Basınç Düşüşü Hesaplamalarının Yapılması

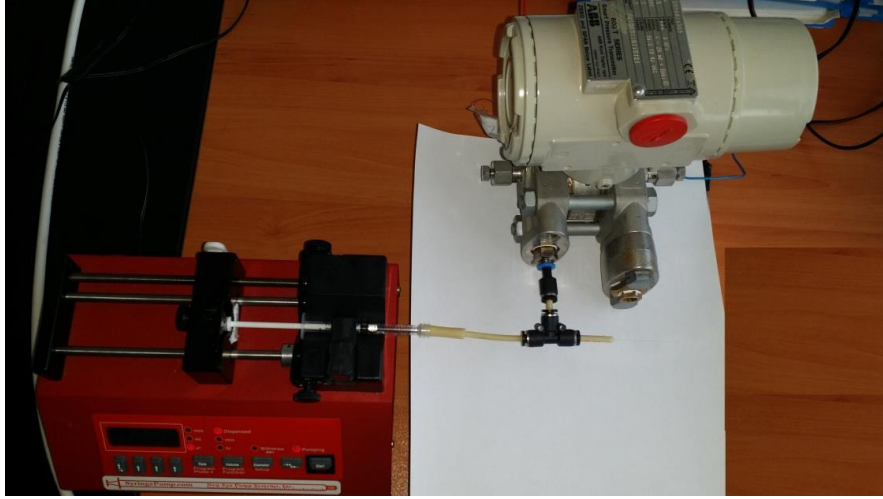
Şekil 3.1'de görülen mikro-PIV düzeneği ile 40 µm×400 µm ve 200 µm×200 µm kesitlerindeki 50 mm uzunluğundaki kanallarda farklı derinliklerde görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler matlab tabanlı program ile analiz edilmiş ve kamera+objektif kalibrasyonuna göre hız birimleri bazında sayısal değerleri belirlenmiştir. programlanabilir şırınga pompa (NE-1000, New Era Pump systems, Inc.) ile yönlendirilmiştir. İzleme tanecikleri olarak 3 µm'lik kırmızı polisitiren mikro kürecikler kullanılmıştır. Deneylerde, hacimsel tanecik konsantrasyonu yaklaşık %0,4 olarak ayarlanmıştır. Hirox CX-10 mikroskop, OL-140I objektifi ile kullanılmıştır. Mikroskobun görüş alanı, 532 nm dalga boyundaki Nd:yag lazer ile kanalın arkasından olmak üzere aydınlatılmıştır. Mikroskop ile kamera arasına, sadece floresan ışımaya geçiren, uzun bant cam filtre konulmuştur. Görüntüler, 1360×1024 piksel çözünürlükte, piksel boyutu 4,65 µm × 4,65 µm olan ve tam çözünürlükte hızı 20 fps olan, siyah-beyaz kamera (Prosilica) ile kaydedilmiştir. Görüntü işleme için MATLAB tabanlı PIVlab programı kullanılmıştır (Thielicke ve Stamhuis [71]).

Burada deneylerde kullanılan kanallar için analitik olarak hesaplanan basınç düşüşü değeri, Fluent'de bulunan duvardaki kayma gerilmesinden hesaplanan basınç düşüşü, fark basınçölçer ile ölçülen basınç düşüşü ve micro-PIV ile çalışmalarda elde edilen hız gradyeninden hesaplanan basınç düşüşü karşılaştırılmıştır. Bu ölçümlerde Şekil 3.20'deki düzeneğe görülen ABB marka fark basınçölçer kullanılmıştır.

Kanallarda Mikro-PIV sistemi ile elde ettiğimiz hız profillerinden ortalama hız gradyenleri hesaplanmıştır. Bu hesaplanan hız gradyenleri ile duvardaki kayma gerilmesi (3.2) ve kanaldaki basınç düşüşü (3.5) denklemi ile hesaplanmıştır.

Duwardaki kayma gerilmesi:

$$\tau_w = -\mu \frac{du}{dy} \quad (3.2)$$



Şekil 3.20 Kanallardaki basınç düşüşü ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

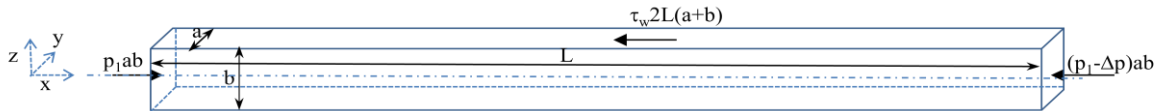
Uç etkilerini ihmal ederek ve akışı tam gelişmiş akış kabul ederek kanalın tamamı için Şekil 3.21’de görülen kuvvetler dengesini yazarsak dikdörtgen kesitli kanal için kayma gerilmesinden basınç farkına geçişi sağlayan eşitliği elde ederiz (Son [50]):

$$p_1 ab - (p_1 - \Delta p) ab - 2L(a+b)\tau_w = 0 \quad (3.3)$$

$$\Delta p ab = 2L(a+b)\tau_w \quad (3.4)$$

$$\Delta p = 2L(a+b)\tau_w / (ab) \quad (3.5)$$

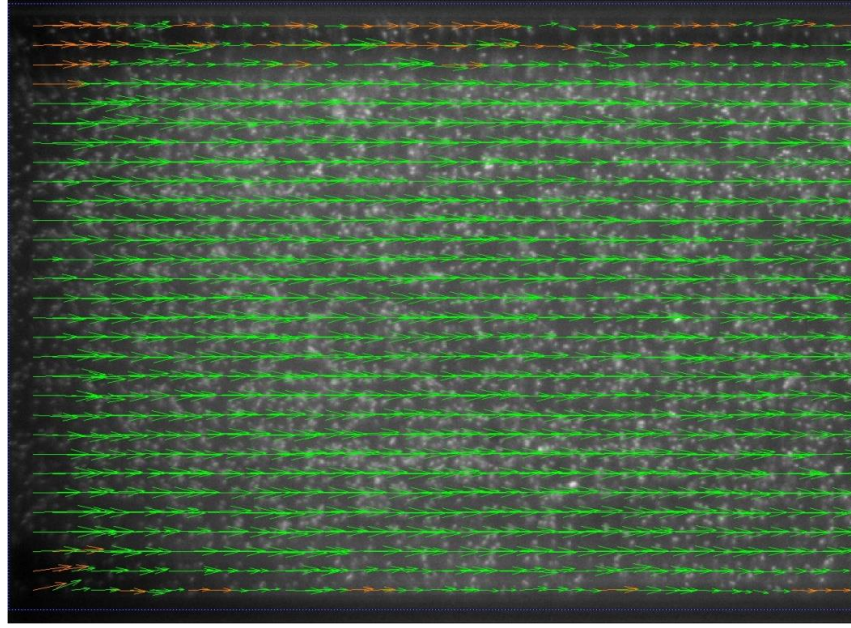
Burada a ve b kanal kesiti, L kanal boyu(50 mm), p basınç ve τ_w duvardaki kayma gerilmesidir.



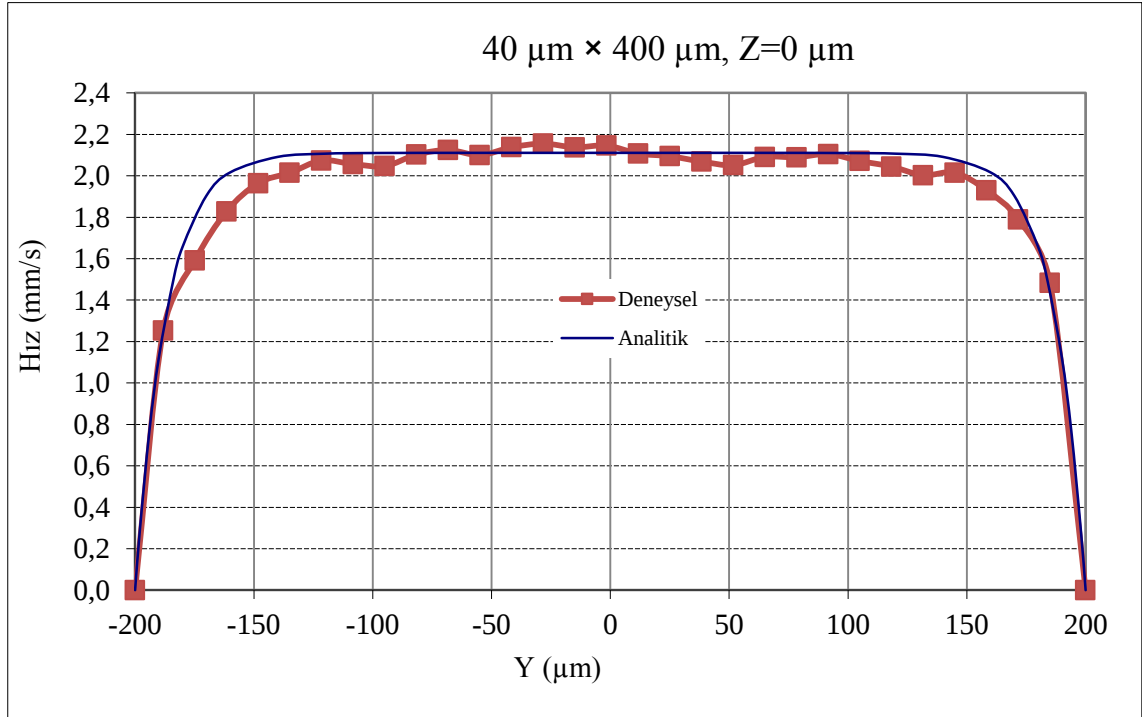
Şekil 3.21 Kanaldaki kuvvet dengesi

3.6.1 Dikdörtgen kesitli Kanal

0,063 mL/h debide($Re = 0,08$), $40 \mu m \times 400 \mu m$ kesitinde ve 50 mm boyunda olan kanalın geniş kenarında 3 farklı derinlikte yapılan ölçüm sonuçları (Z- merkezden uzaklık, maksimum $20 \mu m$) Şekil 3.22-3.25 ve Çizelge 3.5’de verilmiştir. Dar kenarında yapılan 6 farklı derinlikteki(Y- merkezden uzaklık, maksimum $200 \mu m$) ölçüm sonuçları da Şekil 3.26-3.33 ve Çizelge 3.6’da verilmiştir.

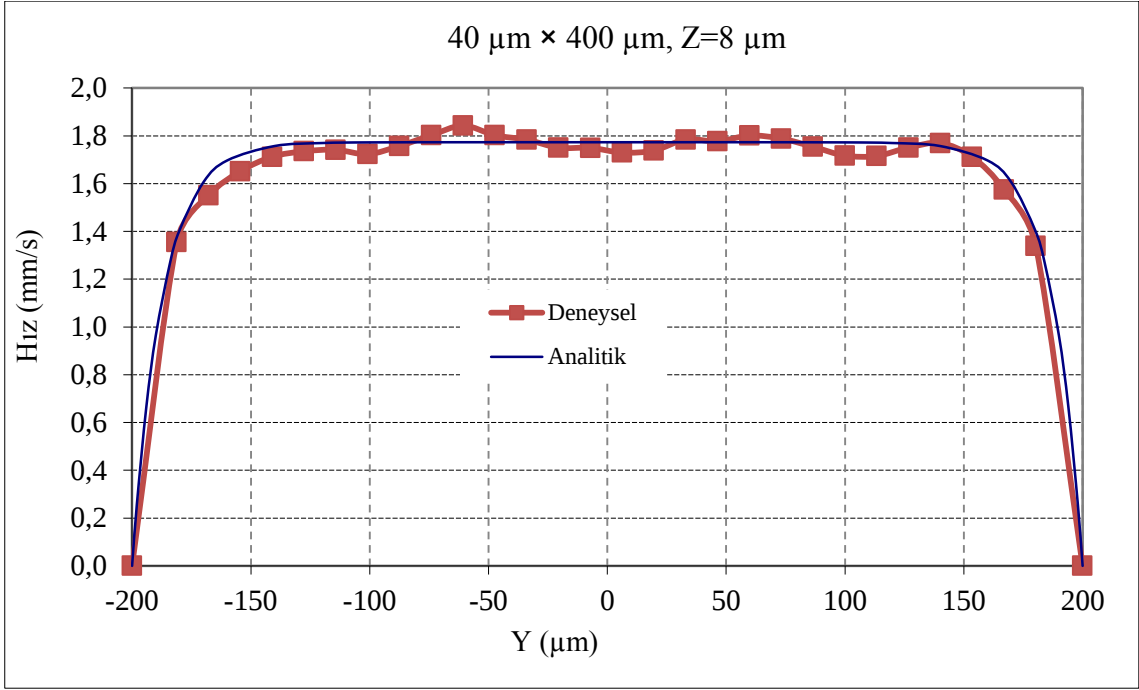


(a)

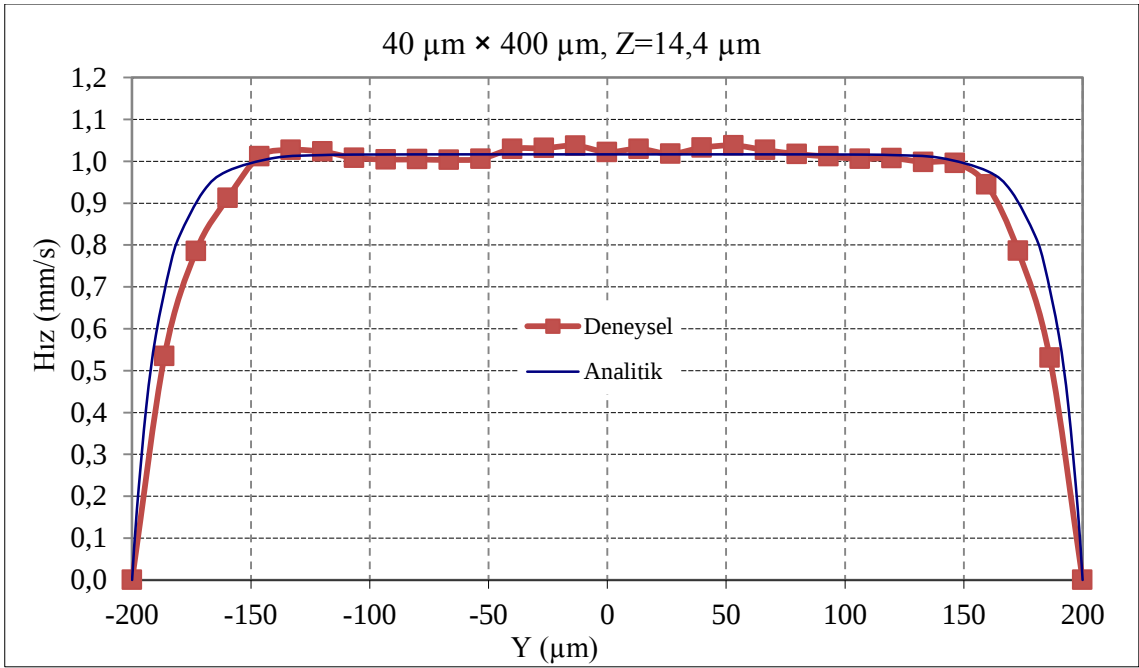


(b)

