

**AYRIK TÜRBLATÖR ARKASI AKIŞ ALANININ
PIV İLE İNCELENMESİ**

Şakir KARAGÖZ
Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım ABD Tezli YL.
Ocak 2016

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1503F137**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Şakir Karagöz'ün "Ayrık Türbülötör Arkası Akış Alanının PIV ile İncelenmesi" başlıklı **Uçak Gövde Motor Bakım** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 05.01.2016 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. HİKMET KARAKOÇ
Üye (Tez 2. Danışmanı)	: Dr. TOLGA YASA
Üye	: Doç. Dr. ZİYA SÖĞÜT
Üye	: Doç. Dr. ÖNDER ALTUNTAŞ
Üye	: Doç. Dr. EMİN AÇIKKALP

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AYRIK TÜRBÜLATÖR ARKASI AKIŞ ALANININ PIV İLE İNCELENMESİ

Şakir KARAGÖZ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak Gövde Motor Bakım ABD

Tez Danışmanı: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Tez 2. Danışmanı: Dr. Tolga YASA

2016, 76 sayfa

Bu çalışmada, türbin iç soğutma kanallarını temsil eden, ayırık ve entegre türbülatorlerin bulunduğu dikdörtgen kesitli bir kanalda, türbülator arkası akış alanı incelenmiştir. Yedi farklı boşluk-türbülator yüksekliği (b/h) oranında ve yine RE sayısının 33,000-60,000 olduğu aralıkta, ayırık türbülatorlerin akış karakteristiklerine olan etkileri PIV yöntemiyle araştırılmıştır. Türbülator arkası akış alanı, akış çizgileri, boyutsuz aksenal ve radyal hız dağılımları, girdap vektörleri, ilgili boşluk-türbülator yüksekliği oranlarında ve farklı RE sayılarında incelenerek, türbülator sonrası akış yapısı raporlanmıştır. İkincil akışların şekilleri, türbülatorö olan mesafeleri, dönme yönleri gibi özellikleri boşluk oranlarına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Türbülator yükseltildikçe, ikili girdap yapısına geçiş olmakla birlikte, yeniden tutunma noktası türbülatorö yaklaşmaktadır. $b/h=0.14$ oranında, üçlü girdap yapısına geçiş başlamakta, $b/h=0.18$ oranında geçiş tamamlanmaktadır. Bu değer üstündeki boşluk oranlarında, yeniden tutunma noktası görülmemektedir. Buna ek olarak, artan boşluk oranı ile türbülatorö aksenal olarak yaklaşan, birbirine ters yönde dönen girdap yapıları dikkati çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akış Alanı, Ayırık Türbülator, Girdap, PIV, Soğutma Kanalı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

FLOW FIELD INVESTIGATION OF DETACHED TURBULATORS BY USING PIV

Şakir KARAGÖZ

**Anadolu University
Graduate School of Science
Department of Airframe and Powerplant Maintenance**

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Co-supervisor: Dr. Tolga YASA

2016, 76 pages

In the present study, experimental flow field investigation behind a detached turbulator in a rectangular channel representing turbine internal cooling duct has been carried out. Flow characteristics of detached turbulators were studied by using PIV for seven clearance ratios and RE number varied from 33,000 to 60,000. Flow characteristics behind a detached turbulator were reported by means of streamlines, normalized axial and radial velocities and vorticity. Secondary flow characteristics such as vortex structure and strength, position related to the rib and rotating direction were compared for different clearance ratios. As turbulator was elevated from the channel wall, transition of vortex structure and displacement of recirculation zone toward rib were noticed. Clearance ratio of $b/h=0.14$ was the transition clearance ratio for double-vortex structure to triple vortex structure. Triple-vortex structure was clearly seen at the ratio of $b/h=0.18$. For clearance values above $b/h=0.18$, flow reattachment on the channel wall was not observed. Furthermore, as clearance ratio increases counter rotating double cell vortex structures approach the rib in the axial direction.

Keywords: Flow Field, Detached Turbulator, Vortex, PIV, Cooling Channel

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix

1. GİRİŞ 1

1.1. Gaz Türbinleri Tasarım Parametreleri.....	1
1.2. Türbin Soğutma Teknolojileri	2
1.3. İç Soğutma Kanalları.....	6
1.3.1. Türbülatorler arası mesafenin etkisi.....	8
1.3.2. Türbülator oryantasyonu etkisi	9
1.3.3. Türbülator yüksekliği etkisi	10
1.3.4. RE sayısı etkisi.....	11
1.3.5. Türbülator geometri etkisi.....	11
1.3.6. Ayrık türbülator etkisi	13
1.4. İkincil Akışlar ve Girdap.....	22

2. PIV (Particle Image Velocimetry) YÖNTEMİ 25

2.1. Çalışma Prensipleri.....	25
2.1.1. Partikül besleme	27
2.1.2. Işık kaynakları	28
2.1.3. Görüntü işleme	29
2.1.4. Görüntü yakalama	30
2.1.5. PIV hataları	30
2.2. Veri İşleme Akış Şeması	31

2.2.1. En küçük kareler eşleşmesi	31
2.2.2. Çapraz korelasyon	32
2.2.3. Ortalama korelasyon	33
2.2.4. Adaptif PIV	34
2.3. Akışkanlar Mekaniği Uygulamalarında Hız Alanı Etkileri.....	37
3. TEST DÜZENEĞİ	41
4. BULGULAR	53
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	71
KAYNAKLAR	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1	Türbin giriş sıcaklığının yıllara göre değişimi	2
1.2	Çeşitli soğutma teknikleri	3
1.3	Soğutma kanallarının bulunduğu kanatçığın iç yapısı.....	4
1.4	Çarpıtma ile soğutma	5
1.5	Film soğutma ve taşınım ile soğutma	5
1.6	Terleme ile soğutma	6
1.7	Türbülantörlü bir kanalın şematik gösterimi	7
1.8	Türbülantör çevresindeki ayrılma ve yeniden tutunma olayları.....	7
1.9	Türbülantörler arası mesafelerin akış ayrılmasına olan etkileri	8
1.10	Test düzeneği.....	9
1.11	Test düzeneği ve türbülantör konfigürasyonu	10
1.12	Üç boyutlu rib konfigürasyonları	10
1.13	Değişik türbülantör geometrileri için akış çizgileri	12
1.14	Daire kesitli türbülantör arkası girdap alanları	12
1.15	Ayrık ve entegre türbülantörlerle pürüzlendirilmiş duvarlar.....	13
1.16	$b/h=0.38$ koşullarında iki farklı RE sayısı için hologram görüntüleri.....	15
1.17	Entegre ve ayrık konfigürasyon akış şablonları	16
1.18	Soğutma test düzeneği konfigürasyonu.....	16
1.19	Jet akışının sağlandığı ayrık türbülantörün eksen-simetrik geometrisi	17
1.20	LES ile çözdürülmüş akış çizgileri.....	18
1.21	Ayrık ve entegre türbülantörlerin akış çizgileri ve sıcaklık alanları	20
1.22	Ayrık türbülantörlü kanalın şematik gösterimi.....	20
1.23	Farklı boşluk oranlarındaki ayrık rib sonrası akış çizgileri	21
1.24	İkincil akış olayları	22
2.1	PIV sistemi ve veri işleme prosesi.....	26
2.2	PIV ölçümü için başlatılmış atım zinciri	28
2.3	PIV görüntü işleme şematik gösterimi	29
2.4	Partikül yoğunluğunun sinyal-gürültü oranına etkisi	30
2.5	(Solda) Çapraz korelasyon hız dağılımı. (Sağda) Adaptif korelasyon hız dağılımı.....	33
2.6	Ortalama korelasyon tepeciklerinin toplamı.....	34
2.7	Ortalama korelasyon akış şeması	34

2.8	λ_2 , 2. derece diferansiyel denklem sonuçlarının bölgelere göre dağılımı ...	40
3.1	Test düzeneği şematik gösterimi	41
3.2	PIV sistemi için yapılan kalibrasyon işlemi	42
3.3	1. ve 2. lazer hüzmelerinin aydınlattığı alanlar	43
3.4	Test düzeneğinde meydana gelen yansımalar	44
3.5	Türbülötörün kanal içerisinde düzgün yerleştirilememesi.....	44
3.6	(Üstte) Net olmayan PIV görüntüsü. (Altta) Net PIV görüntüsü	45
3.7	Veri işleme akış şeması	46
3.8	Sinyal görüntü oranı düşük olan hız vektör haritası	47
3.9	(Üstte) Ortalama korelasyon uygulanmış (Altta) Adaptif PIV uygulanmış hız alanları	47
3.10	Tohumlayıcı debi ayarlama test sonuçları	48
3.11	Farklı tohumlayıcı debilerinde akış çizgileri	49
3.12	Tekrarlanabilirlik deneyleri hız eğrileri.....	50
3.13	Tekrarlanabilirlik ölçümleri boyutsuz aksenal hız dağılımları.....	50
3.14	Tekrarlanabilirlik ölçümleri boyutsuz radyal hız dağılımları.....	51
3.15	Tekrarlanabilirlik deneyleri akış çizgileri.....	51
3.16	Adaptif PIV görüntü sayısı karşılaştırması.....	52
4.1	RE 48'de b/h=0, b/h=0.11, b/h=0.18 oranları için akış çizgileri	53
4.2	RE 48'de b/h=0.18 için girdap büyüklükleri.....	54
4.3	RE 48'de b/h=0, b/h=0.33, b/h=0.48, b/h=1.0 oranları için akış çizgileri	55
4.4	RE 60'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 oranları için akış çizgileri	56
4.5	RE 60'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 oranları için boyutsuz aksenal hız eğrileri.....	57
4.6	RE 60'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 oranlarında boyutsuz hız dağılımları	57
4.7	RE 60'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 oranları için boyutsuz radyal hız eğrileri.....	58
4.8	RE 60'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 oranlarında boyutsuz radyal hız dağılımları.....	58
4.9	RE 48'de b/h=0.11, b/h=0.14, b/h=0.18 için girdap büyüklükleri	59
4.10	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için akış çizgileri	60

4.11	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için boyutsuz eksenel hız eğrileri.....	60
4.12	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için eksenel hız dağılımları.....	61
4.13	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için boyutsuz radyal hız eğrileri.....	61
4.14	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için radyal hız dağılımları.....	62
4.15	b/h=0.18 boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için girdap alanları..	62
4.16	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için akış çizgileri.....	63
4.17	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz eksenel hız eğrileri.....	63
4.18	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz eksenel hız dağılımları.....	64
4.19	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız eğrileri.....	64
4.20	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları.....	65
4.21	b/h=0.14 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için girdap alanları.....	65
4.22	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için akış çizgileri.....	66
4.23	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz eksenel hız eğrileri.....	66
4.24	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz eksenel hız dağılımları.....	67
4.25	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları.....	67
4.26	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları.....	68
4.27	b/h=0.18 boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için girdap alanları.....	68
4.28	b/h=0.18 ve değişik hız konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı.....	69
4.29	RE 33k koşulları için, değişik boşluk konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı.....	70
4.30	b/h=0.14 için, değişik hız konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1	Gaz akışı için tohumlayıcı malzemeler.....	27
3.1	Deneylerde kullanılan RE aralığı	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- A : Dikdörtgen uzun kenarı
b : Boşluk değeri
c : Dikdörtgen kısa kenarı
D : Hidrolik çap
F : Cisim kuvvetleri
G : Kanal genişliği
H : Kanal yüksekliği
h : Türbülator yüksekliği
I : Görüntü yoğunluk alanı
Nu : Nusselt sayısı
P : İki türbülator arası mesafe
p : Basınç
 $R(s)$: Uzaysal çapraz korelasyon (integral formda)
 R_{II} : Uzaysal çapraz korelasyon (sonlu eleman gösterimi)
 $R_C(s)$: Ortalama arkaplan korelasyonu
 $R_D(s)$: Yerdeğişimi korelasyon tepciği
 $R_F(s)$: Gürültü terimi
 r_{ij} : Dönme oranı tensörü
 s_{ij} : Kayma oranı tensörü
U : Eksenel hız bileşeni (m/s)
V : Radyal Hız bileşeni (m/s)
W : Alt pencere
 $\Delta s(x)$: Deformasyon alanı
 λ_2 : Lambda operatörü
 μ : Dinamik viskozite
 ρ : Akışkan yoğunluğu
 $\tau(X)$: Görüntü nokta dağılım fonksiyonu
 ν : Kinematik viskozite
 ω : Girdap (1/s)
DES : Detached Eddy Simulation
LDV : Laser Dopler Velocimetry

LES : Large Eddy Simulation
PIV : Particle Image Velocimetry
RE : Reynolds sayısı
URANS: Unsteady RE Averaged Navier Stokes

Alt ve üst indisler

H : Hidrolik çap
P : Türbülantörlü kanal şartları
S : Türbülantörsüz kanal şartları
düz : Düzeltilmiş
maks : Maksimum

1. GİRİŞ

1.1. Gaz Türbinleri Tasarım Parametreleri

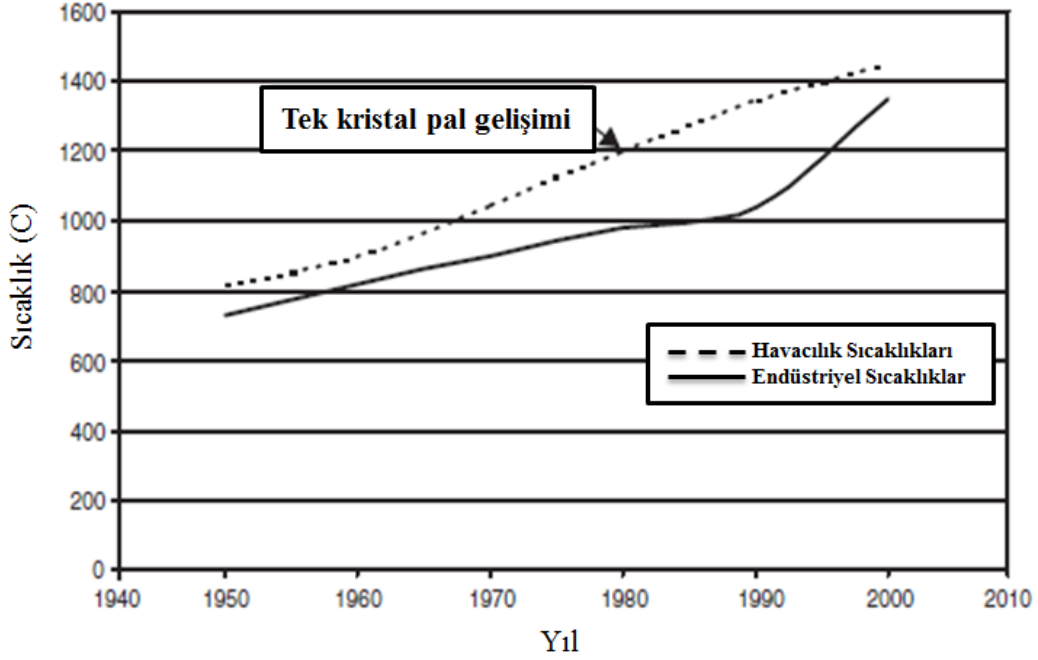
Gaz türbinleri performans ve güvenilirlik kriterleri dünyada kabul görmüş bir çok standarda dayandırılan sivil, askeri ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan kompleks makinalardır. Bu kompleks makinalar, uçuş zarfı boyunca esnek çalışma koşullarını sağlayacak, yüksek performans ve yüksek güvenilirlik kriterlerine göre tasarlanmaktadır [1].

Havacılık motorlarının performansları, ilk olarak, itki-ağırlık oranına göre değerlendirilmektedir. İtke/ağırlık oranının artırılması da, kompresör basınç oranının ve türbin giriş sıcaklığının optimize edilerek, birim akış için maksimum gücün elde edilmesiyle sağlanır. Kompresör basınç oranının ve türbin giriş sıcaklığının birlikte artırılması optimum termal verimin yakalanması açısından önemlidir. Tabii, belli bir türbin giriş sıcaklığında, kompresör basınç oranı bir değer üzerine yükseltildiğinde termal verim düşmektedir. Optimum termal verim yakalandığında, özgül yakıt tüketimi de minimum düzeyde tutulmaktadır. Türbin giriş sıcaklığındaki her 56°C 'lik artış, yaklaşık olarak %10 güç artışını ve yine yaklaşık olarak 1.5 puan verim artışını beraberinde getirmektedir [1].

Tasarım kriteri olarak yüksek güvenilirlik faktörlerini yakalayabilmek için, kanatçık ve şaft yükleri, kanatçık yükleme katsayıları, malzeme bütünlüğü, yardımcı sistemler ve kontrol sistemleri gibi birçok faktörün göz önünde bulundurulması gerekir. Ana bakımlar arasında minimum 3500 saatlik motor ömrü, yakalanması gereken hedeflerdendir. Yüksek verim hedeflerini yakalamak amacıyla arttırılan türbin giriş sıcaklıkları, türbin kanatçık ömrünü kayda değer ölçüde azaltmaktadır. Kanatçık metal sıcaklıklarını, sıcak korozyon mekanizmasından korumak amacıyla, 537°C ile 704°C arasında tutabilmek için uygun soğutma teknikleri kullanılmalıdır. Bu yüzden, uygun soğutma konseptleriyle birlikte, uygun kanatçık kaplaması ve malzemeleri, türbinin yüksek güvenilirlik seviyelerinde tasarlanabilmesi için önemlidir [1].

1.2. Türbin Soğutma Teknolojileri

Gaz türbinlerinin giriş sıcaklıkları, son yıllarda kayda değer ölçüde arttırılmıştır ve arttırılmaya da devam edilmektedir. Bu trend, malzeme ve imalat teknolojisindeki atılımlar ve yine gelişmiş soğutma teknolojileriyle mümkün kılınmıştır. Özellikle ilk kademelerde yer alan türbin kanatçıkları, sıcaklık ve stresin kombine olduğu çok zorlu şartlara dayanmak zorundadırlar ve bu parçalar, genellikle gaz türbini ömürlerindeki sınırlayıcı parçalardır. Şekil 1.1, türbin giriş sıcaklığının yıllara göre değişimini göstermektedir [1].



Şekil 1.1. Türbin giriş sıcaklığının yıllara göre değişimi [1]

Daha verimli uçak motorları tasarlayabilmek için gaz türbinli motorların türbin giriş sıcaklığını arttırmak, neredeyse bir gereklilik haline gelmiştir [2]. Başka bir deyişle, özgül yakıt tüketimini düşürebilmek için yüksek türbin giriş sıcaklıklarına ihtiyaç vardır ve gaz türbini endüstrisi bu yönde sürekli gelişen bir eğilim göstermektedir. Türbin giriş sıcaklıkları soğutma yapılmayan bir kanatçıkta 1000°C mertebelerinde iken, sofistike soğutma teknikleriyle giriş sıcaklıkları 1800°C'lere çekilebilmektedir. Bu sıcaklık değerleri, döküm yöntemiyle imal edilmiş nikel bazlı alaşımların ergime noktalarının çok üzerindedir. Yüksek basınç türbini sabit ve döner kanatçıkları, sızdırmazlık elemanları yüksek basınç

kompresöründen sağlanan soğutma havası ile içeriden ve dışarıdan soğutulmaktadır. Rolls-Royce'un Trent motorunda, Bu soğutma havasının sıcaklığı 700°C ' nin, basıncı da 3.8 Mpa ' in üstündedir [3].

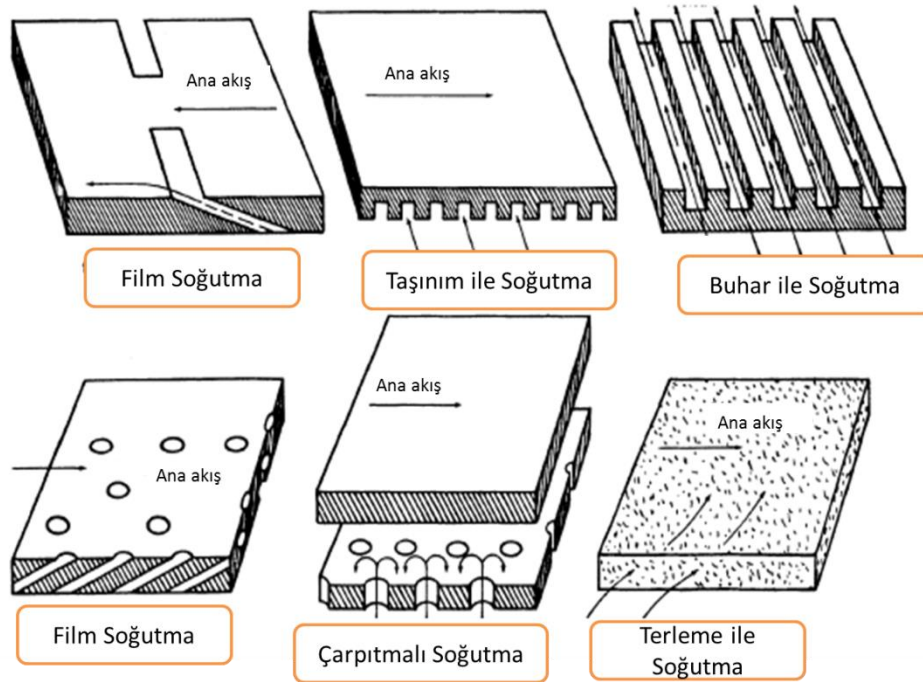
Soğutma tekniklerinde, kompresör tarafından sağlanan soğutma havası, rotor, stator gibi türbin kademelerine ve yeterli soğutmayı gerçekleştirmek için türbin muhafazasına yönlendirilir [1]. Soğutma teknikleri dört ana konseptte incelenebilir (Şekil 1.2) [1].

Taşınım ile soğutma

Çarpırtımalı soğutma (impingement)

Film tabakası ile soğutma

Terleme soğutması (transpiration)



Şekil 1.2. Çeşitli soğutma teknikleri [1]

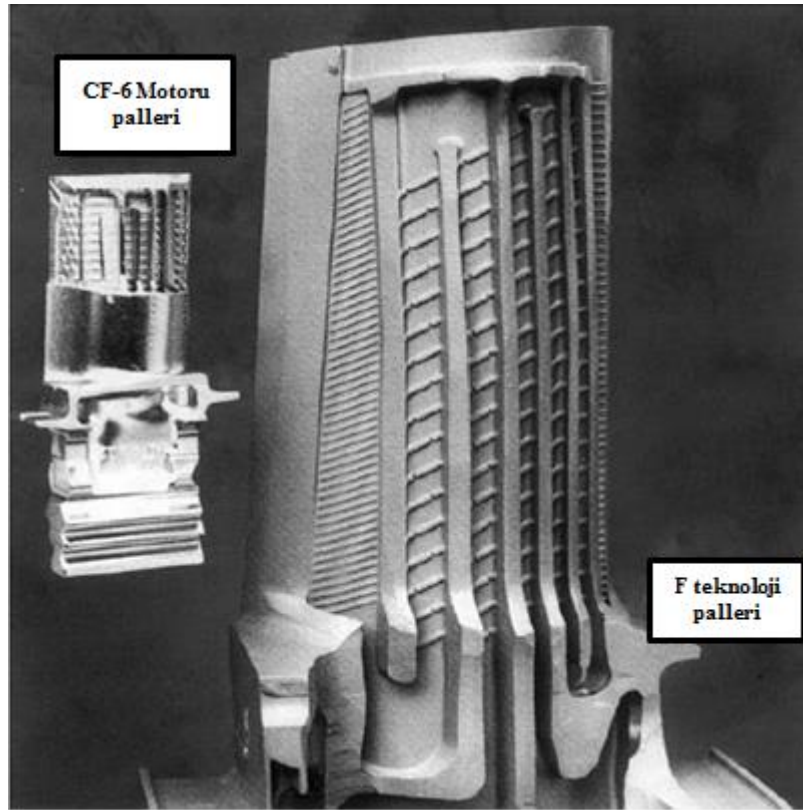
Soğutma yöntemlerinin etkinliği, soğutma tekniklerine, soğutucu akışkan sıcaklığının ana akış sıcaklığına oranına, soğutma bölgesine, soğutucu akışkanın yönüne ve miktarına bağlıdır [1].

1960'lara kadar, taşınım ile soğutma türbin kanatçıklarını soğutmada neredeyse tek yöntem olarak kullanılırken, film tabakası ile soğutma kritik bölgelerde nadiren kullanılıyordu. 1980 ve 1990'larda film tabakası ile soğutma

geniş ölçüde uygulama alanı bulmaya başladı. 2001 yılında, kombine çevrim santrallerinde buhar ile soğutma teknikleri kullanılmaya başlandı. Türbin kompresör basınç oranları arttıkça, soğutma kapasitesini etkileyen kompresör çıkış sıcaklıkları da yükselmeye başladı [1].

Taşınım ile soğutma

Bu soğutma tekniğinde, soğutma havası döner ve sabit kanatçık içerisindeki duvarlara gönderilir ve ısı, duvar yüzeylerinden, soğutma havası içerisine hapsedilir. Genellikle, hava akışı, kanatçık kökünden kanatçık ucuna doğru, radyal yönde birkaç tur atarak serpantin benzeri pasajlardan geçer. Taşıma ile soğutma günümüzde en yaygın kullanılan soğutma konseptidir . Şekil 1.3'te, taşınım ile soğutulan ilk kademe kanatçığın serpantin konfigürasyonu gösterilmiştir [1].

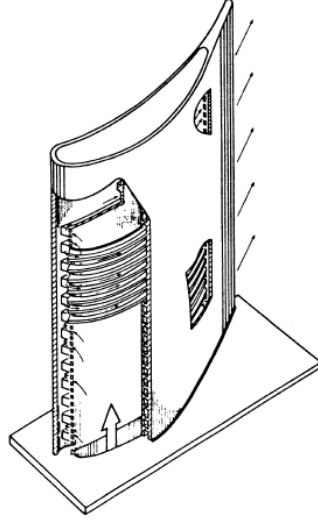


Şekil 1.3. Soğutma kanallarının bulunduğu kanatçığın iç yapısı [1]

Çarpıtma ile soğutma

Taşınım ile soğutmanın yüksek şiddette yapılan formu olan bu soğutma tekniğinde, soğutma havası çok yüksek hızlarda kanatçık iç yüzeyine çarpıtılarak, yüksek miktarda ısının metal yüzeyinden soğutma havasına geçmesi sağlanır. Bu

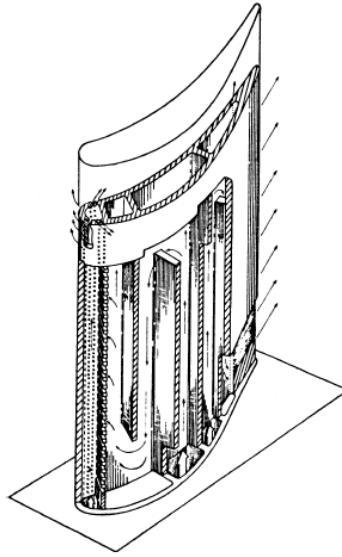
yöntem, genellikle belli bölgelerde uygulanır. Örneğin, kanatçık hücum kenarlarının, orta bölgelere ve firar kenarlarına göre daha fazla soğutulma ihtiyacı olduğundan, bu bölgeler genellikle bu yolla soğutulur [1]. Şekil 1.4'te yatay finler vasıtasıyla taşınım ile soğutulan kanatçık orta kesiti ve çarpıtma ile soğutulmuş kanatçık hücum kenarı gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Çarpıtma ile soğutma [1]

Film soğutma

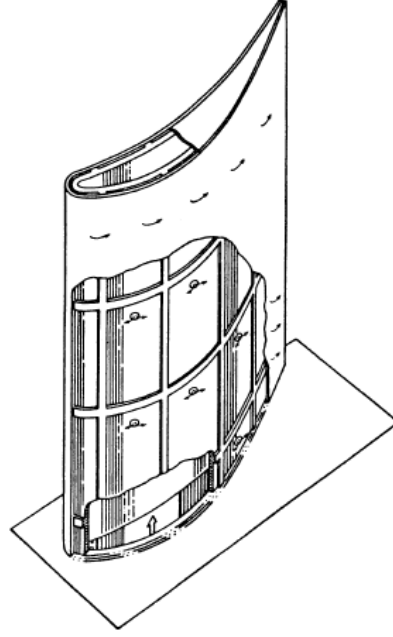
Bu soğutma konsepti, soğutma havasının, sıcak gaz yolu ile kanatçık yüzeyi arasında yalıtkan bir tabaka oluşturmasıyla gerçekleştirilir (Şekil 1.5). Yanma odası tasarımlarında da sık kullanılan bir yöntemdir [1].



Şekil 1.5. Film soğutma ve taşınım ile soğutma [1]

Terleme ile soğutma

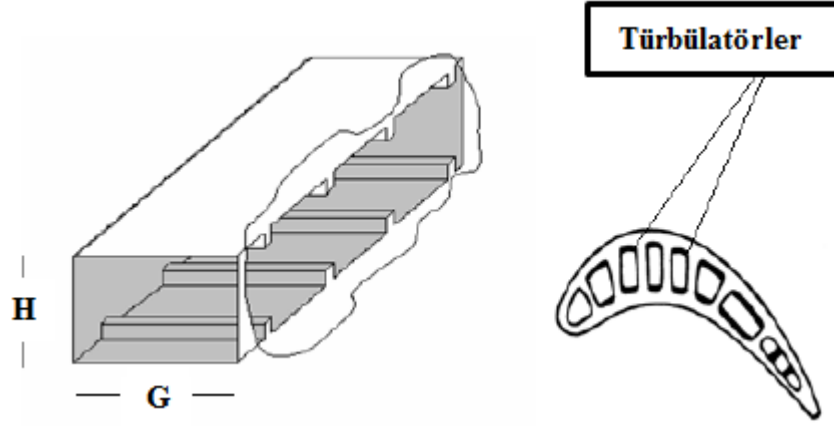
Bu konseptte, soğutma havasının gözenekli yapıda duvarlar bulunduran kanatçık malzemesinden geçmesi beklenir (Şekil 1.6). Isı alışverişi direkt olarak soğutma havası ve sıcak gaz arasındadır. Çok yüksek sıcaklıklarda etkili bir yöntemdir [1].



Şekil 1.6. Terleme ile soğutma [1]

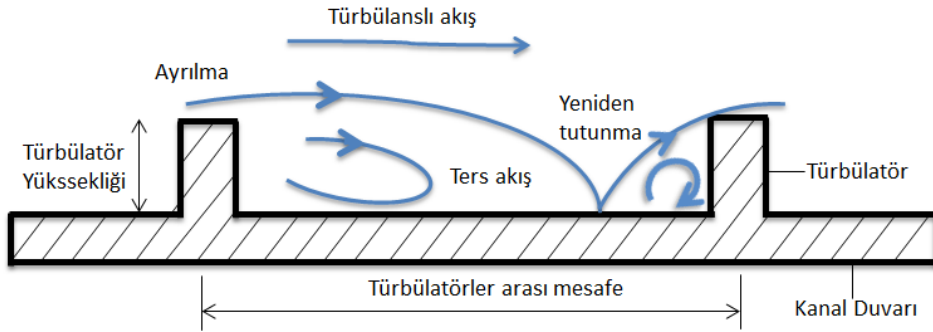
1.3. İç Soğutma Kanalları

Endüstriyel ve havacılık türbinlerinde kullanılan soğutma havası, içlerinde türbülans oluşturucular ya da türbülötörler bulunduran karmaşık yapıdaki serpantin ağlarından geçerek, taşınım yoluyla ısı transferi etkinliğini iyileştirmektedirler [4]. Türbülötörler, genellikle, iç soğutma kanallarının karşılıklı yüzeylerine (emme ve basma yüzeyleri) ardışık olarak yerleştirilirler (Şekil 1.7). Emme ve basma yüzeylerindeki dış yükleri dengeleyebilmek için, türbülötörlerin tek yüzeyde kullanıldığı uygulamalar da vardır. Türbülötörlerin varlığından dolayı, akış türbülötör üst yüzeyinden ayrılarak, iki türbülötör arasında tekrar yüzeye tutunmaktadır. Şekil 1.8’de, türbülötörlerin varlığında akışın gelişimi şematik olarak gösterilmiştir. Türbülötörlerin varlığı sınır tabakanın bozulmasına yol açmaktadır [5].



