



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRENİN SINIR TABAKAYLA ETKİLEŞİMİYLE OLUŞAN AKIŞ YAPISI VE KONTROLÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

Abdulkerim OKBAZ

YÜKSEK LİSANS

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2012
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdulkerim Okbaz tarafından hazırlanan "Kürenin Sınır Tabakayla Etkileşimiyle Oluşan Akış Yapısı ve Kontrolünün Deneysel İncelenmesi" adlı tez çalışması 24/12/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina MühendisliğiAnabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri **İmza**

Başkan
Doç. Dr. M. Serdar GENÇ

Danışman
Doç. Dr. Muammer ÖZGÖREN

Üye
Yrd. Doç. Dr. Faruk KÖSE



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Aşır GENÇ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 109R028 nolu proje ile ve Selçuk Üniversitesi B.A.P. Koordinatörlüğü tarafından 11201040 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdulkerim OKBAZ

Tarih: 24/12/2012



ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KÜRENİN SINIR TABAKAYLA ETKİLEŞİMİYLE OLUŞAN AKIŞ YAPISI VE KONTROLÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

Abdulkerim OKBAZ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Muammer ÖZGÖREN
2012, 219 Sayfa
Jüri
Doç. Dr. M. Serdar GENÇ
Doç. Dr.Muammer ÖZGÖREN
Yrd. Doç. Dr. Faruk KÖSE

Akrilik malzemeden yapılan düz bir levha üzerine yerleştirilen pürüzsüz bir küre ve pasif olarak akış kontrolü uygulanmış farklı küreler etrafındaki akış karakteristikleri boya ile görselleştirme ve Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemi kullanılarak kapalı devre açık kanal su akışında incelenmiştir. Düz levha üzerindeki hız dağılımı tetikleyici tel (tripwire) kullanılarak gelişmiş türbülanslı sınır tabaka koşullarında kalırken serbest akım hızına ve küre çapına göre tanımlı Reynolds sayısı $2500 \leq Re \leq 10000$ aralığında değiştirilmiştir. Pasif akış kontrolü için, üzerine farklı açılarda 2 mm ve 3 mm silindirik çapında o-ring yerleştirilmiş küreler, farklı çaplarda pasif jet deliği olan küreler ve pürüzlü yüzeyi olan bir küre kullanılmıştır. Küre çapı 42.5 mm olup kalınlığı 63 mm olan levha yüzeyindeki türbülanslı bir sınır tabaka akışı içinde farklı konumlara yerleştirilmiştir. Küre art izi bölgesindeki anlık ve zaman ortalaması alınmış akış yapıları $0 \leq G/D \leq 1.50$ aralığındaki boşluk oranlarında akış fiziği açısından analiz edilmiştir.

Hız çalkantıları, akım çizgileri, girdap eş düzey eğrileri, hız alanları, türbülans kinetik enerji ve Reynolds gerilmesi eş düzey eğrilerinin dağılımları PIV verileri kullanılarak elde edilmiştir. Küre art izi yapısı küre ile levha arasındaki boşluk miktarına bağlı olarak değişen jet akıştan etkilenmektedir. Boşluk oranı art izi ile sınır tabaka etkileşiminin akış yapısında ve bu çalışmada uygulanan akış kontrol yöntemlerinin etkinliğinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, o-ringlerle uygulanan pasif akış kontrolünün etkinliği o-ring çapına ve yerleşim açısına bağlı olduğu kadar, kürenin sınır tabaka içindeki yerine de bağlı olmuştur. Üniform akış şartlarına yaklaşıldığı ve küre ile levha arasındaki boşlukta gerçekleşen jet akışın hiç olmadığı G/D=1.50 açıklık oranın ortalama akış yapıları ve türbülans istatistikleri değerlendirildiğinde en etkili o-ringli kontrol şeklinin 55°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ringin ve 50°'ye yerleştirilmiş 3 mm çapındaki o-ringin olduğu gözlemlenmiştir. Düşük açıklık oranlarında (G/D=0.10 ve 0.25) çap oranları d/D=0.20 ve 0.25 olan küre durumlarında, küre deliğinden gelen jet akışın art izinde oluşturduğu momentumun, küre ile levha arasındaki jet akış üzerinde çok etkili olduğu bulunmuştur. Serbest akım şartlarına yaklaşıldığında G/D=1.50 açıklık oranında d/D=0.20 ve 0.25 oranlarındaki deliklerden gelen jet akışın küre üst kayma tabakasıyla alt kayma tabaksının etkileşimini engellediği bulunmuştur. Küre art izinde Reynolds gerilmeleri, hız çalkantıları ve türbülans kinetik enerji şiddetleri artan delik çapıyla birlikte azalmıştır. Ancak, delik çap oranları d/D=0.20 ve 0.25 olduğunda küre deliğinden gerçekleşen jet akışın oluşturduğu momentumun artmasıyla jet akışın art izi bölgesine karıştığı bölgede bu akış karakteristiklerinin şiddetleri artmıştır. Delik çapı oranının d/D=0.15 durumunun hem üst ve alt kayma tabakalarındaki değerler hem de jet çıkışındaki değerler birlikte incelendiğinde en iyi akış kontrolü için optimum oran olduğu sonucuna varılmıştır. Delikli kürenin deliğinden çıkan akış, art izi yapısını değişmiş ve akış yapısında küçük ölçekli bir adet girdap çifti oluşmuştur ve akış yapısının simetrikliğe doğru düzelmesine etki yapmaktadır. Akış fiziği yönünden bakıldığında, Reynolds sayısı değerinin Re=5000'in kritik altı olmasına rağmen, art izi bölgesindeki Karman Girdap caddeleri ve Kelvin Helmholtz girdapları pürüzlülük etkisinden dolayı biraz azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ve doğrulanmasında ve mühendislik tasarımlarındafaydalı olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: akış, delik, girdap, jet akış, küre, o-ring, pasif akış kontrolü, sınır tabaka akışı, PIV, pürüzlülük, türbülans.

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW STRUCTURE AND ITS CONTROL BETWEEN BOUNDARY LAYER AND SPHERE

Abdulkerim OKBAZ

The Graduate School of Natural And Applied Science of Selcuk University
The Degree of Master of Science in MechanicalEngineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

2012,219 Pages
Jury
Assoc. Prof. Dr. M.Serdar GENÇ
Assoc. Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN
Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE

Flow characteristics around a smooth sphere and passively flow controlled sphere located over a smooth flat plate made of Plexiglas material were experimentally investigated using dye visualization and PIV technique in close loop open water channel flow. Reynolds numbers were in a range of $2500 \leq Re \leq 10000$ based on the free-stream velocity and sphere diameter while the velocity distributions over the plate surface are the developed turbulent boundary layer condition attained by using a tripwire. For passive flow control, the spheres with o-ring in 2 mm or 3 mm diameters located on the sphere surface at various angles, the spheres with passive jet hole in various diameters and a sphere with roughened surface were used. The sphere in diameter of D=42.5 mm was embedded at different locations in a turbulent boundary layer flow with a thickness of 63 mm. Instantaneous and time-averaged flow patterns in the wake region of the sphere were examined from the point of flow physics for different sphere locations in the range of gap ratio $0 \leq G/D \leq 1.50$.