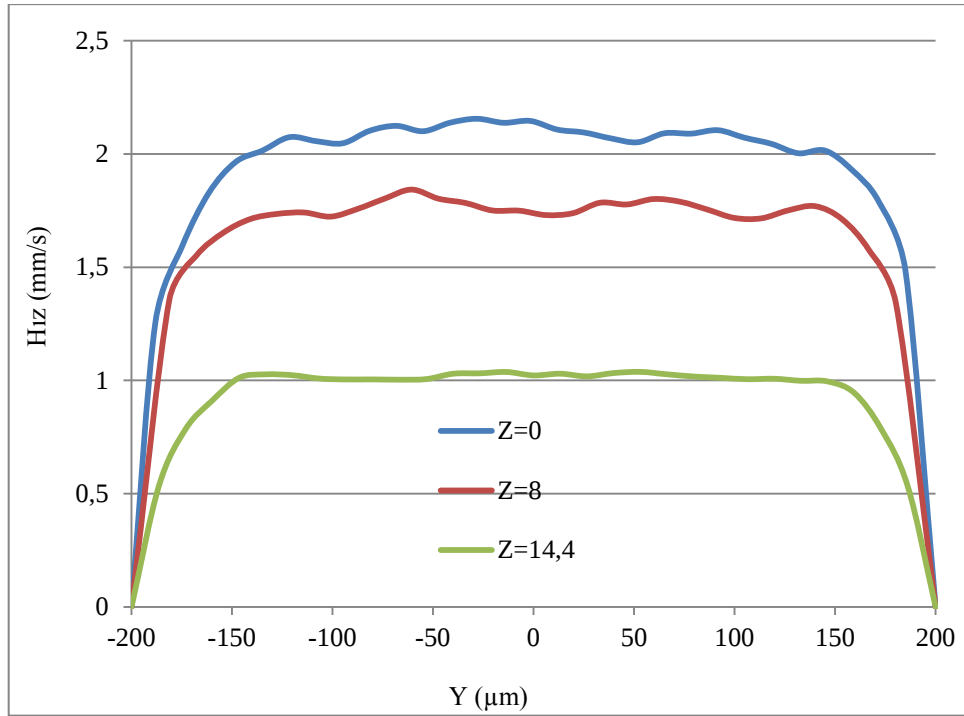
Şekil 3.22 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktada elde edilen hız profilleri(a ve b) ve analitik olarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.23 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $8\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



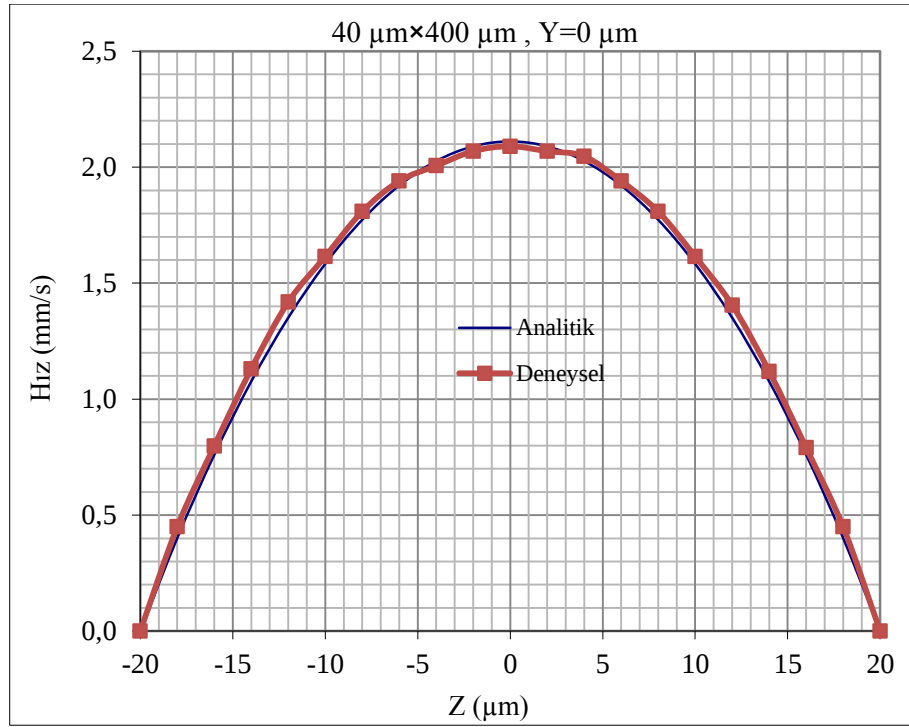
Şekil 3.24 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $14,4\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



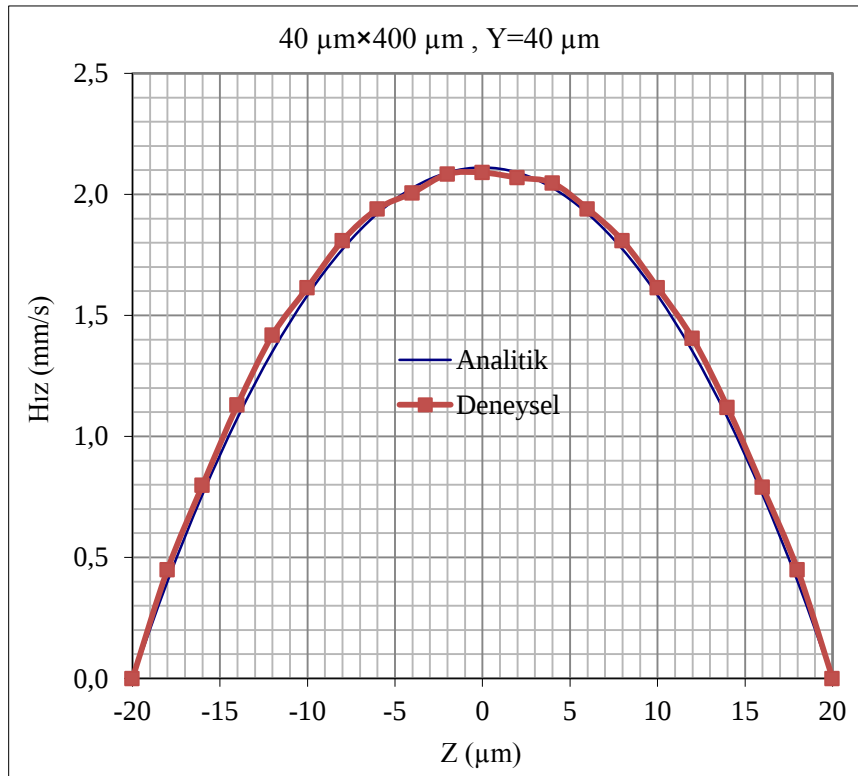
Şekil 3.25 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarında farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi

Çizelge 3.5 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için farklı derinliklerde deneysel hız gradyanları ve duvardaki kayma gerilmeleri

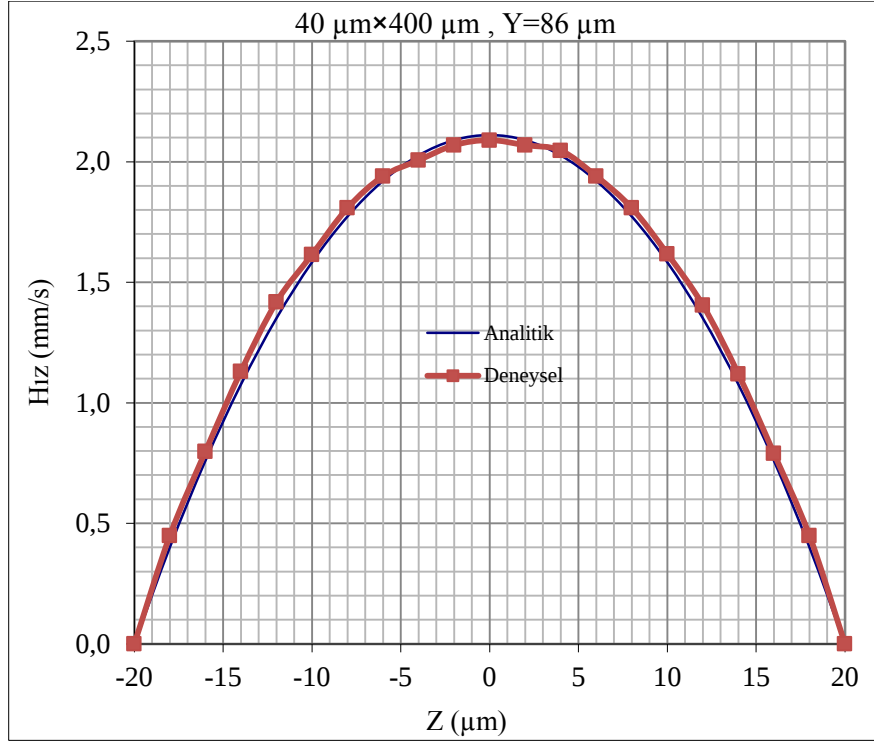
	Z=14.4	Z=8	Z=0
du/dy (1/s)	114	185	223
τ_w (kg/(m.s ²))	0,1143	0,1857	0,2239



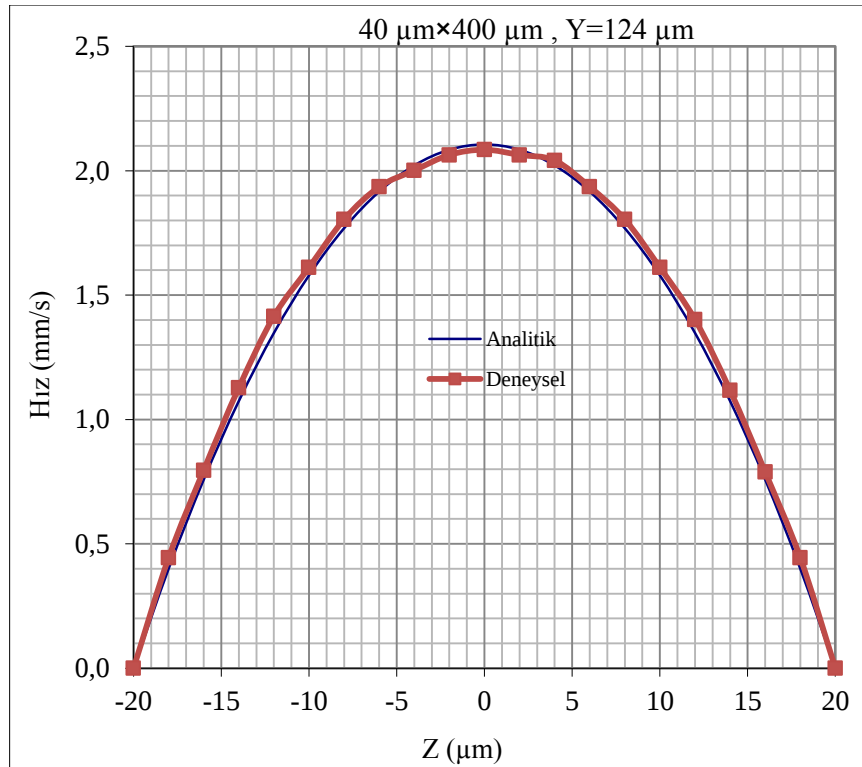
Şekil 3.26 40 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ kesitindeki kanalın dar kesitinde ($Y=0 \mu\text{m}$) orta noktada elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



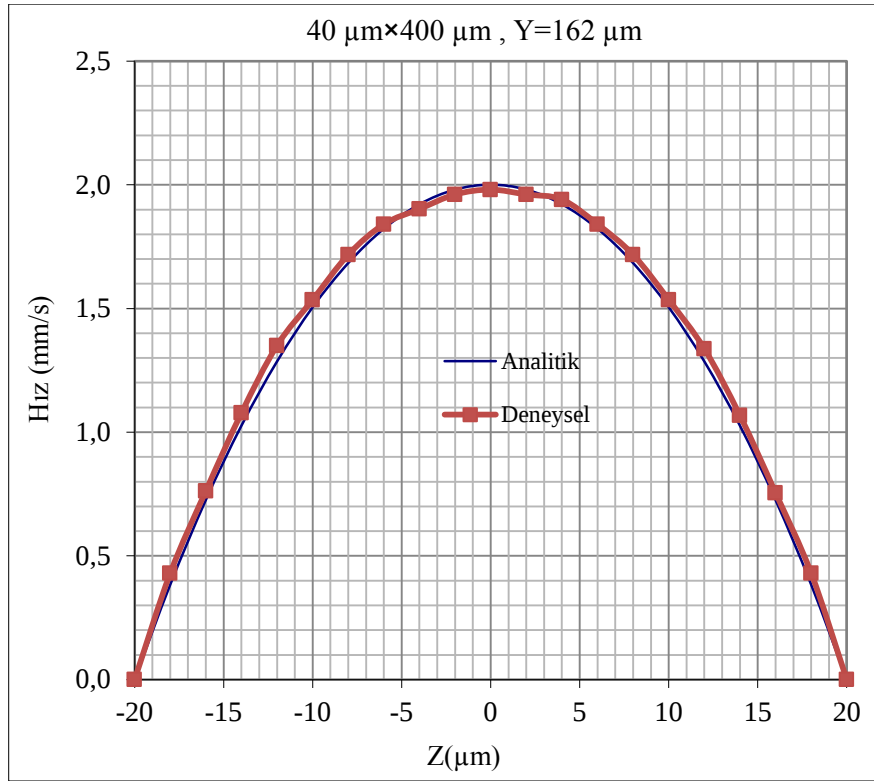
Şekil 3.27 40 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 40 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