Şekil 1.7. Türbülatorlü bir kanalın şematik gösterimi [5]

Türbülator sonrasında sınır tabaka yeniden gelişmekte ve bu gelişim sırasında kalınlığı tutunma noktasından sonra tekrar artmaktadır. Sınır tabaka taşınımıyla ısı transferinde bir yalıtkan gibi davranmaktadır. Bu sebeple yeniden gelişen ince sınır tabaka ısı transferinin iyileşmesine yol açmaktadır. Bununla birlikte sınır tabaka içindeki akışın türbülans yoğunluğu da artmaktadır. Bu durum, duvar kenarındaki akış partiküllerinin daha soğuk olan partiküllerle karışmasına neden olur ve bu da ısı transferi iyileşmesi sonucunu ortaya çıkarır [5].



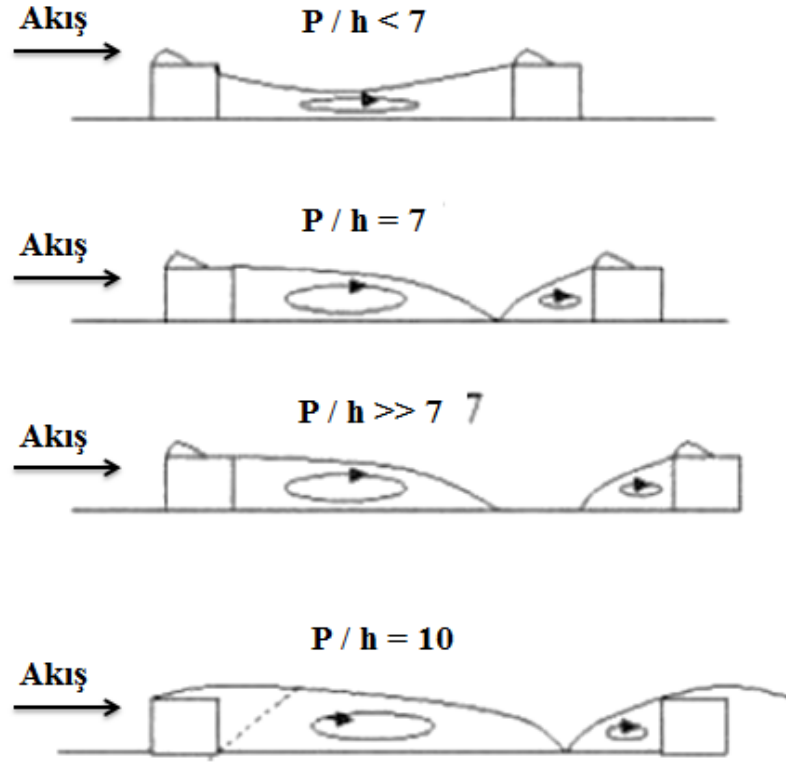
Şekil 1.8. Türbülator çevresindeki ayrılma ve yeniden tutunma olayları [5]

Türbülatorlerin bulunduğu dikdörtgen kesitli soğutma kanallarında ısı transferi iyileşmesi, öncelikli olarak türbülator kesitine, şekline, dağılımına, hücum açısına ve akış RE sayısına bağlıdır. Türbin kanatçıklarında, kanal hidrolik çapına bağlı olarak çalışılan RE sayıları 10k ile 80k arasında değişmektedir. Genellikle, ardışık konfigürasyonda kullanılan türbülatorler, kanal en-boy oranının 0.25'ten 4'e değiştiği, türbülator yüksekliğinin kanal hidrolik çapına oranının % 5-10 arasında olduğu, iki türbülator arası mesafenin türbülator

yüksekliğine oranının 5'ten 15'e değiştiği ve türbülator hücum açısının 30°- 60° arasında değiştiği konfigürasyonlarda kullanılırlar [6].

1.3.1. Türbülatorler arası mesafenin etkisi

Şekil 1.9'da, farklı P/h oranlarında, akış ayrılması ve yeniden tutunması olayları gösterilmiştir [5].

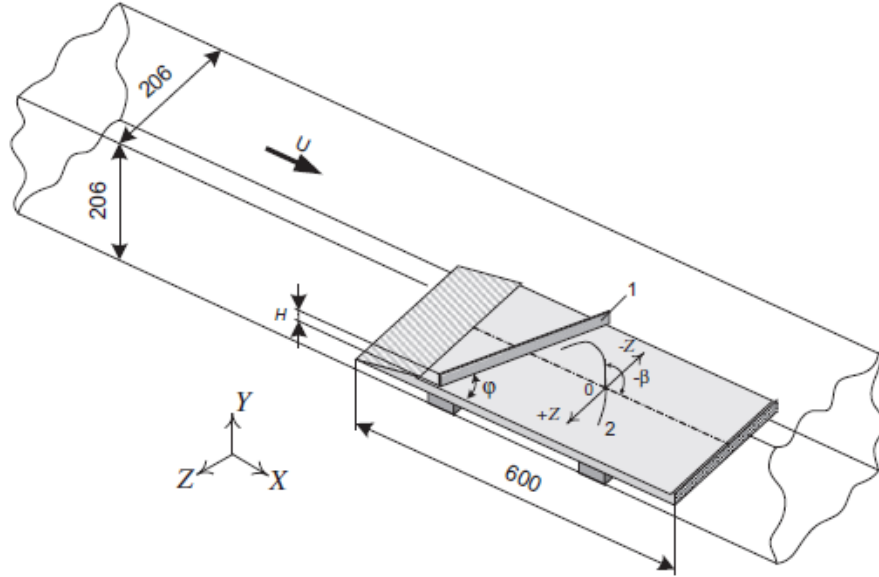


Şekil 1.9. Türbülatorler arası mesafelerin akış ayrılmasına olan etkileri [5]

P/h oranı 7'den küçük olduğunda, ardışık türbülatorler üzerinde bir ayrılma baloncuğu görülmektedir. P/h oranı 7'ye eşit olduğunda, ayrılma bölgeleri arasındaki ve türbülator yüzeyi üzerindeki sınır tabaka gelişmemektedir. Maksimum ısı transferi için optimum değer olduğuna inanılan, P/h oranı 10'a eşit olduğunda, ardışık türbülatorler arasında akışın yeniden tutunduğu ve türbülator üst yüzeyindeki ayrılma baloncuğunun, türbülatorün arkasına doğru uzandığı ve türbülatorü izleyen ayrılma bölgesiyle birleştiği gözlenmektedir. Bu yüzden, P/h oranı 10'da, duvar yanındaki türbülans seviyesinin yükselmesiyle, ana akıştaki sıvı partikülleriyle duvar yakınındaki sıvı partikülleri arasında maksimum değişim meydana gelir ve ısı transferi iyileşir [5].

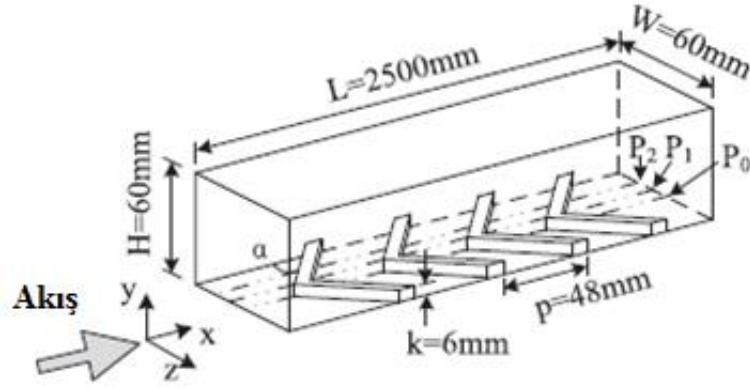
1.3.2. Türbülator oryantasyonu etkisi

Smulsky ve ark. [7] ana akışa göre türbülator oryantasyonunun etkilerini ($\phi = 50, 60, 70, 80, 90^\circ$), farklı RE sayılarında, türbülator yüksekliğine bağlı olarak girdap oluşumu, basınç alanları ve ısı transferi açısından incelemişlerdir (Şekil 1.10). Bu çalışmada, türbülator oryantasyon açısının azalmasıyla, basınç ve ısı transfer katsayısının maksimum olduğu noktaların türbülator doğru yaklaştığı sonucuna varılmıştır. Bölgesel ısı transferinin maksimum olduğu açı 50° olup, buradaki ısı transfer katsayısı, 90° 'lik türbülator oryantasyonuna göre, %40 daha fazla saptanmıştır.



Şekil 1.10. Test düzeneği [7]

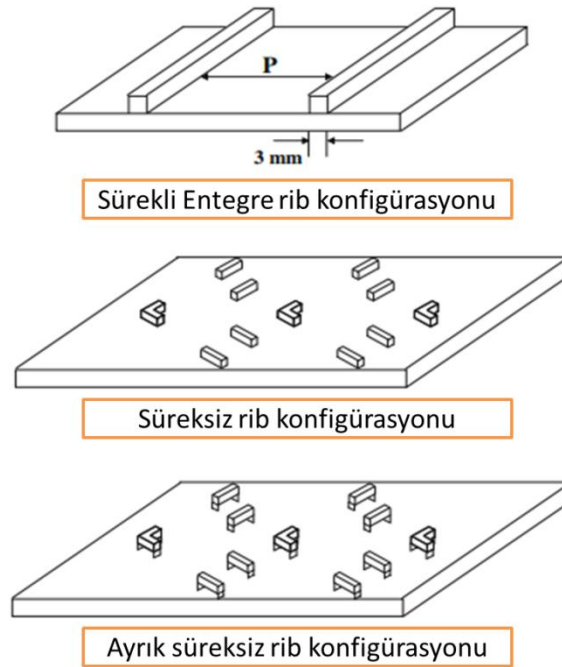
Fang ve ark. [8] kare kesitli bir kanalın bir duvarına entegre edilmiş V şeklindeki türbülatorlar sonrası yüksek türbülans yoğunluğundaki akışı araştırmışlardır (Şekil 1.11). V şeklinde konfigürasyona sahip türbülator sonrası akış alanı, üç farklı eğimde ($60^\circ, 45^\circ$ ve 30°) düzlemsel PIV yöntemiyle incelenerek dik türbülator koşullarıyla (90°) karşılaştırılmıştır. Ölçüm verileri, V şekilli türbülator kaynaklı güçlü ikincil akışların, birbirine ters yönde dönen girdaplar şeklinde kendini gösterdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 1.11. Test düzeneği ve türbülator konfigürasyonu [8]

1.3.3. Türbülator yüksekliği etkisi

Sriharsha ve ark. [9] 90°'lik entegre ve 60°'lik V şeklinde parçalı türbülatorların bulunduğu kare kesitli bir kanalda türbülator yüksekliği etkisinin ısı transferi dağılımına olan etkisini araştırmışlardır (Şekil 1.12). 90°'lik entegre türbülator şartlarında, türbülator yüksekliğinin kanal hidrolik çapına oranı arttıkça ısı transferinin iyileştiği görülmekle birlikte basınç düşüşü de gerçekleşmektedir.



Şekil 1.12. Üç boyutlu rib konfigürasyonları [9]

60°'lik V şeklinde parçalı türbülator şartlarındaki ısı transferi iyileşmesi, 90°'lik entegre türbülator şartlarına göre daha iyi ve yine kanaldaki basınç düşüşü daha az

olarak saptanmıştır. Ancak, türbülator yüksekliği arttikça, parçali türbülator şartlarındaki ısı transferi iyileşmesi azalmaktadır. Ayrık parçali türbülatorlerin etkisi konusunda kayda değer bir gözlem yapılamamıştır. Bu çalışmada, ısı transferi karakteristiklerinin, entegre ve ayrık parçali türbülator şartları için, türbülator yüksekliğinin artmasıyla kötüleştii gözlemlenmiştir.

Sparrow ve Tao [10,11] RE sayısı etkisini ($10,000 < RE < 45000$), türbülator yüksekliğinin iki türbülator arası mesafeye oranını ($P/h=9.15, 18.3$ ve 36.6) ve türbülator yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranını ($h/H=0.082$ ve 0.164), kütle transfer katsayısı ve sürtünme faktörü açısından, karşılıklı yüzeylere türbülator koyarak ve sadece bir yüzeye türbülator koyarak incelemiştir.

Han [12] farklı kanal boyutlarında ($h/H=0.25, 0.50, 1, 2$ ve 4) bölgesel ısı transferi katsayısının, karşılıklı entegre türbülatorlü yüzeylere olan etkisini incelemiştir.

1.3.4. RE sayısı etkisi

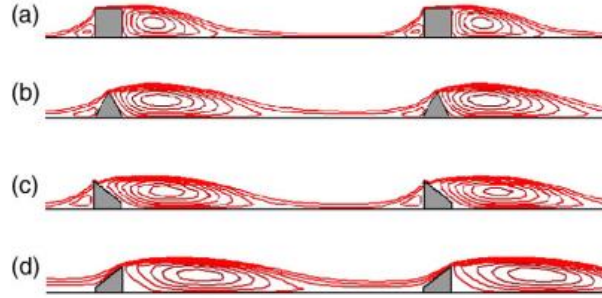
Burggraf [13] tarafından kare kesitli kanalda ($G/H=1$) karşılıklı duvarlarda entegre türbülatorlerle, RE sayısı $13,000-130,000$ aralıklarında çalışmalar yapılmıştır. Türbülatorlü yüzeylerde ortalama Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü, tam gelişmiş pürüzsüz (türbülatorsüz) kanal akışına göre sırasıyla 2.38 kat ve 8.6 kat artış göstermiştir.

Chandra ve ark. [14] bir duvarında, iki duvarında, üç duvarında ve dört duvarında türbülatorlerin bulunduğu kare kesitli bir kanalda, tam gelişmiş akış koşullarında, RE sayısının $10,000-80,000$ aralığında değiştii şartlarda, ısı transferi ve sürtünme karakteristiklerini incelemiştir. Normalize edilmiş bölgesel ortalama Nu sayısının artan RE sayısı ile azaldığı, sürtünme faktöründe, RE sayısı ile doğru orantılı olarak değiştii sonucuna varmışlardır. Isı transferi performansı RE sayısının artmasıyla ve türbülatorlü duvar sayısının artmasıyla azalmıştır.

1.3.5. Türbülator geometri etkisi

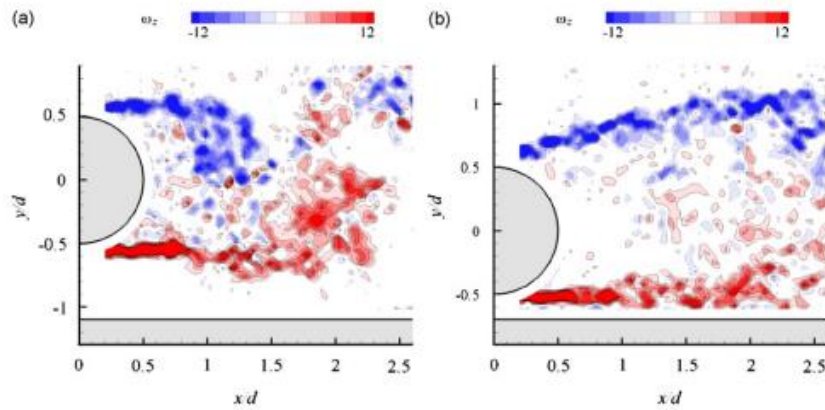
Kamali ve Binesh [15], bir duvarında değişik kesitlerdeki türbülatorlerin bulunduğu kare kesitli bir kanalda ısı transferi ve sürtünme karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştir (Şekil 1.13). Bu çalışmayla, türbülator şekillerinin,

türbülötörler arası ısı transferi katsayına direkt etki ettiği ve yüksekliği akış yönünde azalan yamuk şeklindeki türbülötörlerin daha fazla ısı transferi iyileşmesi sağladığı ve yine aynı şekildeki türbülötörlerin kanalda, daha fazla basınç düşümü sağladığı sonucunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 1.13. Değişik türbülötör geometrileri için akış çizgileri [15]

Nishino ve Ark. [16] yere paralel yerleştirilen daire kesitli türbülötör etrafındaki akış karakteristiklerini araştırmak için URANS ve DES simülasyonları yaparak, sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Deneysel alışmalarda, RE 40k’de, boşluk-çap oranı 0.5’ten büyük iken Von Karman girdaplarının hemen silindirin arkasında oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu değer, 0.35’ten küçük olduğunda ise girdap yumaklarının açıldığı (shedding) ve bunların yerine içinde çok küçük ölçekli girdaplar barındıran birbirine paralel iki kayma tabakasının oluşturduğu ölü akış bölgesi ortaya çıkmıştır (Şekil 1.14). DES simülasyonlarında, URANS simülasyonlarına göre, 0.2 ile 0.6 boşluk-çap oranlarında, deneysel çalışmalardaki girdap davranışlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir.

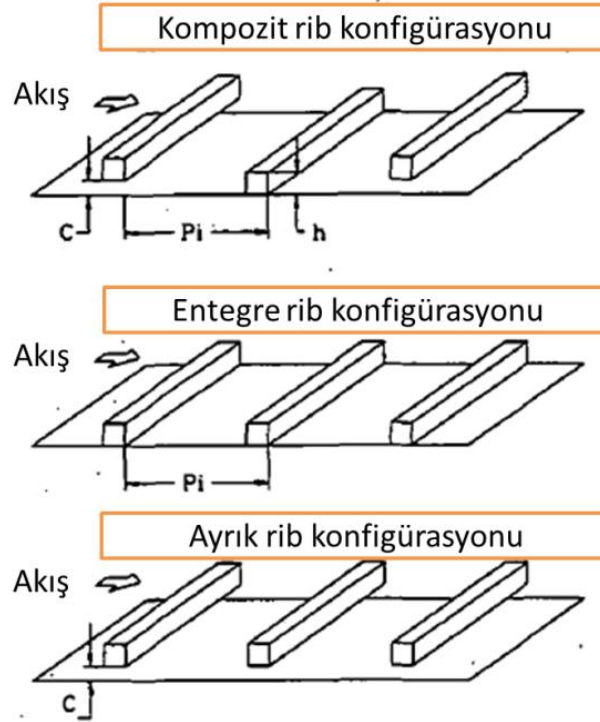


Şekil 1.14. Daire kesitli türbülötör arkası girdap alanları [16]

1.3.6. Ayrık türbülötör etkisi

Ayrık türbülötörlü kanallardaki tam gelişmiş akışta yapılan çalışmalar, entegre türbülötörlü kanal tam gelişmiş akışta yapılan çalışmalar kadar kapsamlı olmamıştır [2].

Türbülötörlü kanal duvarlarındaki ısı transferi ve sürtünme olaylarını inceleyen kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Türbülötör yüksekliğinin, yerleşiminin, şeklinin ve türbülötör açı oryantasyonunun etkileri 5k-70k RE spektrumunda ele alınmaktadır. Son zamanlardaki araştırmalar, türbülötörün ısı transfer yüzeyinden, arada boşluk kalacak şekilde, yükseltilmesi üzerine yönelmiştir. Boşluktaki akışın hızlanması ve türbülötör sonrasındaki girdap türbülansları sebebiyle pürüzsüz yüzeydeki bölgesel ısı transferinin iyileştiği anlaşılmıştır. Ancak, ayrık yüzeylerde fin etkisinin (iletim etkisinin) kaybedilmesi toplam ısı transferi artışının, kanallarda yüzeye entegre türbülötörlere göre kayda değer ölçüde iyileştirmediği görülmektedir [2]. Sonuç olarak, bu doğrultuda Hwang [2] çalışmasında, ayrık ve entegre türbülötörlü kanalların yanında kompozit türbülötörlü kanal (ayrık ve entegre) konseptini incelemiştir (Şekil 1.15).



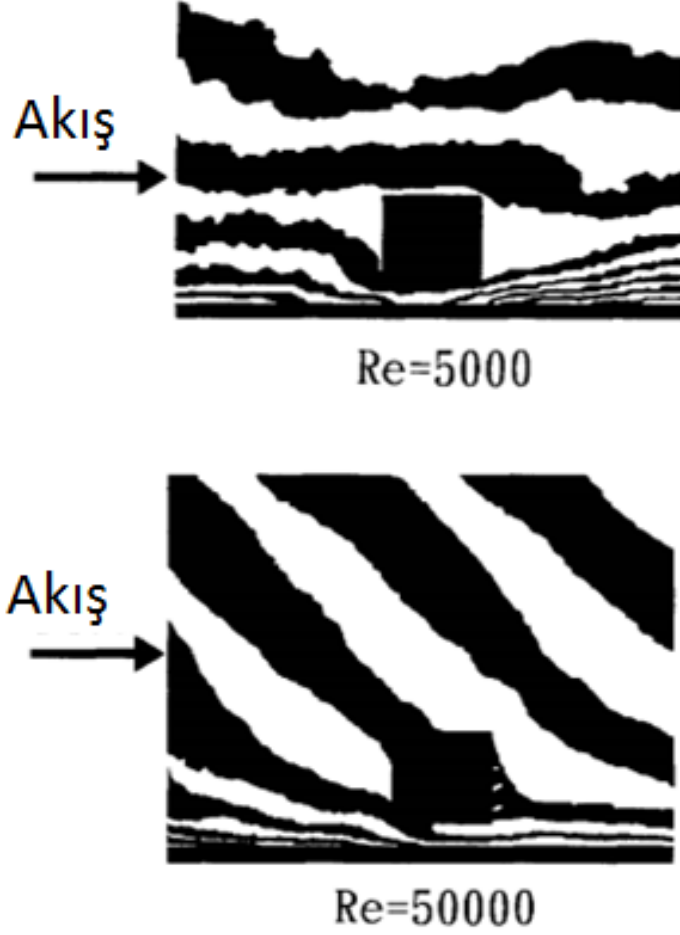
Şekil 1.15. Ayrık ve entegre türbülötörlerle pürüzlendirilmiş duvarlar [2]

Kanal üzerinde iki entegre türbülator arasına ayrik bir türbülator yerleştirmek (kombine yerleşim), ayrik türbülator etrafında gridapları tetiklemektedir. Bu durum, ayrik türbülatorün altında ve sonrasında yine akış yönündeki entegre türbülatorlerde ısı transferini kayda değer ölçüde arttırabilir. Ayrıca, kombine yerleşimdeki entegre türbülatorler, sadece duvar türbülansını arttırmakla kalmayacak, fin etkisiyle, sadece entegre ve sadece ayrik türbülator konfigürasyonlarına göre daha iyi bir ısı transferi sağlayacaktır [2].

Lau ve ark. [17] kare kesitli bir kanalda karşılıklı yüzeylere yerleştirilen akış yönüne dik türbülatorler ile akış yönüne çeşitli açılarla yerleştirilmiş türbülatorlerin ısı transferine ve sürtünmeye olan etkilerini incelemişlerdir.

Liou ve Wang [18] dikdörtgen kesitli kanalda kare kesitli türbülatorlerle, sabit boşluk-türbülator yüksekliği oranında ($b/h=0.58$) ve RE 5k-50k aralığında ısı transferi/termal performans arttırımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Burada, boşluk oranı ve RE sayısı etkileri incelenerek, iki önemli sonuca ulaşılmıştır. Bunlardan ilki, entegre türbülatorün arkasındaki bölgesel ısı transferi kötüleşmesidir ve bu durum türbülatorün yüzeyden yukarı kaldırılmasıyla ortadan kaldırılmıştır. İkinci olarak, ayrik türbülator için, termal ve hidrodinamik gelişen akış uzunluğu, kanal hidrolik çapının yaklaşık 3 katı olarak saptanmıştır.

Liou ve Chen [19] genişlik-yükseklik oranı 4:1 olan dikdörtgen kesitli bir kanalda, bir duvara ayrik olarak yerleştirilmiş türbülatorlerin, mesafesel periyodik ısı transferi ve sürtünme etkilerini RE 5k-50k aralığında incelemişlerdir (Şekil 1.16). Bu çalışmada, iki rib arası mesafenin, rib yüksekliğine oranı 10 ve boşluk mesafesinin rib yüksekliğine oranı 0.38 olarak alınmıştır. Daha düşük akış rejimlerinde, sabit emiş gücünde, rib yüksekliğinin artmasıyla termal performansta monotonik olarak düşüş görülen entegre riblerin aksine, ayrik ribler mütevazi rib yüksekliklerinde daha iyi termal performans göstermektedirler. Ayrıca, RE sayısı arttıķça, termal performansın rib yüksekliği-hidrolik çap oranından bağımsız bir hale geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1.16. $b/h=0.38$ koşullarında iki farklı RE sayısı için hologram görüntüleri [19]

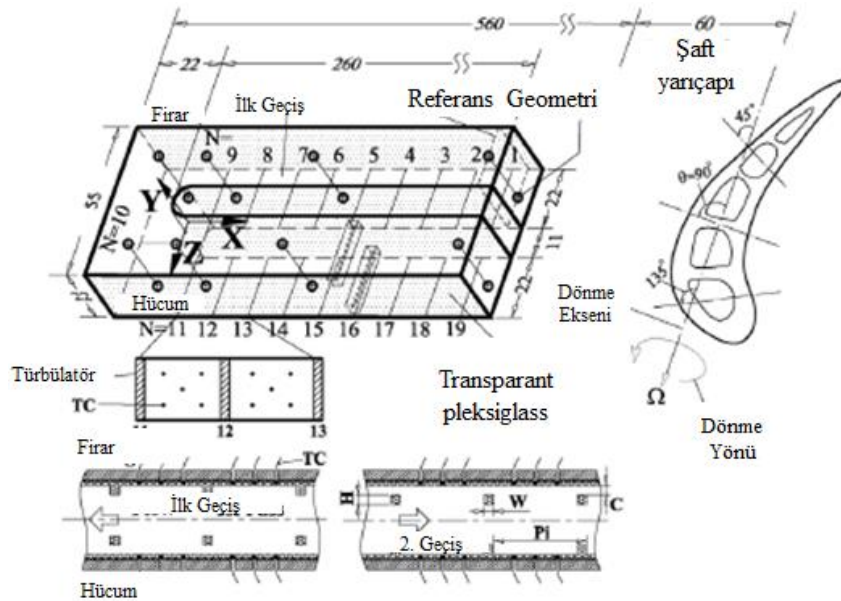
Ayrık türbülantörlü konfigürasyonda, Nu sayısının, pürüzsüz kanaldaki akışa göre, 1.3 ile 1.9 kat arasında arttığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak, entegre türbülantörlerin bulunduğu kanaldaki akışın aksine, ayrık türbülantörlerin bulunduğu kanalda, H/D oranı artışı ile Nu_P/Nu_S değerinin düşmediğini tespit etmişlerdir.

Tsia ve Hwang [20] entegre ve ayrık türbülantör dizinleriyle pürüzlendirilmiş dikdörtgen kesitli bir kanalda ısı transferi ve sürtünme üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır (Şekil 1.17). Bu çalışmalarda, RE sayısını 12k-70k aralığında tutularak, ilgili kanal parametrelerinde ayrık türbülantörlü konfigürasyonun ısı transferine ve sürtünmeye olan etkileri incelenmiştir. Ayrık türbülantörlerin, entegre türbülantörlere göre, türbülansı daha fazla teşvik ettiği saptanmıştır. Ancak, ayrık türbülantörlerde, zeminle türbülantör arasında boşluk olmasından dolayı, entegre türbülantörlerdeki gibi iletim etkisi söz konusu değildir. Sonuç olarak, ayrık ve entegre türbülantörlerin toplam ısı transferine etkisinin deneysel olarak aynı mertebelerde olduğu belirlenmiştir.



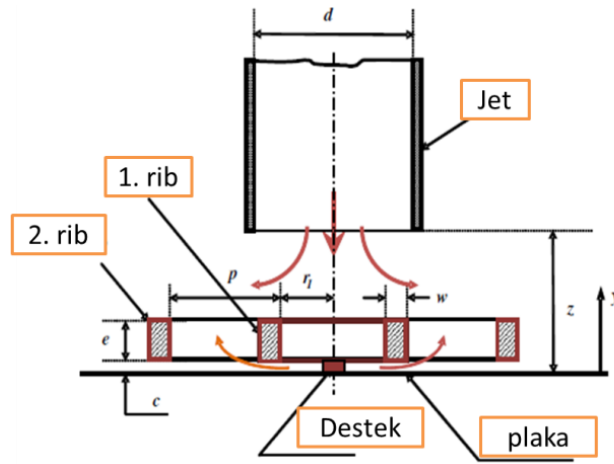
Şekil 1.17. Entegre ve ayırık konfigürasyon akış şablonları [20]

Liou ve ark. [21] çift geçişli dönen bir kanalda, ilk geçişte 90 derece oryantasyonlu ayırık türbülötörlerin hücum duvarında olduğu, ikinci geçişte 90 derece oryantasyonlu ayırık türbülötörlerin firar duvarında olduğu ve iki geçişte de ayırık türbülötörlü duvarların karşı duvarlarında yine 90 derece oryantasyonlu entegre türbülötörlerin, ısı transferi katsayısına, akış alanına ve statik basınç dağılımlarına olan etkisini araştırmışlardır (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. Soğutma test düzeneği konfigürasyonu [21]

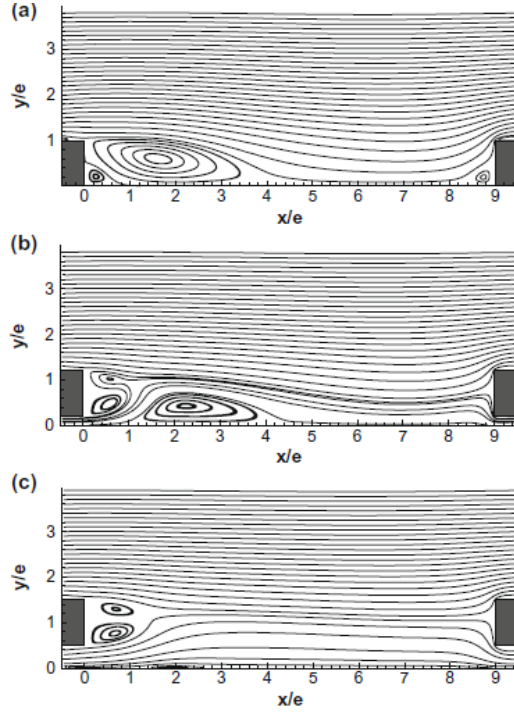
Katti ve Prabhu [22] eksen-simetrik ayrıık türbülötörlerin bulunduğu bir plakaya dairesel bir jetten akış çarptırarak (impingement) ısı transferi iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır (Şekil 1.19). Bu çalışmada, plakaya bir güç kaynağıyla sabit ısı akısı gönderilmiş, plaka sıcaklıkları termal kamera ile okunmuş ve yine duvar kenarı hızlarının ve türbülans yoğunluklarının radyal dağılımları sıcak tel anemometri yöntemiyle belirlenmiştir. Deney düzeneği hazır hale geldikten sonra, türbülötör altındaki boşluk, türbülötör yüksekliği-genişliği, ilk türbülötör yerleşimi, türbülötörler arası mesafe, jet-plaka mesafesi gibi parametreler çalışılmıştır.