Distributions of velocity fluctuations, patterns of sectional streamlines, vorticity contours, velocity fields, turbulence kinetic energy and corresponding Reynolds stress correlations are obtained using PIV data. The gap ratio has a strong influence on the flow structure of the wake-boundary layer interaction and the effectiveness of the flow control methods applied in this study. Therefore, the effect of the o-ring on the passive flow control depends on the o-ring diameter and location angle as well as sphere location in the boundary layer flow. Approaching the uniform flow conditions, at the gap ratio G/D=1.50 no jet flow occurs through the gap between the bottom point of the sphere and flat plate and thus, it is observed from the mean flow characteristics and turbulence statistics that the most effective control with the o-ring is the o-ring located at 55° with 2 mm diameter and the o-ring located at 50° with 3 mm diameter. At the lower gap ratios (G/D=0.10 and 0.25) for the cases of diameter ratios d/D=0.20 and 0.25, it is observed that the momentum created by the jet flow through the sphere hole has strong effect on the wake structure of jet flow and through the gap between the sphere and flat plate. At the gap ratio G/D=1.50, it is observed that the jet flows through the sphere holes at the diameter ratios d/D=0.20 and 0.25 prevent the interaction of upper shear layer and lower shear layer of the sphere. For the case at the hole diameter ratio d/D=0.15, the evaluation of these flow characteristics levels at the upper and lower shear layers and jet exit, it is concluded that the sphere hole in d/D=0.15 diameter ratio is the optimum for the best flow control. The modified flow structure of the near wake of the vented sphere causes the occurrence of a pair of counter-rotating ring vortices which have the effect of aerodynamically streamlining the sphere wake. From the point of flow physics, vortex formation lengths of large scale Karman Vortex Streets and Kelvin Helmholtz vortices in the wake slightly decrease due to the roughness effect although the Reynolds number is in the subcritical region. It is demonstrated that both the passive control methods and the increased Reynolds numbers make the wake region size smaller and closer to the base of the sphere. The obtained results from this study can be helpful for developing and validating numerical predictions as well as designing.

Keywords: boundary layer, flow, hole, jet flow, o-ring, passive flow control, PIV, sphere, turbulence, vortex.

ÖNSÖZ

Akışkanlar mekaniği uygulamalarında tek fazlı akışlarla birlikte katı-gaz, sıvı-gaz veya katı-sıvı gibi iki fazlı akışlarda küresel cisimler etrafında oluşan akış yapısının bilinmesi tasarım açısından önem arz etmektedir. Küre üç boyutlu akışlar için ideal bir geometri olup, bir küt cisimdir. Küt cisimler genellikle yoğun akış ayrılmalarına, daimi olmayan akışlara ve karmaşık girdap kopmalarına neden olur. Bu tür akışlara genellikle; spor toplarında, tarımsal ürünlerin pnömatik naklinde, bombalar, deniz radarı, yağ depolama tankları, yağmur damlaları, pnömatik taşımada, yanma, silikon ve polimer vb. maddelerin taşınmasında, nehirdeki kirletici maddelerin taşınmasında, küre formundaki ürünlerin kurutulmasında veya soğutulmasında, küreye benzer geometriye sahip aerodinamik yapılarda, küre şeklinde su kulelerinde, suda yüzen cisimlerde, deniz altındaki insanlı veya insansız araştırma araçlarında, balon ve gemilerin çektiği küresel cisimlerin akışkanla etkileşimi gibi endüstriyel veya pratik uygulamalarda sıkça rastlanmaktadır.

Küt cisimler etrafındaki akışlarda oluşan anlık girdaplar, akıştan kaynaklanan dinamik yüklere ve sonuçta titreşimlere neden olmaktadır. Titreşimler de malzeme yorulmasına ve gürültü kirliliğine neden olabilmektedir. Bu olumsuz etkilerin kaynağının belirlenmesi için akışkan-cisim etkileşiminin detaylı ölçüm ve analizlerinin yapılması gerekmektedir. Küt cisimler çevresinde oluşan akışın tamamen üç boyutlu ve karmaşık yapıda olmasından dolayı, nitel (boya ve duman görüntülemeyle) görüntülerle değerlendirmek oldukça zordur ve sayısal sonuç vermemektedir. Ancak, sayısal sonuç veren nicel görüntülerle ölçme imkânı sağlayan PIV yönteminin kullanılması araştırmacılara gerek pratik gerekse tasarım için faydalı parametrelerin sunulmasını mümkün kılmaktadır. Elde edilen mevcut sonuçların, daha güvenilir sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ve tasarım hesaplamalarında karşılaştırma amaçlı kullanılması da mümkün olacaktır. Bunlara ek olarak, kürelerin etrafındaki akış yapısı ve kontrolünün anlaşılması, pratik uygulamada karşılaşılacak problemlerin çözümü için uygulanan pasif akış kontrol yöntemlerinin belirlenmesine de katkı sağlayabilecektir.

Bu çalışmanın, küt cisimler etrafındaki akış yapısı, akış kontrol yöntemleri, sayısal akışkanlar mekaniği, türbülans modelleri üzerine çalışan araştırmacılara ve tasarımcılara yardımcı olmasını dilerim.

Tez çalışmamın her safhasında çeşitli kaynak, bilgi ve önerileriyle benden yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Muammer ÖZGÖREN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Yüksek Lisans çalışmalarıma maddi olarak destek veren TÜBİTAK'a ve tezimle ilgili deneyleri yapmam için gerekli olan ortamı oluşturan, bilgi ve önerileriyle benden yardımlarını esirgemeyen Çukurova Üniversitesi'ndeki kıymetli hocalarım Prof. Dr. Beşir ŞAHİN ve Prof. Dr. Hüseyin AKILLI'ya teşekkür ederim. Tez aşamasında bana destek olan Arş. Gör. Sercan DOĞAN'a teşekkür ederim. Deney çalışmalarım sırasında bana desteklerini esirgemeyen Çukurova Üniversitesi'ndeki Akışkanlar Mekaniği grubundaki araştırmacılara, Proje Asistanı Engin PINAR'a, Arş. Gör. Çetin CANPOLAT'a ve Arş. Gör. Göktürk M. ÖZKAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmamda bana desteğini, bilgi ve önerilerini esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Ali KAHRAMAN'a teşekkür ederim. Değerli görüşleriyle bana destek olan Arş. Gör. Eyüb CANLI'ya ve Arş. Gör. Muharrem Hilmi AKSOY'a teşekkür ederim.

Benden hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Abdulkerim OKBAZ
KONYA-2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **8**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **24**

3. 1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Sistemi ve Rhodamine 6G Akış Görselleştirme Düzeneği 24
3. 2. Deneylerde Kullanılan Küreler 30
3. 3. Kapalı Devre Açık Su Kanalı ve Küre Tutturma Mekanizması 32
3. 4. Deney Sonuçlarının Analiz Edilmesi 38
3. 5. Levha üzerinde Türbülanslı Gelişmiş Sınır Tabaka Akışının Oluşturulması 45

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **47**

4.1. Pürüzsüz Kürenin Sınır Tabaka ile Etkileşiminin Boya ve PIV Deney Sonuçları 47
4.2. Pürüzsüz ve O-ringli Kürelerin Sınır Tabaka ile Etkileşimin Boya, Anlık ve Ortalaması Alınmış PIV SonuçlarıylaKarşılaştırılması 88
4.3. Pürüzsüz ve Delikli Kürelerin Sınır Tabaka ile Etkileşiminin Boya, Anlık ve Ortalaması Alınmış PIV SonuçlularıylaKarşılaştırılması 121
4.4. Pürüzsüz ve Pasif Kontrol Uygulanan Kürelerin Sınır Tabakayla Etkileşimiyle Oluşan Akış Yapılarının Karşılaştırılması 159

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **193**

5.1. Sonuçlar 193
5.1.1. Pürüzsüz küre durumundaki akış yapısı 193
5.1.2 Pasif akış kontrolü uygulanmış küreler durumlarındaki akış yapısı 194
5.2. Öneriler 200