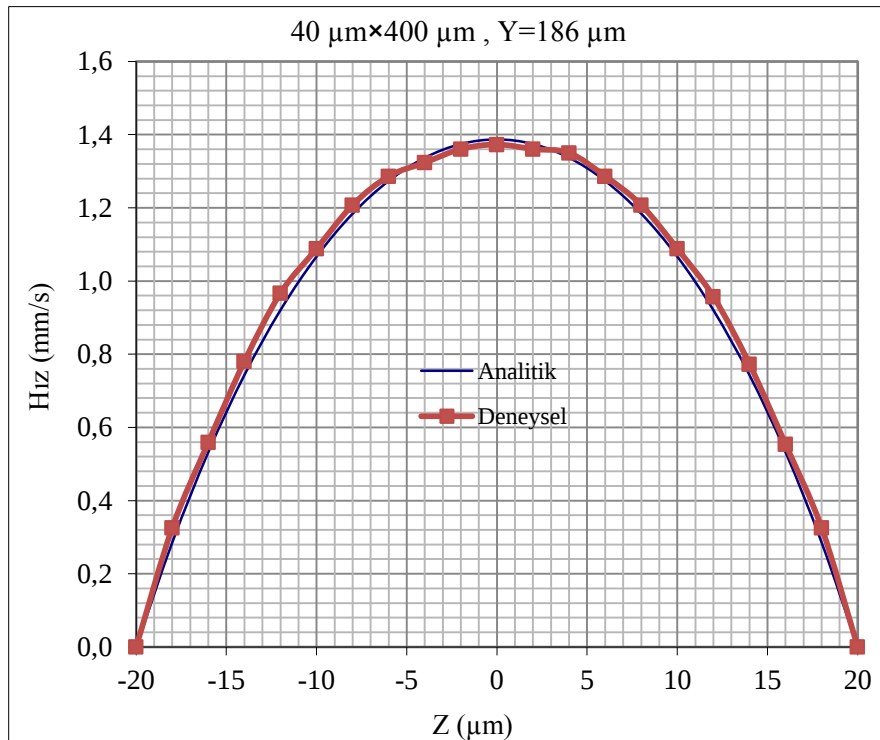
Şekil 3.28 40 μm x 400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 86 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



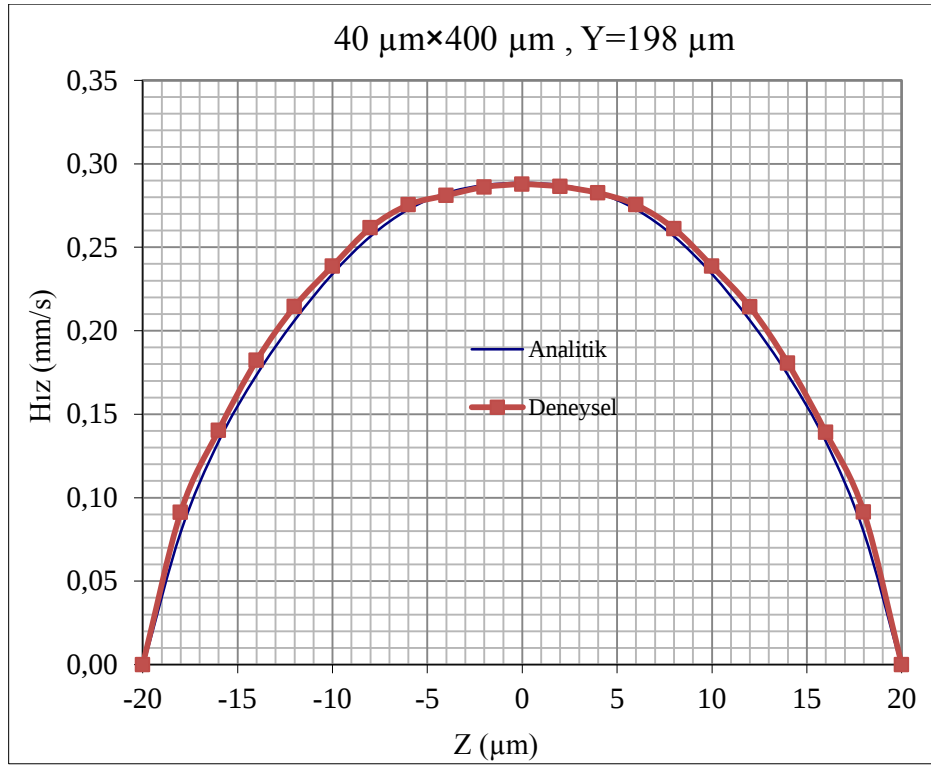
Şekil 3.29 40 μm x 400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 124 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



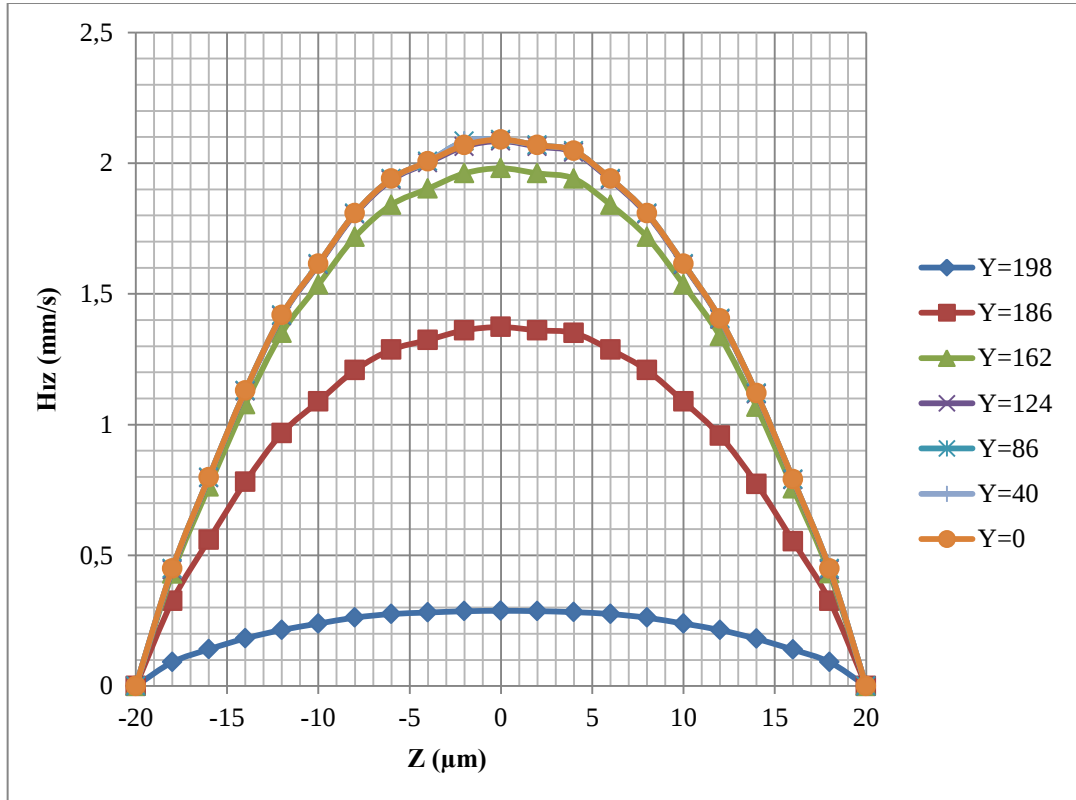
Şekil 3.30 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 162 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.31 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan 186 μm uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



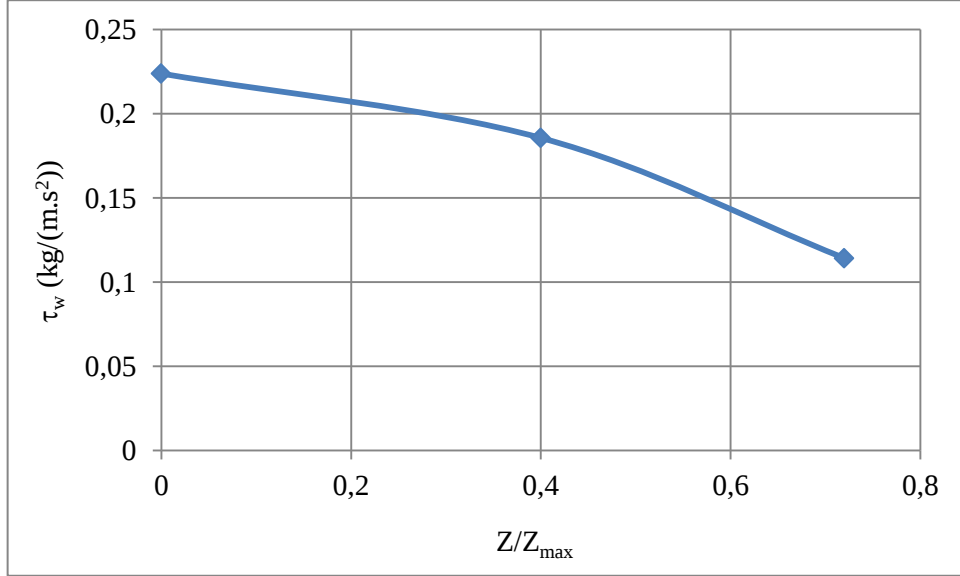
Şekil 3.32 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda Y eksenine göre orta noktadan $198\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.33 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalın dar kenarında farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi

Çizelge 3.6 40 μm ×400 μm kesitindeki kanaldın geniş kenarı farklı derinliklerde deneysel hız gradyenleri ve duvardaki kayma gerilmeleri

	Y=198	Y=186	Y=162	Y=124	Y=86	Y=40	Y=0
du/dy (1/s)	26,8	137,3	216,3	222,2	224,6	224,6	224,8
τ_w (kg/(m.s ²))	0,0269	0,1376	0,2167	0,2227	0,2250	0,2251	0,2253



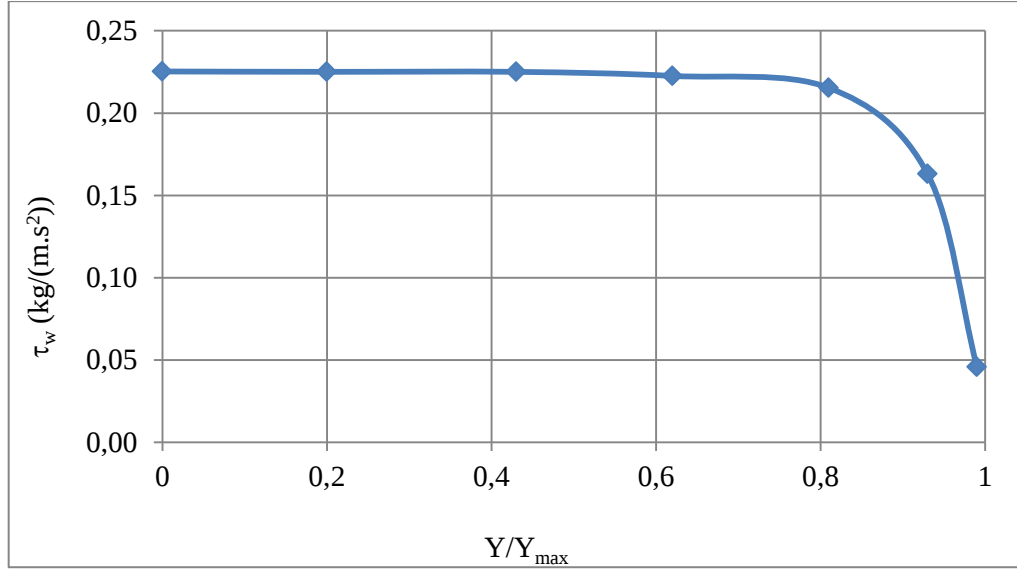
Şekil 3.34 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği

Alan ağırlıklı ortalamayı bulmak için deneysel verilerden elde edilen grafiklerden eşit Z ve Y aralıklarındaki kayma gerilmeleri okunarak ortalamaları alınmıştır.

40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için, çalışılan debideki deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi değerlerinden(Şekil 3.34) ve eşit Z aralıkları ile Çizelge 3.7'deki değerler okunmuştur.

Çizelge 3.7 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Z aralıkları ile τ_w değerleri

Z (μm)	0	10	20
τ_w (kg/(m.s ²))	0,2239	0,1719	0,0399



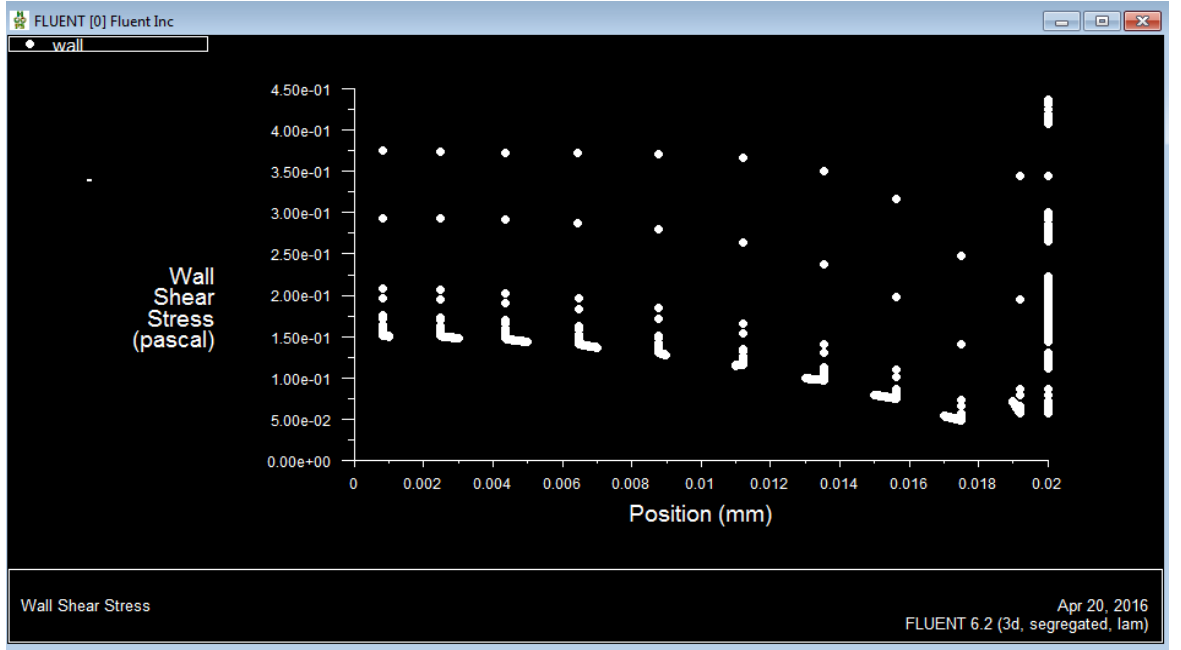
Şekil 3.35 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarı için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği

40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın dar kenarı için, çalışılan debideki deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi değerlerinden(Şekil 3.35) eşit Y aralıkları ile Çizelge 3.8'deki değerler okunmuştur.