Şekil 1.19. Jet akışının sağlandığı ayrıık türbülötörün eksen-simetrik geometrisi [22]

Türbülötörlü kanallarda termal ve akış karakteristiklerini öğrenebilmek için birçok çalışma yapılmasına rağmen, bu çalışmalar tam anlamıyla tamamlanamamıştır. Wang ve ark. [23] periyodik entegre türbülötörlerin kanal duvarının bir tarafında bulunduğu kanalda PIV ölçümleri yapmıştır. Bu çalışmada, türbülötör boşluğundaki akış yapısı, ortalama hızlar, Reynolds kuvvetleri, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve iki noktalı korelasyonlar gibi terimler üzerinden araştırma yapılmıştır. Ahn ve Lee [24] ayrıık türbülötör dizinlerinin bulunduğu bir kanalda ısı transferi ve türbülanslı akış için Large Eddy simülasyonları koşturmuşlardır. Türbülötör yüzeyinde kayma ve atlamanın olmadığı şartlarda, gömülmüş sınır tabaka metodu kullanılarak kartezyen koordinatlarda analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonu valide etmek adına deneyler de yapılmıştır. Hız ve sıcaklık ölçümlerinde sıcak tel yöntemi ve ısı çiftleri kullanılmıştır. Yüzey ısı transferi, sıvı kristal yöntemiyle belirlenmiştir. Entegre türbülötöre göre

kıyaslandığında ayırık türbülátörde, türbülátör altındaki ısı transferi iyileşmekte iken, türbülátör sonrası kanal duvarında daha düşük ısı transferi oranları saptanmıştır. Bu çalışmada, türbülátör ile kanal duvarı arasındaki boşluğun etkisi araştırılarak, birbirlerine zıt yönde dönen bir girdap çiftiyle, ayrılma baloncununun beraber bulunduğu bir ara akış şablonunun varlığı görülmüştür (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. LES ile çözdürülmüş akış çizgileri [24]

Tek bir türbülátör baz alınırca, ısı tranferi iyileşmesinin türbülátör zeminden uzaklaştıkça azaldığını ortaya koyulmuştur. Bir tamamlayıcı çalışma olarak, Kawaguchi ve ark. ayırık bir türbülátör dizisinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda, boşluk-türbülátör yüksekliği oranı 0.25 olan türbülátör dizinlerinde ısı transferi yeniden sağlanırken, bu oran 1.38 iken ısı transferinde bir iyileşme görülmemiştir. Liou ve ark. boşluk oranı 0.58 in altında iken, ayırık türbülátörlerin entegre türbülátörlere göre daha iyi performans sağladığını saptamışlardır. Ancak, toplam ısı transferini kayda değer ölçüde etkileyebilecek olan, türbülátörün kendisinden yani iletimle olan ısı transferini hesaba katmamışlardır [24].

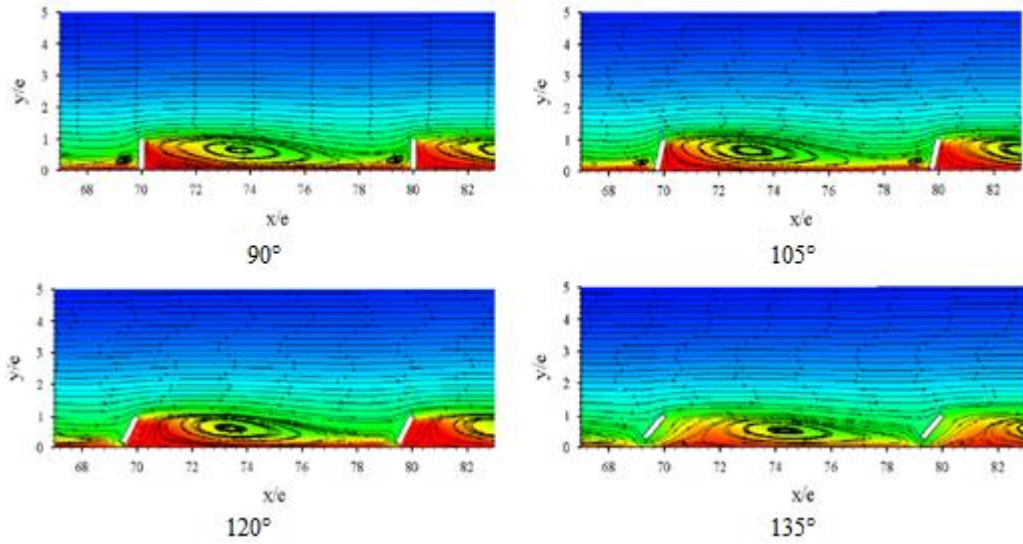
Türbülátör, kanal duvarından yukarıya kaldırıldığında, türbülátör altı kanal duvarında ısı transferi iyileşmektedir. Bu durum, türbülátör altındaki boşlukta,

akışın hızlanmasıyla açıklanmaktadır. Türbülator yakınındaki ısı transferi artışının ötesinde, türbülator sonrası akışta lokal ısı transferi tırmanışları gözlenebilir [24].

Ahn ve Lee [24] RE sayısının 30,000 olduğu, ayrı türbülator dizinlerinin bulunduğu bir kanalda akış ve ısı transferi Large Eddy simülasyonları gerçekleştirmiştir. İki türbülator aralığının türbülator boyuna oranı 10, türbülator yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı 0.1 olarak sabitlenmiştir. Liou ve ark. tarafından karakterize edilen akış şablonlarına göre $b/h = 0, 0.2, 0.5$ olmak üzere üç adet boşluk değerlerinde çalışılmıştır. Yine bu çalışmada, LES sonuçlarını valide edebilmek adına deneyler de yapılmıştır. Liou ve ark. tarafından holografik interferometri ile elde edilen görüntüler sınıflandırıldığında ayrı türbülator dizinlerinin bulunduğu bir kanaldaki akış şablonları iki sınıfta kategorize edilmiştir. Boşluk küçük olduğu zaman, akış şablonu entegre türbülatorlü kanallardaki gibi türbülator arkasında büyük bir girdap bölgesinin olduğu şablona benzer çıkmaktadır. Boşluk arttıkça, ayrılma baloncuğu birbirlerinin tersine dönen girdap çiftlerine dönüşmektedir. Kritik boşluk değerinin $0.25 < b/h < 0.38$ olduğunu raporlamışlardır.

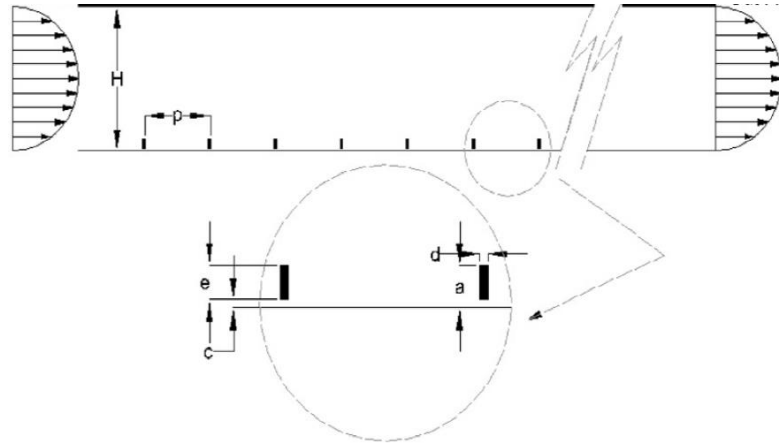
İki türbülator arasındaki ısı transferi, çoğunlukla, duvar yakınındaki girdap hareketlerinden dolayı iyileşmektedir. Üst kayma tabakasında oluşan girdap, alt kayma tabakası ile duvar arasındaki etkileşimden kaynaklanan ikincil girdapa göre, ana akışı duvara doğru daha etkin bir şekilde yönlendirir. Türbülator kanal duvarından yükseltildiğinde, ısı transferinin türbülatorler arası duvar kanalında yavaşlamasının da sebebi budur [24].

Yongsiri ve ark. [25] eğimli ayrı türbülatorlerin bulunduğu bir kanalda türbülant akış ve ısı transferi olaylarını numerik olarak incelemişlerdir. 4,000'den 24,000'e kadar olan RE sayılarında, eğimli ayrı türbülatorlerin farklı hücum açılarında, ısı transferi, basınç kaybı ve termal performans değerleri incelenerek, 90 derecelik hücum açısına sahip entegre türbülator sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Ayırık ve entegre türbülötörlerin akış çizgileri ve sıcaklık alanları [25]

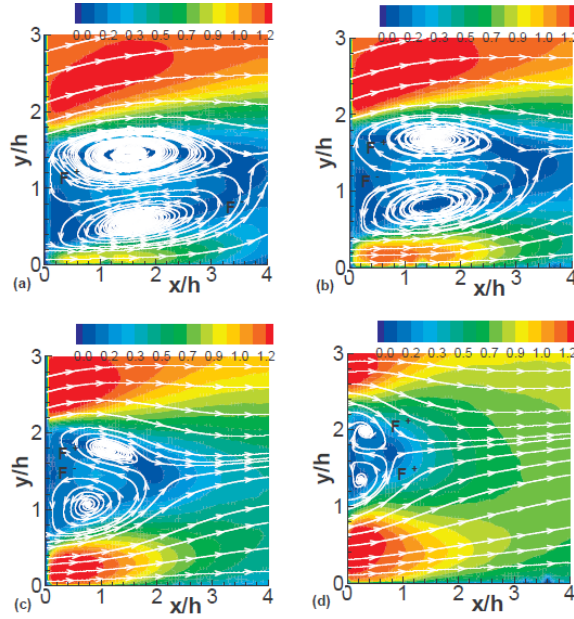
Parsazadeh ve ark. [26] ayırık türbülötörlerin bulunduğu bir kanalda, nano-partikül tipleri ve farklı nano-partikül parametre etkilerini analiz edebilmek amacıyla, zorlanmış taşınım nano-akış koşullarını nümerik olarak incelemiştir. Bu çalışmada, RE sayısı 10,000 - 50,000 aralığında tutulmuş, boşluk oranı 0.1 olan dikdörtgen kesitli ayırık türbülötörler, yine dikdörtgen kesitli bir kanala monte edilmiştir (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Ayırık türbülötörlü kanalın şematik gösterimi [26]

Panigrahi [27], RE 11,075'te, boşluk-türbülötör yüksekliği değerleri sırasıyla 0.2, 0.37, 0.57 ve 1.0 olan yüzeye monte edilmiş ayırık kare kesitli türbülötör arkası akış yapısını PIV ile incelemiştir (Şekil 1.23). Radyal ve aksel ortalama hızların, girdap alanlarının ve akış çizgilerinin sunulduğu bu çalışmada, türbülötör arkası çift hücreli girdap yapılarının, boşluğun artmasıyla küçüldüğü ve

anlık girdap oluşumlarının ise düşük boşluk oranlarında kanal duvarına daha yakın bölgelerde yoğunlaştığı raporlanmıştır.



Şekil 1.23. Farklı boşluk oranlarındaki ayırık rib sonrası akış çizgileri [27]

Liou ve ark. [28], dikdörtgen kesitli bir kanalın bir duvarına yerleştirilmiş ayırık türbülatorlerin bulunduğu bir test düzeneğinde, 0.25'ten 1.5'e kadar olan boşluk oranlarının ve 5,000 ile 50,000 RE aralığının, ısı transferi ve sürtünmeye olan etkilerini holografik interferometri ve basınç ölçümleri ile araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda, RE sayısı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı ve boşluk oranı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı saptanmıştır. Ortalama Nu sayısının, boşluk oranı 0 - 1.5 aralığında, pürüzsüz kanala göre, %50 ile %240 arasında bir artış gösterdiği anlaşılmıştır. Boşluk oranı 0.38 iken, ortalama Nu sayısı en yüksek değerinde bulunmuştur. Bu çalışmanın en önemli sonucu, boşluk oranı 0.58'den fazla olduğunda, ortalama Nu sayısının entegre türbülator şartlarındaki ortalama Nu sayısına göre daha düşük çıkmasıdır.

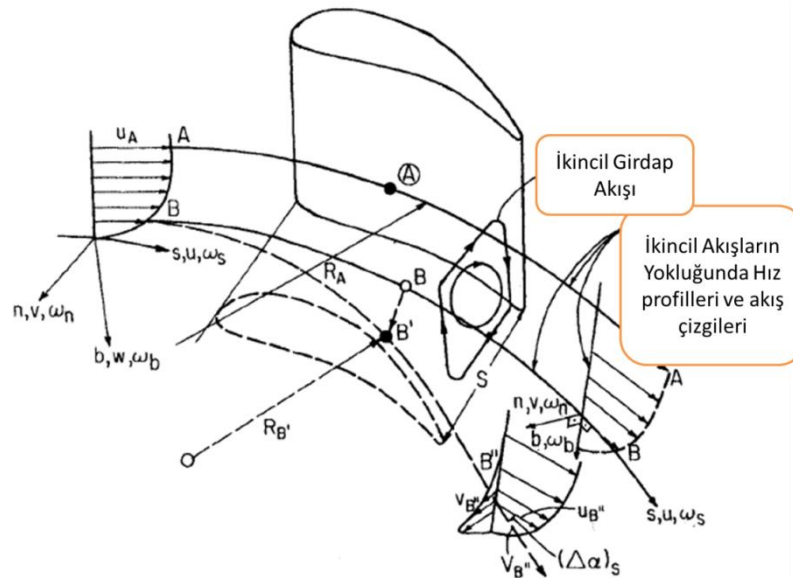
Liou ve ark. [29], boşluk oranları 0 - 3.25 aralığında değişen entegre ve ayırık türbülatorlerin bulunduğu dikdörtgen kesitli bir kanalda, türbülator sonrası hız alanları, kinetik enerji değişimi, maksimum kayma stresleri ve türbülans anizotropisi gibi konuları incelemiştir. Ayırık türbülator sonrası ikincil akış yapısının, entegre türbülator sonrası akış yapısına göre tamamen farklı olduğunu ortaya koymuşlardır. Boşluk oranı 0.38 iken, $0 < x/h < 1$ bölgesindeki kinetik enerji yoğunluğunun, entegre türbülator koşullarına göre, en yüksek değere

ulaştığını saptamışlardır. Yine boşluk oranı 0.38 iken, ortalama radyal hız bileşeninin, ortalama aksel kanal hızının sadece %1'i olduğu ve yine ortalama radyal hız bileşeninin, entegre türbülator koşullarındaki duruma göre %60 azaldığı gözlemlenmiştir.

Liou ve ark. [30], boşluk oranı 0.38 olan ayırık türbülatorlerin bulunduğu dikdörtgen kesitli (4:1) bir kanalda, h/H oranı (0.13 – 0.26 aralığında), p/h oranı (7 ile 13 aralığında) ve RE sayısı (5,000 – 50,000 aralığında) gibi parametrelerin ısı transferi ve sürtünme üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. $h/H=0.17$ ve $p/h=10$ değerleri için en iyi termal performans koşullarının oluştuğunu saptanmışlardır.

1.4. İkincil Akışlar ve Girdap

Akışların çoğunluğunda, baskın akış yönünü tanımlamak mümkündür. Baskın akış yönünde hizalanmayan akış yapıları “ikincil akışlar” olarak isimlendirilir. İkincil akışlar (Şekil 1.24), geometrik sınırlamalardan, örneğin türbülatorler dolayısıyla, ya da akışa etki eden kuvvetlerden dolayı ortaya çıkmaktadırlar. Prandtl, ikincil akışları viskoz olmayan etkiler kaynaklı ve Reynolds kuvvetleri kaynaklı olarak iki grupta sınıflandırmıştır [31].



Şekil 1.24. İkincil akış olayları [4]

Viskoz olmayan etkilerden kaynaklı ikincil akışlar, kendi ana girdap yönüne dik bir kesme tabakasının dönmesiyle meydana gelir. En-boy oranı (aspect ratio) büyük olan kanallardaki bir akış, akış yönündeki (streamwise) eksen x- eksen ve akışa dik eksen y- eksen olan iki boyutlu bir akış olarak düşünülebilir. Bu durumda girdap,

$$\omega_z = \delta V / \delta x - \delta U / \delta y \quad (1.1)$$

Olarak tanımlanır (Denklem 1.1) ve sadece akışa dik yönde (spanwise) girdaplara rastlanır [31].

Viskoz olmayan etkiler kaynaklı bir ikincil akış üretebilmek için, girdap vektörünün x- ve y- bileşenini oluşturabilecek bir duruma ihtiyaç vardır. Türbülantörlü bir kanal akışında, ana sirkülasyon baloncuğu kendiliğinden oluşan bir ikincil akış değildir, türbülantörler sadece, artan kesme kuvvetlerinin etkileriyle, radyal (spanwise) girdapları oluştururlar [31].

Reynolds kuvvetleri kaynaklı ikincil akışlar, bir kanalın köşelerinden, Reynolds kuvvetlerinin çapraz akış gradyanlarının oluşturduğu zayıf radyal girdaplardan gelişirler [31].

Viskoz olmayan etkiler kaynaklı ikincil akışlar, Reynolds kuvvetleri kaynaklı ikincil akışlara göre çok daha basit ve tahmin edilmesi kolaydır. Bu tür ikincil akışları ya basınç gradyanları ya da çapraz akış düzleminde bir cisme etki eden kuvvetler (dönme sonucu ortaya çıkabilecek Coriolis kuvveti ya da düzensiz ısıtma sonucu akışın yükselmesi) yönlendirir. Basınç gradyanı kaynaklı ikincil akışlar türbülantörler gibi geometri kaynaklıdır [31].

Türbülantörlerle pürüzlendirilmiş kanallarda, türbülantör arkası boşluk, resirkülasyon bölgesinde aşağı yönlü bir hareket meydana getirir. Yan duvarlar boyunca kayma şartının olmamasıyla birlikte bu hareket, iki karşıt dönen hücreler şeklinde bir dairesel hareket oluşturur. Değişik türbülantör konfigürasyonlarıyla, bu dönen hücrelerin şiddetleri artırılabilir ve bu da mevcut ısı transferi modellerinin yeniden dağılımına olanak sağlayabilir [31].

İkincil akışlar ana hatlarıyla iki koşullarda gelişirler. İlk koşul, ön taraftan gelen akıştan dolayı, duvar sınır tabakası ya da kayma gradyanı kaynaklı girdapların normal bileşenlerinin varlığıdır. İkinci koşul ise, girişte bir radyal sıcaklık dağılımının varlığıdır [4].

Eğer kayma hız gradyanı ω_n ve sıcaklık gradyanı uygun bir şekilde seçilir ya da manupüle edilebilirse, toplam basınç gradyanı minimize edilir ve ikincil akış gelişimi yavaşlatılır [4].

İkincil akışlar türbin soğutma rejimini ve sıcaklık alanını önemli ölçüde etkilerler. Yine ikincil akışlar, kanatçık duvarlarının emme yüzeylerinin yakınlarında bir ayrılma bölgesi oluştururlar ve bu bölge girdap oluşturma eğilimindedir [4].

Sıkıştırılabilir viskoz akış için girdap nakil denklemleri momentum denklemlerinden elde edilir [4].

$$\begin{aligned} \frac{\delta\omega}{\delta t} + (V \cdot \nabla)\omega &= (\omega \cdot \nabla)V - \omega(\nabla \cdot V) - \nabla x \left(\frac{\nabla p}{\rho} \right) \\ -\nabla x \left[\frac{\mu}{\rho} \nabla x \omega - \frac{4\mu}{3\rho} \nabla(\nabla \cdot V) \right] &+ \nabla x \left(\frac{B}{\rho} \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Denklem (1.2)'de, ilk iki terim, yerel ve taşınımsal ivmelenme terimleridir. 3. terim, girdap çizgilerinin normal yönde uzamasından kaynaklanan girdap yükselmesini temsil eder. Hacimsel genişleme kaynaklı girdap oluşumu ve düzensiz yoğunluktaki akışa etkiyen basınç kuvvetleri kaynaklı dönme hareketi sırasıyla 4. ve 5. terimlere karşılık gelmektedir. Eğer akışın yoğunluğu sabit ise, bu iki terim de sıfırdır. 6. terim, girdapın vizkos difüzyonunu ve son terim de korunumsuz cisim kuvvetleri kaynaklı girdap oluşumlarını temsil etmektedir [4].

İki boyutlu sıkıştırılabilir akış için, bir akış fonksiyonu ψ tanımlanabilir. Girdap ve süreklilik denklemleri aşağıdaki eşitlik grubuna (Denklem 1.3, 1.4, 1.5) dönüşür [4].

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -v, \frac{\partial\psi}{\partial y} = u, \omega = \omega_z \quad (1.3)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \nu \nabla^2 \omega \quad (1.4)$$

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (1.5)$$

2. PIV (Particle Image Velocimetry) YÖNTEMİ

Akış hızı ölçümleri ilk olarak basınç problemleriyle, daha sonra yüksek frekans cevabına sahip sıcak tel anemometre (hot wire) problemleriyle yapılmıştır. Bu yöntemlerde, prob akış alanı içerisinde veri aldığından, bu tekniklerle gerçekleştirilen hız ölçümlerinde akışa müdahale edilmektedir (intrusive). Laser Doppler Velocimetry (LDV) yönteminin geliştirilmesiyle, akış alanına müdahale edilmeden (non-intrusive), düşük hızlardan çok yüksek hızlara, türbülans, zamana bağlı akış (unsteady) gibi birçok hız alanı ölçümü rahatlıkla yapılabilmektedir. Ancak yine de, bu yöntem, tek nokta ölçüm yöntemidir ve akış alanı ve dağılımı hakkında sınırlı bilgi vermektedir [32].

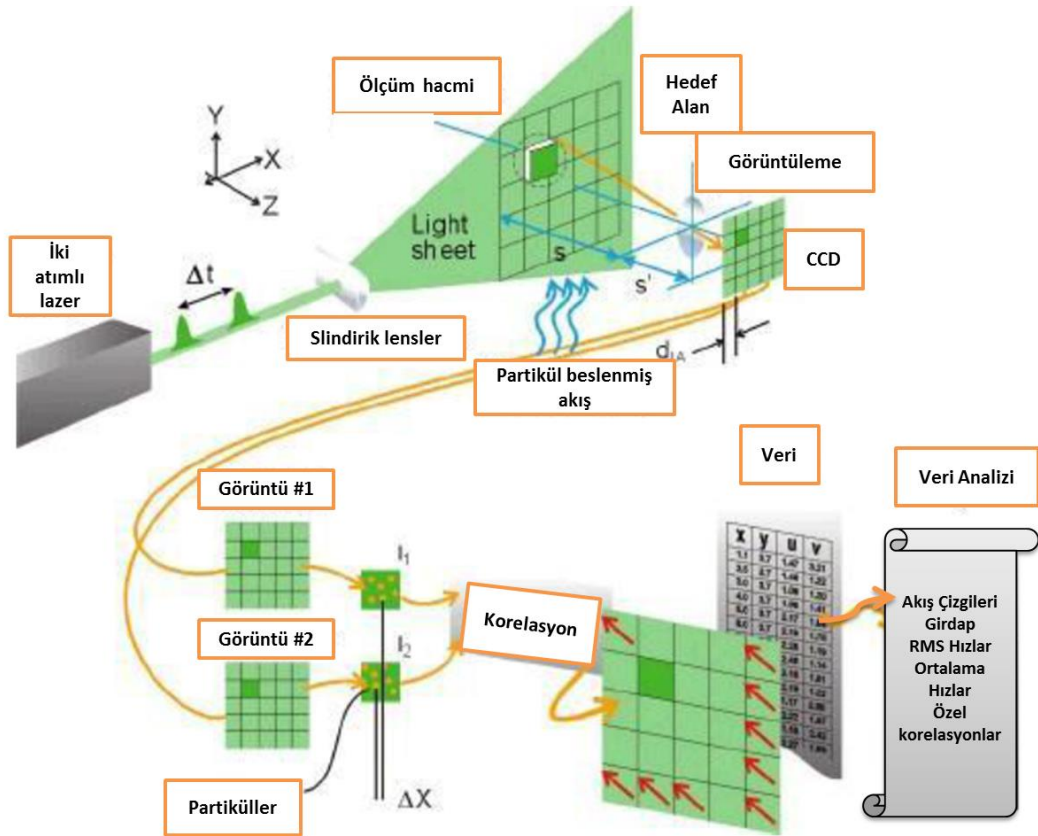
Akış alanını ölçebilmek için, birden fazla noktadan ölçüm alabilen, rake denilen, sıralı basınç problemleri ve sıcak tel anemometresi problemleri kullanılmıştır. Ancak, daha kaliteli ölçüm yapma adına doğan ihtiyaç, LDV yönteminin geliştirilerek, birden fazla noktada aynı anda ölçüm alınarak akış alanının non-intrusive olarak ölçülmesine olanak veren Particle Image Velocimetry (PIV) tekniğinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu yöntem, 1970'lerin sonunda geliştirilmeye başlanmış, 1980'lerin sonunda ise kullanımı hızla yayılmıştır. Bu yöntem, aralıklı test sistemlerinde (örneğin test süresi sadece 400 ms olan test sistemlerinde) toplam test süresini kısaltmakta ve diğer yöntemlerle yakalanamayan anlık girdap alanlarını ölçebilmektedir [32].

2.1. Çalışma Prensipleri

PIV yöntemi, LDV yönteminde olduğu gibi, akışa karıştırılan ve ışık altında yansıma yapan özel partiküllerin hızlarının ölçülmesi prensibine dayanır. LDV'de noktasal ölçüm alınırken, PIV'de düzlemsel ölçüm alınır. PIV tekniğinde, ölçüm yapılacak bölgeye bir ışık hüzmesi gönderilir ve parçacıkların görünür hale gelmesi sağlanır ve ilgili görüntüler kaydedilir. Daha sonra parçacıkların yer değişimleri ardışık görüntülerle belirlenerek hız vektörleri hesaplanır [32].

Bir PIV sisteminin deneysel kurulumu belirli birkaç alt sistemden oluşur. Bir çok uygulamada, parçacıklar akışa eklenir. Bu parçacıklar, bir akış düzleminde, kısa zaman aralıklarıyla, en az iki kere görüntülenir. Partiküller

tarafından saçılan ışık, bir yapıya (a single frame) ya da yapılar zincirine kaydedilir. Işık hüzmeleri arasındaki partikül görüntülerinin yer değiştirmesi PIV kayıtlarının değerlendirilmesi sonucu belirlenir. PIV tekniğiyle toplanan veri havuzunu kontrol edebilmek için karmaşık veri işleme yöntemleri gereklidir. Şekil 2.1’de PIV kaydı için gerekli düzenek gösterilmiştir. Burada, küçük partiküller akışa eklenir. Akış içerisinde ölçümlerin alınacağı düzlem, lazer yardımıyla akışta iki kere aydınlatılır. Burada, partiküllerin iki ışık hüzmesi arasında bölgesel akış hızıyla hareket ettiği varsayılır. Partiküllerle saçılan ışık, yüksek çözünürlüklü lensler yardımıyla tek bir yapıda (on a single frame) ya da iki farklı yapıda dijital kameralarla kaydedilir. Foto-grafik PIV yönteminin gelişiminden sonra, kayıtlar bir tarayıcı yardımıyla dijitalize edilmiştir. Dijital sensörün çıktıları, bilgisayara direkt olarak aktarılmaktadır [33].



Şekil 2.1. PIV sistemi ve veri işleme prosesi [33]

PIV kayıtlarının değerlendirilebilmesi için, kayıtlar küçük alt alanlara (interrogation areas) bölünmüştür. Birinci ve ikinci ışık hüzmelerindeki partikül görüntülerinin yerel yer değiştirme vektörleri, her bir alt alan için, istatistiksel

yöntemlerle (oto- ya da çapraz-korelasyon) belirlenir. Burada, bir alt alandaki bütün partiküllerin iki ışık hüzmesi arasında homojen olarak hareket ettiği varsayılmaktadır. Yerel hız vektörlerinin ışık hüzme düzlemindeki (iki komponentli hız vektörü) projeksiyonu, iki aydınlatma işlemi arasındaki zaman gecikmesi ve görüntünün çözünürlüğünün arttırılmasıyla hesaplanır. Bütün alt alanlarda CCD (charge coupled device) kameralarla PIV kayıt işlemi gerçekleştirilir [33].

2.1.1. Partikül besleme

Akış alanını görüntüleyebilmek için, akışa beslenen partiküllerin ışığı dağıtması gerekmektedir. Partiküller, akışı izleyebilecek kadar küçük, ışığı yansıtabilecek kadar da büyük olmalıdırlar. Genel kural olarak, her ölçülen hız vektörü için aşağı yukarı 10 partikül korele edilmelidir. Literatürde, akışa nasıl bir besleme yapılacağıyla alakalı az sayıda çalışma mevcuttur. Sıkıştırılabilir akışlarda, görüntüleme için kullanılacak partiküller Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [33].

Çizelge 2.1. Gaz akışı için tohumlayıcı malzemeler [33]

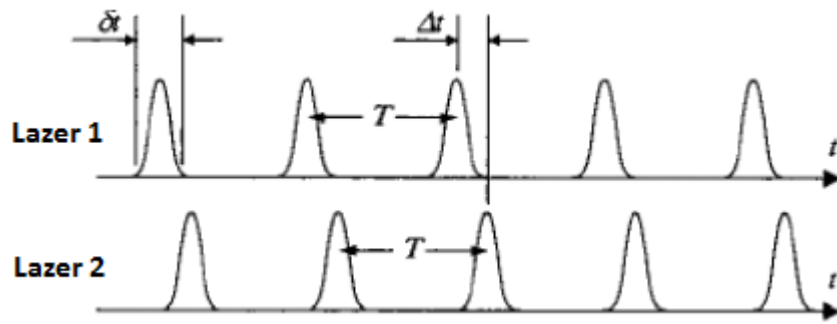
Tip	Malzeme	Ortalama Çap (um)
Kati	Polistren	0.5 - 10
	Al ₂ O ₃	0.2 - 5
	TiO ₂	0.1 - 5
	Cam mikro-küreler	0.2 - 3
	Cam mikro-balonlar	30 - 100
	Sentetik kaplama granülleri	< 50
	Diokfatalit	1.0 - 10
	Duman	< 1
Sıvı	Farklı yağlar	0.5 - 10
	Di-etil-heksisabakat	0.5 - 1.5
	Helyumlu sabun köpüğü	1000 - 3000

Gaz akışlarını tohumlandırmak amacıyla, akışa birkaç teknikte partikül sağlanabilir. Kuru toz partikülleri akışkan yataklarda ya da hava jetleriyle küçük parçalara ayrılabilir. Sıvı partiküller buharlaştırıldıktan sonra yoğunlaşma jeneratörlerinde çökeltilebilir ya da sıvı damlacıkları bir atomizer yardımıyla oluşturulabilir. Buharlaştıran sıvıdaki asılı katı parçacıklar yine atomizerler yardımıyla parçalanabilir [33].