KAYNAKLAR **202**

ÖZGEÇMİŞ **208**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_d	:	Sürükleme katsayısı
C_p	:	Boyutsuz basınç katsayısı
D	:	Küre çapı (mm)
d	:	Küre delik çapı (mm)
d/D	:	Küre üzerindeki delik çapının küre çapına oranı
d_o	:	o-ring silindirik çapı (mm)
F	:	Akım çizgilerinin odak noktası
G	:	Küre ile levha arasındaki boşluk (mm)
h		saat
h_w	:	Su yüksekliği (mm)
L	:	Uzunluk (mm)
ɵ	:	o-ring yerleşim açısı (°)
R	:	Akım çizgilerinin tekrar birleşme noktası
s		saniye
S	:	Akım çizgilerinin durma noktası
U_∞	:	Serbest akım hızı (mm/s)
$< u'v'/U_\infty^2 >$	:	Boyutsuzlaştırılmış ortalama Reynolds gerilmeleri
ω	:	Anlık girdap (s^{-1})
ν	:	Kinematik viskozite (m^2/s)
δ	:	Sınır tabaka kalınlığı (mm)
ω*	:	Boyutsuzlaştırılmış anlık girdap
<ω*>	:	Boyutsuzlaştırılmış ortalama girdap
$<\omega^*_{rms}>$	:	Boyutsuzlaştırılmış ortalama girdap çalkantıları (s^{-1})
<ω>	:	Ortalama girdap (s^{-1})
$<\omega_{rms}>$	:	Ortalama girdap çalkantıları (s^{-1})
$<u^*>$	:	Akım yönündeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız bileşeni
$<u^*_{rms}>$	:	Akım yönündeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız çalkantıları
<u>	:	Akım yönündeki ortalama hız bileşeni (mm/s)
$<u_{rms}>$	:	Akım yönündeki ortalama hız çalkantıları (mm/s)
$<v^*>$	:	Akım yönüne dik yöndeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız bileşeni

$\langle v^* \rangle$	:	Akım yönüne dik yöndeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız bileşeni
$\langle v^*_{rms} \rangle$	:	Akım yönüne dik yöndeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız çalkantıları
$\langle v \rangle$	:	Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşeni (mm/s)
$\langle v_{rms} \rangle$	:	Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız çalkantıları (mm/s)
$\langle \psi \rangle$	:	Ortalama akım çizgisi

Kısaltmalar

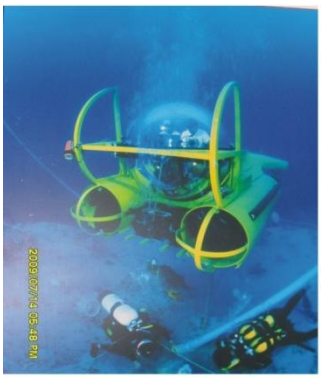
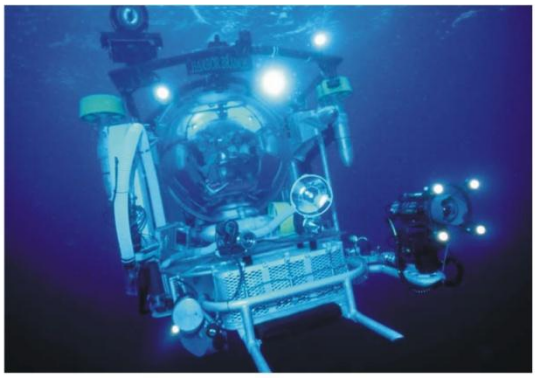
DPIV	:	Dijital Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçer (Digital Particle Image Velocimetry
HAD	:	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KGC	:	Karman Girdap Caddeleri (Karman Vortex Streets)
LDA	:	Lazer Dopler Anemometresi
PIV	:	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçer (Particle Image Velocimetry)
Re	:	Reynolds sayısı
St	:	Strouhal sayısı
TKE	:	Türbülans kinetik enerjisi

1. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniğinin birçok uygulaması çeşitli endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır. Küresel cisimler etrafındaki akış karakteristiklerinin bilinmesi çok fazlı akışlarda ve endüstriyel mühendislik tasarımlarında önemli yer arz etmektedir. Bir ve birden fazla küresel cisim etrafındaki akışkanlar mekaniği uygulamalarına; katı-gaz akışları gibi iki fazlı akışlarda, akışkan yataklı işlemlerde, pnömatik taşımada, yanmada, yakıt depolama tanklarında, silikon ve polimer vb. maddelerin taşınmasında, nehirdeki kirletici maddelerin taşınmasında, suda yüzen cisimlerde, küre formundaki ürünlerin kurutulmasında veya soğutulmasında, küreye benzer geometriye sahip aerodinamik yapılarda, spor topları etrafında, bombalarda, insanlı/insansız deniz altı araştırma araçlarında ve diğer küresel cisim içeren aerodinamik ve hidrodinamik cisim-akış etkileşimi ile ilgili uygulamalarda rastlanmaktadır (Şekil 1.1).

Akış-cisim etkileşimi sonucunda gerek cisimde gerekse akış yapısında önemli değişimler olabilmektedir. Bu etkileşimden kaynaklanan tasarım parametrelerinin detaylı değerlendirilmesi, oluşan akış yapısı ve fiziğinin iyi anlaşılması ve gerekli kriterlerin oluşturulması ile mümkündür. Akış içinde bulunan küresel cisimler veya yapılar aerodinamik veya hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altındadır. Akış içerisinde bulunan bir cisim çevresinde oluşan daimi olmayan girdaplar gerek cisim üzerinde ve gerekse bu cisimlerin arkasında bulunan başka cisimler üzerinde daimi olmayan yükler oluşturur. Böylece, bu cisimlerde titreşimlere ve yorulmalara sebep olmakta ve cisimlerin ömürlerini kısaltmaktadır. Cisim yüzeyinden kopan girdaplar ayrıca titreşimlere ve gürültü kirliliğine de neden olmaktadır. Bu nedenle, akışkan-cisim etkileşimi üzerine temel araştırmalar yapılması son derece önemlidir ve elde edilen sonuçların hem tasarımcılara hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışan bilim insanlarına sunulmasında yarar vardır.

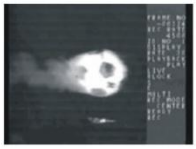
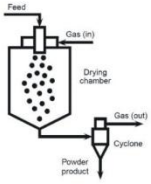
Endüstriyel uygulamalarda ve hava ya da su akışı içindeki birçok cismin maruz kaldığı akış yapısı üniform değildir. Genellikle açık alandaki ya da endüstriyel uygulamalardaki cisimler üniform olmayan hız profiline sahip bir sınır tabaka akışına maruz kalır. Cisim üzerine gelen akışın üniform olmaması cisim çevresindeki girdap kopmalarının farklı şiddetlerde ve frekanslarda gerçekleşmesine neden olur. Bu durum küt cisim etrafındaki daimi olmayan türbülanslı akışın daha da karmaşık, çözülmesi zor bir hale gelmesine neden olur. Kürenin hidrodinamik sınır tabaka içerisine yerleştirilmesi durumunda ise, oluşan küçük ölçekli değişken yapıdaki girdaplar kürenin


küresel formdaki deniz altı araştırma araçlarında

Küre şeklindeki su depolama tanklarında



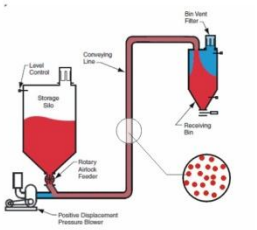



Değişik Spor topları çevresindeki akışlarda

Endüstriyel ürünlerin spray yöntemi ile kurutulması işlemlerinde







Küre şeklindeki aerodinamik yapılar çevresinde

Katı-gaz akışların pneumatik taşınmasında





Küresel formdaki Aerodinamik cisimler (örneğin parajüt ve balon)

Yakıt depolama tankları çevresinde

Küresel formdaki ürünlerin kurutulması işlemlerinde

Şekil 1.1.Küre/küreler çevresinde oluşan akış yapısı için çeşitli uygulama örnekleri

ön kısmında ve katı cidar yüzeyinde aşınmalara sebep olabilmektedir. Küresel cisimle taban arasındaki boşluktan kaynaklanan jet formundaki akış daimi olmayan bir akış yapısı meydana getirerek küre ve katı cidar üzerinde dinamik yüklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum da kürenin bağlı olduğu yapının zarar görmesine ve küresel cisimlerin taşındığı akış hatlarının aşınmasına neden olmaktadır. Küresel cisimle katı cidar arasındaki boşluk miktarı değiştikçe art izi bölgesinin büyüklüğünde ve yapısında değişmeler meydana gelmektedir ve bu durumun araştırılması pnömatik taşıma sırasında partiküllerin taşınmasında, ya da atmosferik sınır tabaka akışına maruz

kalan küt cisimlerde sürükleme kuvvetine etki eden parametrelerin belirlenmesinde önemli veri sağlamaktadır.