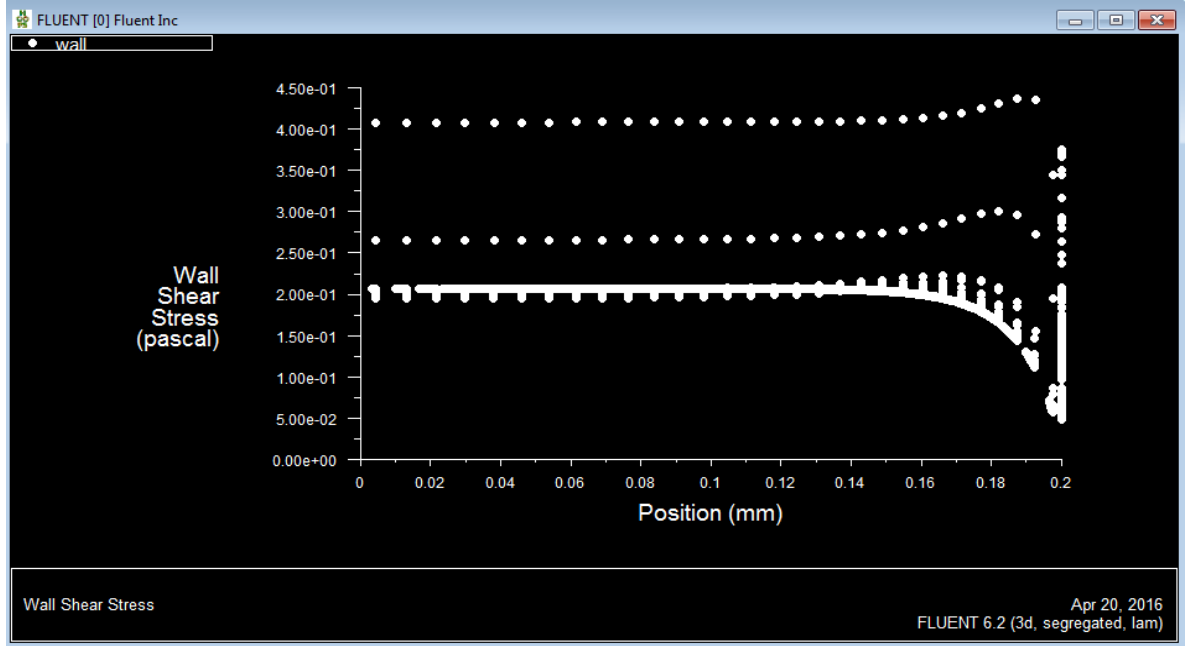
Çizelge 3.8 40 μm ×400 μm kesitindeki kanalın geniş kenarı için çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Y aralıkları ile hesaplanan τ_w değerleri

Y (μm)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	110	120, 130	140, 150	160	170	180	190	200
τ_w (kg/(m.s ²))	0,225	0,223	0,221	0,220	0,218	0,200	0,175	0,132	0,017

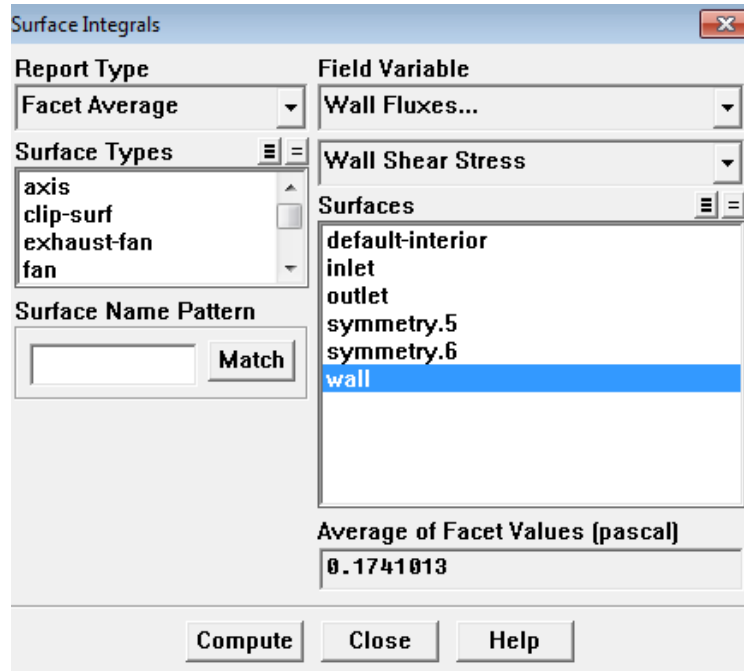
Çizelge 3.7 ve 3.8'deki değerler kullanılarak, 40 μm ×400 μm kesitindeki kanal için alan ağırlıklı duvardaki kayma gerilmesi ortalaması 0,181 Pa olarak bulunmuştur.



Şekil 3.36 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalın dar kenarı için Fluent’de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği



Şekil 3.37 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalın geniş kenarı için Fluent’de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği



Şekil 3.38 Fluent’de hesaplanan $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalın alan ağırlıklı ortalama duvardaki kayma gerilmesi değeri

Burada Fluent ile yapılan hesaplamalarda duvardaki kayma gerilmesi hesaplamaları (Şekil 3.36, 3.37) yapılmış ve alan ağırlıklı ortalaması 0,174 Pa bulunmuştur (Şekil 3.38). Akış laminar ve gelişmiş akış kabul edilerek çözüm yapılmıştır.

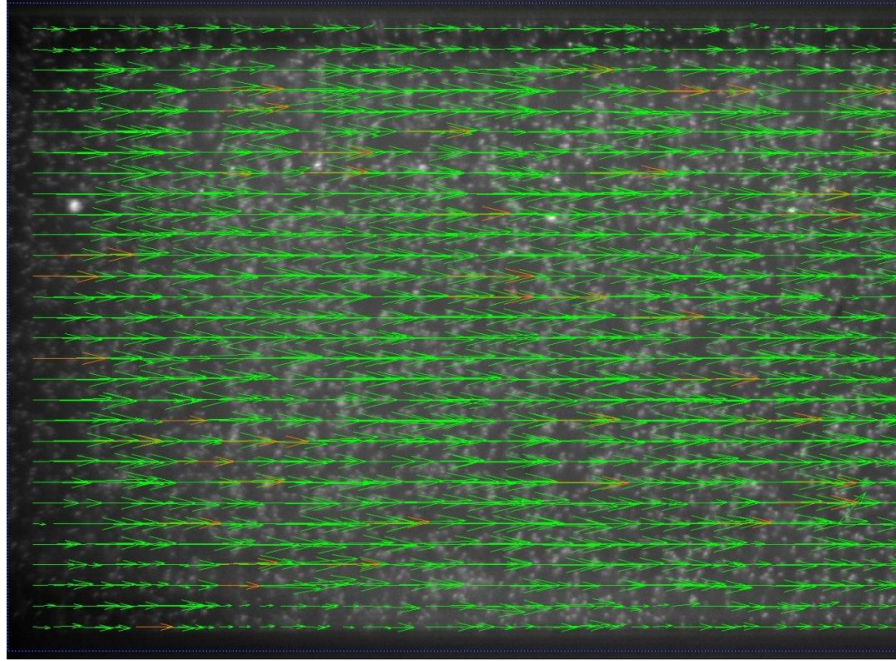
Çizelge 3.9 $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanal için 0,063 mL/h debide basınç düşüşü

	Analitik Hesaplama	Fluent	Fark Basıncı Ölçer	Hız Profili
Basınç Düşüşü (mbar)	5,29	4,78	5,1	4,98

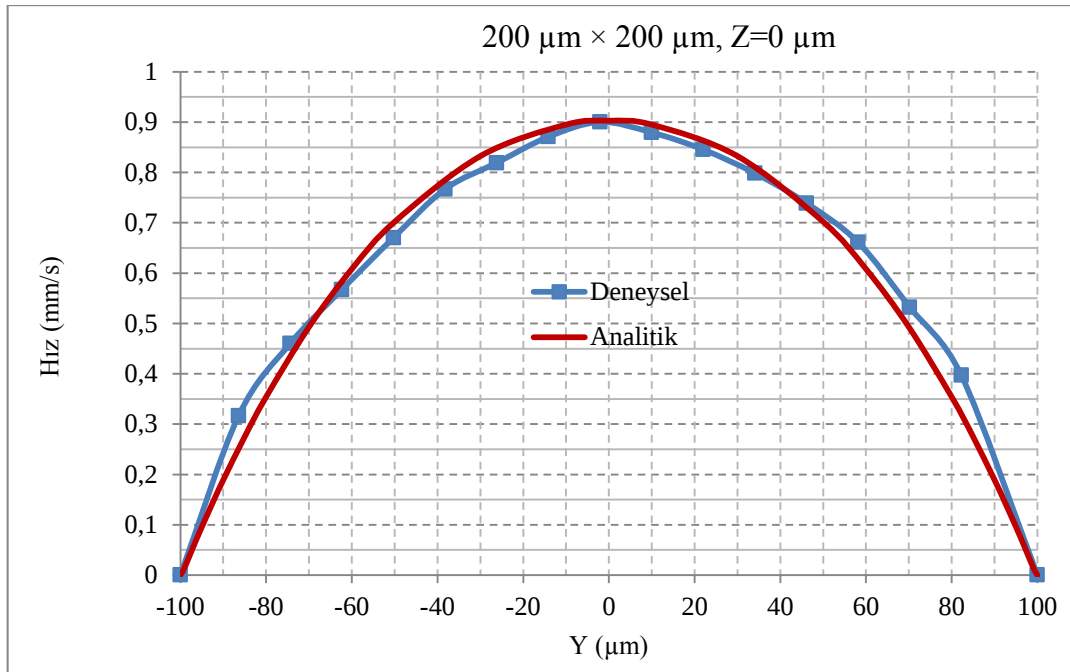
Çizelge 3.9’deki değerler $40\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanal için 0,063 mL/h debide çeşitli yöntemler ile hesaplanmış basınç düşüşü değerleridir. Analitik hesaplama olarak ifade edilen değer, Bölüm 1.1.9’da anlatılan şekilde bulunmuştur. Fluent’de ve mikro-PIV ile hız profillerinden hesaplanan alan ağırlıklı duvardaki kayma gerilmesi değerleri Formül 3.5’de kullanılarak kanaldaki basınç düşüşü değeri bulunmuştur. Burada mikro-PIV ölçümleri ile diğerlerini kıyasladığımızda, analitik hesaplama ile %5,8’lik bir fark varken fluent’den hesaplanan değer ile %4,2’lik bir fark bulunmuştur. Ancak toplam ölçüm belirsizliği %3 mertebelerinde olduğu için gerçekte bu değer biraz daha farklı olma aralığına sahiptir.

3.6.2 Kare Kesitli Kanal

0,062 mL/h debide($Re= 0,086$), $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ kesitinde ve 50 mm boyunda olan kanal için 5 farklı derinlikte yapılan ölçüm sonuçları(Z - merkezden uzaklık, maksimum 100 μm) Şekil 3.39-3.44 ve Çizelge 3.10'da verilmiştir.