2.1.2. Işıık kaynakları

Lazerler, akışa beslenen partikülleri herhangi bir sapma olmadan ince bir ışık hüzmesinde toplayarak, monokromatik ışığı yüksek enerji yoğunluğuyla yayabilme özelliklerinden dolayı PIV ölçümlerinde sıklıkla kullanılırlar. PIV tekniğinde sürekli dalgalı ya da atımlı lazerler kullanılır. İlk gruba örnek olarak, birkaç watt aralığında güç üreten argon-ion lazerleri verilebilir. Tipik atımlı lazerler ise Nd-YAG lazerleridir [33].

Atımlı lazerlerinin avantajı, iki lazer atımı arasındaki birkaç nanosaniyelik süredir. Sonuç olarak, çok yüksek hızlarda bile, seyahat eden partikül lazere maruz kaldığında, minimum bulanıklıkla neredeyse donmuş durumdadır (Örneğin 100m/s hızla hareket eden bir partikül, 6 nanosaniyelik bir atımla sadece 0.06 mm yer değiştirmektedir). Atımlı lazerler, enerjiyi tam istenilen anda depolayabildiklerinden ve aktarabildiklerinden dolayı PIV yöntemi için çok uygundurlar. Atımlı lazerler, PIV yönteminde 10 Hz.'ler mertebesinde sabit tekrarlanma oranında çalışırlar. Bu yüzden, rastgele zaman farklarını (Δt) elde edebilmek için, arka arkaya ateşleyen iki benzer lazerin bulunması gerekir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, ikinci lazerden gerçekleşen atım zinciri rastgele küçük zaman aralıkları (Δt) oluşturabilir. Gerekli başlatma sinyalini oluşturan gecikme kutusu lazerleri, kamerayı, bilgisayarı ve diğer cihazları senkronize şekilde çalıştırmalıdır [33].

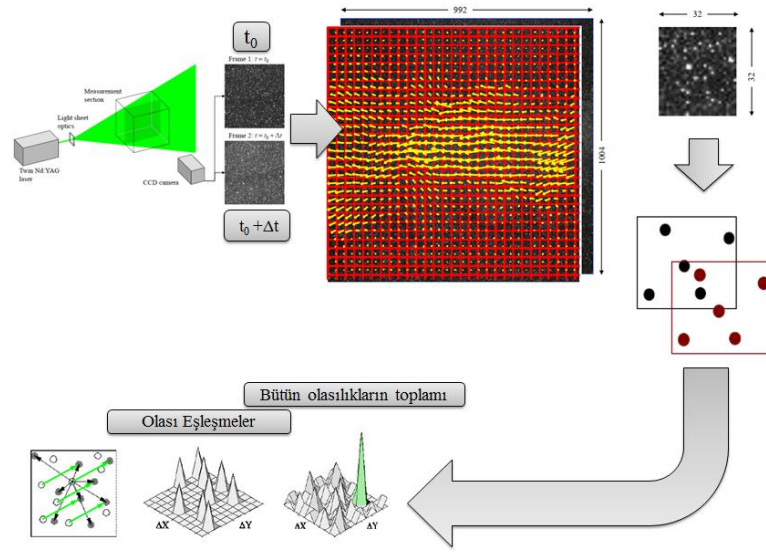


Şekil 2.2. PIV ölçümü için başlatılmış atım zinciri [33]

İki lazerle çalışırken, lazer hüzmelerinin test düzeneğinde tam olarak üst üste gelmesi çok önemlidir. Eğer, ışık hüzmeleri aynı böyleyi aydınlatmazsa, bu durum zayıf korelasyonlar ve tatmin edici olmayan durumlar ortaya çıkarır [33].

2.1.3. Görüntü işleme

Görüntü işleme prosesinde (Şekil 2.3), Δt zaman farkıyla alınan iki görüntünün her biri alt pencereleme bölünerek, pencere başına düşen partiküllerin herbirinin ayrı ayrı birbiriyle eşleşme durumları çapraz korelasyon yöntemiyle, iteratif bir şekilde incelenir. Çapraz korelasyon yöntemiyle eşleşme olasılığı en yüksek partiküller bulunur ve buradan partikülün Δt zaman aralığında aldığı yol bulunarak ilgili hızlar hesaplanır [34].



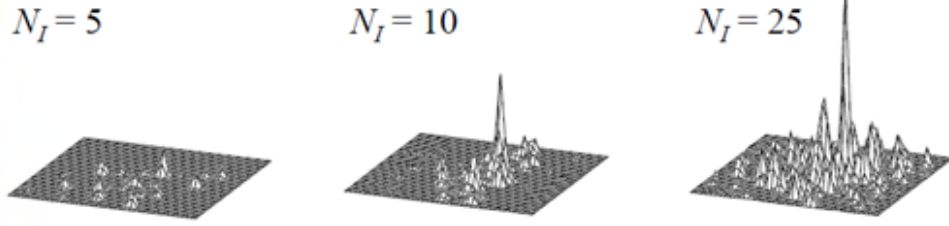
Şekil 2.3. PIV görüntü işleme şematik gösterimi [34]

Alt pencere başına düşen partikül konsantrasyonu az ise sinyal-gürültü oranı düşük görüntüler elde edilir ve bu şekilde alınan ölçümlerde çapraz korelasyon yapılması yanıltıcı durumlar ortaya çıkarır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, partikül konsantrasyonundaki artış daha iyi bir sinyal-gürültü oranına, dolayısıyla, daha güvenilir bir çapraz korelasyon işlemine olanak sağlamaktadır [34].

N_I : Partikül sayısı
 R_D : Sinyal-gürültü oranı

$$R_D(s_D) \sim N_I \Rightarrow N_I = \frac{C \Delta z_0}{M_0^2} D_I^2$$

C : Partikül Konsantrasyonu
 Δz_0 : Işık tabaka kalınlığı
 D_I : Alt alan boyutu
 M_0 : Magnifikasyon



Şekil 2.4. Partikül yoğunluğunun sinyal-gürültü oranına etkisi [34]

2.1.4. Görüntü yakalama

PIV yöntemiyle bir akışın karakteristiği ölçülmek istendiğinde göz önünde bulundurulması gereken parametreler aşağıda verilmiştir [33].

- Çözünürlük: Görüntü yakalama sisteminin çözünürlüğü ışık hüzmesinin konik açısı tarafından belirlenir.
- Alan derinliği: Net bir görüntü elde edebilmek için, partiküllerin kamera lensinin odağına düşmesi gerekir.
- Görüntü büyüklüğü: Partikül görüntüsü küçük parçalara ayrıldığında, görüntünün büyüklüğünün partikül çapına, lens büyütme gücüne ve lensin nokta cevap fonksiyonuna bağlı olduğu görülür.
- Kayıt sistemi: Kayıt sistemi, incelenecek akış alanının büyüklüğüne ve gerekli çözünürlüğe bağlı olarak değişir.

2.1.5. PIV hataları

PIV ölçümleri aşağıda bahsedilen birkaç sebepten dolayı hatalar içerir [33]:

- Kaydedilen görüntünün gürültü içermesinden kaynaklanan rastgele hatalar,
- Alt piksel hassasiyetinde sinyal tepe noktalarının hesaplanması sırasında meydana gelen hatalar,
- Bir alt bölgede (interrogation spot), akışın dönmesinden ve deformasyonundan kaynaklanan ve aynı zamanda korelasyon kaybına sebebiyet veren gradyen hataları,

- Bir partikülün kayma olmadan akışı izleyememesinden kaynaklanan izleme hataları,
- Partikül hareketlerinin Lagrangian-Euler dönüşümü sırasında meydana gelen hızlanma hataları,

İzleme hataları gibi bazı hata kaynakları deney koşullarının dikkatli bir şekilde seçimiyle minimuma indirilebilir. Fakat, diğer hata kaynakları PIV korelasyonunun doğasında vardır ve elemine edilemez. Örneğin, kaydedilen görüntüler gürültüden arındırılmış bile olsa, korelasyonun tepe noktası, aynı çifte ait olmayan partikül görüntüleri arasındaki rasgele korelasyonlardan etkilenir. Yine, türbülanslı bir akışta görülen gradyan hataları ve anlık Euler akış hızının tahmin edilebilmesi için Lagrangian partikül hareket formülasyonlarının kullanılması da elemine edilemeyen hatalardandır [33].

2.2. Veri İşleme Akış Şeması

En küçük kareler eşleşmesi, adaptif korelasyon, ortalama korelasyon ve adaptif PIV yöntemleri, belli varsayımlara dayanan veri işleme yöntemleridir. Testlerde, sinyal gürültü oranı düşük olan görüntüler için ortalama korelasyon yöntemi ile, yüksek olan görüntüler için ise adaptif PIV yöntemiyle hız vektörleri elde edilmiştir.

2.2.1. En küçük kareler eşleşmesi

Klasik PIV korelasyon tekniklerinde iki boyutlu çapraz korelasyonlar, akış yönündeki sıfırıncı mertebe hız bileşenlerini çıkartarak ve daha yüksek mertebeli dönme ve deformasyon terimlerini dikkate almayarak uygulanırlar. Bu varsayım, aslında, akış alanının çok düzgün olduğu ve dönme-kayma yer değişimlerinden çok fazla etkilenmediği varsayımdır. Korelasyon tekniklerinin aksine, en küçük kareler eşleşmesi, bir akış elementini kaydırır, döndürür ve uzatır [35].

2.2.2. Çapraz korelasyon

PIV verileri, genellikle, tek pozla çekim yapılmış ikili yapıların (single exposure, double frame) yerel çapraz korelasyonları hesaplanarak değerlendirilirler [36].

Partikül görüntüleri akış ile hareket eden bir şablon olarak düşünüldüğünde, iki partikül görüntü şablonunun ($\tau_1(X)$ ve $\tau_2(X)$) en iyi şekilde eşleştirilmesi $R(s)$ ile tanımlanan uzaysal korelasyon yöntemiyle belirlenmektedir (Denklem 2.1) [37]:

$$R(s) = \int \tau_1(X)\tau_2(X + s) dX \quad (2.1)$$

Tek poz-çoklu yapılarda, iki ardışık poz farklı yapılara kaydedilir. Kaydedilen sinyaller, $\tau_1(X)$ ve $\tau_2(X)$, ışık şiddetiyle orantılı olarak tanımlanan alt pencere bölgelerinde, $W_1(X - X_{I1})$ ve $W_2(X - X_{I2})$, düşünülür (Denklem 2.2) [37]:

$$\tau_1(X) \doteq W_1(X - X_{I1})I_1(X) \text{ ve } \tau_2(X) \doteq W_2(X - X_{I2})I_2(X) \quad (2.2)$$

Burada, $I_1(X) = I_1(X, t_1)$ ve $I_2(X) = I_2(X, t_2)$, t_1 ve t_2 zamanlarındaki görüntü yoğunluk alanlarıdır. X_{I1} ve X_{I2} ise Δt zaman aralığındaki W_1 ve W_2 alt pencerelerinin konumlarıdır [37].

Tohumlayıcı partiküllerin akışa homojen dağıldığı varsayılırsa, ortalama görüntü yoğunluğu X 'den bağımsızdır. Bu sebeple, yoğunluk alanı, ortalamayı ve salınımı temsil eden parçalara bölünebilir (Denklem 2.3) [37]:

$$I_1(X) = \langle I_1 \rangle + \Delta I_1(X) \text{ ve } I_2(X) = \langle I_2 \rangle + \Delta I_2(X) \quad (2.3)$$

Burada, $\langle \Delta I_1(X) \rangle = \langle \Delta I_2(X) \rangle = 0$ 'dır. Buradan, $R(s)$, Denklem 2.4'teki gibi yazılabilir [37].

$$R(s) = R_C(s) + R_F(s) + R_D(s) \quad (2.4)$$

$$R_C(s) = \int W_1(X)W_2(X + s)\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle dX \quad (2.5)$$

$$R_F(s) = \int W_1(X)W_2(X+s)[\langle I_1 \rangle \Delta I_2(X+s) + \langle I_2 \rangle \Delta I_1(X)]dX \quad (2.6)$$

$$R_D(s) = \int W_1(X)W_2(X+s)\Delta I_1(X)\Delta I_2(X+s)dX \quad (2.7)$$

Denklem 2.5'te R_C , alt pencereler W_1 ve W_2 'nin ortalama arka plan yoğunluğunun korelasyonu, Denklem 2.6'da R_F , ilk alt penceredeki salınım yoğunluğunun, ikinci alt penceredeki ortalama yoğunlukla birlikte, çapraz korelasyonunu ve tam tersini temsil eder. Denklem 2.7'de R_D , birinci ve ikinci alt pencerelerdeki, salınlı görüntü yoğunluklarının çapraz korelasyonunu temsil etmektedir. Ortalama görüntü yoğunluklarının, görüntü verisinden çıkartılmasıyla, uzaysal korelasyonun hesaplanması öncesi, R_C ve R_F etkileri minimize edilmektedir [37].

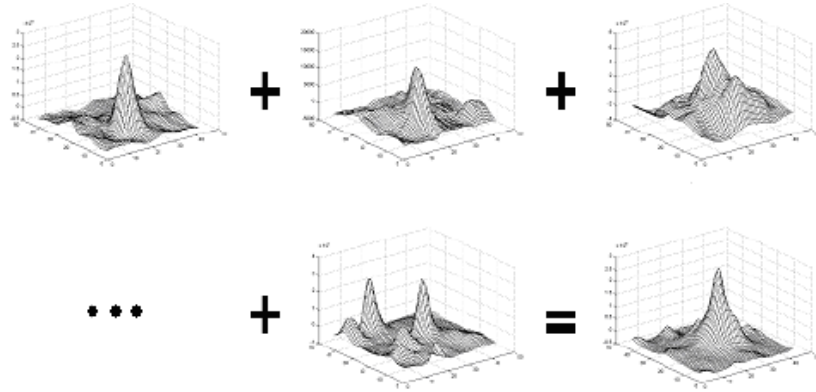
2.2.3. Ortalama korelasyon

Bir akışta partikül sayısı az olduğunda, ortalama korelasyon ile ortalama akış alanı hesabı yapılabilir. Ortalama korelasyonda, her bir alt alanın ortalama fonksiyonunun, bütün görüntüler için her bir bölgede ortalaması alınır. Ortalama korelasyon, sinyal-gürültü oranını kayda değer ölçüde iyileştirerek, net korelasyon tepeleri oluşturur. Örneğin, 20 PIV görüntüsü düşünölsün. Bunlardan ilk 15 tanesindeki belli alt alanlarda hiç partikül yakalanamadığı varsayölsün. Bu durumda, ortalama korelasyon neredeyse anlamsızdır, çünkü alt alanlar sadece gelişi güzel gürültü içermektedirler. Son görüntülerde, ilgili alt alanlarda bir korelasyon oluşturabilecek az sayıda partikül vardır ve bunlar bir araya geldiklerinde iyi bir korelasyon tepesi oluşturabilirler [35].

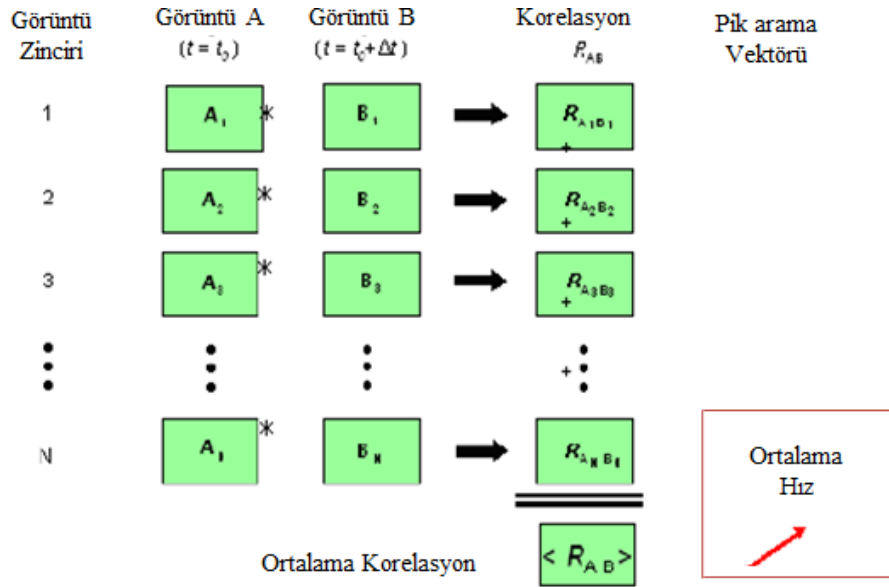
Tepe değerdendirmesi normal olarak yapılır ve kaydedilen görüntü sayısında ilgili alt alanlardaki ortalama hızları temsil eder. Bu da yeterli sayıda görüntünün kaydedilmesini gerektirir ki her bir bölgedeki partiküllerin toplam sayısı mantıklı olsun. Yeterli sayıda görüntü elde edildiğinde, anlamsız vektörlerin olmadığı, iyi sayılabilecek bir vektör haritası elde edilebilir [35].

Bir başka deyişle, akış az sayıda partikül barındırdığında, korelasyon fonksiyonlarının birbirlerine eklenerek, bir korelasyon sinyal tepeciğinin oluşumu aşama aşama Şekil 2.6'da gösterilmiştir [35]. Bu işlem şematik olarak da Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Birinci ve ikinci lazer atımında, A yapısındaki (frame A) alt

alanlar (interrogation areas) korele edilmektedir. Korelasyon fonksiyonları üst üste toplanıp, sonrasında tepecikler değerlendirilmektedir [35].



Şekil 2.5. Ortalama korelasyon tepcilerinin toplamı [35]



Şekil 2.6. Ortalama korelasyon akış şeması [35]

2.2.4. Adaptif PIV

Adaptif PIV yöntemi partikül görüntülerine göre hız vektörlerini hesaplayan otomatik ve adaptif bir yöntemdir. Bu metot, bölgesel ekim yoğunluğunu ve akış gradyanlarını adapte edebilmek için her bir alt alanın (interrogation areas) büyüklüğünü ve şeklini iteratif olarak ayarlar [35].

Bir başka deyişle, görüntü şablonundaki partiküllerin yer değişimi çapraz korelasyon yardımıyla ölçülürken, partikül hareketlerini barındıran alt pencerelerin boyutlarının neredeyse sabit olduğu varsayımı yapılır. Pratikte,

birçok akış koşulunda, alt pencere içerisindeki hız alanı kayda değer ölçüde değişkenlik gösterir. Bu durumlarda, görüntü çiftleri tarafından oluşturulan çapraz korelasyon tepcikleri genişler, ve aşırı hız farklarından dolayı birden fazla tepcik oluşturabilirler[36].

Alt pencerelerin iteratif olarak deforme edilmesiyle (Adaptif PIV), aynı düzlemdeki hız gradyen farkları ve tepcik genişleme etkisi azaltılabilir. Böylelikle, alt pencere boyutlarının sabit tutularak elde edilen çapraz korelasyonlara göre, sınır tabaka, girdap ve türbülanslı akış koşullarında çok daha güvenilir ve hassasiyeti çok daha iyi olan sonuçlar elde edilir [36].

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j)I'(i + x, j + y) \quad (2.8)$$

Benzer olarak, Denklem 2.8'de verilen standart çapraz korelasyon fonksiyonuna göre, deforme edilmiş görüntülerin çapraz korelasyonu Denklem 2.9'da verilmiştir [36].

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L \tilde{I}(i, j)\tilde{I}'(i + x, j + y) \quad (2.9)$$

Burada, $\tilde{I}(i, j)$ ve $\tilde{I}'(i, j)$, deformasyondan sonraki, merkez farklar düzeninde (Denklem 2.10, 2.11) tahmini deformasyon alanı, $\Delta s(x)$, kullanılarak oluşturulan görüntü yoğunluklarıdır [36].

$$\tilde{I}(x) = I\left(x - \frac{\Delta s(x)}{2}\right) \quad (2.10)$$

$$\tilde{I}'(x) = I'\left(x + \frac{\Delta s(x)}{2}\right) \quad (2.11)$$

Deformasyon alanı, $\Delta s(x)$, görüntüdeki her bir pikselin interpolasyonunu gerektirir. Taylor serisindeki (Denklem 2.12) ilk terim, bölgesel yerdeğişiminin yeniden yapılandırılması için yeterlidir [36].

$$\Delta s_1(x) = \Delta s(x_0) + \nabla[\Delta s(x_0)] \cdot (x - x_0) + \dots + O(x - x_0)^2 \quad (2.12)$$

Burada, x_0 , alt pencerenin merkezini temsil etmektedir.

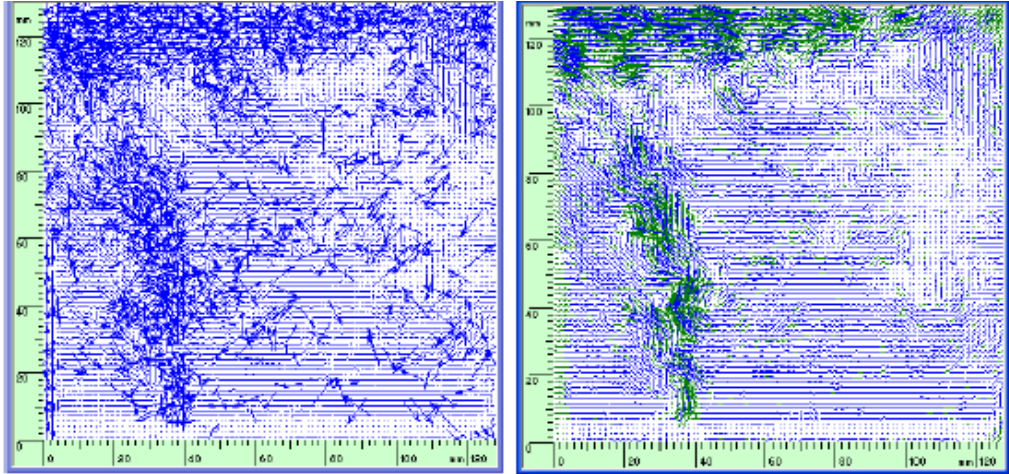
İterasyon sonucunda, partikül görüntü çiftleri arasındaki mesafe minimize edilerek, $\tilde{I}(i, j)$ ve $\tilde{I}'(i, j)$ görüntüleri karşılaştırılarak, korelasyon tepeği, korelasyon düzleminin merkezinde oluşturulur [36].

Sonuç olarak, iteratif PIV yöntemi öngörme-düzeltilme eşitliğini kullanır (Denklem 2.13):

$$\Delta s_{k+1}(x) = \Delta s_k(x) + \Delta s_{düz}(x) \quad (2.13)$$

Bu işlem, çoğunlukla iki-üç iterasyondan sonra, alt pencere boyutlarını optimize ederek, çoğu düzlemsel partikül hareketi için başarılı olarak yakınsamaktadır [36].

Adaptif korelasyon metodu, ilk ve son alt alan boyutlarını çaprazlar ve alt alan boyutu finalize olana kadar, ara sonuçları kendisinden sonra gelen daha küçük boyuttaki alt alanlara besleyerek, hız vektörlerini hesaplar. Şekil 2.5'te, sağda, adaptif korelasyon sonucu, akış alanındaki yeşil vektörlerin oluşturulduğu ve bunun, soldaki çapraz korelasyon sonucu elde edilen düzensiz vektörlere göre, akışı daha iyi temsil ettiği gösterilmektedir [35].



Şekil 2.7. (Solda) Çapraz korelasyon hız dağılımı. (Sağda) Adaptif korelasyon hız dağılımı [35]

2.3. Akışkanlar Mekaniği Uygulamalarında Hız Alanı Etkileri

Akışkanlar mekaniği uygulamalarında hız bilgisi, eş zamanlı basınç ve yoğunluk alan ölçümleri olmadığından dolayı, hız ölçümleri fiziksel bağlamda ikincil ilgi alanı oluşturur. Genel olarak, Navier-Stokes denklemlerindeki (Denklem 2.14) terimler, basınç, yoğunluk ve hız alanlarıyla ifade edilir [36]:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + F \quad (2.14)$$

Burada F, akışkan parçacıklarına etki eden yerçekimi gibi cisim kuvvetlerini temsil etmektedir. Yukarıda bahsedilen fiziksel özellikleri eş zamanlı olarak ölçebilmek çok zordur. PIV ile elde edilen düzlemsel hız alanları, kendi başına, akışın diğer fiziksel özelliklerini türev-integral yöntemleriyle tahmin etmede kullanılabilir [36].

Girdap alanı, hız alanının aksine, bağımsız bir referans yapısında olduğundan özel olarak ilgi gösterilen bir büyüklüktür. Eğer anlık olarak incelenebilirse girdap alanları, özellikle türbülanslı sınır tabaka, çıkış girdapları ya da kompleks girdap yapıları gibi karmaşık akış yapılarını anlamakta, tek başına hız alanlarını incelemekten çok daha etkilidir. Sıkıştırılmaz akışlar için ($\nabla \cdot U = 0$) Navier-Stokes denklemi girdap terimleri cinsinden yazılabilir [36].

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \cdot \nabla \omega = \omega \cdot \nabla U + \nu \nabla^2 \omega \quad (2.15)$$

Denklem 2.15, bir akış parçacığının girdap değişim oranını temsil etmektedir. Basınç terimi elimine edilmesine karşın son terimin, $\nabla^2 \omega$, tahmini, PIV verileriyle oldukça zordur. Akışkanlar mekaniğindeki kullanımı dolayısıyla, PIV verisinden girdap alanı tahmini diferansiyel denklemlerle olasıdır. PIV ile elde edilen anlık hız alanları bir yol boyunca integre edilerek anlık tekil değerler ya da akım fonksiyonları elde edilir [36].

Düşük partikül yoğunluğundaki görüntüler için, bir noktadaki Euler akış hızı tanımından, akış parçacığının yerdeğişimini ölçebilmek için sonlu hacme sahip küçük bir parçacığın işaretlenmesi gerekir. Bu amaçla moleküler

İşaretleyiciler kullanılabilir. Optik ölçüm yöntemlerinde, görüntüdeki partiküllerin işaretlenmiş kütle merkezlerinin yer değiştirmeleri çeşitli yöntemlerle hesaplanır. İşaretli moleküller difüz ederken, zamanla kütle merkezlerinin tespit edilmesi zorlaşır. Bu moleküller, akış hareketi sırasında deforme olurlar ve işaretli parçacıkların oluşturduğu görüntünün sentroidi ile parçacıkların kütle merkezleri arasındaki fark artar [37].

Akışkanlar mekaniğinin doğası gereği çoklu nokta verilerine (yüksek görüntü yoğunluğu) ihtiyaç vardır. Bir x noktasındaki akışı tanımlayabilmek için, Euler hızıyla verilen, $u(x,t)$, bu noktanın bir eksenindeki yer değişimi ve deformasyon tensörü ile verilen, $\partial u_i / \partial x_j$, yerel deformasyon bilgileri gereklidir [37]. Daha sonra, Denklem 2.16, simetrik ve asimetrik olarak parçalanır:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = s_{ij} + r_{ij} \quad (2.16)$$

Burada kayma oranı tensörü (Denklem 2.17);

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.17)$$

dönme olmadan, akış partikülünün basma ve çekme kuvvetleri altında sadece kayma hareketine maruz kaldığını göstermektedir. Dönme tensörü, r_{ij} , (Denklem 2.18);

$$r_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.18)$$

Uzama-kısalma olmadan sadece dönme hareketini temsil eder. Girdap vektörüne bağlı olarak (Denklem 2.19) aşağıdaki tensör de tanımlanabilir.

$$\omega(x, t) = \nabla \times u(x, t) \quad (2.19)$$

$$\omega_i = -\varepsilon_{ijk} r_{jk} \quad (2.20)$$

Burada, ε_{ijk} , değişken birim tensördür (Denklem 2.20).

Akış hareketinin kinematik açıklamasına ek olarak, sıkıştırılamaz formdaki standart Navier Stokes eşitlikleri (Denklem 2.21), girdap vektörünün ve kayma oranının önemini vurgulamak adına, Denklem 2.22 formunda yazılabilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \varepsilon_{ijk} u_j \omega_k + \frac{1}{2} \frac{\partial u_j u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} (v s_{ik}) \quad (2.22)$$

Girdap vektörünün belirlenmesi, kompleks akış olaylarının tanımlanabilmesi açısından önemlidir. Aslında, PIV ile elde edilen hız alanları, önemli akış mekaniği olaylarını anlamak adına ara bir sonuçtur. Bu hız alan verilerinin proses sonrası işlenerek, girdap, kayma gibi vektörler cinsinden ifade edilmesi önemli akış olaylarının incelenmesinde önemlidir [36].

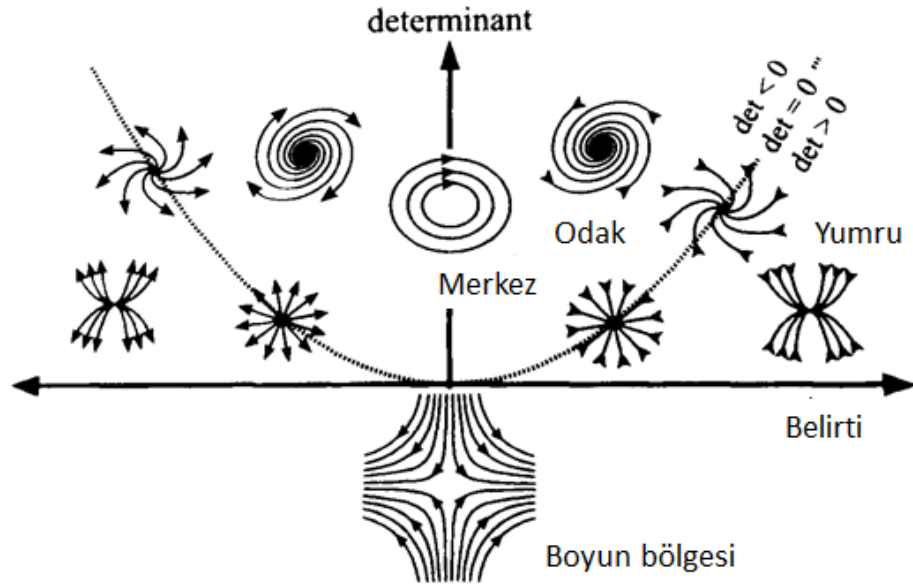
Girdapların nasıl bir yapıda olduğu hakkında genel bir algı olmasına rağmen, özellikle birden fazla girdabın iç içe geçtiği durumlarda, kolay algılanabilir bir dairesel yapıları yoktur. Bir girdap, konumu, merkez yarıçapı, kayma hızı, maksimum girdap büyüklüğü, teğetsel hızı gibi parametrelerle karakterize edilebilir [36].