Akış kontrolü akışkanlar mekaniğinin en önemli alanlarından birisidir ve teknolojinin birçok dalında uygulama alanı bulmaktadır. Birçok aerodinamik ve hidrodinamik tasarımlarda akış kontrolü uygulanmakla fiziksel üstünlük elde edilebilmekte ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Daha hızlı ve verimli, manevra kabiliyeti yüksek askeri- sivil hava ve deniz araçlarının geliştirilmesinde akış kontrol uygulamaları büyük bir yere sahip olmuştur. Köprülerdeki silindirik yapılar, yüksek binalar, elektrik telleri, yüksek fabrika bacaları, akıntılı ve dalgalı ortamdaki su altı boru sistemleri, küresel yapıdaki su depoları gibi küt cisimler üzerinde akış kontrol uygulanarak girdap kaynaklı titreşimlerin neden olduğu hasarlar ve yıkımlar ortadan kaldırılabilmektedir. Akış kontrolü cismin geometrisine, akışın özelliklerine ve elde edilmek istenen amaca göre belirlenmekte, farklı amaçlar, geometriler ve akış özelliklerine göre uygulanan kontrol yöntemleri değişmektedir. Akış kontrolü ile ilgili bilimsel bilgilerin artması, uygulamadaki teknolojik zorlukların ortadan kalkması, daha gelişmiş ölçme aletlerinin kullanıma girmesi ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelerin hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sağladığı kolaylıklar bu alana olan ilgiyi artırmış ve yapılan çalışmalar hız kazanmıştır (Gad-el-Hak, 1996).

Akış kontrol uygulamalarında cisim çevresindeki akışta örneğin; bir hava aracının, bir deniz altının, bir otomobilin ya da bir küre veya silindir gibi küt cisimlerin dış yüzeyinde oluşan akışta, laminer akıştan türbülanslı akışageçişin ertelenmesi, akış ayrılmalarının geciktirilmesi, kaldırma kuvvetinin artırılması, yüzey sürtünmesinin ve basınç sürükleme katsayısının azaltılması, türbülansın artırılması, ısı transferinin iyileştirilmesi, gürültü sönümlemesi elde edilmek istenen amaçlardandır. Elbette ki bu amaçların hepsi aynı anda gerçekleştirilemez. Örneğin sınır tabakanın büyük bir kısmının mümkün olduğunca laminer olmasını sağlayarak yüzey sürtünmesi ve akıştan kaynaklanan gürültü azaltılabilir. Fakat türbülanslı bir sınır tabaka genel olarak ayrılmaya karşı laminer sınır tabakadan daha dirençlidir. Ayrılmanın önlenmesiyle kaldırma kuvveti artarken oluşan sürükleme kuvveti azalır. Üstelik karışma ve ısı transferi türbülansla iyileştirilir. Bir akış kontrol yöntemini seçmedeki en büyük zorluk faydalı bir amacı en ucuz maliyetle akıştan beklenen diğer amaçları etkilemeden elde etmektir (Gad-el-Hak, 1996).

Küt cisimler arkasında oluşan daimi olmayan akışlar birçok mühendislik alanında karşımıza çıkmaktadır. Küt cisimler art izi bölgesinde oluşan Karman girdap

yapılarından dolayı dinamik yüklemelere maruz kalır. Dinamik yüklemeler cisim üzerinde daha yıkıcı etkilere sahiptir. Ayrıca, girdap kaynaklı bu dinamik yüklemelerin frekansı cismin doğal frekansıyla aynı olursa rezonans haline geçer, bu 1940 yılında Tacoma Köprüsünde olduğu gibi büyük hasarlara yol açabilir. Bu yüklemelerin ve sürüklemenin azaltılması için farklı yüzey modifikasyonları geliştirilmiştir. Bu yüzey modifikasyonlarından helisel yapılar, silindir gibi bir küt cismin art izinde oluşan karman girdap yapılarını bozmakta bunlardan kaynaklanan titreşimleri de engellemektedir. Bu yüzden fabrika bacalarına, su altı gaz-petrol taşıma sistemlerinde boruların dış yüzeyine helisel ve benzeri üç boyutlu yapılar eklenerek girdap kaynaklı titreşimlerin azaltılması veya engellenmesi sağlanmaktadır (Choi ve ark., 2008).

Bu çalışmadaki pasif akış kontrol yöntemlerinin uygulanmasından elde edilen sonuçlar sadece küre/küreler değil akışkanlar mekaniğinin birçok uygulamasında, titreşimlerin ve dinamik yüklerin istenmediği durumlarda girdap kontrolünde tasarımcılar için bir alternatif oluşturacaktır. Küreden belirli frekansta kopan girdap yapısının ve şiddetinin kontrol edilmesiyle girdapların koptukları küreye ve girdap caddesi üzerinde bulunan cisimlere uyguladıkları titreşimler ve dinamik yüklerin azaltılması sağlanacaktır. Böylece, küresel formdaki aerodinamik cisimlerin ve iz bölgesindeki cisimlerin dayanım ömürleri artmış olacaktır.

Küre mükemmel bir simetrik cisim olmasına rağmen, küre çevresindeki girdap yapısı çok farklı karakteristikler göstermektedir. Bu yapılar, Reynolds sayısına bağlı olarak simetrik akış, düzlemsel simetrik akış, ayrılma noktalarının düzensiz olması, daimi olmayan akış, periyodik girdap kopması, laminer art izi, kayma tabakası kararsızlığı, türbülanslı daimi olmayan art izi ve türbülans ayrılması şeklinde sıralanabilir. Sınır tabaka akışına maruz kalan kürenin etrafındaki ve küre art izi-levha üzerindeki sınır tabaka akışı etkileşimi altındaki akış yapısı ise daha karmaşık bir hale gelmektedir. Bu şartlardaki kürenin etrafındaki akış yapısının iyi bir şekilde anlaşılması uygulanacak akış kontrol yöntemlerinin seçilmesinde fayda sağlamaktadır.

Tez kapsamında uygulanan akış kontrol yöntemleri, küre yüzeyinde pürüz yapılarının oluşturulması, farklı silindirik çaplardaki o-ring'in küre yüzeyinde farklı açılara yerleştirilmesi ve küre merkezine akış doğrultusunda farklı çaplarda açılan deliklerle pasif jet oluşturmaya dayanmaktadır. Kürenin sınır tabaka içinde farklı açıklık oranlarına yerleştirilmesi, kürenin sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinin farklı kısımlarına maruz kalmasına ve küre ile levha arasında gerçekleşen jet akış yapısının değişmesine neden olmaktadır. Bu yüzden farklı açıklık oranlarında farklı kontrol

yöntemleri daha etkili olmaktadır. Uygulanan kontrol yöntemleri sayesinde herhangi bir kontrol yöntemi uygulanmadığı durumda küre yüzeyinden akış ayrılma açısı, girdap oluşum uzunluğu, türbülans şiddetine etkileri değerlendirilmiş, malzeme ve düşük sürükleme katsayından dolayı enerji tasarrufu sağlayabilecek akış kontrol yöntemlerinin yaygınlaşmasına da katkı sağlanabildiği düşünülmektedir.