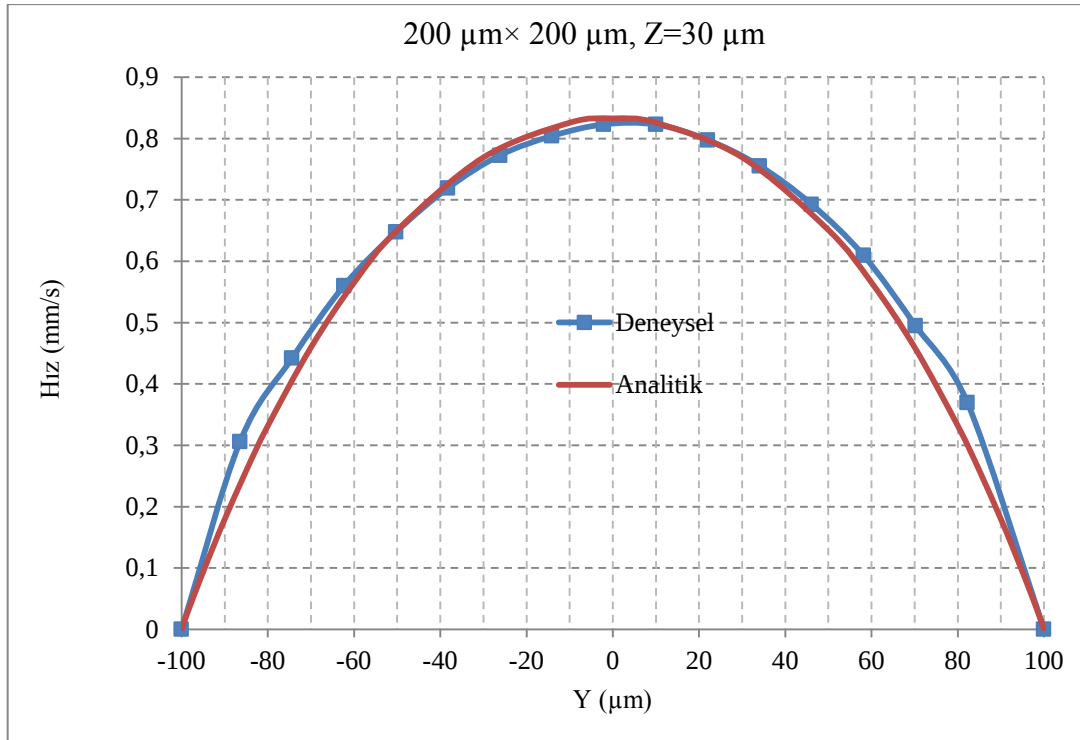


(a)

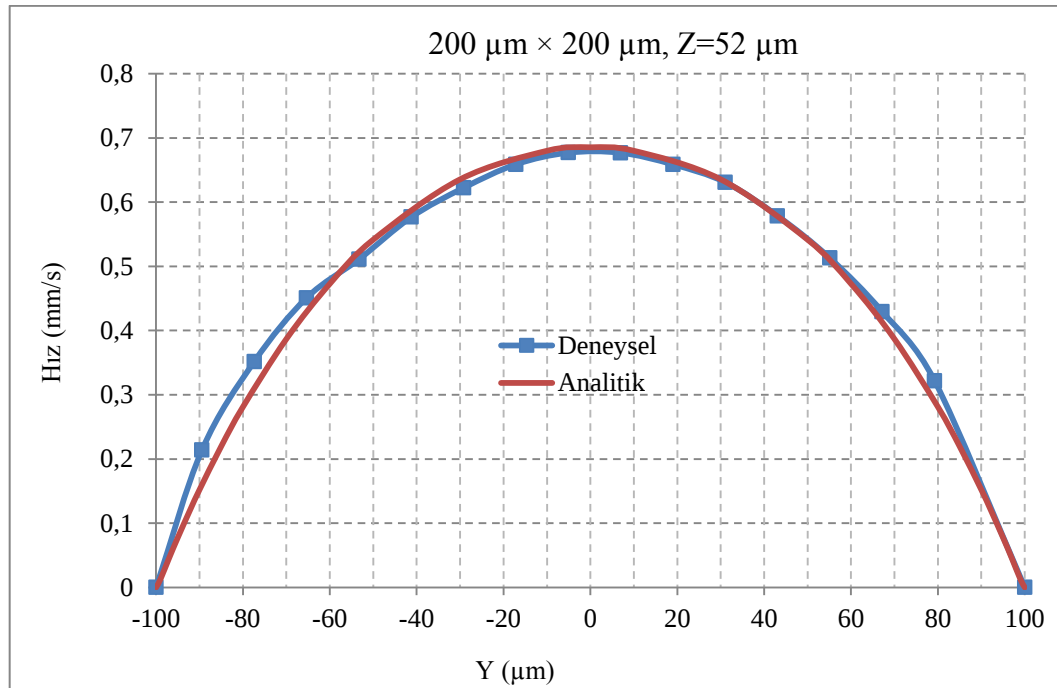


(b)

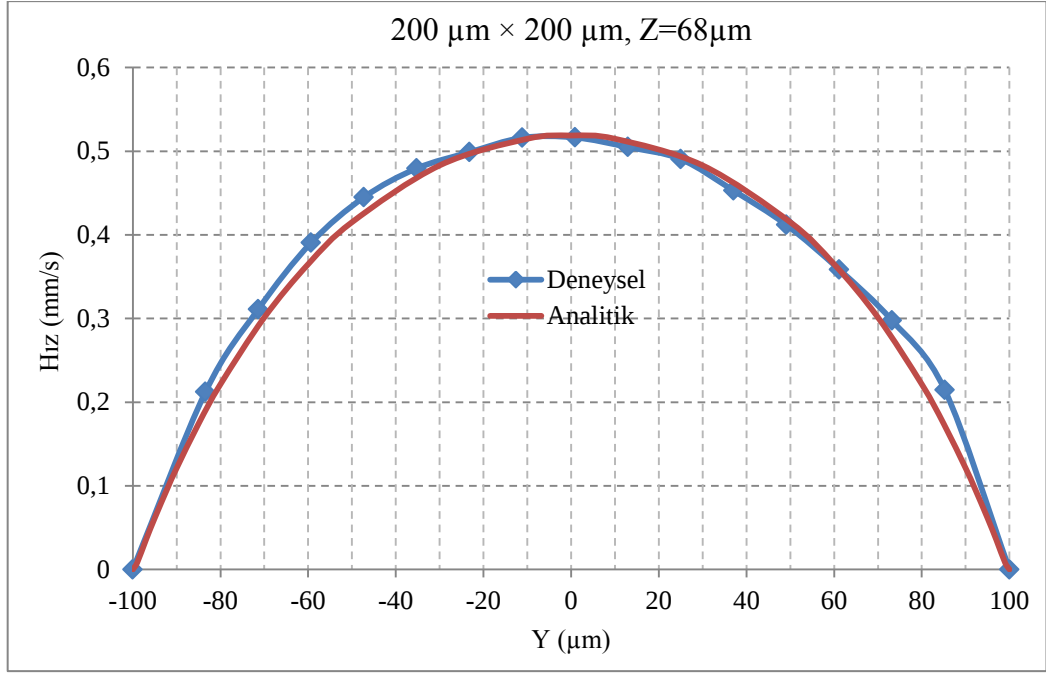
Şekil 3.39 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta nokta uzaklıkta elde edilen hız profilleri (a ve b)ve analitik olarak hesaplanan hız profili



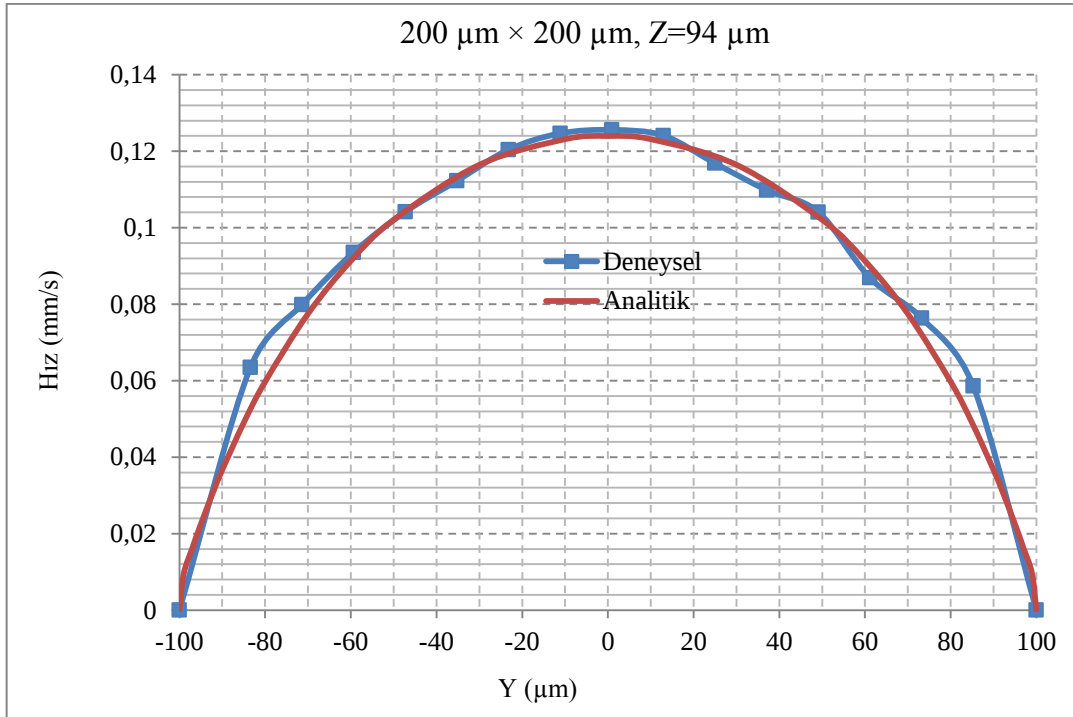
Şekil 3.40 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $30\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



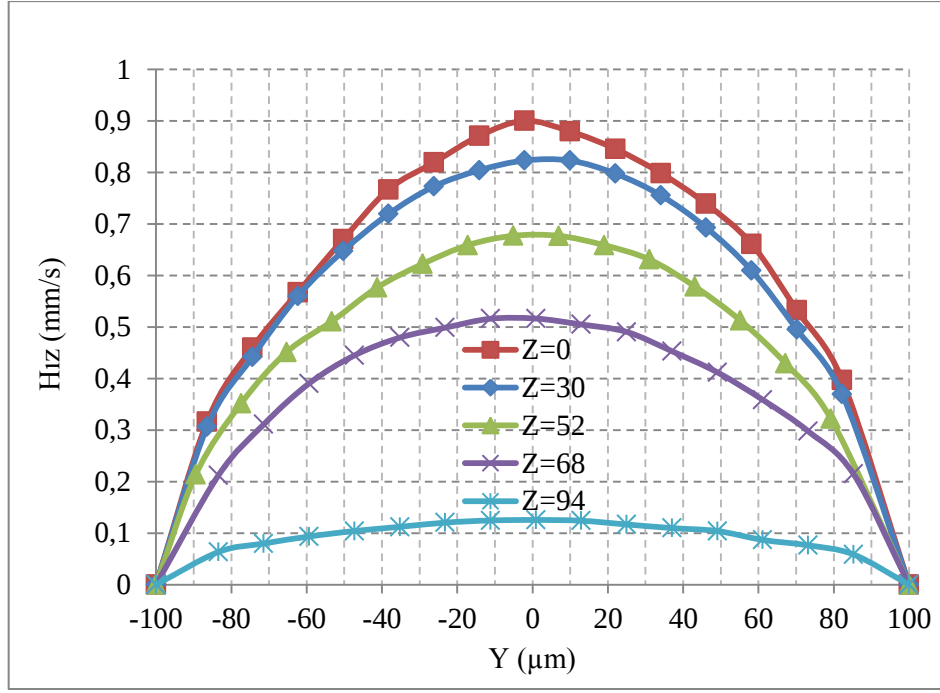
Şekil 3.41 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $52\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.42 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $68\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



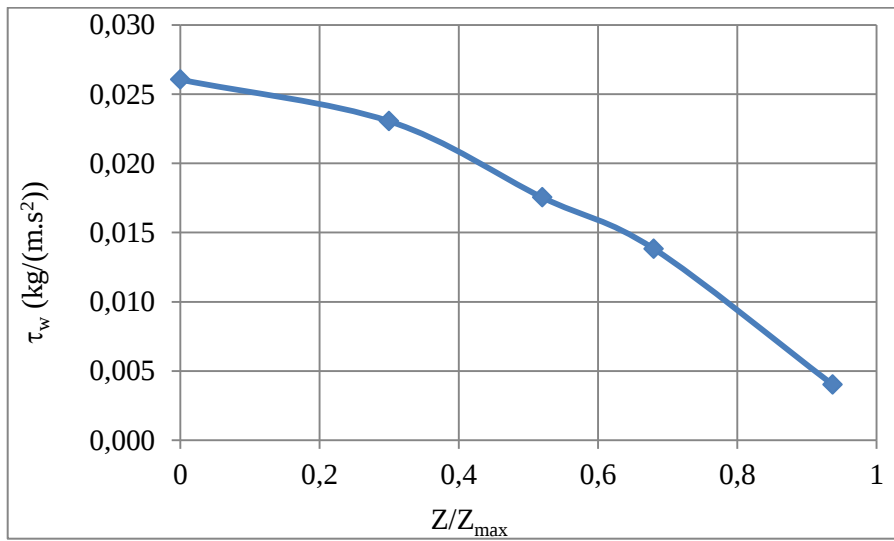
Şekil 3.43 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda orta noktadan $94\ \mu\text{m}$ uzaklıkta elde edilen hız profilleri ve analitik olarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.44 200 µm×200 µm kesitindeki kanalda farklı derinliklerdeki hız profillerinin beraber gösterimi

Çizelge 3.10 200 µm×200 µm kesitindeki kanalda farklı derinliklerde hız gradyanları ve duvardaki kayma gerilmeleri

	Z = 0	Z = 30	Z = 52	Z = 68	Z = 94
du/dy (1/s)	26,0	23,0	17,5	13,8	4,0
τ_w (kg/(m.s ²))	0,02605	0,02305	0,01754	0,01383	0,00401



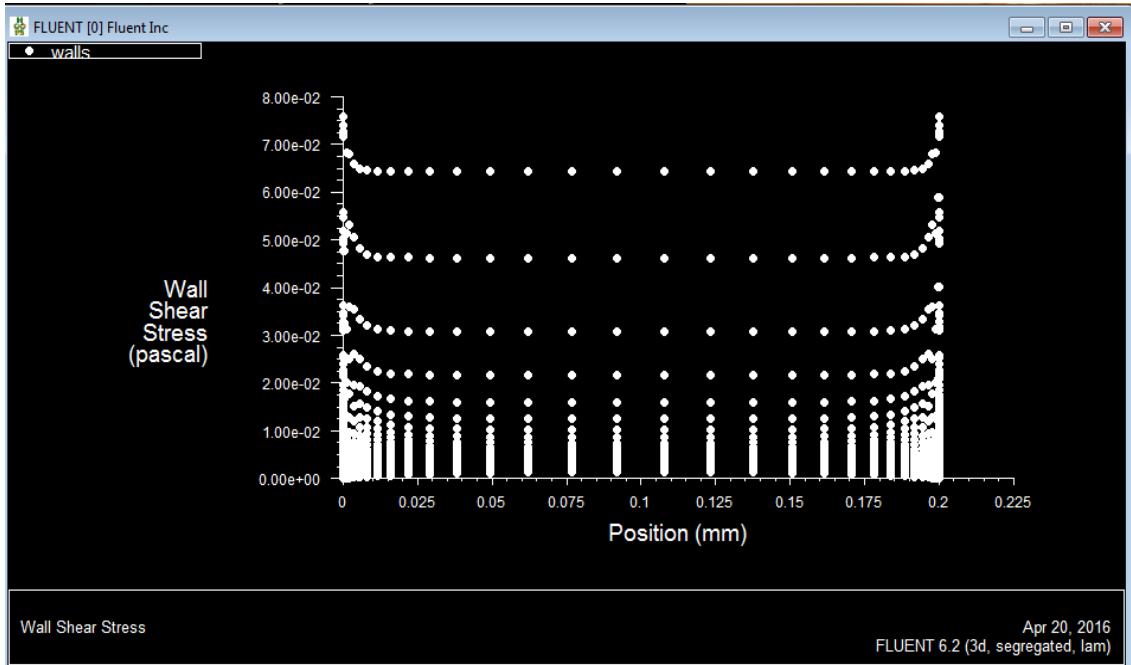
Şekil 3.45 200 µm×200 µm kesitindeki kanal için deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi-kanal derinliği oranı grafiği

200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitindeki kanal için çalışılan debideki deneysel olarak bulunan duvardaki kayma gerilmesi değerlerinden (Şekil 3.45) eşit Z aralıkları ile Çizelge 3.11'deki τ_w değerleri hesaplanmış ve kanal simetrik kabul edilerek alan ağırlıklı ortalama hesaplanmıştır.