Hız alanı, genellikle, barındırdığı girdap alanını gizleme eğilimindedir. Akış çizgileri, akıştaki girdap varlığının iyi bir göstergesi olabilir (Şekil 2.8), ancak tek başına yeterli değildirler. Girdap merkezlerinin belirlenmesi zor olup, bu konuda çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında λ_2 –operatörü, düzlemsel şartlar için Denklem 2.23'te verilmiştir:

$$\lambda_2 = \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 - 4 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \cdot \frac{\partial V}{\partial Y} - \frac{\partial U}{\partial Y} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} \right) \quad (2.23)$$

Negatif λ_2 değerine sahip bölgeler girdapları işaret etmektedir. Girdap vektörünün aksine, λ_2 , sınır tabakası, kayma tabakası, girdap dönme yönü hakkında bilgi vermez. λ_2 operatörü, girdap varlığını teyit eder ve girdap pozisyonunu belirlemede etkilidir [36]. Bölgesel minimumdaki negatif λ_2 değeri, girdap

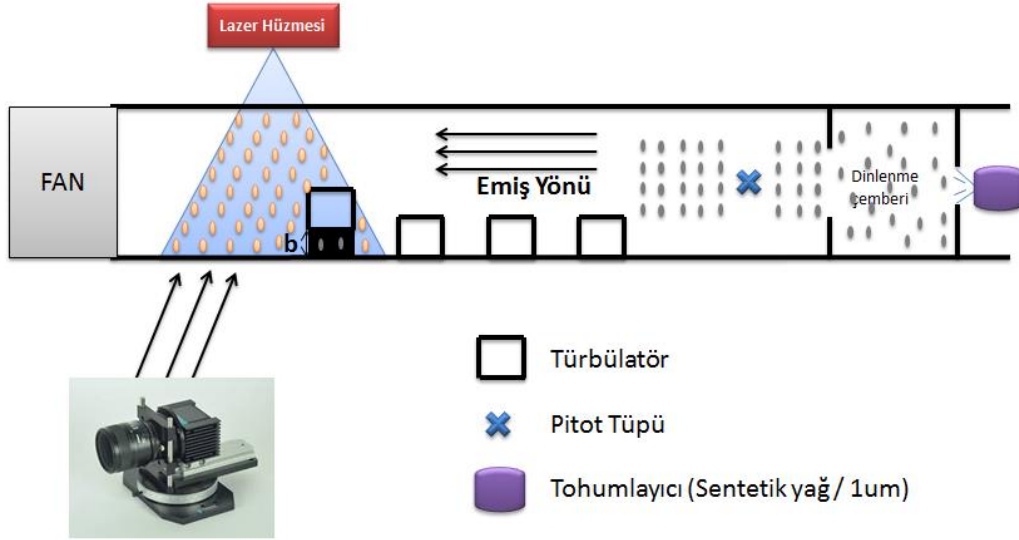
merkezini belirlerken, pozitif değerler akışta dönme hareketi olmadan, kaymanın olabileceğini gösterir [35].



Şekil 2.8. λ_2 , 2. derece diferansiyel denklem sonuçlarının bölgelere göre dağılımı [36]

3. TEST DÜZENEGİ

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli genişlik-yükseklik oranı $G/H=1.7$ olan bir kanalda, kare kesitli türbülötörlerle, 7 farklı boşluk-türbülötör yüksekliği (b/h) oranında $((b/h)_1=0.11, (b/h)_2=0.14, (b/h)_3=0.18, (b/h)_4=0.33, (b/h)_5=0.48, (b/h)_6=1.0, (b/h)_7=0)$ ve yine RE sayısının 33,000-60,000 olduğu aralıkta, ayırık türbülötörlerin akış karakteristiklerine olan etkileri PIV yöntemiyle araştırılmıştır (Şekil 3.1). İki türbülötör arası mesafenin (P), türbülötör yüksekliğine (h) oranı 10 olarak seçilmiştir. Akış ilk olarak, üç adet entegre türbülötörü geçmekte ve sonrasında, lazer ışık hüzmesinden yansıma olmaması için, siyaha boyanmış türbülötörden geçmektedir. İlk üç türbülötör bütün deneylerde sabit tutulmuştur.



Şekil 3.1. Test düzeneği şematik gösterimi

Ölçüm yapılacak bölgenin yaklaşık 1.5 m önünden, kanalın tam merkez bölgesinde, pitot tüpü yardımıyla, toplam basınç-statik basınç farkları ölçülmüş ve buradan kanal merkezindeki maksimum hızlar hesaplanmıştır. Kanal duvarlarından merkeze doğru, hız profili bilindiğinden, kanal merkezindeki maksimum hız da bir korelasyonla düzeltilerek, RE sayılarını hesaplamak için gerekli ortalama hız değerlerine geçilmiştir (Çizelge 3.1). Daha sonra aşağıdaki formülasyonlardan sırasıyla hidrolik çap ve RE sayıları (Denklem 3.1 ve 3.2) hesaplanmıştır.

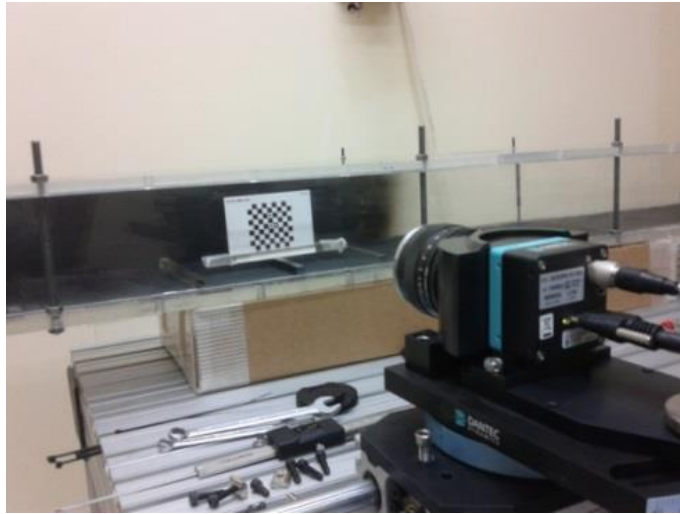
$$D_H = \frac{4ac}{2(a+c)} \quad (3.1)$$

$$RE = \frac{\rho U D_H}{\mu} = \frac{U D_H}{\nu} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan RE aralığı

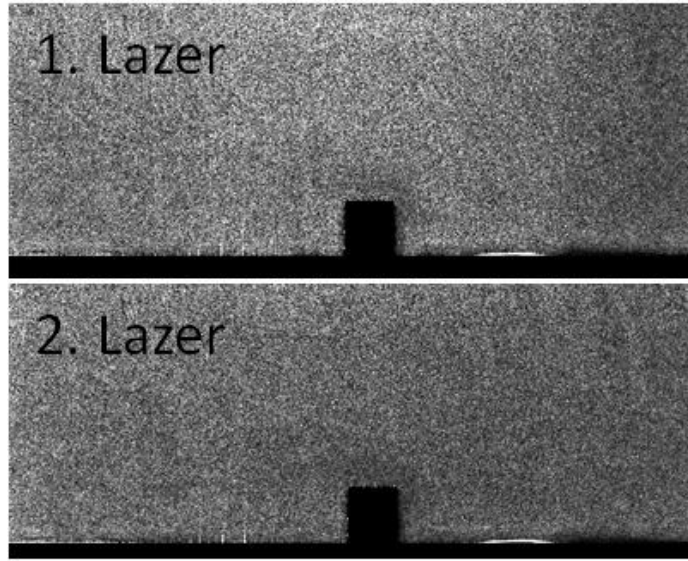
$U_{max}(m/s)$	$U_{düz}(m/s)$	$D_H(m)$	RE
4.9	4.0	0.125	33,000
6.1	4.9	0.125	41,000
7.1	5.8	0.125	48,000
8.9	7.3	0.125	60,000

Test düzeneğinin kurulumu için ilk aşamada kameranın odak ayarı yapılmaktadır. Türbülötör sonrası ölçüm alınacak düzlemde kameranın odak ayarının yapılabilmesi için Şekil 3.2'deki gibi bir kalibrasyon plakası kullanılmaktadır. Burada, kalibrasyon plakası akış incelemesi yapılacak bölgeye koyulur ve loş ortamda kameranın plaka yüzeyine odaklanması sağlanır.



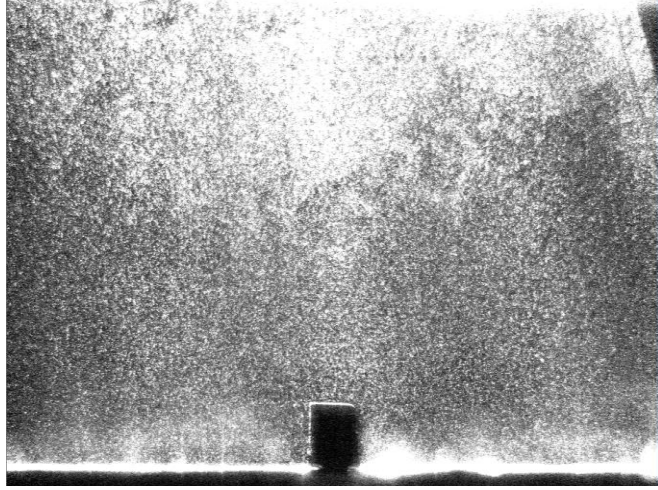
Şekil 3.2. PIV sistemi için yapılan kalibrasyon işlemi

Odaklama işlemi yapıldıktan sonra, kalibrasyon plakası kanal içerisindeyken, lazerden salınan ışık hüzmelerinin plaka üzerine düşmesi sağlanır. Bu süreç, çok sıkıntılı bir süreçtir. Tek bir rezeneratörden iki lazer hüzmesi, belli bir zaman aralığıyla, salınmaktadır ve bu ışık hüzmelerinin teoride aynı bölgeyi aydınlatmaları beklenir. Işık hüzmelerini odak ayarı yapılmış plaka yüzeyine, erişimin sınırlı olduğu koşullarda, denk getirebilmek manuel olarak çok zor bir işlemdir. İlk ışık hüzmesi odak ayarı yapılmış plaka yüzeyine düşse bile, eğer ikinci ışık hüzmesi plaka yüzeyine düşmüyorsa, lazer yollarındaki aynaların ince ayarının yapılması gerekir ki, deneylerde bu durumlarla da karşılaşmıştır. İki lazerin de gücü birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.3'de, iki lazerin belli bir zaman aralığıyla gönderdikleri ışık hüzmeleri sonucu elde edilen görüntüler gösterilmektedir. Lazerin güçlerine bağlı olarak aydınlattıkları alanda, partiküllerin belirginliği de değişmektedir.



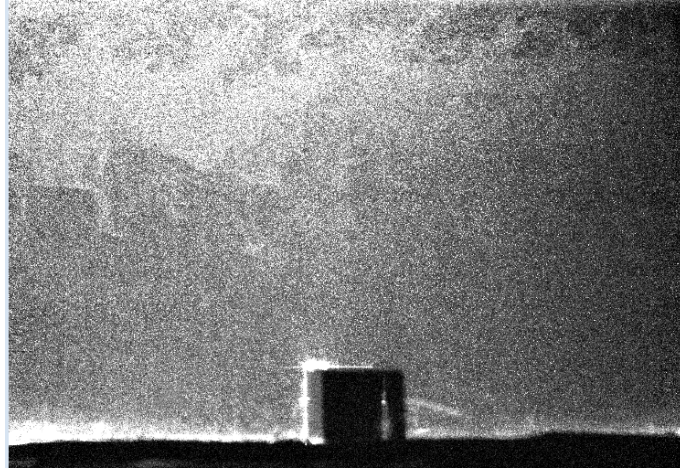
Şekil 3.3. 1. ve 2. lazer hüzmelerinin aydınlattığı alanlar

PIV ölçümlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan yansımaları minimum seviyeye indirebilmek için, ölçüm alınacak alan, siyaha boyanmıştır. Şekil 3.4'deki görüntüde zeminden olan yansımalar görülmektedir. Bu yansımalar, çeşitli yöntemlerle, azaltılmış olsa da sıfır mertebesine indirilememiştir.



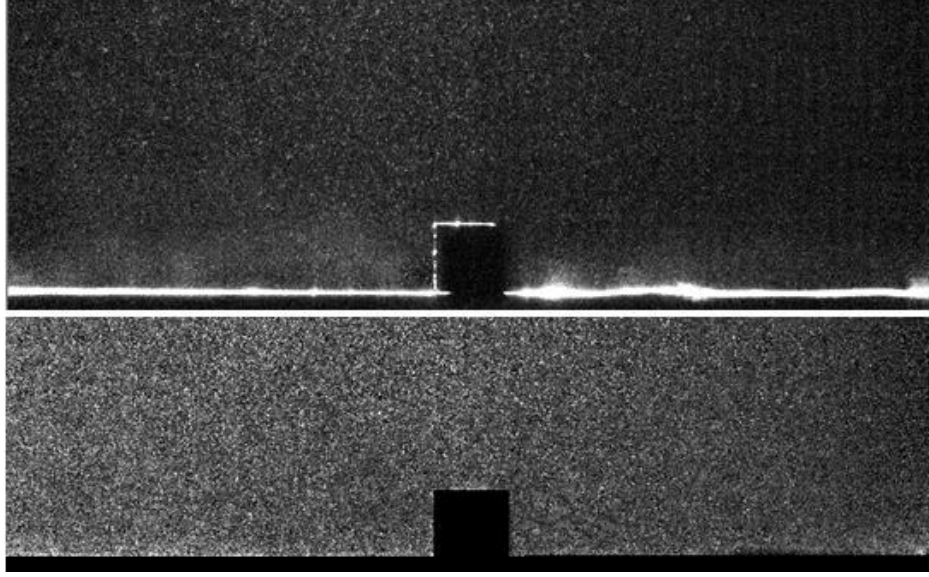
Şekil 3.4. Test düzeneğinde meydana gelen yansımalar

Yine Şekil 3.5'te türbülator derinlik etkisi de abartılı bir örnekle gösterilmiştir. Türbülator derinliğinin elle ve gözle ayarlanması da türbülatorün hemen yanında ölçümleri olumsuz etkilemektedir.



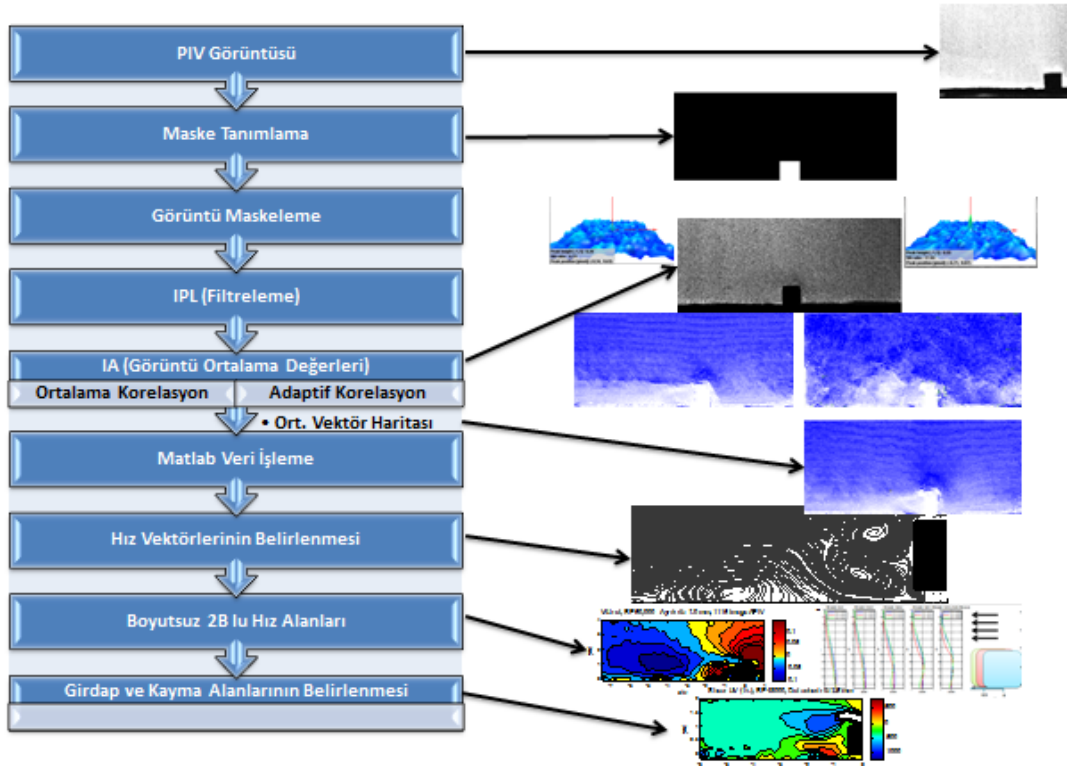
Şekil 3.5. Türbülatorün kanal içerisinde düzgün yerleştirilememesi

Odak ayarı ve lazer hüzmelerinin odak düzlemine düşmesi ayarlandıktan sonra uygun tohumlayıcı debisinin bulunması için denemeler yapılmıştır. Şekil 3.6'da üstte, partiküllerin iyi yakalanamaması dolayısıyla tohumlayıcı debisinin yetersizliği, kamera odağının kayması ve yansıma problemleri dikkati çekmektedir. Yine Şekil 3.6'da, altta, daha iyi odaklama, tohumlayıcı debisinin arttırılmasıyla daha net partiküllerin varlığı aşıkardır.



Şekil 3.6. (Üstte) Net olmayan PIV görüntüsü. (Altta) Net PIV görüntüsü

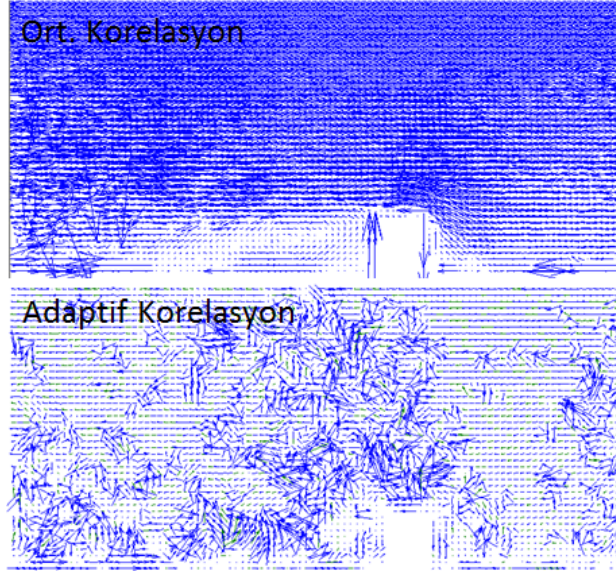
Ham veriden, işlenmiş veriye geçme aşamaları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. PIV görüntüsü elde edildikten sonra, hesaplama zamanını kısaltmak ve problemlı alanları ayıklamak için akışta inceleme yapılmayacak bölgelere maske tanımlanır. Daha sonra görüntü maskelenir ve maskeleme işlemiyle sınırları tanımlanmış görüntü de filtreleme işlemleri yapılarak görüntü ortalamaları alınır. Bu aşamadan sonra, sinyal-gürültü oranının iyi olup olmamasına göre, ortalama korelasyon ya da adaptif PIV basamaklarıyla ilgili akış alanında hız vektörleri elde edilir. Yalnız ortalama korelasyon sonucu, 124 görüntünün ortalaması alındığından tek bir vektör haritası elde edilirken, adaptif PIV sonucu 124 vektör haritası elde edilir ve bu vektör haritalarının da ortalamaları alınarak bir adet ortalama vektör haritasına ulaşılır. Bu vektör haritasının numerik değerleri MATLAB’da işlenerek görelı hız vektörleri, girdap ve kayma konturları elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Veri işleme akış şeması

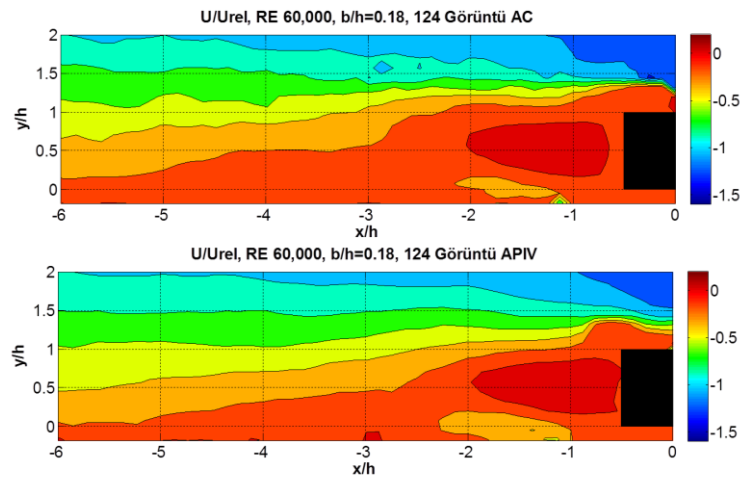
Sinyal-gürültü oranı, birinci lazer hüzmesinde görüntülenen parçacıkların ikinci lazer hüzmesinde, nasıl bir hassasiyet ve belirsizlikle, saptandığının ölçüsüdür. Deney sırasında, elde edilen görüntülerin sinyal-gürültü oranları bölgesel olarak elde edilir, eğer bu oranlar belli bir seviyede değilse ilgili faktörler yeniden düzenlenerek deneyler tekrarlanır. Bu faktörlerin başında odaklama, birinci ve ikinci lazer hüzmelerinin çakışmaması durumu gelir. Lazer hüzmelerinin üst üste gelmemesi durumu zahmetli uğraşlar gerektirir ve düzeltilmesi haftalar sürebilir. Bir diğer faktör de tohumlayıcı debisidir. Eğer alt pencereye düşen partikül sayısı az ise sinyal-gürültü oranı yine düşük olacaktır. Tohumlayıcı debisi değiştirilerek, alt pencereye düşen partikül sayısı optimize edilebilir.

Sinyal-gürültü oranı iyi olmayan görüntülerde ortalama korelasyon yöntemiyle hız vektörleri elde edilmiştir. 0.50 üzerindeki sinyal-gürültü oranlarında adaptif korelasyonlarla iyi sonuçlar elde edilirken, 0.30 mertebelerinin altındaki değerlerde adaptif korelasyon güvenilir sonuçlar vermemektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Sinyal görüntü oranı düşük olan hız vektör haritası

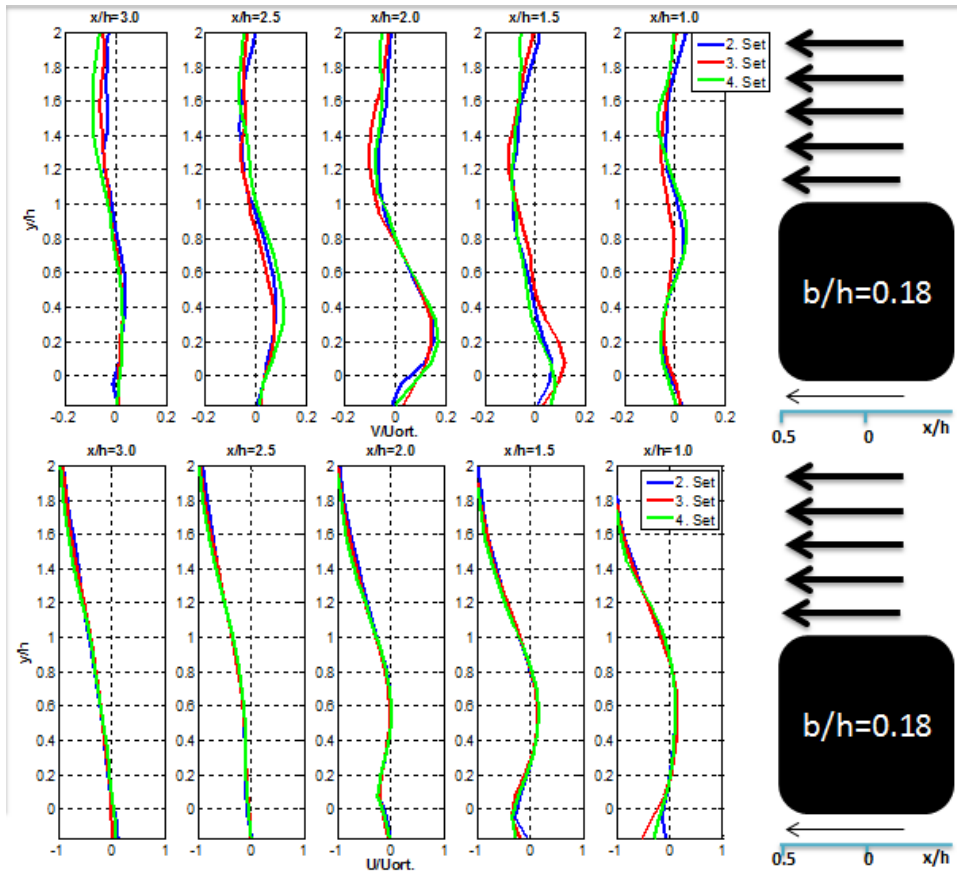
Sinyal-gürültü oranı kötü olsa bile, ortalama korelasyon sonucunda akış şablonu hakkında fikir sahibi olunabilirken, sinyal-gürültü oranı kötü olan bir görüntüye adaptif korelasyon uygulandığında akış şablonu hakkında fikir sahibi olunamamaktadır (Şekil 3.8). Bu yüzden, sinyal-gürültü oranları iyi olan görüntüler üzerinde adaptif korelasyon işlemi uygulanarak, ilgilenilen akış bölgesinde daha güvenilir detaylara ulaşılmıştır. Şekil 3.9’da ortalama korelasyon ve adaptif PIV uygulanarak elde edilmiş normalize aksel hız konturları gösterilmiştir. Bu konturlar, sinyal-gürültü oranı iyi olan bir örnekten alındığı için, her iki yöntem de akış hakkında fikir vermektedir.



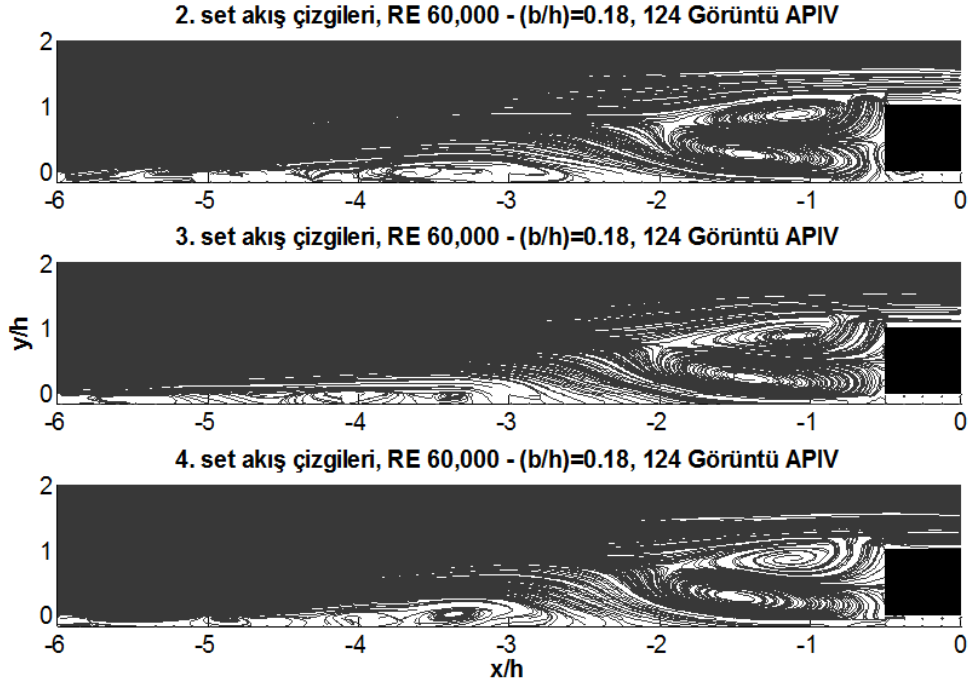
Şekil 3.9. (Üstte) Ortalama korelasyon uygulanmış (Altta) Adaptif PIV uygulanmış hız alanları

Şekil 3.10’da, tohumlayıcı debisi değiştirilerek yapılan testlerin karşılaştırılması verilmiştir. Sonraki testlere, sinyal-gürültü oran dağılımı en iyi olan 4. set test grubundaki tohumlayıcı debisiyle devam edilmiştir. Burada, türbülator boyutlarına göre boyutsuzlaştırılmış eksenlerde, eksenel ve radyal hız bileşenleri incelenmiştir. Boyutsuz eksenel hızlarda türbülator den uzaklaştıkça kayda değer bir değişim görülmezken, eksenel ortalama hıza göre boyutsuzlaştırılmış radyal hız bileşenlerinde $x/h=1.0$ ve $x/h=1.5$ ’te, türbülatorün alt ve üst bölgelerinde farklılıklar görülmektedir. Radyal hız bileşenlerinin büyüklükleri çok küçük olduğundan, tohumlayıcı debisinin radyal hız dağılımını etkilediği sonucuna varılmamalıdır.

Şekil 3.11’de akış çizgileri incelendiğinde, bütün deney setlerinde, $x/h=0.5$ ’ te konumlu türbülator duvarı ile $x/h=2.0$ ’a kadar birbirleriyle ters yönde dönen iki girdap oluşumu gözlenmektedir. 4. set testlerde, olağan dışı olarak, $x/h=3$ ile $x/h=4$ arasında daha belirgin bir girdap oluşumu gözlenmektedir. Buradan, 4. set testlerin sinyal-gürültü oranı iyi olduğu için yukarıda bahsedilen bölgedeki küçük girdap oluşumunu yakaladığı sonucuna varılabilir.