Literatürdeki küre ile ilgili akışkanlar dinamiği çalışmalarının çoğu duman, boya teknikleri ve noktasal ölçüm yöntemlerine dayanmaktadır. Farklı yöntemlerle çözülmüş sayısal çözümler de mevcuttur. Ancak, son zamanlarda birçok sayısal benzeşim çalışmalarında yeni geliştirilen türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bu sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların doğrulanması için karşılaştıracakları akış fiziği, akış ayrılma açısı, iz bölgesi özellikleri, girdap oluşum uzunluğu, türbülans şiddeti gibi akış karakteristikleriyle ilgili deneysel veri eksikliği vardır. Bilgisayar kapasitelerinin yetersizliği ve çözüm yöntemlerinin yaklaşım aralığından dolayı yapılan çalışmaların çoğu orta seviyelerdeki Reynolds sayısı aralığında (2500-10000) olmaktadır. Küre etrafında akış yapısını inceleyen HAD çalışan araştırmacılar bu aralıkta güvenilir verilere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu çalışmanın temel amaçlarından biriside bu veri eksikliğini giderebilecek sonuçları bilim dünyasına kazandırmaktır. Böylece, HAD çalışanlara ve tasarımcılara faydalı bilgiler sunularak, problem çözümleme güvenilirliklerini artıracaklardır. HAD çalışmaları deneysel çalışmalara göre daha düşük maliyetlidir ve güvenilir sonuçlar ürettiklerinde daha yaygın kullanımları gerçekleştirilebilir.

Küre etrafında oluşan akışlar geometrik yapıdan dolayı daimi olmayan bir art izi bölgesi oluşturur. Bu nedenle, zamana bağlı ve üç boyutlu olarak araştırılması gerekmektedir. Bu araştırmada uygulanan Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemi sayesinde akış alanında aynı anda birçok noktada iki boyutlu hız ölçümlerinin yapılması ile akış fiziği hakkında detaylı bilgiler elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar akış yapısının temel karakteristikleri olan anlık hız vektörleri, girdap eş düzey eğrileri, Reynolds gerilmeleri, ortalama hızlar, hız bileşenlerin karelerinin kareköklerinin ortalamasının (rms) eş düzey eğrileri, girdap bileşenlerinin kareköklerinin ortalamasının (rms) eş düzey eğrileri, türbülans kinetik enerji yoğunluğu, girdap şiddeti, girdap oluşum uzunluğu, ortalama akım çizgilerinin dağılımının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Noktasal nicel ölçüm yapılan çalışmalarda ya da boya ile nitel olarak akışın görselleştirildiği çalışmalarda akış alanı içerisinde akım çizgileri elde edilememektedir. PIV ile belirli bir akış alanının nicel olarak ölçülmesi ile akım

çizgileri elde edilebilmekte bu HAD çalışmaları ile mükemmel bir karşılaştırma yapabilme imkanı sunmaktadır. Akış yapısının fiziksel olarak daha iyi anlaşılabilmesi için lazer ışını ile aydınlatıldığında görünür hale gelen Rhodamine 6G boyası kullanılarak akış görselleştirme de yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde kaynak araştırması yapılmış, küre etrafındaki akış yapısı, cisim-sınır tabaka etkileşimi ve küt cisimlerle ilgili pasif akış kontrol yöntemlerini kapsayan literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde deneylerin gerçekleştirildiği Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği Laboratuarındaki kapalı çevrim açık su kanalı ve PIV sisteminin kamera, lazer, bilgisayar donanımı ve yazılımları gibi elemanları tanıtılmıştır. Deneylerin gerçekleştiği akış şartları, serbest akım hızı, hidrodinamik olarak gelişmiş türbülanslı sınır tabaka özellikleri, kanalın türbülans yoğunluğu, deneyde kullanılan kürelerin özellikleri, kürelerin tutturma mekanizması tanıtılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarının nasıl analiz edildiği açıklanmıştır. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde ise ilk olarak pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısı Reynolds sayısının 2500 $\leq$Re$\leq$10000 aralığında ve küreyle levha arasındaki boşluğun 0$\leq$G/D$\leq$1.50 aralığında araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yukarda bahsedilen akış karakteristikleri açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiş, akış yapısına Reynolds sayısının ve küre ile levha arasındaki boşluğun etkisi belirlenmiştir. Küre etrafındaki akış yapısına uygulanacak akış kontrol yöntemlerini seçmek ve etkinliğini belirleyebilmek için ilk önce akış kontrolü uygulanmamış kürenin etrafındaki akış yapısının iyi bilinmesi gerekmektedir Elde edilen sonuçlarla anlaşılan temel akış yapısı küreye uygulanacak pasif akış kontrol yöntemlerinin akış yapısı üzerinde yapmış oldukları değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünün ikinci kısmında ise Reynolds sayısının Re=5000 değerinde küre etrafına takılan 2 mm ve 3 mm çapındaki (silindirik çap) o-ringin 45°, 50°, 55, 60° ve 70°'deki yerleşimleri için etkileri araştırılmıştır. Farklı çaptaki o-ringin farklı yerleşim açılarında, küre ile levha arasındaki açıklık oranına bağlı olarak akış yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünün üçüncü kısmında ise Reynolds sayısının Re=5000 değerinde küre ekvator eksenine farklı oranlarda açılmış deliklerden geçen pasif jet akışının küre art izindeki ve levha üzerindeki sınır tabaka akışı üzerindeki etkileri küre ile levha arasındaki açıklık oranına göre araştırılmıştır. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünün son kısmında ise üç farklı akış pasif akış kontrol yönteminin karşılaştırılması yapılmıştır. O-ringli küreler arasından 2 mm çapındaki o-ringin 55°'ye

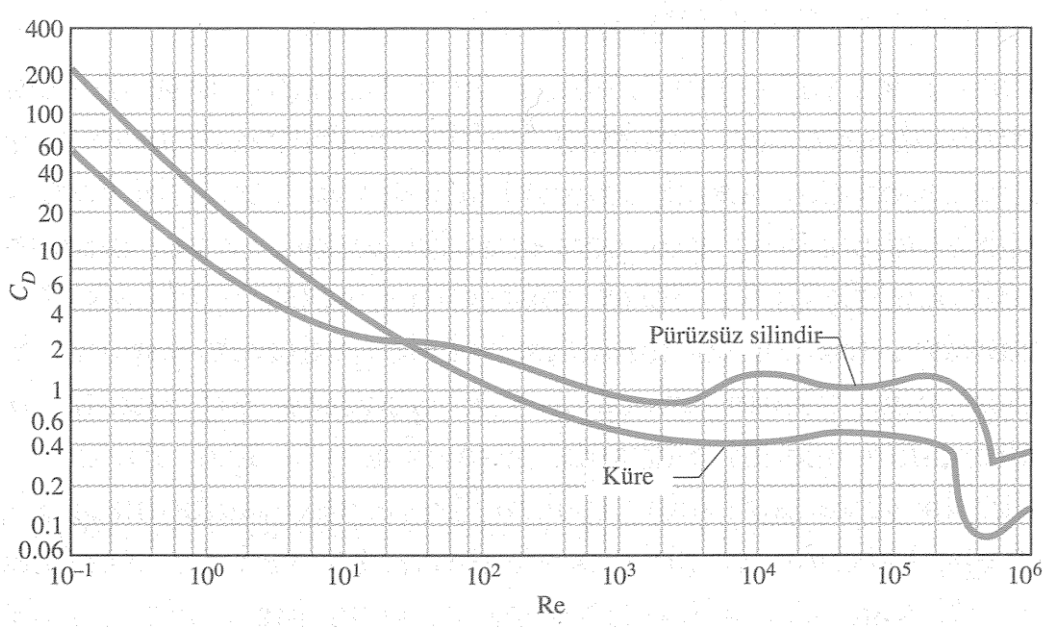
yerleştirildiği durum, delik küreler arasından ise delik çap oranının d/D=0.15 olduğu küre seçilmiştir. Üçüncü pasif akış kontrol yöntemi olarak ise yüzeyine pürüz yapıları oluşturulmuş küre seçilmiştir. Tezin sonuç bölümünde yapılan tez çalışması değerlendirilmiş, pürüzsüz küre ile levha arasındaki akış yapısının farklı açıklık oranları ve Reynolds sayılarındaki değişimi ve uygulanan pasif akış kontrol yöntemlerinin akış yapısı üzerinde meydana getirdiği değişim değerlendirilmiştir. Önerilerde ise mevcut çalışmadan elde edilen sonuçların mühendislik tasarımlarında, HAD çözümlemelerinin doğrulanmasında, mevcut türbülans modellerinin doğrulanmasında ve yenilerinin geliştirilebilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Mevcut çalışmaya ek olarak akış kontrolü uygulanmış ve uygulanmamış kürenin sürükleme kuvvetlerinin ölçülmesi, pasif jet akışı için farklı delik geometrilerinin ve yüzey pürüzlülüğü için farklı boyutlarda ve geometrilerde pürüzlülük elemanlarının denenebileceği belirtilmiş ve konuyla ilgili yapılabilecek başka çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