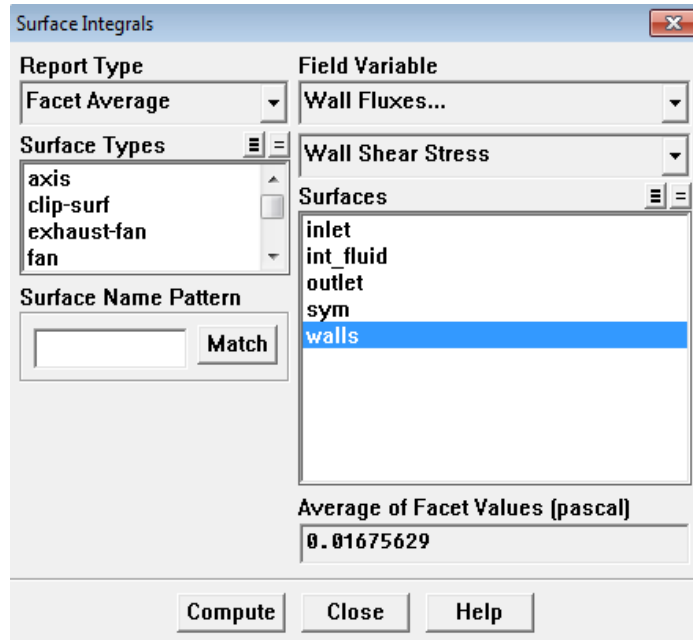
Çizelge 3.11 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitindeki kanalda çalışılan debideki farklı derinliklerde eşit Z aralıkları ile hesaplanan τ_w değerleri

Z (μm)	0	20	40	60	80	100
τ_w (kg/(m.s ²))	0,0261	0,0242	0,0210	0,0160	0,0095	0,0015

Çizelge 3.11'deki değerler kullanılarak, 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitindeki kanal için alan ağırlıklı duvardaki kayma gerilmesi ortalaması 0,0169 Pa olarak bulunmuştur.



Şekil 3.46 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ kesitindeki kanal için Fluent'de hesaplanan kayma gerilmesi grafiği



Şekil 3.47 Fluent’de hesaplanan 200 μm ×200 μm kesitindeki kanalın alan ağırlıklı ortalama duvardaki kayma gerilmesi değeri

Burada Fluent ile yapılan hesaplamalarda duvardaki kayma gerilmesi hesaplamaları (Şekil 3.46) yapılmış ve alan ağırlıklı ortalaması 0,01676 Pa bulunmuştur(Şekil 3.47). Akış laminar ve gelişmiş akış kabul edilerek çözüm yapılmıştır.

Çizelge 3.12 200 μm ×200 μm kesitindeki kanal için 0,062 mL/h debide basınç düşüşü

	Analitik Hesaplama	Fluent	Fark basıncı ölçer	MikroPIV Hız Profili
Basınç Düşüşü (mbar)	0,154	0,1676	0,2	0,169

Çizelge 3.12’deki değerler 200 μm ×200 μm kesitindeki kanal için 0,062 mL/h debide çeşitli yöntemler ile hesaplanmış basınç düşüşü değerleridir. Analitik hesaplama olarak ifade edilen değer, Bölüm 1.1.9’da anlatılan hesaplama yöntemi ile bulunmuştur. Fluent’de ve mikro-PIV ile hız profillerinden hesaplanan alan ağırlıklı duvardaki kayma gerilmesi değerlerinden, (3.5) eşitliği kullanılarak kanaldaki basınç düşüşü değeri bulunmuştur. Burada mikro-PIV ölçümleri ile diğerlerini kıyasladığımızda, analitik hesaplama ile %9,6’lık bir fark varken fluent’den hesaplanan değer ile %1,2’lik bir fark bulunmuştur. Ancak toplam ölçüm belirsizliği %3 mertebelerinde olduğu için gerçekte bu değer biraz daha farklı olma aralığına sahiptir.

3.7 Hata Hesaplamaları

PIV sistemi için aşağıdaki model fonksiyon göz önünde bulundurulur:

$$u = \frac{M \cdot \Delta X}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Ancak PIV sistemi için direk bu formül üzerinden belirsizlik hesaplamak yerine bu formülü etkileyecek bileşenlerin ve etkenlerin ölçüm sonucu hata payına katkıları göz önüne alınmaktadır. Akışın tam gelişmiş, basınç sürmeli, kanal yüzeyi su sevmeyen ve çok düşük Re değerlerinde olduğunu göz önüne aldığımızda ve literatürde de yer alan çalışmalara (Olsen ve Adrian [26], Zheng ve Silber-Li [72]), baktığımızda (1.34) analitik denkleminin kullandığımız mikro kanallar için de kullanılabildiği görülmektedir. Ölçüm hatası olarak deneysel sonuçların analitik sonuçlardan sapma yüzdesi ve bu sapmaya neden olan belirgin bileşenlerin incelenmesi lazım. Dolayısıyla ölçüm hatalarını göz önüne aldığımızda dikkat etmemiz gereken konular aşağıda sıralanmıştır:

1- Stokes sürüklenmesi: Kullandığımız parçacıklar üretici şirket tarafından özel olarak mikroPIV için üretilmiştir. Bu nedenle bu parçacıkların yoğunluğu suyun yoğunluğuna çok yakın olarak üretilmektedir. Ayrıca, kullandığımız parçacıkların çaplarının ortalamadan sapması da çok düşük olduğu için her hangi bir viskozite değişimine de yol açmamaktadırlar. Dolayısıyla, $\rho_p=1,05 \text{ g/cm}^3$ alınarak, (1.1) eşitliğinden $1 \mu\text{m}$ ve $3 \mu\text{m}$ tanecik çapları için u_s sırasıyla $2,83 \times 10^{-5}$ ve $2,55 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$ olarak bulunmuştur. Çizelge 3.13'den de görüldüğü gibi ölçüm üzerindeki Stokes sürüklenmesinden gelen belirsizlik ihmal edilecek mertebededir.

Çizelge 3.13 Yapılan çalışmalarda Stokes sürüklenmesi hesabı için kullanılan veriler ve belirsizlik değerleri

Parametre	Deney 1 ve 4 (Bölüm 3.3 ve 3.6)	Deney 2 (Bölüm 3.4)	Deney 3 (Bölüm 3.5)
d_p	$3 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m}$
u_s	$2,55 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$	$2,83 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$	$2,55 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$
u_{max}	$1,5 \text{ mm/s}$	2 mm/s	5 mm/s
Belirsizlik	$\% 1,7 \times 10^{-2}$	$\% 1,4 \times 10^{-3}$	$\% 5,1 \times 10^{-3}$

2-Brownian hareketi: Küresel besleme tanecikleri için, oda sıcaklığındaki sudaki difüzyonunu hesaplamak için (1.7) ve (1.8) eşitlikleri kullanılır. Çalışmalardaki şartlar için Çizelge 3.14’de veriler ve sonuçlar görülmektedir. $\mu = 0,001 \text{ kg/(m.s)}$ ve $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ olarak alınmıştır. Bu çalışmalardaki belirsizlik için ilgili deneyin ortalama çalışma hızları alınmıştır.

Çizelge 3.14 Yapılan çalışmalarda Brownian hareketi hesabı için kullanılan veriler ve belirsizlik değerleri

Parametre	Deney 1 ve 4 (Bölüm 3.3 ve 3.6)	Deney 2 (Bölüm 3.4)	Deney 3 (Bölüm 3.5)
d_p	3 μm	1 μm	3 μm
T	295 K	295 K	294 K
t	50 ms	50 ms	1 ms
L	0,084 μm	0,146 μm	0,012 μm
u_{max}	1,5 mm/s	2 mm/s	5 mm/s
ε_B	% 0,22	% 0,29	%0,48

3- Odak derinliği: (1.10) eşitliği ve Çizelge 3.15’deki veriler kullanılarak bulunan görme derinlik değerleri hesaplanmıştır. Bu görme derinliği değerleri inceleme hacmimizin içinde kaldığından ölçüme etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca, deneylerin yapıldığı hızlarda, özellikle de kanalların orta kısımlarında akış çizgilerinin çok iyi ve düzgün olması, görüntüleme sisteminin bakış açısı içerisinde parçacıkların çok yüksek kısmının aynı parlaklıkta olması, sistemin odak derinliğinin ölçüm sonuçlarını etkilemeyecek derecede yeterli olduğunun kanıtıdır.

Çizelge 3.15 Yapılan çalışmalarda odak derinliği hesabı için kullanılan veriler ve odak derinlikleri

Parametre	Deney 1ve 4 (Bölüm 3.3 ve 3.6)	Deney 2 (Bölüm 3.4)	Deney 3 (Bölüm 3.5)
d_p	3 μm	1 μm	3 μm
λ	532 nm	532 nm	532 nm
n	1	1	1
NA	0,6	0,86	0,86
$\tan\theta$	0,58	0,85	0,85
δz_m	9,3 μm	2,8 μm	6,4 μm

4- Tanecik yer-değişimini bulmadan gelen hatalar: Normal modda 1. Deneyde 1 μm 'lik tanecik yaklaşık olarak 4 piksele, 2. Deneyde 3 μm 'lik tanecik, yaklaşık olarak 8-10 piksele, 3. Deneyde 3 μm tanecik çapı yaklaşık 4 piksele tekabül etmiştir. Korelasyon pikinin, tanecik görüntü boyutunun onda biri hassasiyetle bulunması için gerekli kriter olan, 3-4 piksel şartı ile uyumludur (Meinhart vd. [17]). Binning modlarında bu değer 2-3 pikseldir. Bu değer de yeterli olmaktadır (Olsen ve Bourdon [31]). Buna göre ölçüm hatası, $d_x \approx d_e / 10M$ kullanılarak tanımlanabilmektedir. (1.11) ve (1.12) kullanılarak, taneciğin efektif çapı ve buradan gelebilecek hata hesaplanmıştır(Çizelge 3.16).

Tüm hesaplamalarda görüntü inceleme için geliştirilen yazılımda, inceleme pencerelerinin örtüşmesi Nyquist örnekleme kriterine (%50) uymaktadır. Bu kriter uymayan ölçüm sonuçları istatistik hesaplamalarında dikkate alınmamıştır. Dolayısı ile görüntü incelemede parçacıkların yer değişimi hesaplamalarında oluşabilecek belirsizlik karşılıklı-ilinti fonksiyonu hesaplarında en kötü durum ($d_x \approx d_e / 10M$) göz önüne alınarak, 1/10 piksel boyutunda hata hesaplamalara katılmıştır.

Çizelge 3.16 Yapılan çalışmalarda tanecik yer-değişimi bulmadan gelen hatalar için kullanılan veriler ve belirsizlikler

Parametre	Deney 1ve 4 (Bölüm 3.3 ve 3.6)	Deney 2 (Bölüm 3.4)	Deney 3 (Bölüm 3.5)
d_p	3 μm	1 μm	3 μm
λ	532 nm	532 nm	532 nm
M	20	30	25
NA	0,6	0,86	0,86
d_s	21,63 μm	22,64 μm	18,87 μm
d_e	63,78 μm	37,58 μm	77,33 μm
d_x	0,32 μm	0,13 μm	0,31 μm
ε_d	% 0,43	% 0,13	% 0,50

5- Zaman aralığının(Δt) belirlenmesinden gelen hata: Fotoğraf kareleri arası zaman 10^{-6} ms mertebesinde belirsizlik ile ölçülmüştür ve ihmal edilebilir düzeydedir.

Toplam belirsizlik görüldüğü gibi %1'in altında kalmaktadır ve bu değer deneylerde elde edilen analitik çözüm ile olan farklardan($\sim\%3$) ve standart sapma($\sim\%2$) değerlerinden azdır.

Kapiler etkiden doğabilecek hatalar baktığımızda, bu etkinin kanalın geometrisine pek bağlı olmadığı görülmektedir. Kapiler veya osmatik akıslarda bu etki daha çok görülmektedir. Bizim çalışmamızdaki gibi basınç sürmeli (pressure driven flow) akıslarda etkisi ancak kanal cidarından 1-3 μm mesafeye kadar olmaktadır.

Kanal yüzeyinde oluşabilecek kayma yüzünden oluşabilecek hatalara baktığımızda da su sevmeyen yüzeylerde analitik çözümlerin geçerli olduğu gösterilmiştir. Bununla ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tretheway ve Meinhart, 2002 'de kayma akışı çalışmaları yapmıştır (Tretheway ve Meinhart [20]). Bunun için bir normal, bir de yüzeyi su tutmayan malzeme ile kaplanmış şekilde 30 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ dikdörtgen kanal ile hız profilindeki değişimleri mikro-PIV sistemi ile gözlemlemiştir. Yüzeyi su seven

(kaplanmamış cam) kanalda ölçülen hız profili, kayma olmayan koşullardaki Stokes eşitliğinden hesaplanan ile uyumlu bulunmuştur.

Parçacıkların yerlerinin bulunmasında uygulanan cross-correlation metodunda kullanılan sorgulama pencerelerinin boyutu da bir başka sistematik hata kaynağıdır. Büyük pencereler kullanıldığında sistematik hata büyük, ancak RMS düşük olur. Daha az sorgulama penceresi kullanıldığı için toplam işlem sayısı azaldığında hesaplamalardaki belirsizlik artmaktadır. Ama bütün ölçümler laminar olduğu için, zaman ortalamalı hız alanları yöntemi kullanılarak bu etki, yani çok fazla pencere sorgulamasından gelen belirsizlik kısmen düşürülmektedir (Meinhart vd. [73]).