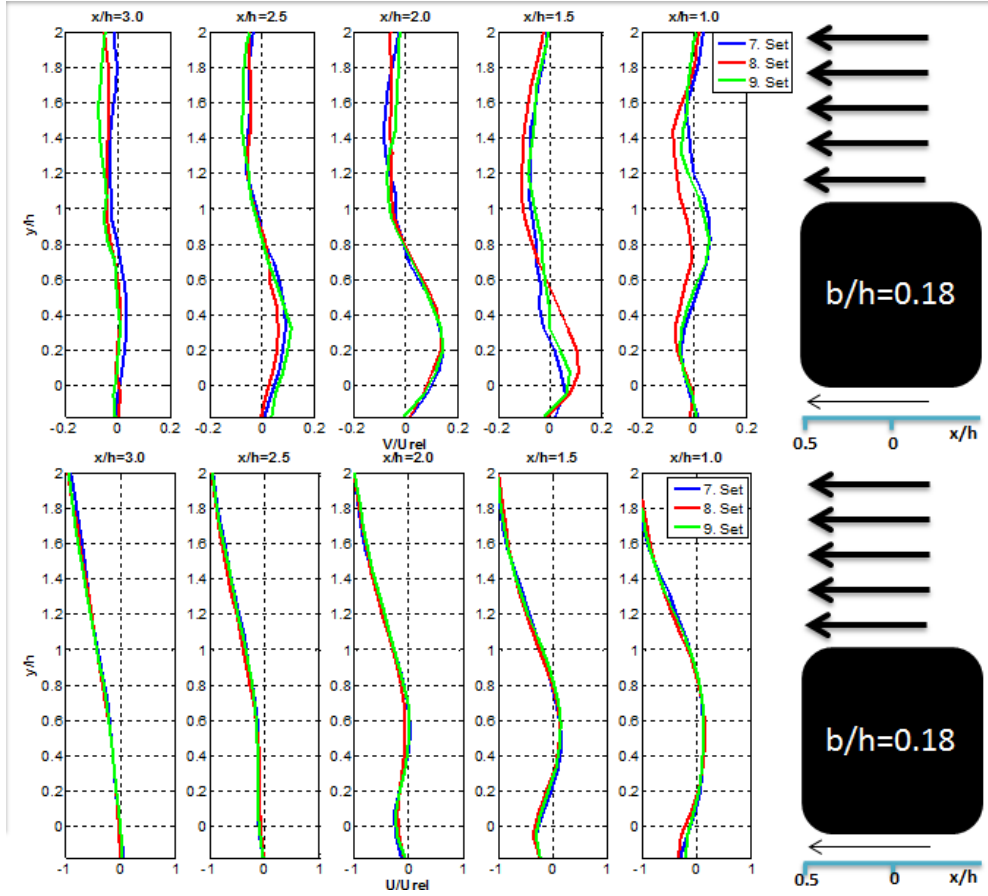
Şekil 3.10. Tohumlayıcı debi ayarlama test sonuçları



Şekil 3.11. Farklı tohumlayıcı debilerinde akış çizgileri

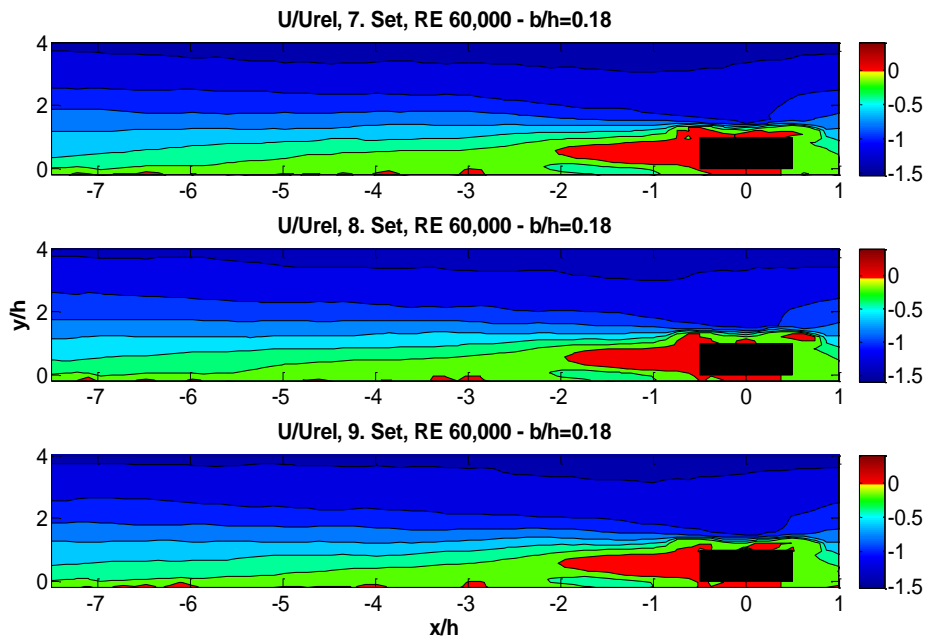
Tohumlayıcı debisi ayarlandıktan sonra, testlerin tekrarlanabilirliği araştırılmıştır. Uygun tohumlayıcı debisinde, $b/h=0.18$ için ölçümler tekrarlanmıştır. Tüm şartlar aynı iken 9 adet ölçüm alınmış ve en stabil olanlarının karşılaştırılması açısından, son 3 set ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Boyutsuz aksenal hızlarda türbülâtörden uzaklaştıkça kayda değer bir değişim görülmezken, aksenal ortalama hıza göre boyutsuzlaştırılmış radyal hız bileşenlerinde, $x/h=1.0$ ve $x/h=1.5$ 'te, türbülâtörün alt ve üst bölgelerinde farklılıklar görülmektedir. Sonuç olarak, tekrarlanabilirlik ölçümlerinde boyutsuz radyal hız bileşenlerinde farklılıklar görülürken, boyutsuz aksenal hız bileşenlerinin örtüşmesi durumu ortaya çıkmıştır (Şekil 3.12). Boyutsuz radyal hız bileşenlerinde, aynı şartlarda yapılan deneylerdeki dalgalanmanın sebebi araştırıldığında, aslında radyal hızların çok düşük mertebelerinde olduğu (0.1 m/s mertebelerinde) görülmüştür. Bu sebepten, aynı şartlarda yapılan farklı deney tekrarlarında, radyal hız bileşenlerinin dalgalanmasının normal olduğu sonucuna varılmıştır.

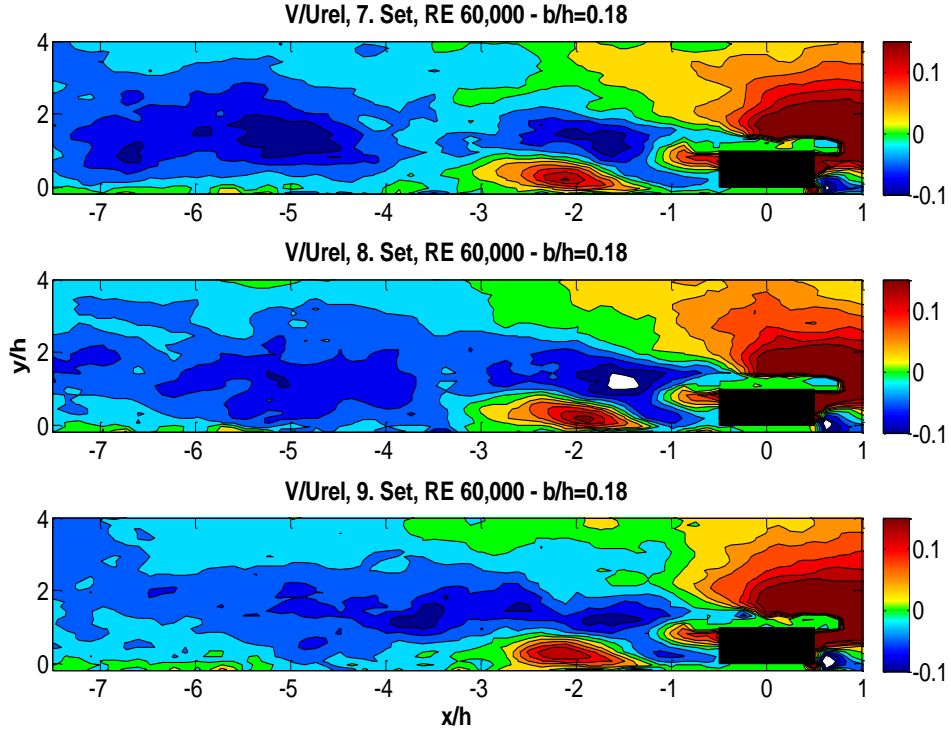


Şekil 3.12. Tekrarlanabilirlik deneyleri hız eğrileri

Şekil 3.13'te ve Şekil 3.14'te aksel ve radyal hız dağılımlarına bakıldığında benzer akış şablonları görülmektedir.

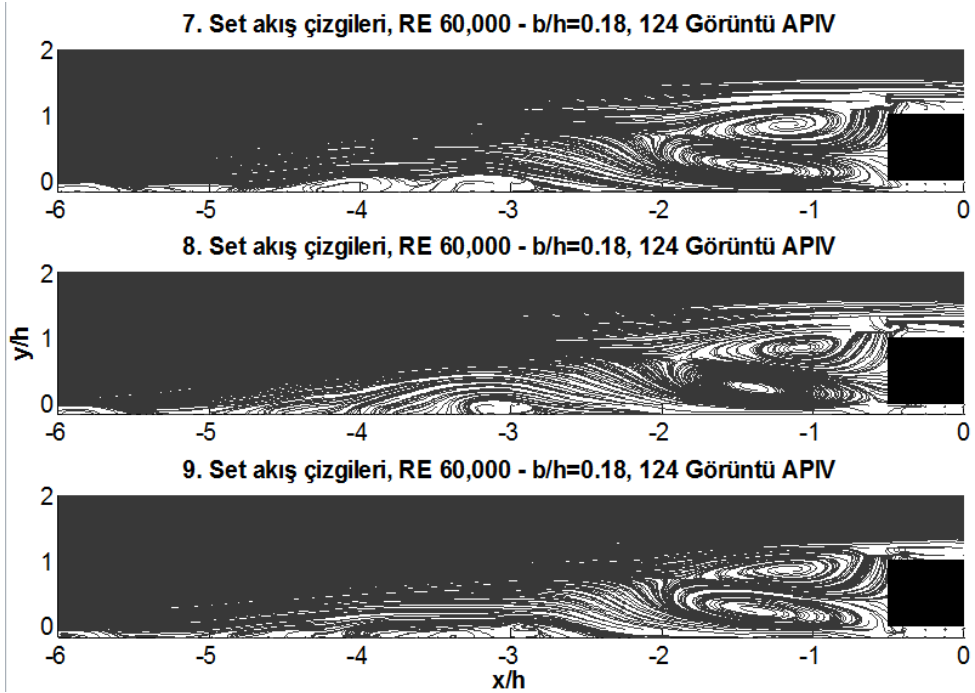


Şekil 3.13. Tekrarlanabilirlik ölçümleri boyutsuz aksel hız dağılımları



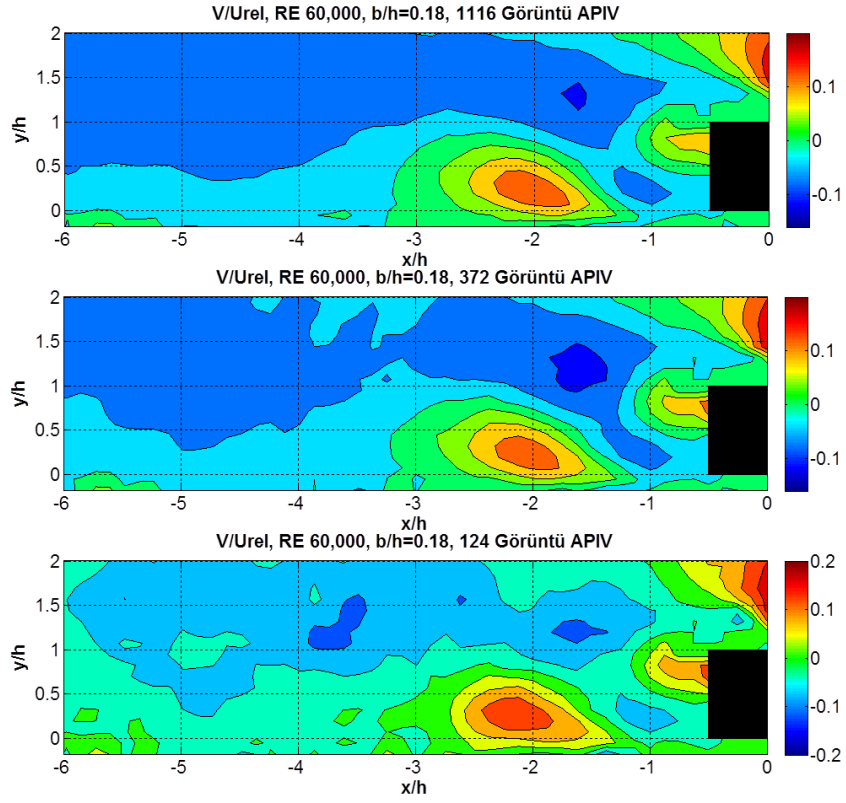
Şekil 3.14. Tekrarlanabilirlik ölçümleri boyutsuz radyal hız dağılımları

Şekil 3.15'te akış çizgileri incelendiğinde, 8. set ölçümlerde, merkezi $x/h=1.5$ civarında olan birbirlerine ters yönde dönen iki girdaptan alttakinin daha yoğun olduğu ve $x/h=3$ civarında, diğer ölçümlerle kıyaslandığında, daha büyük bir ayrılma bölgesi oluşturduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.15. Tekrarlanabilirlik deneyleri akış çizgileri

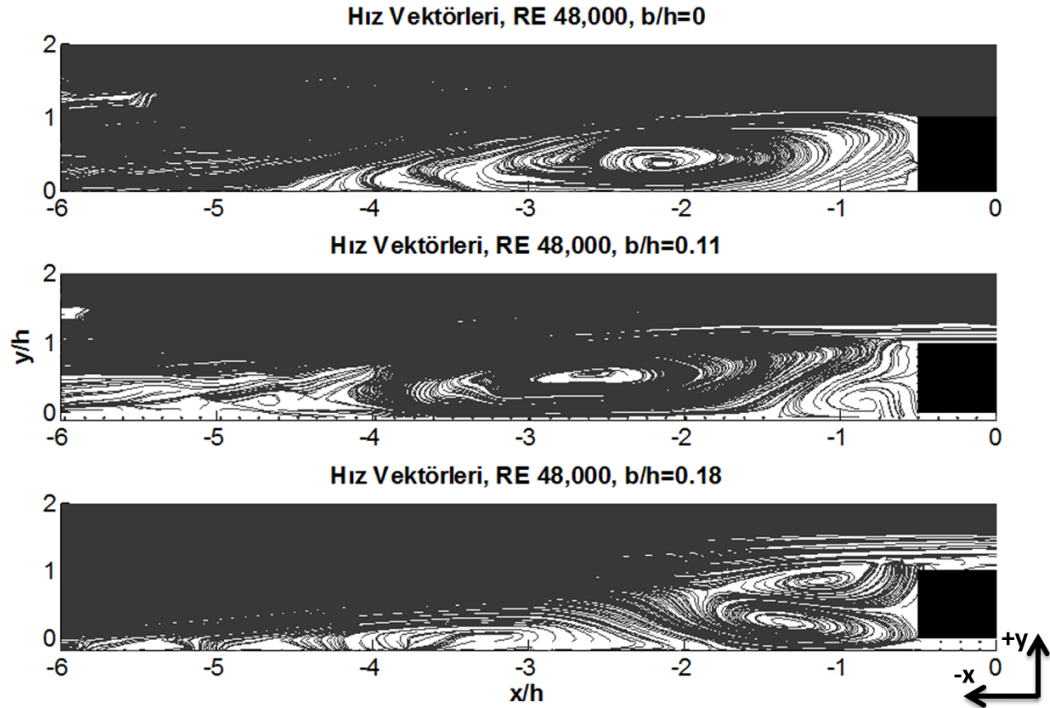
Uygun tohumlayıcı debisi ayarlama işlemini takiben yapılan tekrarlanabilirlik testlerinden sonra görüntü sayısının etkisi incelenmiştir. Şekil 3.16'da, görüntü sayısının artmasıyla akışın daha fazla temsil edildiği anlaşılmakla birlikte, görüntü sayısı görece olarak az olsa bile, akış hakkında fikir sahibi olunabileceği de görülmektedir.



Şekil 3.16. Adaptif PIV görüntü sayısı karşılaştırması

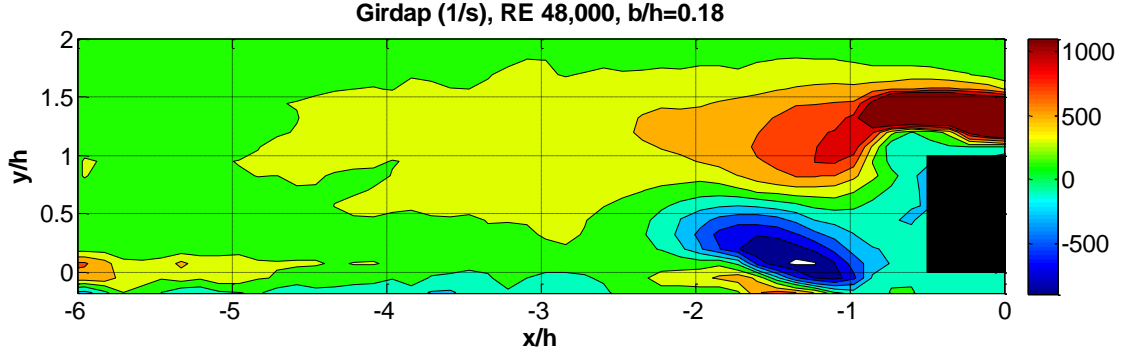
4. BULGULAR

Türbülötör arkası akış alanı, ilk olarak, $b/h=0$ (entegre türbülötör), $b/h=0.11$ ve $b/h=0.18$ boşluk oranları için $RE\ 48k$ 'de incelenmiştir (Şekil 4.1). Entegre türbülötör arkası akışın gelişimi incelendiğinde, $x/h=-4.5$ 'te akışın yeniden tutunduğu görülmekle birlikte, merkezi $x/h=-2$ civarında olan bir resirkülasyon bölgesi görülmektedir. $b/h=0.11$ oranında, resirkülasyon bölgesi merkezi türbülötörden uzaklaşmaktadır ve $x/h=-1$ civarında yeni bir resirkülasyon bölgesi (girdap bölgesi) oluştuğu gözlemlenmektedir. $b/h=0.18$ oranında ise, türbülötör altından gelen akış hızının türbülötör üstünden geçen ana akış hızına yaklaşmasıyla, hemen türbülötör arkasında, birbirlerine ters yönde dönen iki girdap hücresi görülmektedir. Ana resirkülasyon bölgesinin ise radyal doğrultuda küçülerek ($y/h=0.5$), $x/h=-2$ ile $x/h=-6$ arasına sıkıştığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.2'de, türbülötör arkası birbirlerine ters yönde dönen girdap hücrelerinin büyüklükleri görülmektedir.



Şekil 4.1. $RE=48,000$ 'de $b/h=0$, $b/h=0.11$, $b/h=0.18$ oranları için akış çizgileri

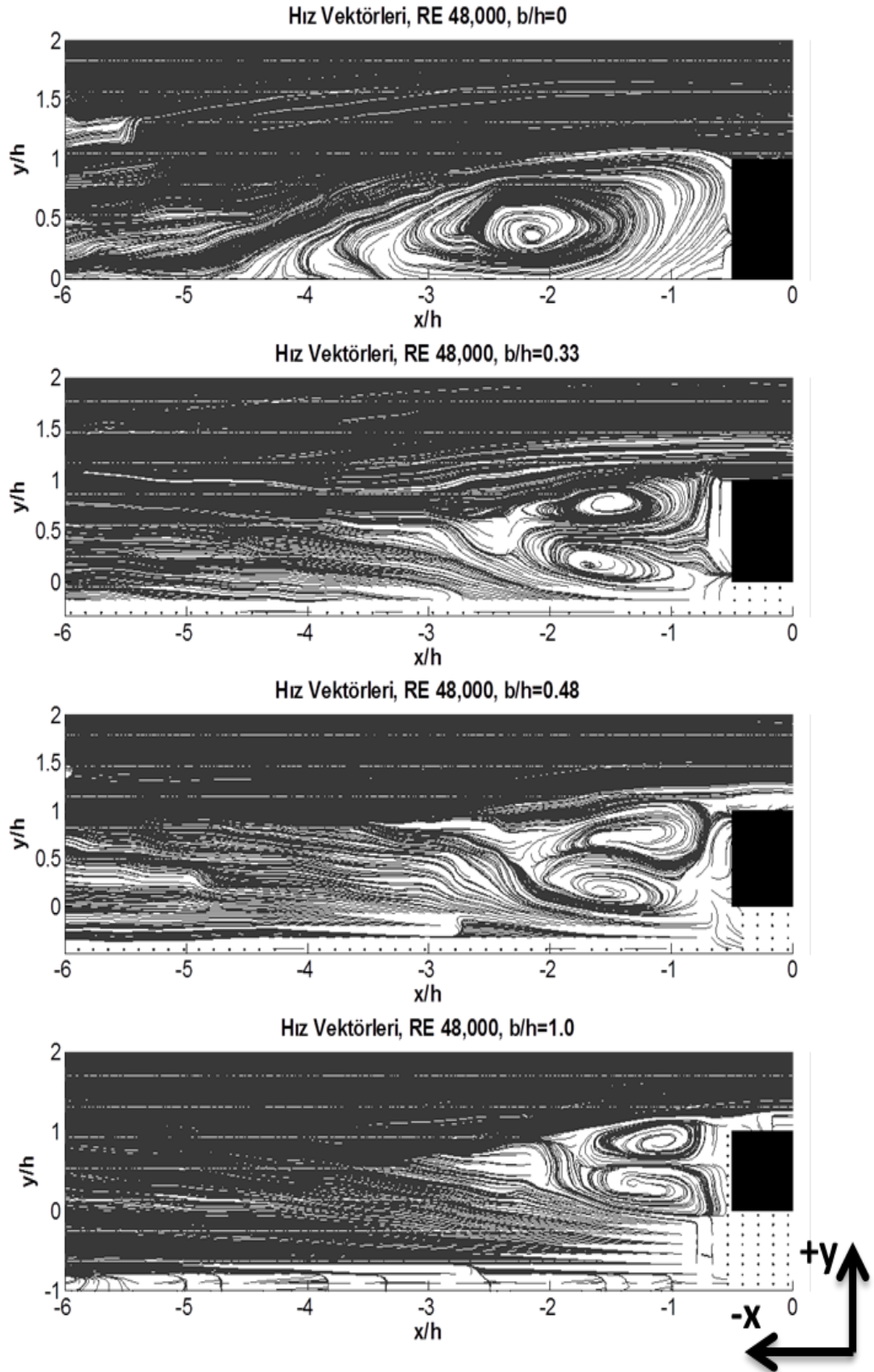
Burada, iki hücrenin girdap büyüklüklerinin aynı mertebelerde olduğu görülmekte birlikte, alttaki girdabın daha büyük değerde olduğu ve daha ileride etkinliğini kaybetmek üzere olan girdap bölgesiyle aynı yönde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. RE=48,000'de b/h=0.18 için girdap büyüklükleri

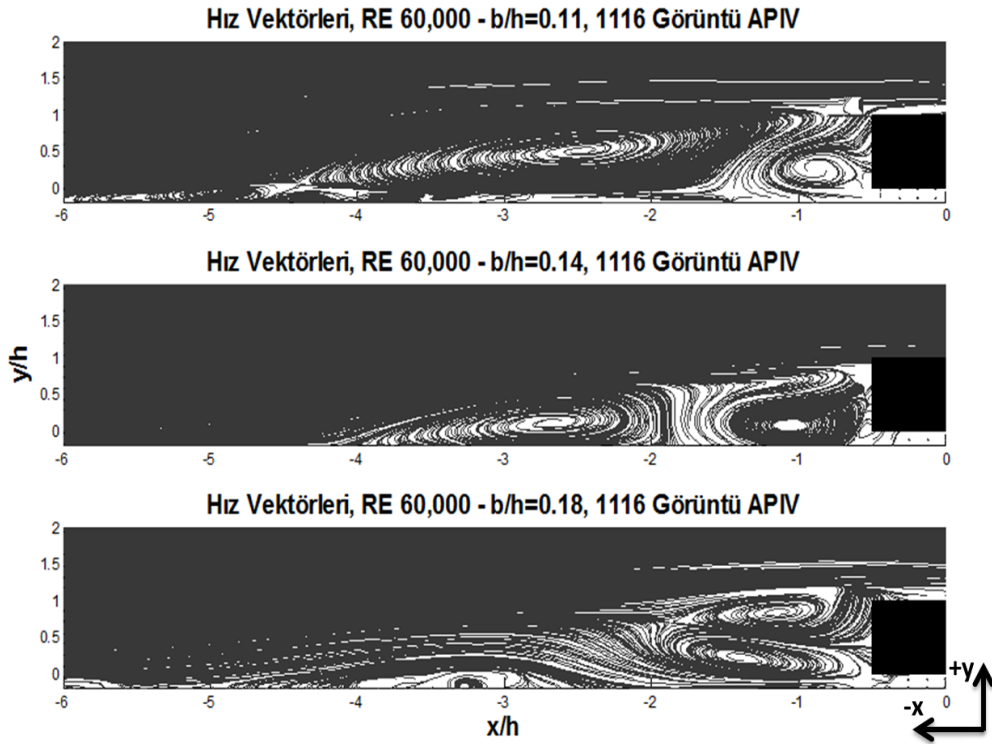
Şekil 4.3'te, entegre türbülötör ve b/h=0.33, b/h=0.48, b/h=1.0 oranları için türbülötör arkası akış gelişimi RE 48k koşullarında incelenmiştir. b/h=0.33 ve sonraki boşluk oranlarında birbirlerine ters yönde dönen girdap hücrelerinin olduğu akış yapısı gözlenmekle birlikte, boşluk oranı arttıkça bu çift hücreli yapının türbülötöre yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca, entegre türbülötör koşullarında oluşan tek yönlü resirkülasyon bölgesi b/h=0.33 ve sonraki boşluk oranlarında görülmemektedir.

Bir sonraki konfigürasyon olarak, ayrıık türbülötör arkası akış gelişimi b/h=0.11, b/h=0.14 ve b/h=0.18 boşluk oranlarında, RE 60k'de incelenmiştir. Şekil 4.4'te, türbülötör arkası akış gelişimi incelendiğinde, b/h=0.11 ve b/h=0.14 oranlarında, türbülötör arkasında küçük bir girdap bölgesini takiben daha büyük resirkülasyon bölgelerinin olduğu (ana girdap bölgesi), benzer bir akış şablonu görülmektedir. b/h=0.11 oranında akış x/h=-6'da tekrar yüzeye tutunmaktadır ve ana girdap bölgesinin merkezi x/h=-2.5 civarındadır. b/h=0.14 oranında, yeniden tutunma noktası x/h=-4 değerindedir. Ayrıca, küçülmeye başlayan ana girdap bölgesinin, türbülötör arkası girdap merkeziyle birlikte türbülötörden uzaklaştığı görülmektedir. b/h=0.18 oranında, yeniden tutunma noktası, b/h=0.14 oranında olduğu gibi x/h=-4 civarında görülmekle birlikte, b/h=0.11 ve b/h=0.14 oranlarına göre tamamen farklı bir akış şablonu gözlemlenmiştir. b/h=0.18 oranında merkezi x/h=-3'ün ötesinde küçük bir resirkülasyon bölgesi oluşmakla birlikte, türbülötör arkasında birbirlerine ters yönde dönen iki girdap hücresi görülmektedir.



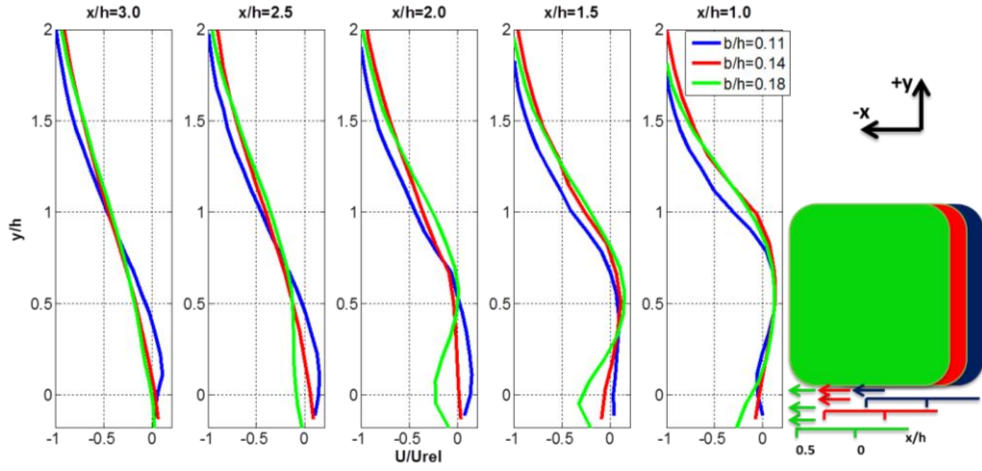
Şekil 4.3. RE 48k'de $b/h=0$, $b/h=0.33$, $b/h=0.48$, $b/h=1.0$ oranları için akış çizgileri

Bir başka deyişle, $b/h=0.11$ oranında oluşan ana sirkülasyon bölgesi, boşluk oranı arttıkça, türbülátörden uzaklaşarak küçülmüştür.



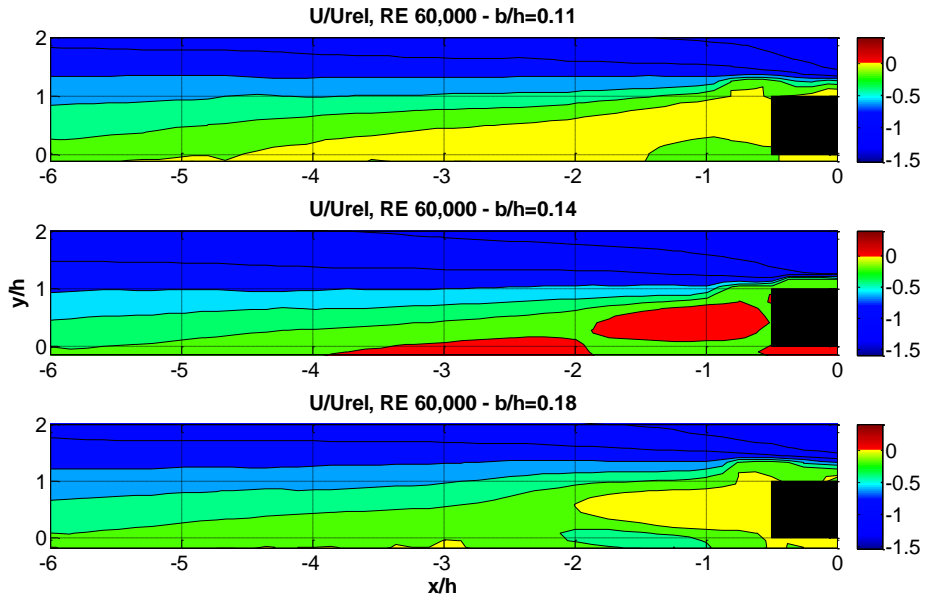
Şekil 4.4. RE 60k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ oranları için akış çizgileri

Şekil 4.5'te, boyutsuz aksenal hız dağılımları incelendiğinde, tüm boşluk oranları için $y/h=1.0$ 'dan sonra aksenal hızların benzer bir eğilimde oldukları görülmektedir. Yine tüm boşluk oranları için, aksenal hız eğrileri, $y/h=0.5$ 'te $x/h=-2.0$ 'den önce akış yönüne ters yöndedirler. Türbülátör yüksekliği boyunca, $b/h=0.18$ oranı için, $x/h=-2.5$ 'dan sonra aksenal hız eğrileri rutin bir hal almaktadır. Yine Türbülátör yüksekliği boyunca, $b/h=0.11$ ve $b/h=0.14$ oranları için, aksenal hız eğrilerinin rutin bir hal aldığı aksenal mesafe $x/h=-2.0$ değeridir.