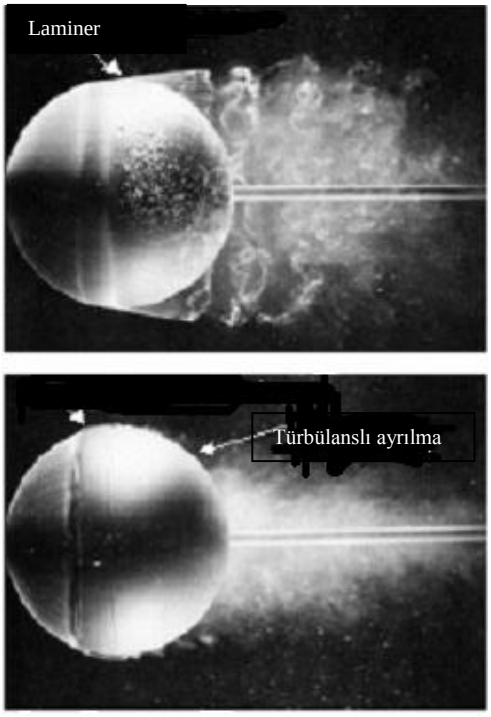
Küre mükemmel simetrik cisim olmasına rağmen, küre çevresindeki girdap yapısı çok farklı karakteristikler göstermektedir. Bu yapılar, Reynolds sayısına bağlı olarak simetrik akış, düzlemsel simetrik akış, ayrılma noktalarının düzensiz dönmesi, daimi olmayan akış, periyodik girdap kopması, laminer art izi, kayma tabakası kararsızlığı, türbülanslı art izi ve türbülans ayrılması şeklinde sıralanabilir. Küre etrafındaki akış, Reynolds sayısının 20-210 aralığında daimi simetrik bir yapı sergilemektedir. Bu simetriklik daha sonra bozulmakta ve Re=280'e kadar düzlemsel simetrik akış oluşmaktadır. Re= 280 değerinden sonra, daimi olmayan akış düzlemsel simetrik akış düzleminde oluşmaya başlar ve saç tokasına benzer şekilde kopan girdaplar periyodik olarak meydana gelmektir. Taneda (1956), Nakamura (1976), Wu ve Faeth (1993), Johnson ve Patel (1999), Leweke ve ark. (1999)'nın da çalışmalarında ifade ettiği gibi Reynolds sayısının 420-800 aralığında, simetrik olmayan akış oluşmakta ve daimi olmayan akış yapısı devam etmektedir. Belirtilen Reynolds sayısı aralığında laminer akış ayrılması ve art izi yapısını içeren küre etrafında birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Diğer yandan, Re=800 büyük değerlerinde büyük ölçekli düşük frekanslı girdap kopması ve küçük ölçekli yüksek frekanslı kayma tabakası kararsızlıkları akış doğasında baskın olmaktadır. Büyük ölçekli girdaplar koparak dalgalı form şeklini alır ve art izinin uzak bölgelerinde türbülanslı akış yapısı oluşturur. Sürükleme katsayısının (drag coefficient) Reynolds sayısı ile değişiminin pürüzsüz küre durumunda değişimi Şekil 2.1'de verilmiştir.

Reynolds sayısının kritik değeri olan $3.7x10^5$'de, sürükleme katsayısı aniden düşer. Bu küre yüzeyindeki sınır tabakanın düzenli laminer akış ayrılması, tekrar küre yüzeyinde birleşmesi ve türbülanslı ayrılması ile sonuçlanır. Kritik Reynolds sayısından sonra küre art izi tamamen türbülanslı olur. Reynolds sayısının 800-$3.7x10^5$ aralığı küre için kritik altı akış olup, kürenin sürükleme katsayısı bu aralıkta hemen hemen sabit değerleri alır ve küreden akış ayrılması laminer ayrılma şeklinde olur. Bunlara ek olarak, Kelvin–Helmholtz ayrılmış akış katmanları oluşur ve art izi türbülanslı olur. Kritik altı akış bölgesinde $Re=2x10^5$ laminer akış ayrılması küre ön yüzeyindeki durgunluk noktasından yaklaşık 80^o-90^o açıda küre yüzeyinde oluşur ve sürüklenme katsayısı yaklaşık 0.5'tir. Bu değerler Reynolds sayısından bağımsız olarak hemen hemen sabit kalır. Kritik akış bölgesinde ($Re=2x10^5<Re<Re=3.7x10^5$) sürükleme katsayısı C_d hızlıca 0.07 civarına düşer ve ayrılmış akış bölgesi küre arka yüzeyine

doğru kayar. Daha sonra Reynolds sayısındaki artışla, kritik üstü akış oluşur ve C_d biraz artar. Şekil 2.2'de laminer ve türbülanslı akış için duman ile elde edilen akış görüntüleri görülmektedir (Smits, 2000).

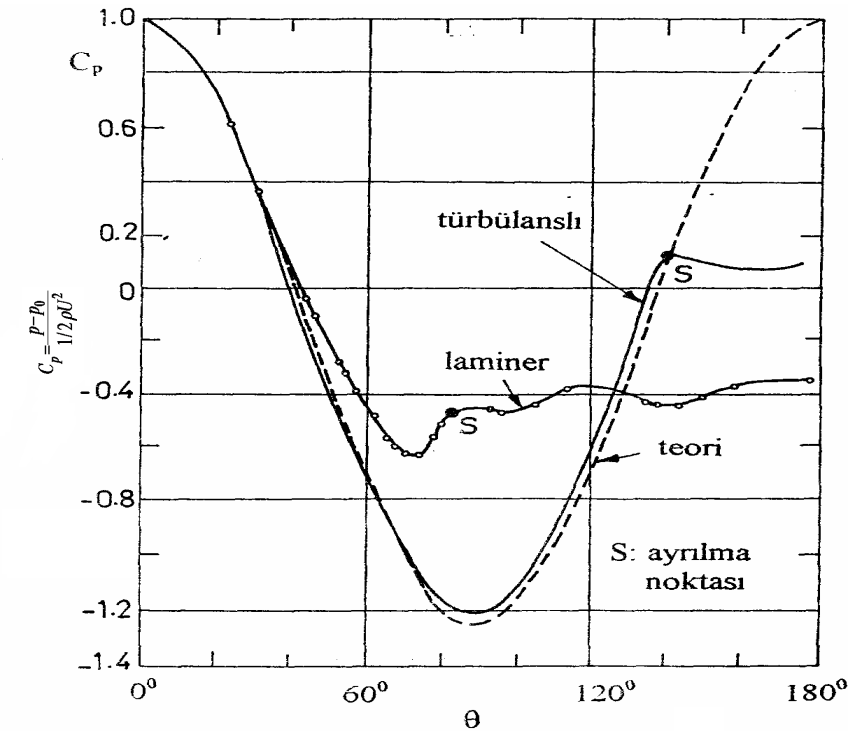


Şekil 2.1. Sürüklenme katsayısının (drag coefficient) Reynolds sayısı ile değişiminin pürüzsüz küre ve silindir durumunda değişimi (Cengel ve Cimbala, 2006)



Şekil 2.2. Küre etrafında laminer ve Türbülanslı akışta ayrılma (Smits, 2000)

Küre çevresindeki türbülanslı akışla ilgili yapılan deneysel araştırmaların çok azı kritik altı Reynolds sayısı rejiminde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan çoğu sıcak tel anemometresi kullanarak baskın girdap kopma frekanslarının ölçümü, belirlenmesi ve nitel akış görüntüleme metotları ile akış yapısının gözlenmesi üzerine odaklanmıştır. Küre çevresinde basınç değişimi Şekil 2.3'te laminer ve türbülanslı akış için verilmiştir.