Bunun yanında, inceleme penceresi ne kadar büyükse, duvara paralel kayma vektörü bileşenin bulunmasındaki sistematik hata o kadar büyüktür. Bunun büyüklüğü duvar normali yönündeki korelasyon penceresi boyutunun fonksiyonudur. Duvara paralel kayma vektörü bileşeninin, duvara inceleme penceresinin yüksekliğinin yarısından daha yakın yerlerde olduğu düşünülür. Sistematik hatanın büyük bir kısmı ortalama partikül görüntü yerdeğişiminden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, eğer gerçek yerinde vektör elde edilemediyse, pencerenin merkez konumu ile ilgilidir. Bu yüzden, ideal şartlar altında bile (sabit akış gradyanı, homojen partikül dağılımı, ideal partikül yoğunluğu ve boyutu), duvar yakınında, duvarın normal yönündeki inceleme penceresinin yarısından daha küçük güvenilir bir yerdeğişimi mesafesi tespit edilmesi beklenemez. Duvara paralel yön X, duvarın normali yönü Y olsun. Örneğin, 16×16 piksel inceleme penceresi için, vektörün yeri Y yönünde 8 piksel kaymış olarak bulunması beklenir (Kähler vd. [23]). $30 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ luk kanaldaki çalışmamızda pencere boyutları $23,25 \mu\text{m} \times 5,8 \mu\text{m}$ idi. Bu durumda kenardan yaklaşık $3 \mu\text{m}$ lik bir kayma beklenmektedir. Bu etki en fazla %3 olarak görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada mikro kanallarda akışın incelenmesinde kullanılan mikro-PIV performansını maliyeti arttırmadan artırma yolları aranmıştır. Bunun için de, mikro-PIV sisteminde CCD kameranın binning ve çift-çekim (double shutter) özelliğini kullanarak, sistemin dinamik hız aralığını arttırırken görüntü kalitesini de koruyacak kullanışlı bir metot amaçlanmıştır. Binning işlemi, sistemin mekânsal çözünürlüğünü azaltsa da, kamera hızını ikiye katlaması ve görüş alanını koruması, dinamik hız aralığını arttırmada kullanılabilecek önemli özelliklerdir. Mekânsal çözünürlüğün arttırılması da çift-çekim özelliği ile sağlanmıştır. Bu çalışmada kısaca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Laminer akış şartlarında, dikey binning uygulanarak, 100 pikselde 1 piksel gibi ihmal edilebilir bir hataya neden olurken, dinamik hız aralığının iki katına çıktığı tespit edilmiştir.
- Dikey binning modları kullanılarak kamera hızı, normal modda 20 fps iken, 2×1 modunda 33 fps ve 3×1 modunda 42 fps değerine çıkmıştır. Bunun ile eşdeğer şekilde mikro-PIV sisteminde binning modu kullanılarak deneylerde normal modda ölçülebilen maksimum akış hızı, 2×1 binning modunda %50, 3×1 binning modunda %108 artmıştır.
- Binning işlemi ile çıkış görüntüsünün boyutu ve dolayısıyla piksel sayısı azalmış ve böylece ölçümler sırasında bilgisayar hafızasında daha fazla görüntü saklanabilmiştir.

- Binning işlemi ile azalan piksel sayısı sayesinde, korelasyon hesaplamaları birleşen piksel sayısının karesi oranında azalmaktadır.
- Sadece binning kullanıldığında toplam hesaplanan hız profillerinin geçerli hız vektörlerine oranının %80 civarlarındadır. %20'lik kayıp vardır. PIV sisteminde binning moduyla beraber çift çekim modunun kullanılmasıyla çözünürlük iyileştirilmiş ve hız vektörlerinin tespitinde geçerli vektörlerin oranı %96'lara kadar yükseltilmiştir.
- Bu değer aynı aydınlatma seviyesinde, 1×2 ve 2×1 binning modundaki görüntüler için geçerli vektörlerin toplam hesaplanan vektörlere oranı sırasıyla, %90 ve %92'ye yükselmiştir. Yani kaybın %50'si kazanılmıştır.
- 2×2 binning modu için bu oran % 95-96 olarak elde edilmiştir. Yani kaybın %75'i kazanılmıştır.
- Bu sonuçlar, çift çekimli CCD kameralarda binning modu seçiminin, en düşük aydınlatma şartlarında bile PIV görüntü kalitesinin artırılmasını sağlayabileceğini göstermektedir.
- Çift çekim özelliği kullanıldığında, 2×2 binning modu ile çıkılabilen yüksek hızlara normal modda da ulaşılabildiği görülmüştür.
- Tüm ölçümler kabul edilebilir hata düzeylerini geçmemiştir.
- PIV sistemi kullanılarak elde edilen basınç düşüşü değerlerinin geleneksel sayısal çözümler ile elde edilen değerler ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.
- Fluent'de ve PIV sistemi ile elde edilen hız profilinden hesaplanan basınç düşüşü değerleri arasında %2 ila 4 gibi farklar bulunmuştur. Bu da PIV sisteminin hata değerlerinin içinde kalmaktadır.

Sonuç olarak, amaca ulaşılmış, mikro-PIV sistemin hata değerleri korunarak normal şartlardakinden 2 kat daha yüksek akış hızlarında çalışmayı sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir.

4.2 Öneriler

Bu çalışmada çift-çekim özellikli CCD kameraların binning özelliklerinin mikro kanallardaki akışların incelenmesinde dinamik aralığın en az iki katına çıkaran metot

geliştirilmiştir. Ayrıca, tam gelişmiş laminer akışların hız ölçümlerinde bu dinamik aralık 3-4 kata kadar arttırılabilir. Deneylerde bu metodun farklı ölçülerdeki kanallarda mikro-PIV yönteminde çok başarılı olduğu gözlemlendi. Bilindiği gibi mikro-PIV yönteminde ölçüm derinliği kullanılan optiğin odak derinliği ile belirlenmektedir. PIV yönteminde ise bu derinlik lazer perdesinin kalınlığı ile belirlenmektedir. Dolayısı ile PIV ve mikro-PIV arasındaki bu farkı göz önüne alarak ve bu çalışmada geliştirilen metodun devamı olarak benzer incelemeler PIV yöntemi ile yapılan ölçümlerde de kullanılabilir:

- Lazer perdesi ile oluşturulan ve büyük ölçülerdeki(1 mm üzerindeki hidrolik çaplar) akışların incelenmesinde kullanılan PIV yönteminde, bu çalışmada geliştirilen binning metodunun kullanılması,
- Yüksek derinliklerdeki akışların incelenmesi (Derinlik arttıkça floresan parçacıklardan gelen ışık sıvı tarafından yutulmaktadır. Bu da görüntü kalitesini düşürmektedir. Binning metodunun düşük aydınlatmalı ortamlarda daha iyi kalitede görüntüler elde etme yeteneğini kullanarak daha derin katmanlardaki akışlar incelenebilir),
- Çift-çekim ve binning özellikleri kullanılarak çok fazlı akışların incelenmesi,
- Gerçek zamanlı görüntüleme yöntemiyle incelenmesi gereken akışlarda hız ölçümleri(Örneğin; bu çalışmada gösterildiği gibi 2x2 binning yöntemi hız alanının incelenmesinde kullanılan karşılıklı-ilinti hesaplamalarının 4 kat daha hızlı yapılmasını sağlamaktadır.
- Düşük maliyetli PIV ve mikro-PIV sistemlerinin geliştirilmesi,
- Çift-çekim ve binning metodlarının eşleşmesi ile kameranın hızının ve dolayısı ile ölçüm hızının artması ile yüksek hızlardaki PIV yöntemi ile ölçülen akışların incelenmesi,
- Binning yönteminin CCD kameraların hassasiyetini arttırması ve gürültü-sinyal oranını düşürmesi olanağını kullanarak damarlardaki kan akışının incelenmesi.

KAYNAKLAR

- [1] Nasibov, H. ve Baytaroglu, N., (2010), “Recent Advances in Digital Particle Image Velocimetry Methods for Flow Motion Analysis,” *Int. J. Metrol. Quality Eng.*, 1: 21–29.
- [2] Meinhart, C.D., Prasad, A.K. ve Adrian, R.J., (1993), “A Parallel Digital Processor System for Particle Image Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol*, 4: 619-626.
- [3] Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. ve Adrian R. J., (1998), “A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics”, *Experiments in Fluids*, 25: 316-319.
- [4] Adrian, R. J. (2005), “Twenty Years of Particle Image Velocimetry”, *Experiments in Fluids*, 39: 159–169.
- [5] Lin, J.C ve Rockwell, D., (1994), “Cinematographic System for High-Image-Density Particle Image Velocimetry”, *Experiments in Fluids*, 17 (1-2) : 110-118.
- [6] Adrian, R.J., (1997), “Dynamic Ranges of Velocity And Spatial Resolution of Particle Image Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, 8: 1393–1398.
- [7] Lai, W.T., Bjorkquist, D.C., Abbott, M.P., Naqwi, A.A.(1998), “Video Systems for PIV Recording”, *Measurement Science and Technology*, 9(3): 297-308.
- [8] Shinohara, K., Sugii, Y., Aota, A., Hibara, A., Tokeshi, M., Kitamori, T. ve Okamoto, K., (2004), “High-Speed Micro-PIV Measurements of Transient Flow in Microfluidic Devices”, *Meas. Sci. Technol.*, 15:1965–1970.
- [9] Li, Y.H., Wu, C.Y., Chen, B.C. ve Chao, Y.C. (2008), “Measurements of a High-Luminosity Flame Structure by a Shuttered PIV System” *Measurement Science and Technology*, 19 (4): 045401.
- [10] Liow, J.L. ve Cole, D.E., (2009), “High Framing Rate PIV Studies of an Impinging Water Drop”, 28th International Congress On High-Speed Imaging And Photonics, *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 7126:71260L.
- [11] Prasad, A.K., (2000), “Particle Image Velocimetry”, *Current science*, 79 (1):51-60.
- [12] Melling, A., (1997), “Tracer Particles and Seeding for Particle Image Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, 8: 1406–1416.
- [13] Adrian, R.J., (1991), “Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid

- Mechanics”, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23: 261–304.
- [14] Keane, R.D., Adrian R.J. ve Zhang, Y., (1995), “Super-Resolution Particle Imaging Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, 6: 754-768.
 - [15] Scarano, F., (2002), “Iterative Image Deformation Methods in PIV”, *Meas. Sci. Technol.*, 13 :R1–R19.
 - [16] Meldrum, D.R. ve Holl, M.R., (2002), “Microscale Bioanalytical Systems”, *Science*, 297: 1197–1198.
 - [17] Meinhart, C.D., Wereley, S.T. ve Santiago, J.G., (1999), “PIV Measurements of a Microchannel Flow”, *Exp. Fluids*, 27: 414–419.
 - [18] Devasenathipathy, S., Santiago, J.G., Wereley, S.T., Meinhart, C.D. ve Takehara, K., (2003), “Particle Imaging Techniques for Microfabricated Fluidic Systems”, *Experiments in Fluids*, 34: 504–514.
 - [19] Bown, M.R., MacInnes, J.M. ve Allen, R.W.K., (2005), “Micro-PIV Simulation and Measurement in Complex Microchannel Geometries”, *Meas. Sci. Technol.*, 16: 619–626.
 - [20] Tretheway, D.C. ve Meinhart, C.D., (2002), “Apparent Fluid Slip at Hydrophobic Microchannel Walls”, *Physics of Fluids*, 14 (3) : L9-L12.
 - [21] Kao, J. ve Kleinstreuer, C., (2003), "Liquid Flow in Microchannels: Experimental Observations and Computational Analyses of Microfluidics Effects", *J. Micromech. Microeng.*, 13: 568-579.
 - [22] Cao, B.Y., Chen, M. ve Guo, Z.Y., (2006), "Liquid Flow in Surface-Nanostructured Channels Studied by Molecular Dynamics Simulation", *Physical Review*, 74(7): 066311.
 - [23] Kähler, C.J., Scharnowski, S. ve Cierpka, C., (2012), “On the Uncertainty of Digital PIV and PTV Near Walls”, *Exp Fluids*, 52:1641-1656
 - [24] Kähler, C.J., Scharnowski, S. ve Cierpka, C., (2012), “On the Resolution Limit of Digital Particle Image Velocimetry”, *Exp Fluids*, 52:1629-1639
 - [25] Janesick J. R., (2001), *Scientific Charge-Coupled Devices*, 1. baskı, SPIE Optical Engineering Press, Washington USA.
 - [26] Olsen, M.G. ve Adrian, R.J., (2000), “Brownian Motion and Correlation in Particle Image Velocimetry”, *Optics & Laser Technology*, 32: 621-627.
 - [27] Honkanen, M. ve Nobach, H., (2005), “Background Extraction from Double-Frame PIV Images”, *Experiments in Fluids*, 38: 348–362.
 - [28] Hain, R. ve Kähler, C. J., (2007), “Fundamentals of Multiframe Particle Image Velocimetry (PIV)”, *Exp Fluids*, 42:575–587.
 - [29] McQuarrie, D.A., (1976), *Statistical Mechanics*, 1.baskı, Harper and Row, New York.
 - [30] Liu, D., Garimella, S.V. ve Wereley, S.T., (2005), “Infrared Micro-Particle Image Velocimetry in Silicon-Based Microdevices”, *Experiments in Fluids*, 38: 385–392
 - [31] Olsen, M.G. ve Bourdon, C.J., (2003), “Out-of-plane Motion Effects in