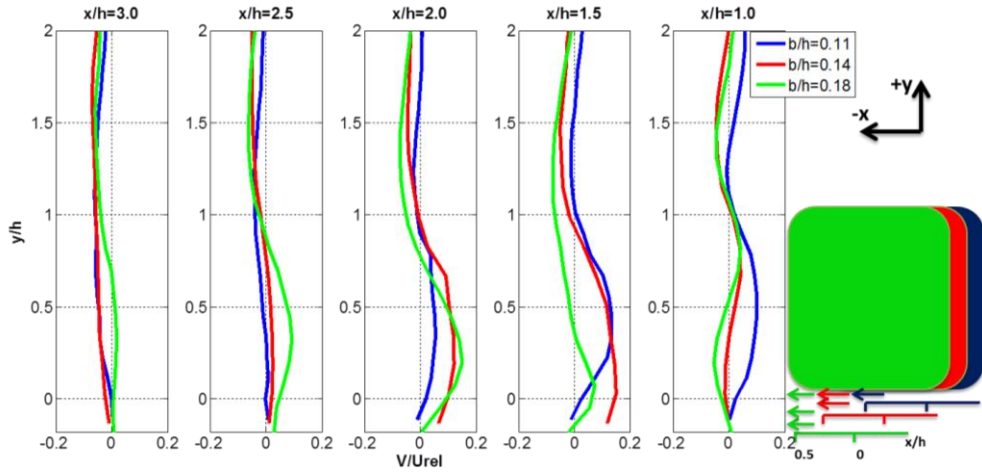
Şekil 4.5. RE 60k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ oranları için boyutsuz aksenal hız eğrileri

Şekil 4.6'da aksenal hız dağılımları incelendiğinde, $b/h=0.11$ boşluk oranında, $x/h=-5$ 'e kadar durağan bir bölge görülmektedir. $b/h=0.14$ boşluk oranında, $b/h=0.11$ boşluk oranında görülen durağan bölgenin $x/h=-2$ civarında kesintiye uğradığı ve akışın aksenal olarak ters yönde ilerlediği bir bölge görülmektedir. $b/h=0.18$ boşluk oranında, $b/h=0.14$ şartlarında $x/h=-2$ ile $x/h=-4$ arasında ana akış yönünün tersi yönde görülen akış (+x), akış yönünde (-x) görülmektedir. Ayrıca, türbülator yüksekliği boyunca ve aksenal olarak $x/h=-2$ civarına kadar olan durağan bir bölgenin varlığı görülmektedir.

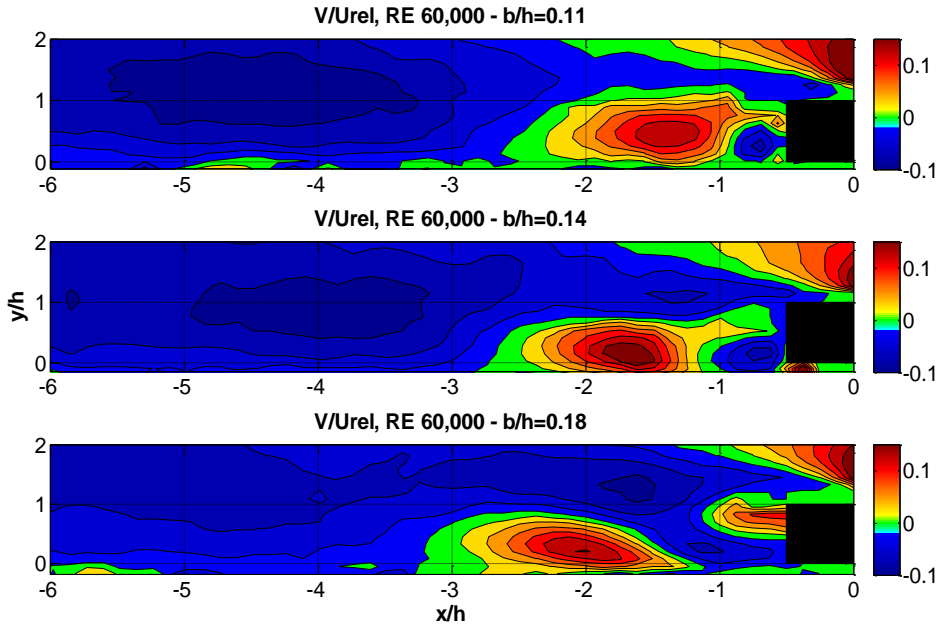


Şekil 4.6. RE 60k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ oranlarında boyutsuz hız dağılımları

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 incelendiğinde, radyal hız dağılımları görülmektedir. Boşluk oranı arttıkça, akışın radyal hız dağılımının türbülátörden uzağa gittiği ve akış şablon değiştirdiğinde ($b/h=0.18$), türbülátörün üst yüzeyine yakın bir yükselme (+y) görülmektedir.

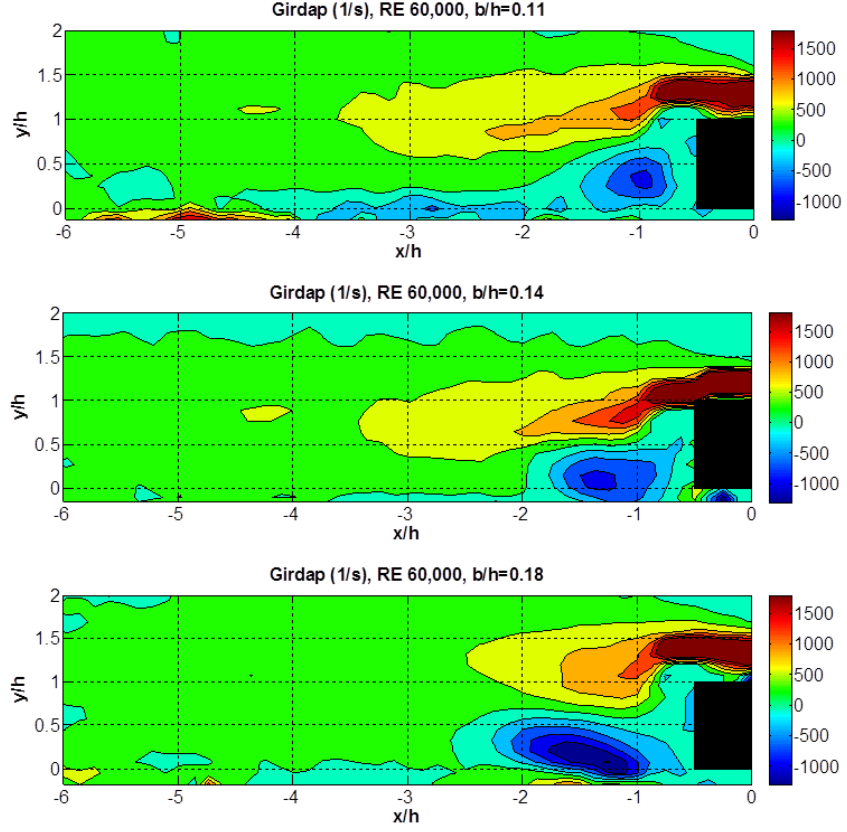


Şekil 4.7. RE 60k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ oranları için boyutsuz radyal hız eğrileri



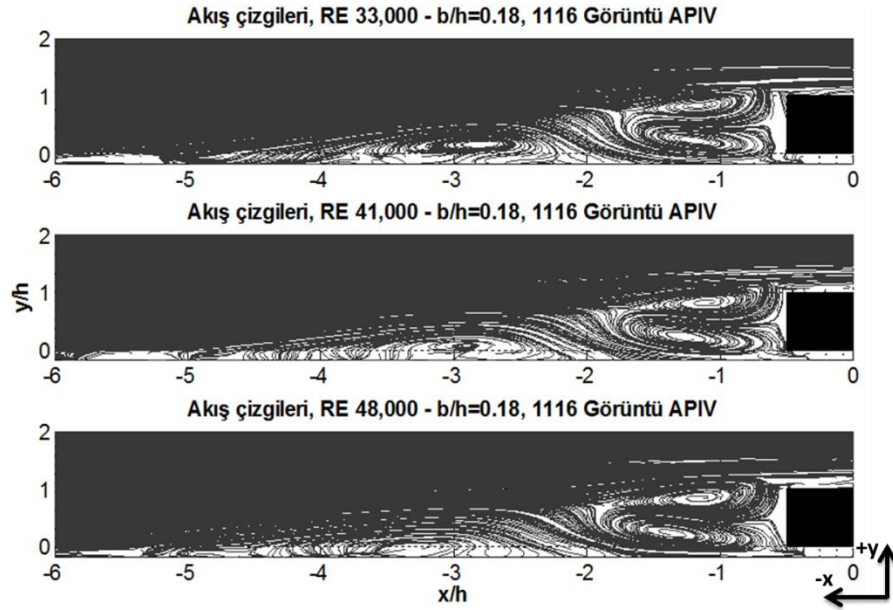
Şekil 4.8. RE 60k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ oranlarında boyutsuz radyal hız dağılımları

Şekil 4.9'da, boşluk oranı arttıkça, türbülátör yanındaki alt girdap hücrenin şiddetinin arttığı görülmektedir. Yine boşluk oranının artmasıyla, üst girdap hücrenin aksenal olarak, yaklaşık bir türbülátör boyu ($x/h=1$), türbülátöre doğru, şiddetini çok fazla değiştirmeden kaydığı görülmektedir.



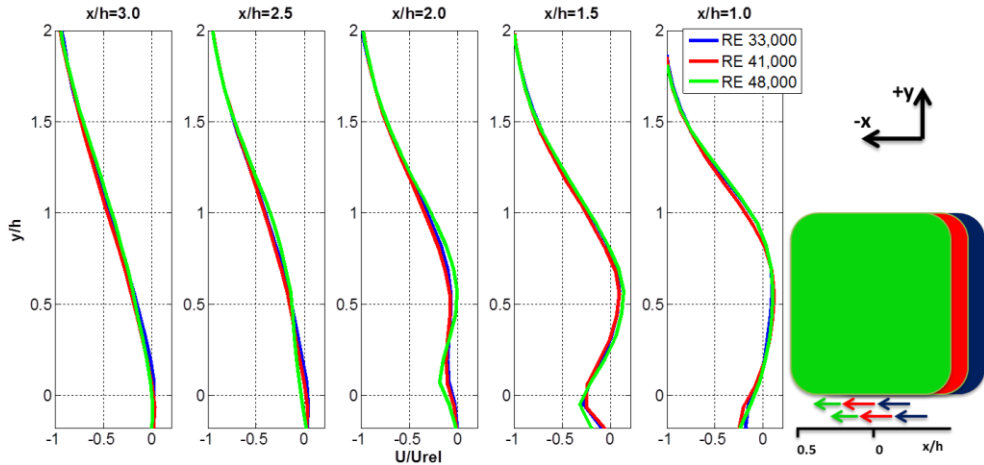
Şekil 4.9. RE 48k'de $b/h=0.11$, $b/h=0.14$, $b/h=0.18$ için girdap büyüklükleri

Farklı boşluk oranlarında, RE sayısı sabit tutularak yapılan incelemelerden sonra, RE sayısının türbülötör arkası akış şablonuna olan etkilerini araştırmak amacıyla, sabit boşluk oranlarında farklı RE sayılarının akış alanına olan etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.10'daki akış şablonu incelendiğinde, RE sayısı arttıkça, türbülötör uzağında kalan girdap bölgesinin basıklaşarak türbülötörden uzaklaştığı, türbülötör yanındaki ters yönlü girdapların üstte olanlarının merkezlerinin aksenal doğrultuda değişmediği, altta olanlarının merkezlerinin ise türbülötörden uzaklaştığı görülmektedir. Her üç RE sayısı şartlarında da akış $x/h=-6$ 'da yeniden yüzeye tutunmaktadır. Başka bir deyişle, her üç durumda da türbülötör arkası akış şablonları benzerdir.

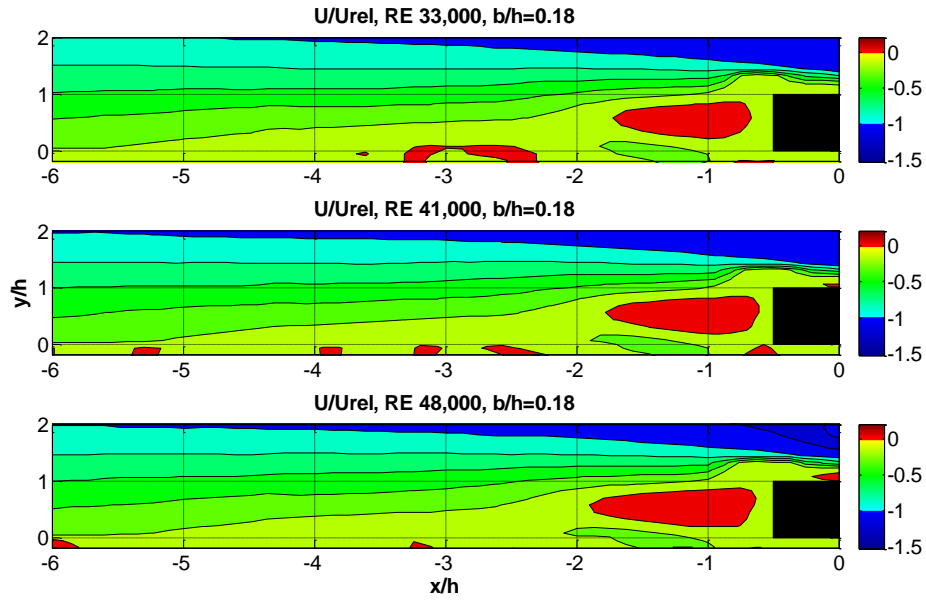


Şekil 4.10. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için akış çizgileri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de, $b/h=0.18$ ayrıklı türbülötör konfigurasyonunda boyutsuz aksnel hız eğrileri ve boyutsuz aksnel hız dağılımları gösterilmiştir. Burada, boyutsuz aksnel hız eğrilerinin RE sayısı artmasına bağılı olarak değışmediğı gözlenmektedir. $y/h=0.5$ radyal pozisyonunda boyutsuz hız eğrilerine bakıldığında, $x/h=-2.0$ ’dan önce akış ters yönde (+x) ilerlemektedir. $x/h=1.5$ mesafesinde, akış, zeminden türbülötörün alt yüzeyine kadar akış yönünde hızlanmakta, sonra yukarı doğru çıkıldıkça iki kere yön değıştirmektedir.

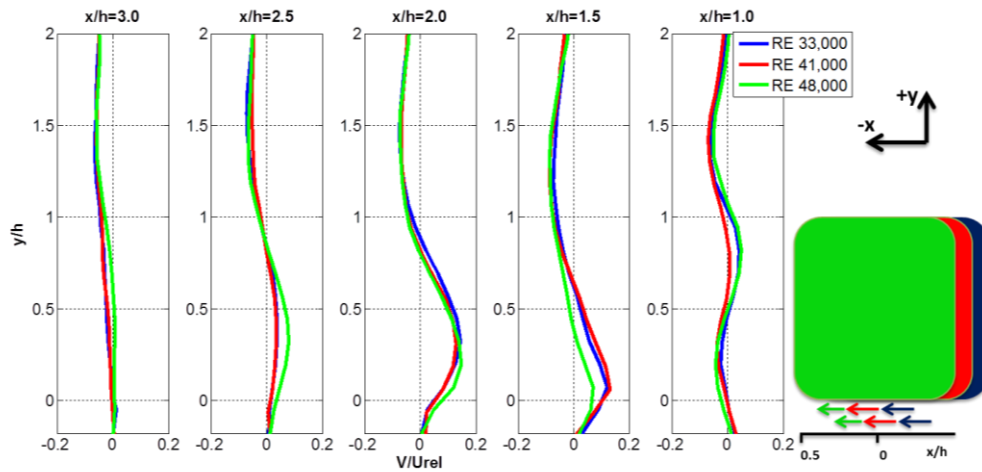


Şekil 4.11. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için boyutsuz aksnel hız eğrileri

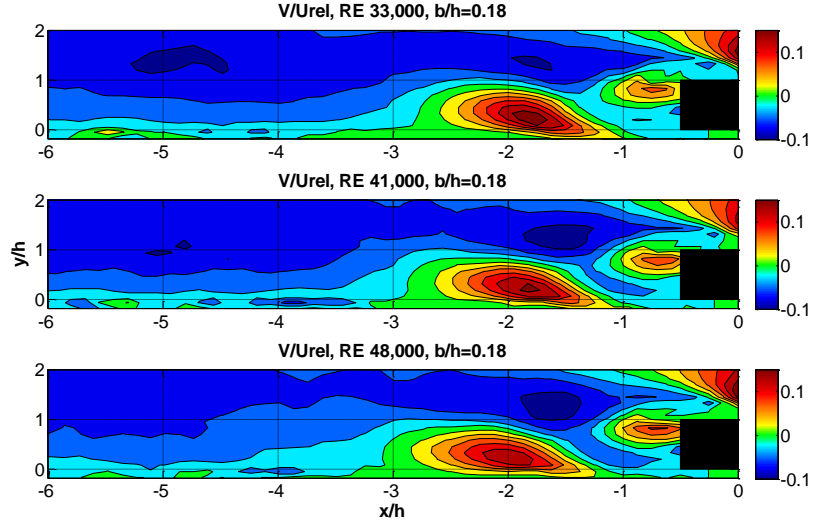


Şekil 4.12. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için eksenel hız dağılımları

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde, $b/h=0.18$ sabit boşluk oranında RE sayısı arttıkça, türbülötör arkası üst yüzeye yakın bölgede ($x/h=-0.7$, $y/h=0.9$), akışın $+y$ yönünde hızlandığı, türbülötör arkası alt yüzeye yakın bölgede ise ($x/h=-0.7$, $y/h=0.3$), $-y$ yönünde hızlandığı görülmektedir. RE 33k ve RE41k'de $x/h=-1$ ile $x/h=-3$ mesafeleri arasında, yaklaşık bir türbülötör boyu kadar mesafede akışın aynı bölgede yükseldiği görülmektedir. Yani, RE 33k'den RE 41k'e geldiğinde bu bölgede büyük bir değişiklik olmamaktadır. Hız daha da arttırıldığında (RE 48k), akışın yükseldiği bölge, türbülötörden $\Delta(x/h)=0.2$ civarında uzaklaşmaktadır.

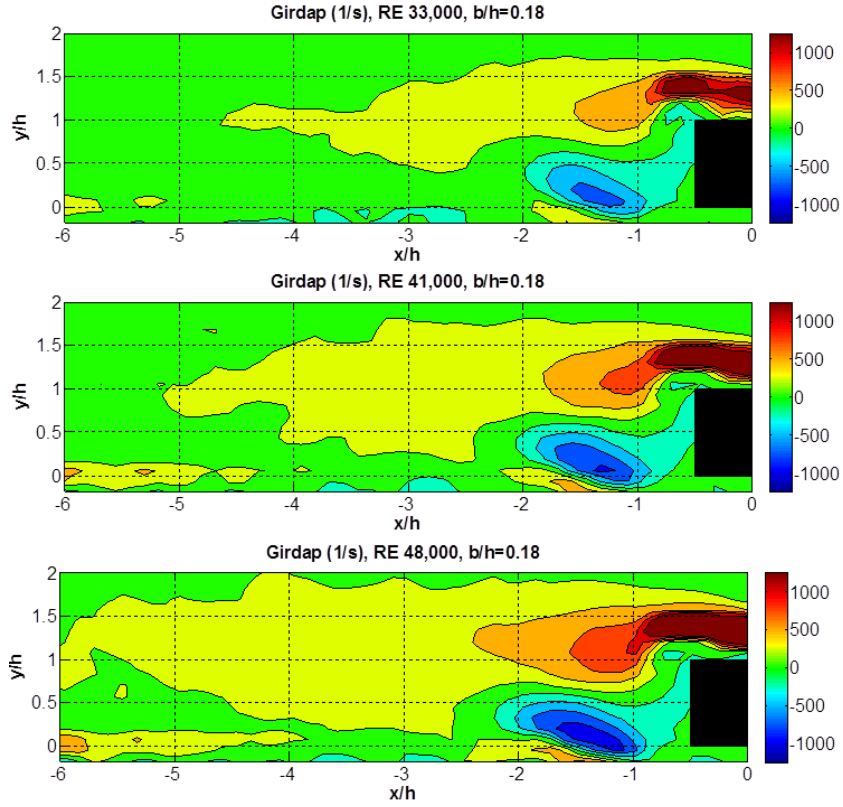


Şekil 4.13. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için boyutsuz radyal hız eğrileri



Şekil 4.14. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için radyal hız dağılımları

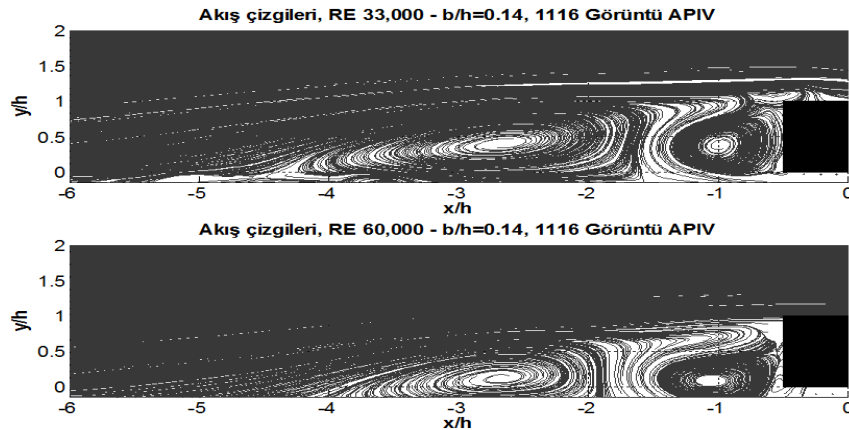
Şekil 4.15 incelendiğinde, RE sayısının artmasıyla, türbülötör arkası birbirlerine ters yönde dönen girdap hücrelerinin şiddetlendiği ve türbülötörden uzakta oluşan girdap bölgesinin ($x/h=-3$ civarı) alçalarak yüzeye yaklaştığı görülmektedir.



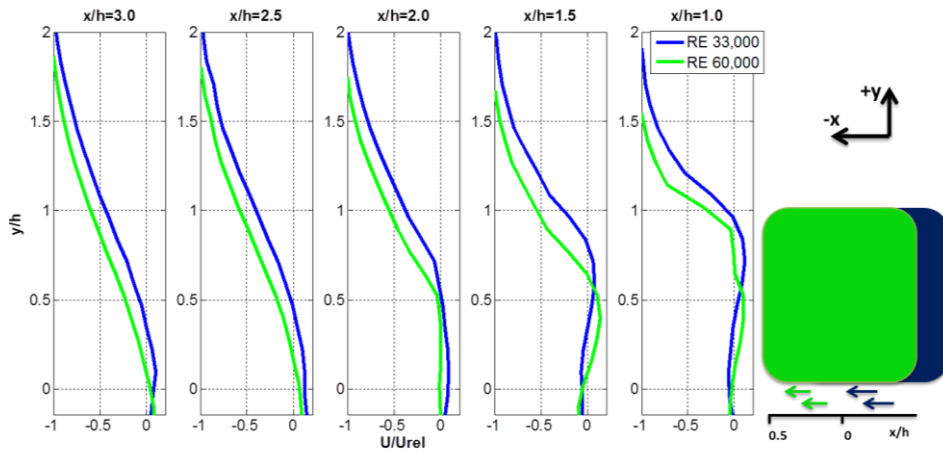
Şekil 4.15. $b/h=0.18$ boşluk oranında, RE 33k, RE 41k, RE 48k için girdap alanları

Türbülötör arkası akış alanı $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k değerlerinde incelenmiştir (Şekil 4.16). Akış çizgileri incelendiğinde, RE 33k’de, $x/h=-1$ merkezli ve $x/h=-3$ civarında iki adet girdap yumağı görülmektedir. RE sayısı arttıkça, ana akışın kinetik enerjisi artmakta ve ana akış, her iki girdap yumağını baskılayarak küçültmektedir ve akışın yeniden tutunma noktası geriye kaymaktadır. Ayrıca, RE sayısının artmasıyla, iki girdap yumağı arasındaki geçiş bölgesinden, türbülötörden uzakta olan girdap ile aynı yönde, türbülötöre yakın küçük girdap hücresi üzerinde yeni bir girdap hücresi oluştuğu gözlemlenmektedir.

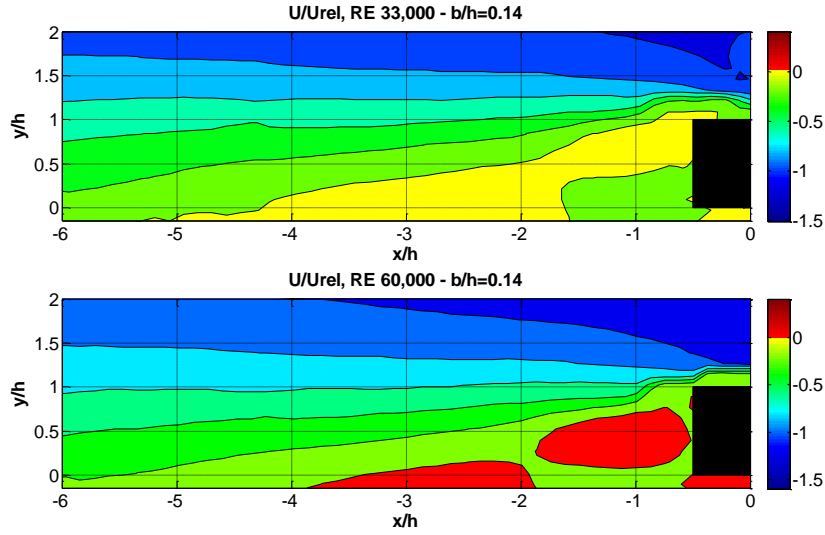
Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’deki boyutsuz aksel hız eğrileri ve dağılımları incelendiğinde, $x/h=-5$ ’e kadar durağan olan bölgede, hız arttıkça, akışın aksel olarak yön değiştirdiği anlaşılmaktadır ($x/h=-4$ ’e kadar). Bu durumda, akış yönüne ters giden akış tabakasının tam olarak gelişemediği görülmektedir.



Şekil 4.16. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için akış çizgileri

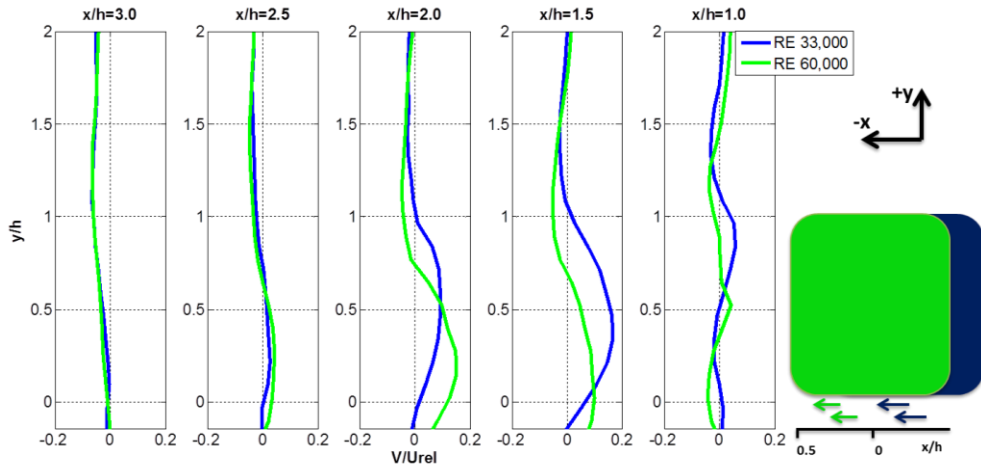


Şekil 4.17. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz aksel hız eğrileri

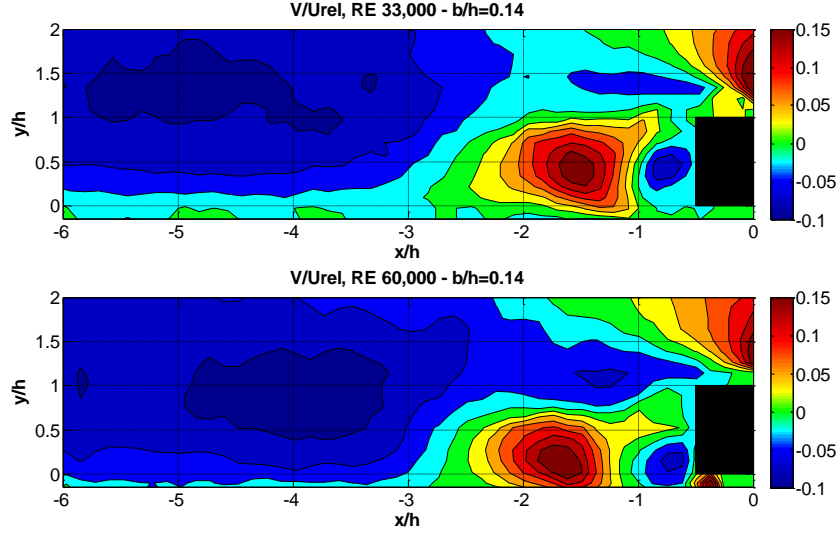


Şekil 4.18. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz aksel hız dağılımları

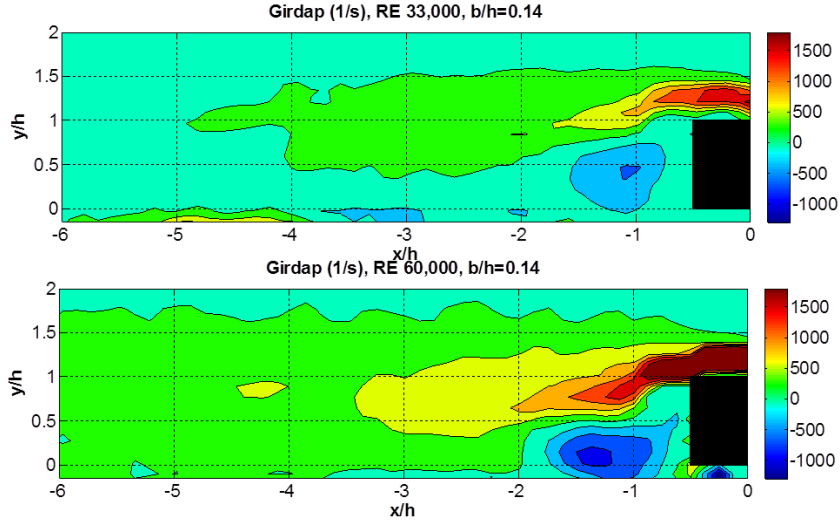
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'deki boyutsuz radyal hız eğrileri ve dağılımları incelendiğinde, akış hızı arttıkça, iki türbülator boyu aksel mesafesindeki bölgelerin, $+y$ ve $-y$ yönündeki radyal hız bileşenlerinin kanal duvarına yaklaşarak, türbülator'den uzaklaştığı görülmektedir. Daha yüksek RE sayılarına çıkıldığında, birbirlerine ters yönde dönen girdap yumaklarının ilgili yönlere şiddetlenerek, kanal duvarına yaklaştıkları görülmektedir (Şekil 4.21). Bir başka deyişle, $b/h=0.14$ değerinde akışın hızlanması, radyal hız bileşeninin kanal duvarına yakın bölgede arttığını göstermektedir. Ayrıca, birbirine ters yönde dönen ikili girdap hücrelerinin kanal duvarına yaklaşarak ($-y$ yönünde), ayrık türbülator'den uzaklaştıkları görülmektedir.