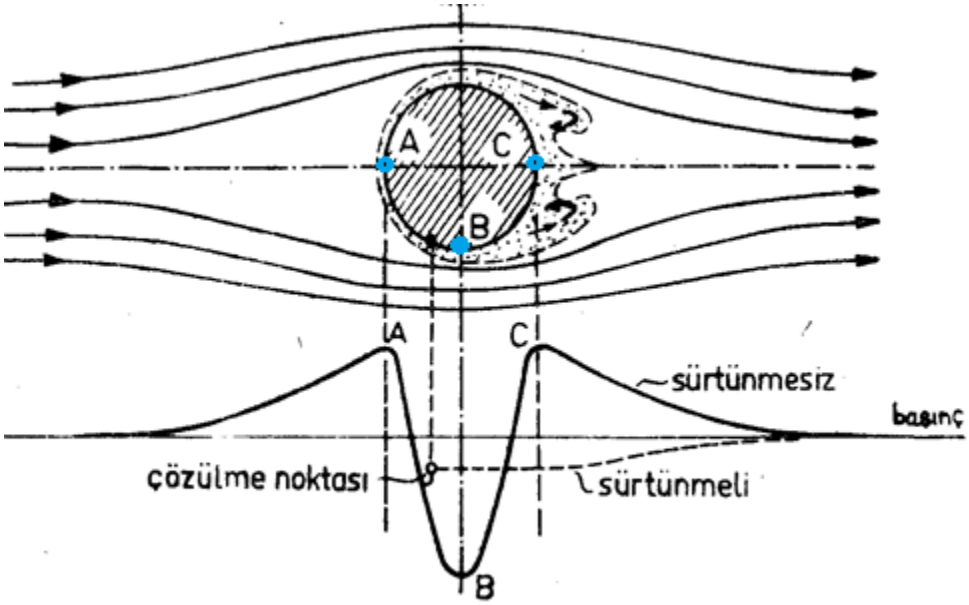


Şekil 2.3. Küre çevresinde basınç değişimi

Küre üzerindeki basınç katsayısının (C_p), küre yüzeyi boyunca değişimi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te deneysel ve teorik olarak gösterilmiştir. $Re<2.10^5$ için akışın laminer olduğu ve laminer akışın artan basınç gradyanı nedeni ile ayrılmaya daha meyilli olduğu ayrılmanın kürenin orta noktasına yakın bir yerde olduğu, $Re>2.10^5$ için akışın türbülansa geçmesi ayrılma noktasının daha ileride olduğu bu şekilde görülmektedir.

Sınır tabakadaki ayrılmayı incelemek için sabit hızla akan sıvı içerisine daldırılan küre çevresindeki akış incelendiğinde oluşan akış formu şu şekildedir. Akışkan küreye temas ettiğinde A noktasında hızı sıfır olur. Bu noktaya durma noktası (stagnation point) denir. A noktasından B noktasına kadar akış kesiti daraldığı için ideal akış bölgesinde Bernoulli denklemine göre hız (U) artacak basınç (P) azalacaktır. B noktasından itibaren kesit genişlediği için hız azalacak basınç artacaktır. B noktasından sonraki sınır tabaka içerisindeki akışkan parçacığı düşünüldüğünde sürtünme

kuvvetlerinin etkisinde bulunan bu parçacığın hareketi basınç kuvvetlerinin etkisiyle daha da zorlaşacaktır. C noktasından itibaren akışkanın bir kısmı esas akım doğrultusunda ilerlemeyip ters bir akım oluşturacaktır. Bu olaya sınır tabakanın ayrılması denir.



Şekil 2.4. Küre etrafındaki basınç değişimi

Taneda (1965)'nın deneylerinde, katı duvar yakınında durgun su içerisindeki bir silindir sabit hızla çekilmiş, bu yüzden silindir etrafındaki akıma taban sınır tabakası etkisi olmamıştır. Taneda (1965), silindirle katı cidart arasındaki boşluğun silindir çapına oranının G/D=0.1 değerinde silindirin sadece üst kısmından girdap kopması oluştuğunu, G/D=0.6 değerine gelindiğinde ise silindirin her iki yüzeyinden de düzenli girdap kopması meydana geldiğini bildirmiştir.

Maxworthy (1969) kürenin ön yüzeyine akışı tetikleyici bir tel yerleştirerek telin sürükleme katsayısına etkisini incelemiştir. Achenbach (1972, 1974) boya metodu kullanarak küre art izi girdap yapısını Re=1000 için gözlemlemiş ve Re= 10^5-10^6 aralığında yüzey sürtünmesini ölçerek akış ayrılma açılarını ölçmüş, küre yüzey sürtünmesinin akış ayrılmasına etkisini araştırmıştır. Werle (1980), Re=16000 için boya kullanarak su kanalında yaptığı deneyde küre arkasındaki dönümlü bölgeyi ve halka şeklindeki girdabın kayma tabakasındaki kararsızlığını gözlemlemiştir. Kim ve Durbin (1988) küre arkasındaki türbülanslı art izinde akış ayrılma tabakasının küçük ölçekli kararsızlığı ve art izinin büyük ölçekli kararsızlığı ile ilişkili olmak üzere iki frekans

modu bulmuşlardır. Sakamoto ve Haniu (1990) ve Kiya ve ark. (2001) Reynolds sayısının 300-40000 aralığında Strouhal sayısına göre küre art izi yapısını sınıflandırmışlardır. Girdap tüp titreşimlerini ve girdap kopmasının simetrik olmayan periyodik girdap kopması içermesinin yanı sıra düzensiz dönen girdap ayrılma açısını, silindirik şekilli kayma tabakası kararsızlığını ve art izinin dalgalı şeklinde ilerleyen düzensiz kopmalarını gözlemlemişlerdir. Küre art izi ile ilgili önceki çalışmaların çoğu (Achenbach 1972, 1974; Werle´ 1980; Kim ve Durbin 1988; Sakamoto ve Haniu 1990) noktasal ölçüm metotları ve geleneksel boya ile akış görselleştirme teknikleriyle küre art izinin karakteristiklerini araştırmıştır. Birçok araştırmacı, değişen Re sayısıyla küre etrafında oluşan akışın davranışları üzerine gözlemsel yöntemlere dayanan nitel ölçümler yapmışlardır. Ancak, bu araştırmalar, boya, hidrojen kabarcık yöntemi gibi görsel ve noktasal ölçüm yapan Lazer Dopler Anemometresi (LDA), sıcak tel (Hot-Wire) anemometresi (HWA) gibi deneysel yöntemler ile yapılmıştır. Küre etrafındaki akış yapısı Reynolds sayısına bağlı olarak karmaşık bir yapı oluşturmaktadır. Lee (1979), Tsuji ve ark. (1982), Sakamoto ve Haniu (1995), Wu veark. (1994), Liang ve ark. (1996) ve Shirayama (1992) boya ve duman deneyleri ile küre çevresindeki akışın tek ve yan yana dizimi durumlarını değişik Reynolds sayılarında araştırmışlardır. Küre etrafındaki akışın yapısını detaylı olarak PIV yöntemiyle benzer şekilde inceleyen çalışmalar literatürde birkaç araştırma ile sınırlı kalmıştır. Ancak, diğer yöntemler kullanılarak küre etrafındaki akışın yapısını inceleyen çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Yapılan çalışmaların yıllar boyunca devam etmesinden de anlaşıldığı gibi hem akış yapısının hem de cismin üç boyutlu olmasından dolayı küre etrafındaki akış yapısının incelenmesi araştırmacıların günümüzde de ilgi odağı olan konulardan biridir.