- Microscopic Particle Image Velocimetry”, *Journal of Fluids Engineering (Transactions of the ASME)*, 125:895-901.
- [32] Meinhart, C.D. ve Wereley, S.T., (2003), “The Theory of Diffraction-Limited Resolution in Microparticle Image Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, 14: 1047–1053.
 - [33] Prasad, A.K., Adrian, R. J. ve Landreth, C. C., (1992), “Effect of Resolution on the Speed and Accuracy of Particle Image Velocimetry Interrogation”, *Experiments in Fluids*, 13:105-116.
 - [34] Adrian, R. J. ve Yao, C., (1985), “Pulsed Laser Technique Application to Liquid and Gaseous Flows and the Scattering Power of Seed Materials”, *Applied optics*, 24 (1): 44-52.
 - [35] Westerweel, J., (2000), “Theoretical Analysis of the Measurement Precision in Particle Image Velocimetry”, *Exp Fluids*, 29:3–12.
 - [36] Huang, H., Dabiri, D. ve Gharib, M., (1997), “On Errors of Digital Particle Image Velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, 8: 1427–1440.
 - [37] Astarita, T. ve Cardone, G., (2005), “Analysis of Interpolation Schemes for Image Deformation Methods in PIV”, *Experiments in Fluids*, 38: 233–243.
 - [38] Nobach, H., Damaschke, N. ve Tropea, C., (2005), “High-Precision Sub-Pixel Interpolation in Particle Image Velocimetry Image Processing”, *Experiments in Fluids*, 39: 299–304.
 - [39] Nobach, H. ve Honkanen, M., (2005), “Two-Dimensional Gaussian Regression for Sub-Pixel Displacement Estimation in Particle Image Velocimetry or Particle Position Estimation in Particle Tracking Velocimetry”, *Experiments in Fluids*, 38: 511–515.
 - [40] Gerald, C.H., (1998), *CCD Arrays, Cameras, and Displays*, 2. baskı, SPIE-Optical Engineering Press, Washington.
 - [41] Akselli, B., Kholmatov, A., Nasibov, H., (2009), "The Use of CCD Pixel Binning in PIV Measurements", *International Symposium on Optomechanronic Technologies*, Istanbul, 223-228.
 - [42] Nasibov, H., Kholmatov, A., Akselli, B., Nasibov, A. ve Baytaroglu, Ş., (2010), “Performance Analysis of the CCD Pixel Binning Option in Particle Image Velocimetry Measurements”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15 (4): 527-540.
 - [43] Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T. ve Kompenhans, J., (2007), *Particle Image Velocimetry-A Practical Guide*, 2. Baskı, Springer, New York.
 - [44] Alexander, B.F. ve Ng, K.C., (1991), “Elimination of Systematic Error in Subpixel Accuracy Centroid Estimation”, *Optical Engineering*, 30(9): 1320-1331.
 - [45] Keane, R. D. ve Adrian, R. J., (1992), “Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images”, *Applied Scientific Research*, 49: 191-215.
 - [46] Roesgen, T., (2003), “Optimal Subpixel Interpolation in Particle Image Velocimetry”, *Experiments in Fluids*, 35: 252–256.

- [47] Cholemani, M.R., (2007), "Modeling and Correction of Peak-Locking in Digital PIV", *Exp Fluids*, 42:913–922.
- [48] Gao, P., Person, S.L. ve Marinet, M.F., (2002), "Scale Effects on Hydrodynamics and Heat Transfer in Two-Dimensional Mini and Microchannels", *Int. Journal of Sciences*, 41:1017-1027.
- [49] Steinke, M.E. ve Kandlikar, S.G., (2006), "Single-Phase Liquid Friction Factors in Microchannels", *Int. Journal of Thermal Sciences*, 45:1073-1083.
- [50] Son, Y., (2007), "Determination of Shear Viscosity and Shear Rate from Pressure Drop and Flow Rate Relationship in a Rectangular Channel", *Polymer*, 48:632-637.
- [51] Costaschuk, D., Elsnab, J., Petersen, S., Klewicki, J.C. ve Ameer, T., (2007), "Axial Static Pressure Measurements of Water Flow in a Rectangular Microchannel", *Exp. Fluids*, 43: 907-916.
- [52] Silverio V. ve Moreira A.L.N., (2008), "Pressure Drop and Heat Convection in Single-Phase Fully Developed, Laminar Flow in Microchannels of Diverse Cross Section", in: 5th European Thermal Science Conference, the Nederland.
- [53] Mirmanto, (2013), "Developing Flow Pressure Drop and Friction Factor of Water in Copper Microchannels", *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 3: 641-649.
- [54] Pfund, D., Rector, D. ve Shekarriz A., (2000), "Pressure Drop Measurements in a Microchannel", *Fluid Mechanic and Transport Phenomena*, 46 (8): 1496-1507.
- [55] Bahrami, M., Yovanovich, M. M. ve Culham, J. R., (2005), "Pressure Drop of Fully-Developed, Laminar Flow In Microchannels Of Arbitrary Cross-Section", *Proceedings of ICM 2005 3. International Conference on Microchannels and Minichannels*, Toronto, Ontario, Canada.
- [56] Jiang, J., Hao, Y. ve Shi, M., (2008), "Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Rectangular Microchannel", *Heat Transfer-Asian Research*, 37: 197-207.
- [57] Toh, K.C., Chen, X.Y ve Chai, J.C., (2002), "Numerical Computation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45: 5133-5141.
- [58] Kohl, M.J., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M. ve Sadowski, D.L., (2005), "An Experimental Investigation of Microchannel Flow with Internal Pressure Measurements", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48: 1518-1533.
- [59] Shen S., Xu J.L., Zhou J.J. ve Chen Y., (2006), "Flow and Heat Transfer in Microchannels with Rough Wall Surface", *Energy Conversion and Management*, 47: 1311-1325.
- [60] Akbari, M., Sinton, D. ve Bahrami, M., (2009), "Pressure Drop in Rectangular Microchannels as Compared with Theory Based on Arbitrary Cross Section", *Journal of Fluids Engineering*, 131(041202):1-8.
- [61] Bharati, S. ve Bux, S., (2015), "Study of Fluid Flow and Heat Transfer in Rectangular Micro Channel", *IJIRST–International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(11): 343-349.

- [62] White, F.M., (2006), Viscous Fluid Flow, 3. baskı, McGraw Hill, New York.
- [63] Nguyen, N.T. ve Wereley, S.T., (2006), Fundamentals and Applications of Microfluidics, 1. Baskı, Norwood.
- [64] Panton, R.L., (2005), Incompressible Flow, 3. baskı, John Wiley&Sons Inc., New Jersey.
- [65] Shah R. K. ve London, A. L., (1978), Laminar Flow Forced Convection in Ducts, 1. baskı, Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York.
- [66] Olsen, M.G. ve Bourdon, C.J. (2007), “Random Error due to Brownian Motion in Microscopic Particle Image Velocimetry”, Meas. Sci. Technol., 18: 1963–1972.
- [67] Meinhart, C.D., Wereley S.T ve Santiago J.G., (2000), “A PIV Algorithm for Estimating Time-Averaged Velocity Fields”, J Fluids Eng., 122: 285–289.
- [68] Akselli, B. ve Teke, İ., (2011), “Experimental Investigation of CCD Binning Option in Particle Image Velocimetry Measurements of Laminar Flows”, Int. J. Metrol. Qual. Eng., 2, 83-89.
- [69] Akselli, B. ve Teke, İ., (2012), “Experimental Study of Laminar Flow in Microchannels Through Micro Particle Image Velocimetry”, Proceedings of the 2. Int. Congress APMAS2012, Antalya, Türkiye, 26-29 Nisan 2012.
- [70] Akselli, B. ve Teke, İ., (2013), “The Use of Sensor Binning Option in Double-Shutter CCD Based Digital Particle Image Velocimetry”, Acta Physica Polonica A, 123(2): 439-444.
- [71] Thielicke, W. ve Stamhuis, E. J., (2014), PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.35).
- [72] Zheng, X. ve Silber-Li, Z., (2008), “Measurement of Velocity Profiles in a Rectangular Microchannel with Aspect Ratio $\alpha= 0.35$ ”, Exp Fluids, 44:951–959.
- [73] Meinhart, C.D., Wereley, S.T. ve Gray, M.H.B. (2000), “Volume Illumination for Two-Dimensional Particle Image Velocimetry”, Meas. Sci. Technol., 11: 809–814.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Başak AKSELLİ
Doğum Tarihi ve Yeri : 1972/Üsküdar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : basak.akselli@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kimya Müh.	İTÜ	1997
Lisans	Kimya Müh.	İTÜ	1993
Lise		Kahramanmaraş Lisesi	1989

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
1997-Halen	TÜBİTAK-UME	Baş Uzman Araştırmacı
1997-1997	Fako Ham Madde Fab.	Kalite Kont. Müh.
1995-1997	Çardak Gıda San.	Kalite Kont. Sor.

YAYINLARI

Makale

1. Akselli, B. ve Teke, İ., (2013), “The Use of Sensor Bining Option in Double Shutter CCD Based Digital Particle Image Velocimetry”, Acta Physica Polonica A, 123 (2): 439-44,
2. Nasibov, H., Kholmatov, A., Akselli, B. ve Nasibov, A., (2012), “A PIV Dynamic Velocity Range Enhancement Approach Using ROI Option of Imaging Sensor, Flow Measurement and Instrumentation, 28: 35-44,
3. Akselli, B. ve Teke, İ., (2011), “Experimantally Investigation of The CCD Binning Option in Particle Imaging Velocimetry Measurements of Laminar Flows”, Int. J. Metrol. Qual. Eng., 2: 83-89,
4. Nasibov, H., Kholmatov, A., Akselli, B., Nasibov, A. ve Baytaroglu, Ş., (2010), “Performance Analysis of the CCD Pixel Binning Option in Particle-Image Velocimetry Measurements”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 15(4): 527-540,
5. Kholmatov, A., Akselli, B., Nasibov, A. ve Nasibov, H., (2010), “Subpixel Centroid Position Error Analysis in Particle Tracking Velocimetry Induced by The CCD Pixel Binning”, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications, 7723: R-1,
6. Akselli, B., Kholmatov, A. ve Nasibov, H., (2009), “The Use of CCD Pixel Binning in PIV Measurements”, IEEE International Symposium on Optomechatronic Technologies, 223-229.

Bildiri

1. Akselli, B., (2014), “Soğuk Su ve Isı Sayaçları İzlenebilirliği ve Teknik Gereksinimler”, ICGS2014 Kongresi, İstanbul,
2. Akselli, B. ve Teke, İ., (2012), “Experimental Study of Laminar Flow in Microchannels Through Micro Particle Image Velocimetry”, APMAS2012, 26-29 April 2012, Antalya,
3. Nasibov, H., Kholmatov, A., Akselli, B. ve Nasibov, A., (2010), “Experimental Study of Digital Micro-Particle-Image-Velocimetry (μ PIV) System with LED Illumination”, International Metrology Conference CAFMET 2010, Mısır,
4. Akselli, B., Çiftçi, V., Kholmatov, A. ve Nasibov, H., (2010), “Investigation of Laminar Flow in Microchannels Through μ PIV Measurements at UME”, International Metrology Conference CAFMET 2010, Mısır,
5. Çiftçi, V. ve Akselli, B., (2004), “UME Test Facilities for Oil Flow Measurement up to 300 m³/h”, XII. Flomeko Conference, Çin,
6. Çiftçi, V. ve Akselli, B., (2004), “UME Test Facilities for Water Flow Measurement Up to 3000 m³/h”, XII. Flomeko Conference, Çin,
7. Çiftçi, V., Akselli, B., Ergen, E. ve Tigrel, F., (2004), “Introducing UME Diverters and Weighing Systems for Water and Hydrocarbon Flow Measurement”, XII.

Flomeko Conference, Çin,

8. Kaykısızlı, H., Çiftçi, V., Karadoğan, E. ve Akselli, B., (2003), “Principle of Converting The Mechanical Movements to Electrical Signals by Turbine Meters”, The Netherlands XI FLOMEKO International Conference, Groningen
9. Akışkan Debisi ölçümü Yapan Cihazların Seçimini Etkileyen Faktörler, Çiftçi V., Akselli B. Kaykısızlı H., IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 25-26 Ekim 2001, Eskişehir.
10. Blockage effect of Mechanical Anemometers, Çiftçi V., Akselli B., Kaykısızlı H., IFLOMEKO’ 2000, 10th International Conference on Flow Measurement, June 4-8, 2000, Salvador- BRAZIL.
11. Çiftçi, V., Akselli, B. ve Kaykısızlı, H., (1999), “Extending Measurement of Gas Flow Meter Calibration”, IMEKO XV. World Congress : 29-35, Japonya,
12. Çiftçi, V., Akselli, B. ve Kaykısızlı, H., (1999), “Ulusal Gaz debi Ölçüm Standardı Bell Prover’ın Tanıtılması”, III.Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir,
13. Çiftçi, V., Akselli, B. ve Kaykısızlı, H., (1999), “Gaz Debi Ölçüm Aralığının Orifis Sistemi ile Genişletilmesi ve Anemometre Kalibrasyonu”, III.Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir,
14. Akselli, B., Hilmioğlu, B. ve Atakül, H., (1998), “Sodyum Oksit ve Kalsiyum Oksit İlavesinin Linyit Küllerinin Ergime Sıcaklıklarına Olan Etkisi”, Kimya Mühendisliği Kongresi, Erzurum,
15. Hilmioğlu, B., Akselli, B., Yardım, M.F ve Atakül, H., (1998), “Bazı Türk Linyitleri ile Aglomerasyon Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması”, Kimya Mühendisliği Kongresi, Erzurum.

Proje

1. Metrology for Drug Delivery (JRP-h18), 2012-2015
2. Deneyisel micro-PIV sisteminin kurulması ve geliştirilmesi, 2008-2012.
3. METEOMET Metrology for Meteorology (Env07), 2012-2015.
4. Sanayi Ticaret Bakanlığı, Ölçüler Standartlar Genel Müdürlüğü- İstanbul Bölge İl Müdürlüğü için 2004/22/AT doğrultusunda Yasal Metroloji Laboratuvarları kurulması ile ilgili KAMAG-1007 Projesinin hazırlanması ve Onayı, 2008
5. Sanayi Ticaret Bakanlığına Bağlı Türkiye’nin yedi bölgesindeki Ölçüler ve Standartlar İl Müdürlüklerinin Yasal Metroloji ölçüm alanındaki mevcut Laboratuvar cihazları ve iş gücü kapasitelerinin belirlenmesi ve 2004 / 22 / EEC doğrultusunda gerekli Laboratuvarların kurulması ile ilgili Fizibilite Raporu, 2007
6. İSKİ için Birincil seviye su sayacı test ve kalibrasyon sistemi kurulması, 2005 - 2009