Şekil 4.19. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız eğrileri

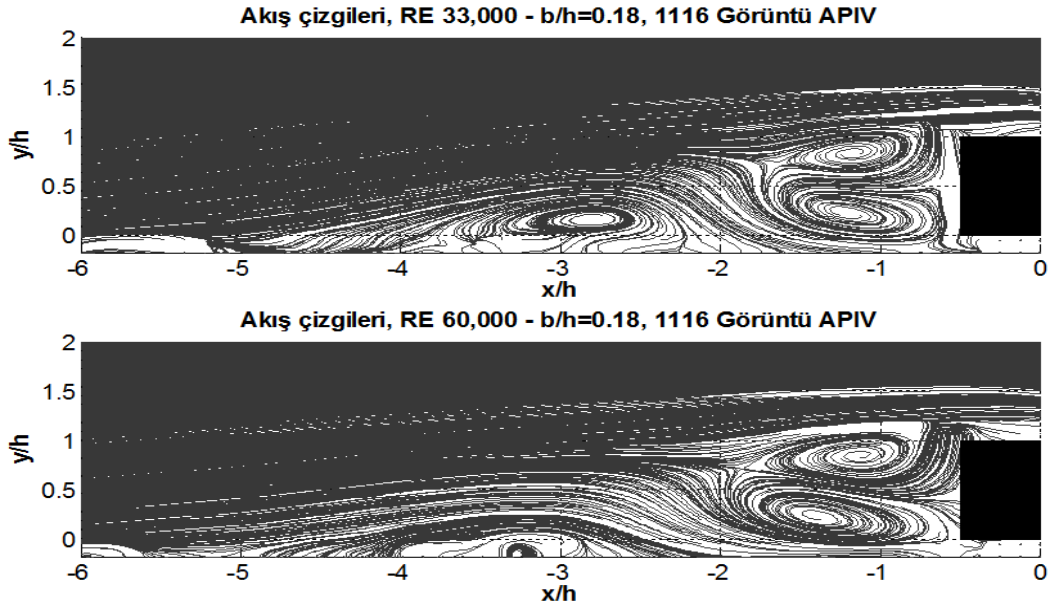


Şekil 4.20. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları



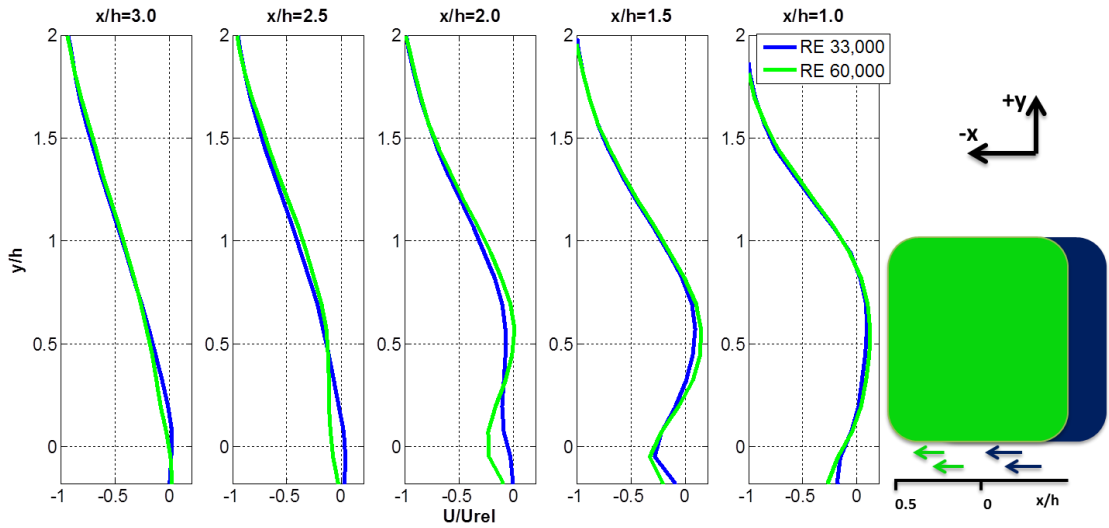
Şekil 4.21. $b/h=0.14$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için girdap alanları

RE 33k ve RE 60k'de türbülator yüksekliği-boşluk oranı arttırıldığında ($b/h=0.18$), birbirine ters yönde dönen girdap hücreleri ile, nispeten daha uzakta görülen girdap hücreleri görölmektedir (Şekil 4.22). Türbülator arkası akış alanı incelendiğinde, ana akış hızı arttıka, türbülatorden uzakta olan tekli girdap bölgesinin basıklaşarak, türbülatorden uzaklaştığı görölmektedir.

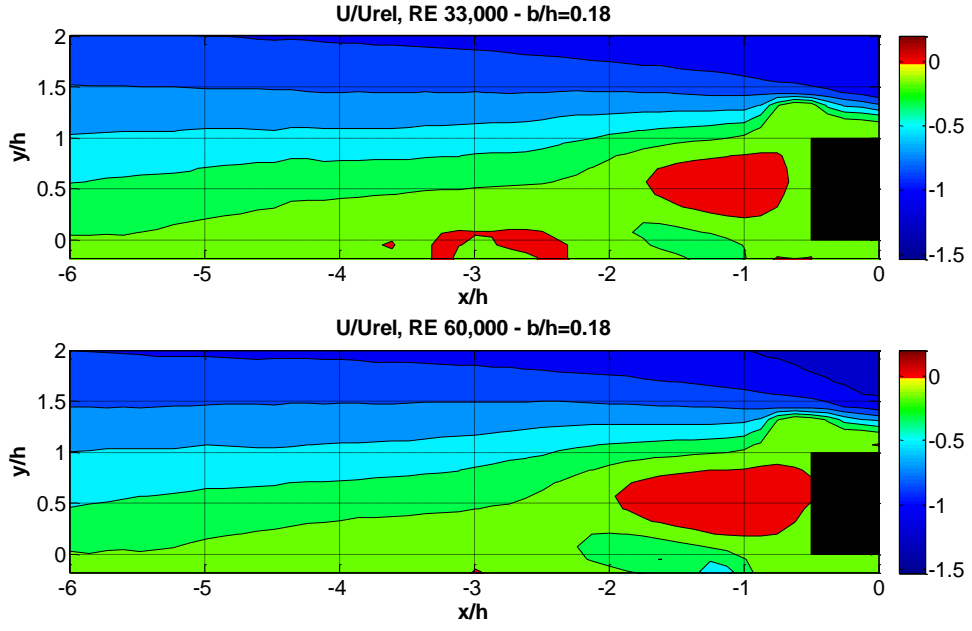


Şekil 4.22. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için akış çizgileri

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'teki boyutsuz aksenal hız dağılımları incelendiğinde, ana akış hızı arttıkça, $x/h=-3$ civarındaki ters yönde ilerleyen akış kaybolmakta ve türbülator yakınındaki akışın $+x$ yönünde daha büyük bir bölgeye hakim olduğu görülmektedir.

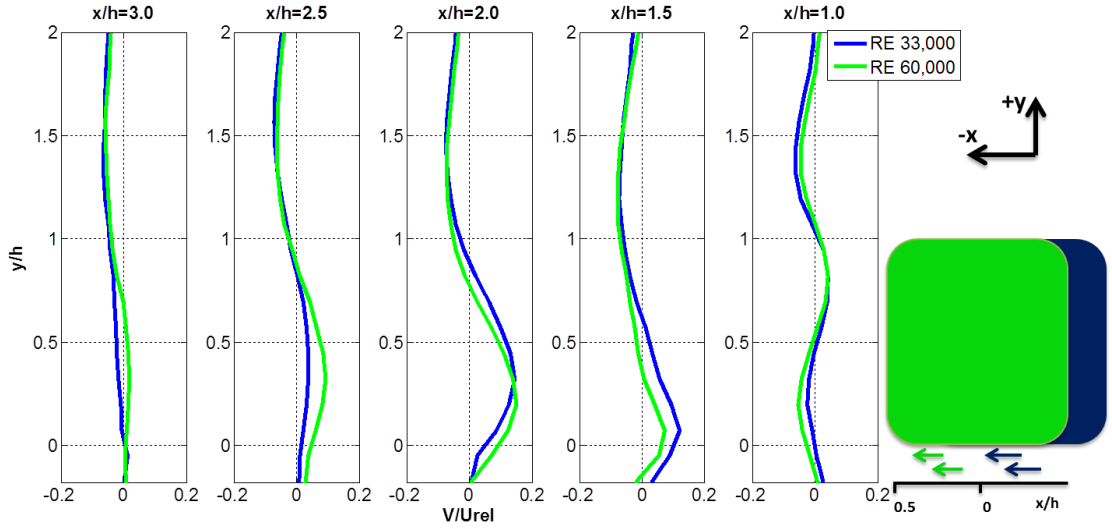


Şekil 4.23. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz aksenal hız eğrileri

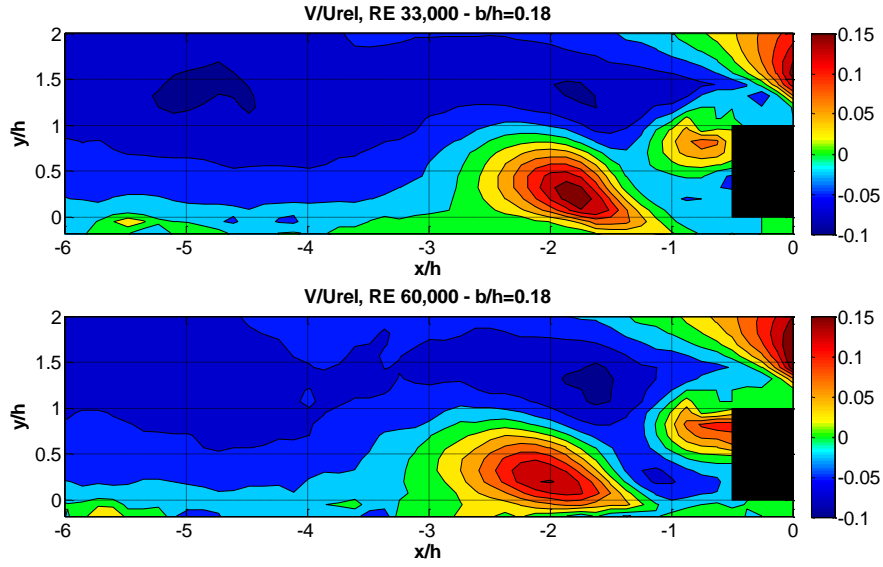


Şekil 4.24. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz aksel hız dağılımları

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki boyutsuz radyal hız dağılımları incelendiğinde, $b/h=0.14$ boşluk koşullarında yapılan testlerdeki sonuçlara (Şekil 4.20) benzer sonuçlar görülmüştür.

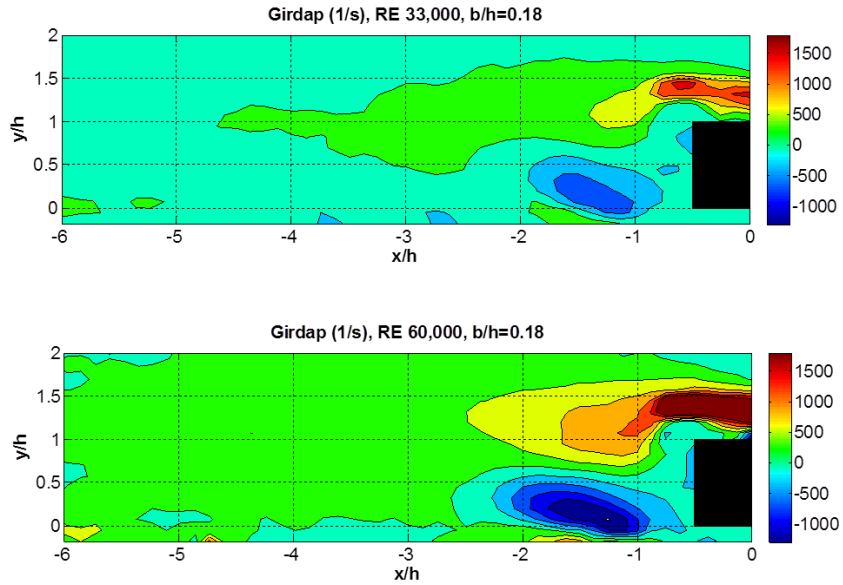


Şekil 4.25. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları



Şekil 4.26. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için boyutsuz radyal hız dağılımları

Şekil 4.27'deki girdap alanları incelendiğinde, akış hızı arttıkça birbirine ters yönde dönen girdap hücrelerinin şiddetlendiği, ancak $b/h=0.14$ oranında görülen hız arttıkça alttaki girdabın türbülâtörden uzaklaşması olayı görülmemektedir. $b/h=0.18$ oranında hız arttıkça, $b/h=0.14$ boşluk oranında olanın aksine girdap çiftlerinden üstte olanın belli bir alanda kalarak, akış yönünde ilerlemediği görülmektedir.

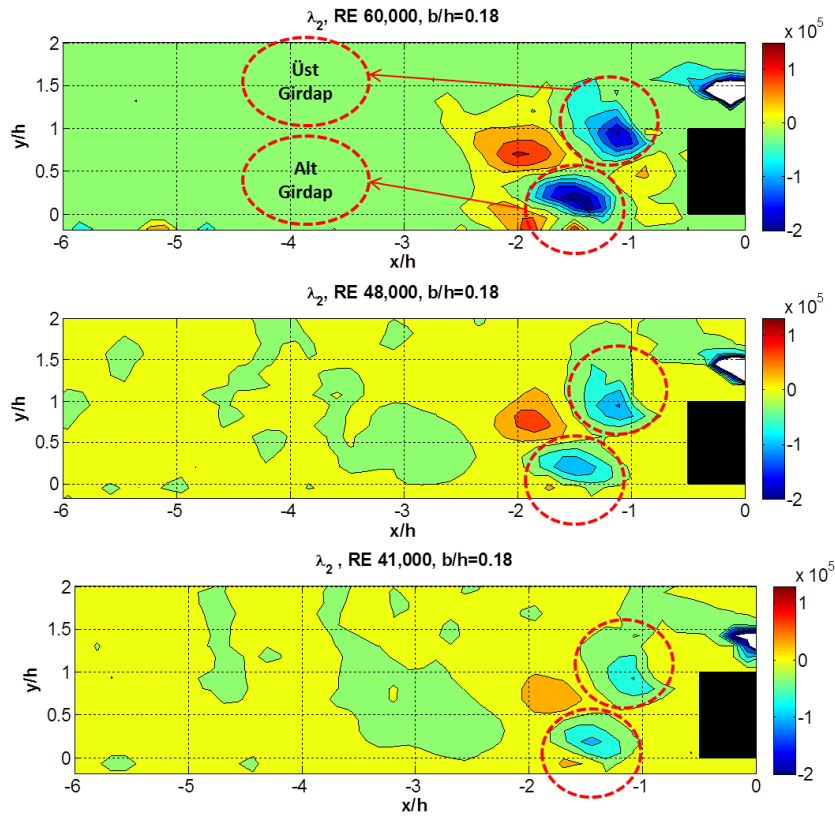


Şekil 4.27. $b/h=0.18$ boşluk oranında RE 33k ve RE 60k için girdap alanları

Test sonrası yapılan veri işleme sonucunda girdap vektörü, girdap yönü hakkında bilgi verirken, iki boyutlu girdap yüzey alanı hakkında fikir

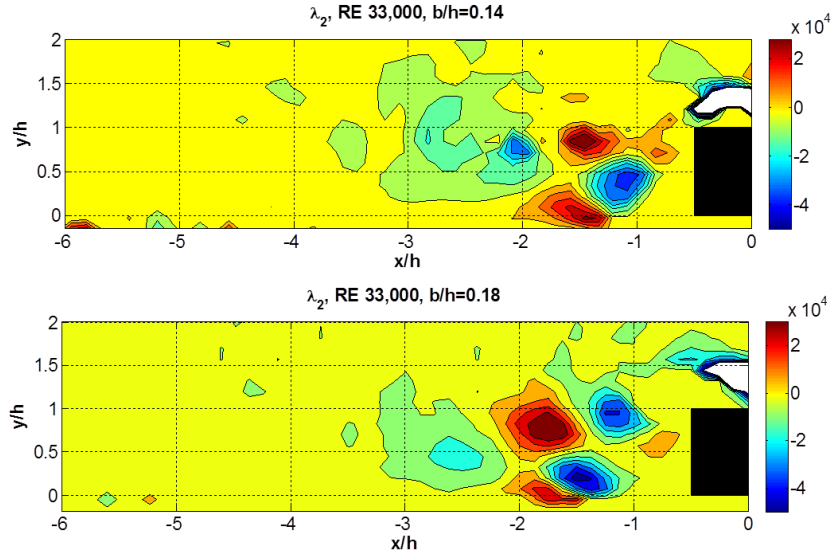
vermemektedir. Bu bağlamda, girdap pozisyonu ve yüzey alanı belirlemede (iki boyutta) kullanılan yöntemlerden olan, λ_2 kriteri kullanılarak girdap alanı hakkında fikir sahibi olunmuştur.

Şekil 4.28’de, Bölüm 2.3’te verilen girdap belirleme yöntemi kullanılarak, sabit boşluk oranında, değişik hızlarda yapılan testlerde λ_2 operatörünün değerleri gösterilmektedir. Negatif değere sahip bölgeler, girdapların konumunu ve şiddetini göstermektedir. $b/h=0.18$ için tüm hız koşullarında, türbülator arkasında iki girdap yapısı (negatif λ_2 , mavi bölgeler) ve aralarında bir kesme bölgesi (pozitif λ_2 , kırmızı bölgeler) görülmektedir. Hız arttıkça, bu bölgelerdeki girdap ve kesme büyüklüklerinin değiştiği gözlemlenmektedir. Matlab’da belli bir negatif λ_2 değerinden daha büyük negatif değere sahip bölgelerin karşılık geldiği pikseller, belli sınırlarda, saydırılarak iki boyutlu girdap yüzey alanları hesaplatılmıştır. Türbülator sonrası ikili girdap alanlarından, altta olan girdap yüzey alanı, hızın artmasıyla kayda değer ölçüde değişmemektedir. RE 41k koşulları referans alındığında, üstte kalan girdap yüzey alanının, RE 48k koşullarında % 29, RE 60k koşullarında % 42 oranında arttığı görülmüştür.

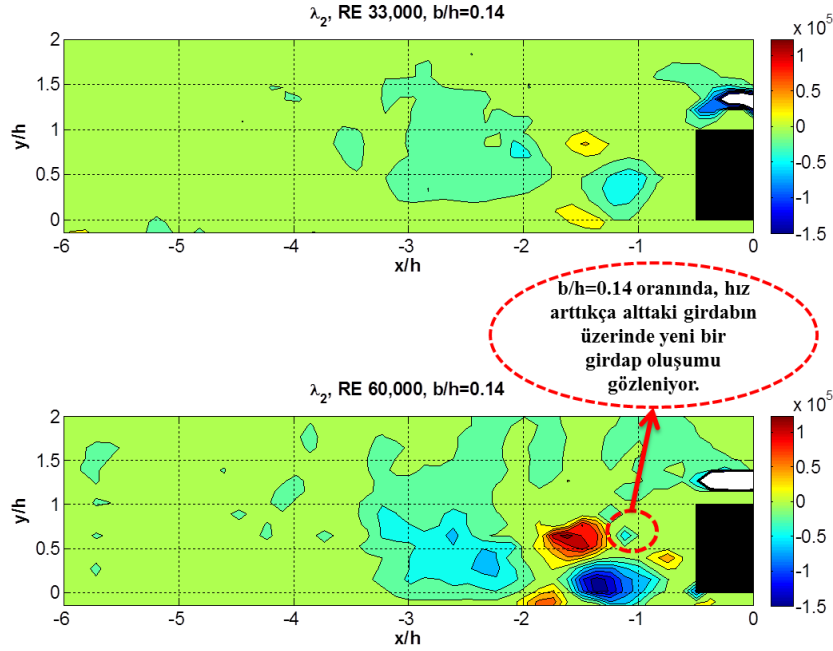


Şekil 4.28. $b/h=0.18$ ve değişik hız konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı

Şekil 4.29’da, düşük hızlarda, farklı boşluk oranları için, λ_2 değerleri incelendiğinde, $b/h=0.14$ değerinden $b/h=0.18$ değerine geçişte farklı girdap yapıları görülmektedir. Düşük hızda, $b/h=0.14$ değeri için, üstteki girdap yapısı görülmemektedir. Şekil 4.30’da, $b/h=0.14$ değerinde hız arttırıldığında, daha önce görülmeyen girdap yapısı, görülmeye başlamıştır. Bu sonuç, $b/h=0.14$ boşluk değerinin, akışın yapı değiştirdiği boşluk değeri olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29. RE 33k koşulları için, değişik boşluk konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı



Şekil 4.30. b/h=0.14 için, değişik hız konfigürasyonlarında λ_2 değerleri dağılımı

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Ayrık türbülatorlerin, türbülator arkası akış alanına olan etkileri farklı türbülator yüksekliği-boşluk oranlarında $((b/h)_1=0.11, (b/h)_2=0.14, (b/h)_3=0.18, (b/h)_4=0.33, (b/h)_5=0.48, (b/h)_6=1.0, (b/h)_7=0)$ ve RE sayısının 33k, 41k, 48k, 60k olduğu aralıklarda incelenmiştir. Yapılan testler sonucu aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- RE sayısının 48k olarak sabit tutulduğu testlerde entegre türbülator $(b/h=0)$ sonrası akışın, yaklaşık olarak 5 (x/h) mesafesinde yüzeye yeniden tutunduğu ve bu bölgede tek girdap yapısı görülmektedir. $b/h=0.11$ oranında, tekli girdap yapısı bozulmaya başlamakta ve hemen türbülatorün arkasında ters yönde küçük bir girdabın oluşmaya başladığı görülmektedir. $b/h=0.18$ boşluk oranında ise, akışın tamamen yapı değiştirmesiyle, 3 tane girdap yumağının olduğu bir yapı ortaya çıkmaktadır. Türbülatorün hemen arkasındaki girdap çifti birbirine ters yönde dönmekte ve boşluk oranı arttıkça ya da bir başka deyişle, türbülator altından gelen akışın hızı, türbülator üstünden gelen akışın hızına yaklaştıkça, alttaki girdap kuvvetlenmektedir. Türbülator arkası girdap çiftinden daha uzakta olan girdap ise etkisini kaybetmektedir. $b/h=0.33, b/h=0.48, b/h=1$ boşluk oranlarında ise akış tekrar yapı değiştirerek, türbülator arkasında bir girdap çiftinin olduğu akış yapısına geçmektedir. Bu boşluk oranlarında ilk girdap (türbülatorden uzakta görülen girdap) görülmemekle birlikte, sabit hızda boşluk oranı arttıkça, girdap çifti türbülator (akışın tersi yönde) yaklaşmaktadır.
- Sabit RE 60k'de farklı boşluk oranlarında yapılan testlerde, $b/h=0.14$ değerinin, 2'li girdap yapısından 3'lü girdap yapısına geçişin başladığı boşluk oranı olduğu anlaşılmıştır. $b/h=0.14$ oranında akış alanına bakıldığında 3'lü girdap yapısı anlaşılmamakla birlikte, girdap alanları incelendiğinde 3. girdabın oluşmaya başladığı net bir şekilde görülmektedir. Boşluk oranı arttırıldığında $(b/h=0.18)$, 3. girdap akış çizgilerine bakılarak da anlaşılmaktadır.
- $b/h=0.18$ boşluk oranında RE sayısı arttırılarak (33k, 41k, 48k) yapılan testlerde, akış yapısı 3'lü girdap yapısındadır. Hızın artması girdap

büyükliklerini arttırmış olmakla birlikte, RE 33k ile RE 41k arasında akış alanı ve girdap büyüklüğü açısından çok büyük farklar görülmemiştir.

- Daha önce yapılan testlerden $b/h=0.14$ boşluk değerinde bir geçiş bölgesi yakalandığından, bu boşluk oranında farklı hızlarda (RE 33k, 60k) testler yapılmıştır. Burada, düşük hızlardan yüksek hızlara gidildikçe 2'li girdap yapısından 3'lü girdap yapısına geçişin olduğu ancak tam olarak tamamlanmadığı görülmektedir. $b/h=0.18$ boşluk oranında ise RE 33k'de bile 3'lü girdap yapısı net olarak anlaşılmaktadır. Bu boşluk değerinde, hız arttıkça (RE 60k), ilk girdap şiddetlenmekte fakat akış alanında kapladığı yer azalmaktadır.
- λ_2 kriteri kullanılarak yapılan girdap belirleme çalışmalarında, düşük hızlarda, farklı boşluk oranları için, λ_2 değerleri incelendiğinde, $b/h=0.14$ değerinden $b/h=0.18$ değerine geçişte farklı girdap yapıları görülmektedir. Düşük hızda, $b/h=0.14$ değeri için, üstteki girdap yapısı görülmemektedir. $b/h=0.14$ değerinde hız arttırıldığında, mevcut yapıya yeni bir girdap yumağının eklendiği görülmüştür. Bu sonuç, $b/h=0.14$ boşluk değerinin, akışın yapı değiştirdiği boşluk değeri olduğunu göstermektedir.
- λ_2 kriteri kullanılarak elde edilen sonuçlarda, $b/h=0.18$ boşluk oranı için, RE 41k koşulları referans alındığında, üstte kalan girdap yüzey alanının, RE 48k koşullarında % 29, RE 60k koşullarında % 42 oranında arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Boyce, M.P., *Gas turbine engineering handbook*, Second edition, Gulf Professional Publishing, Houston, A.B.D., 2002.
- [2] Hwang J.J., “Heat transfer-friction characteristic comparison in rectangular channel arrays of attached ribs on to opposite walls,” ASME, 97-GT-488, 1997.
- [3] Dixon, S.L. ve Hall C.A., *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery*, Sixth edition, Elsevier Publishing, A.B.D., 2010.
- [4] Lakshminarayana, B., *Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1996.
- [5] Siddique, W., *Design of internal cooling passages: investigation of thermal performance of serpentine passages*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Division of Heat and Power Technology, Stockholm, Sweden, 2011.
- [6] Han, J.C. ve Chen, H.C., “Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. **22**, No. 2, 2006.
- [7] Smulsky, Y.I., Terekhov, V.I. ve Yarygina, N.I., “Heat transfer in turbulent separated flow behind a rib on the surface of square channel at different orientation angles relative to flow direction,” *Internal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **55**, s. 726-733, 2012
- [8] Fang, X., Yang, Z., Wang, B.C., Tachie, M.F. ve Bergstrom, D.J., “Highly disturbed turbulent flow in a square channel with V-shaped ribs on one wall,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. **56**, s. 182-197, 2015.
- [9] Sriharsha, V., Prabhu, S.V. ve Vedula, R.P., “Influence of rib height on the local heat transfer distribution and pressure drop in a square channel with 90° continuous and 60° V-broken ribs,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. **29**, s. 2444-2459, 2009.
- [10] Sparrow, E.M. ve Tao, W.Q., “Enhanced heat transfer in a flat rectangular duct with streamwise-periodic disturbances at one principal wall,” *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. **105**, s. 851-861, 1983.
- [11] Sparrow, E.M. ve Tao, W.Q., “Symmetric vs. asymmetric periodic disturbances at the walls of a heated flow passage,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. **27**, s. 2133-2144, 1984.

- [12] Han, J.C., "Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. **110**, s. 321-328, 1988.
- [13] Burggraf, F., "Experimental heat transfer and pressure drop with two-dimensional discrete turbulence promoters applied to two opposite walls of a square tube," *Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer*, (ed: Bergles, E., E.ve Webb, R., L.) ASME, New York, A. B. D., s. 70-79, 1970.
- [14] Chandra, P.R., Alexander, C.R. ve Han, J.C., "Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. **46**, s. 481-495, 2003.
- [15] Kamali, R. ve Binesh, A.R., "The importance of rib shape effects on the local heat transfer and flow friction characteristics of square ducts with ribbed internal surfaces," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. **35**, s. 1032-1040, 2008.
- [16] Nishino, T., Roberts, G.T. ve Zhang, X., "Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. **24**, s. 18-33, 2008.
- [17] Lau, S.C., McMillin, R.D. ve Han, J.C., "Turbulent heat transfer and friction in a square channel with discrete rib turbulators", *Trans. ASME, J. Turbomachinery*, Vol. **113**, s. 360-366, 1991.
- [18] Liou, T.M. ve Wang, W.B., "Laser holographic interferometry study of developing heat transfer in a duct with a detached rib array," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. **38**, s. 91-100, 1995.
- [19] Liou, T.M. ve Chen, S.H., "Turbulent heat and fluid flow in a passage disturbed by detached perforated ribs of different heights," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. **41**, No. 12, s. 1795-1806, 1998.
- [20] Tsia, J.P. ve Hwang, J.J., "Measurements of heat transfer and fluid flow in a rectangular duct with alternate attached-detached rib-arrays," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, s. 2071-2083, 1999.
- [21] Liou, T.M., Hwang, Y.S. ve Chen, M.Y., "Heat transfer improvement by arranging detached ribs on suction surfaces of rotating internal coolant passages," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, s. 2414–2424, 2007.

- [22] Katti, V. ve Prabhu, S.V., “Heat transfer enhancement on a flat surface with axisymmetric detached ribs by normal impingement of circular air jet,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **29**, s. 1279-1294, 2008.
- [23] Wang, L., Salewski, M. ve Sunden, B., “Turbulent flow in a ribbed channel: flow structures in the vicinity of a rib,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, **34**, s. 165–176, 2010.
- [24] Ahn, J. ve Lee, J.S., “Large eddy simulation of flow and heat transfer in a channel with a detached rib array,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, s. 445–452, 2010.
- [25] Yongsiri, K., Eiamsa-ard, P., Wongcharee, K. ve Eiamsa-ard, S., “Augmented heat transfer in a turbulent channel flow with inclined detached-ribs,” *Case Studies in Thermal Engineering*, **3**, s. 1–10, 2014.
- [26] Parsazadeh, M., Mohammed, H.A. ve Fathinia, F., “Influence of nanofluid on turbulent forced convective flow in a channel with detached rib-arrays,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **46**, s. 97–105, 2013.
- [27] Panigrahi, P.K., “PIV investigation of flow behind surface mounted detached square cylinder,” *ASME Joint U.S.-European Fluids Engineering Summer Meeting*, 2006.
- [28] Liou, T.M., Wang, W.B. ve Chang, Y.J., “Holographic interferometry study of spatially periodic heat transfer in a channel with ribs detached from one wall,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. **117**, s. 32-39, 1995.
- [29] Liou, T.M., Yang, C.BP. ve Lee, H.L., “LDV measurement of spatially periodic flows over a detached solid-rib array,” *Journal of Fluid Engineering*, Vol. **119**, s. 383-389, 1997.
- [30] Liou, T.M., Shuy, W.J. ve Tsao, Y.H., “Effect of rib height and pitch on the thermal performance of a passage disturbed by detached solid ribs,” *Journal of Turbomachinery*, Vol. **120**, s. 581-588, 1998.
- [31] Bredberg, J., *Turbulence modelling for internal cooling of gas-turbine blades*, Thesis For the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Göteborg, Sweden, 2002.

- [32] Arts, T., Boerrigter, H., Carbonaro, M., Charbonnier, J.M., Degrez, G., Olivari, D., Reithmuller, M.L. ve Braembussche, R.A., *Measurement techniques in fluid dynamics*, VKI, Belgium, 1994.
- [33] Jahanmiri, M., *Particle image velocimetry: fundamentals and its applications*, Research Report, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- [34] Kiger, K., *PIV basics: correlation*, Lisbon, Portugal, 2015. http://www.civil.ist.utl.pt/~ruif/SUMMER_SCHOOL/presentations/PIV_basics_correlation_final.pdf.
- [35] Anonim, *DynamicStudio User's Guide*, Dantec Dynamics A/S, Denmark, 2013.
- [36] Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. ve Kompenhans, J., *Particle image velocimetry*, Second edition, Springer Publishing, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [37] Adrian, R.J. ve Westerweel, J., *Particle image velocimetry*, Second edition, Cambridge University Press, New York, A.B.D., 2011.