Achenback (1972), Reynolds sayısının $5x10^4 - 6x10^4$ aralığında, pürüzsüz bir yüzey durumu için küre etrafındaki akışları incelemiştir. Toplam sürükleme direnci, yerel statik basınç ve yüzey sürükleme katsayısı %0.45 türbülans şiddetinde ölçmüştür ve sonuçlarını literatürdeki değerlerle karşılaştırılmıştır. Laminer sınır tabakadan türbülanslı sınır tabakaya geçişte oluşan akış ayrılması ve sürtünme kuvvetinin Reynolds sayılarına bağlılığı ile ilgili bilgileri açıklamıştır.

Achenbach (1974), küre etrafında daimi olmayan akış yapısını incelemiş ve kürelerden kopan girdaplar üzerine Reynolds sayısının 400 değerlerine kadar çalışmıştır. Strouhal sayısının Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyon olduğunu suda yaptığı deneylerle doğrulamıştır. Sıcak tel ölçümleri ile akış yönüne göre 75 derecelik bir dairede farklı noktalarda eş zamanlı kayıt edilen sinyaller ve küreden kopan

girdaplar arasında bir faz farkı oluştuğunu göstermiştir. Küre etrafında girdap ayrılması ile akışa ters yönde dönmelerin oluştuğunu vurgulamış ve bunu deney sonuçlarıyla yorumlamaya çalışmıştır.

Taneda (1978), bir rüzgar tünelinde Reynolds sayısının 10^4-10^6 aralığında üç farklı akış görselleştirme metodu kullanarak bir kürenin art izi yapılarını incelemiştir. Belirtilen Reynolds sayısı aralıklarında art izinin çok dalgalı bir form oluşturduğunu, bu formun akım yönünde küre çevresinde bir girdap oluşturduğunu belirlemiştir. Art izinin küre çapının 4.5 katı değerlerine kadar devam ettiğini bulmuştur. Küre içersinde oluşan girdapların, kendi çevresinde dönerek küreden ayrıldığını ve gelişerek devam ettiğini belirlemiştir.

Okamoto (1980) kürenin bir levha yüzeyi ile temas etmesi durumunda art izi yapısı ve küre üzerindeki aerodinamik kuvvetlerle ilgili araştırmalar yapmıştır.

Zdravkovich (1980), düzenli girdap kopmalarının başlamasıyla birlikte silindir ile duvar arasında kuvvetli bir boşluk akımı meydana geldiğini, buna bağlı olarak akış ayrılma bölgesinin kaybolduğunu belirtmiştir.

Yutaka ve ark. (1982), iki küre arasındaki akışın dinamik etkileşimini iki fazlı akış içeren temel bilgileri elde etmek için gerçekleştirmişlerdir. Reynolds sayısının 1000'den küçük değerleri için küreler yan yana veya arka arkaya yerleştirilmiştir. Kürelerin arkasında oluşan akış yapısını, yoğunluğu arttırılmış süt kullanılarak detaylı olarak gözlemlemiş ve sonuçları yorumlanmışlardır.

Grass ve ark. (1984), silindir etrafındaki akımı üç farklı sınır tabakası kalınlığında, silindirlerle katı cidar arasındaki boşluğun silindir çapına oranının G/D=0.28, 2.6, 6.0 ve iki farklı Reynolds sayısında, Re=1785, 3570, incelemişlerdir. Boşluk oranının G/D'nin St'ye etkisinin sınır tabakası kalınlığından bağımsız olduğunu ve boşluk oranının 2.0'den küçük değerler alması halinde St'de aşamalı bir artış oluştuğunu belirtmişlerdir. G/D=0.28 için G/D=0.75 değerinde oluşan en yüksek St'yi daha büyük boşluk oranlarında elde edilenden %5-10 daha büyük bulmuşlar ve G/D<0.3 için girdap kopmasının oluşmadığını bildirmişlerdir.

Mehta (1985), spor toplarının (beysbol, tenis, kriket) aerodinamiği hakkında araştırma yapmıştır. Bu spor toplarının havadaki izlediği yolu ve kendi ekseni etrafında dönme hareketinin magnus etkisini incelemiştir. Magnus etkisinden dolayı normalde simetrik olması gereken akış ayrılması asimetrik hale gelmektedir. Ayrıca, kullanmış olduğu spor toplarının farklı yüzey formlarının etkilerini birbiriyle kıyaslamıştır.

Wei ve ark. (1988), sabit bir voleybol topu üzerinde girdaptan dolayı oluşan dinamik yüklemeyle ilgili rüzgar tünelinde deneyler yapmışlardır. Topu geçen akış yapısını görüntülemişler ve gerilim ölçer (strain gage) balans sistemi kullanarak aerodinamik yükü ölçmüşlerdir. Voleybol topu üzerindeki ayrılmayı sıcak film (hot-film) metodu ile belirlemişlerdir. Deneysel sonuçları değişken kuyruk girdap sisteminin hareketi altında, ayrılma bölgesinin değişebildiğini göstermiştir. Sürüklenme ve dik kuvvetlerin çalkantı sonuçları, voleybol topunun dikiş yerinin akış yönüne göre simetrik veya aksi simetrik olmasına bağlı olmaksızın ortalama sürüklemenin mertebesiyle aynı oranda olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sakamoto ve ark. (1989), Reynolds sayısının 300 ile 60000 arasındaki değerleri için üniform akış durumunda girdap kopmasını deneysel olarak araştırmışlardır. Düşük hızlı rüzgâr tünelinde sıcak tel tekniği kullanarak, yaptıkları ölçümlerle kürelerden kopan girdapların frekansını ölçmüşlerdir. Akış görüntüleme deneylerini su kanalında yapmışlardır. Strouhal sayısının Re ile değişimini dört bölgede sınıflandırmışlardır. Saç tokası şeklindeki girdap döngüsünün Re değerinin 300 civarında olması durumunda küreden koptuğunu Re sayısının değeri 800 civarına eriştiğinde ise art izi bölgesi yapısının görülmediğini ve girdap döngüsünün çok hızlı yayıldığını gözlemlemişlerdir.

Kim ve Pearlstein (1990), küre etrafında simetrik olmayan daimi akış için $120 < Re < 300$ aralığında akışın kararsız olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Daha yüksek Re sayılarında zamana bağlı simetrik akış olmasının sonucunda simetrik girdap kopmasının arttığını niteliksel olarak kayıt etmişlerdir. Daimi simetrik olmayan akışta doğrusal kararlılık sayısal hesaplama yöntemiyle yaptığı araştırmada kritik Re sayısı ve Strouhal sayısının deneysel çalışma sonuçlarıyla uyumlu olduğunu bulmuşlardır.

Taniguchi ve Miyakoshi (1990), silindir etrafındaki akıma taban sınır tabakasının etkisini bulmak için Re=94000 değerinde ve $0.34 \leq G/D \leq 1.05$ aralığında girdap kopması frekansları ile silindire gelen kuvvetleri incelemişlerdir. Düzenli girdap kopmalarının bastırıldığı minimum boşluk oranının sınır tabakası kalınlığının artmasıyla doğru orantılı olarak arttığını bulmuşlardır. Grass ve ark. (1984)'na benzer şekilde, G/D'nin küçük değerlerinde silindir alt yüzeyinden kopan girdapların, duvar sınır tabakasından etkilenerek bozulmasının, girdap kopmasını engellediğini bildirmişlerdir.

Patnaik ve ark. (1992) Reynolds sayısının $3.62 \times 10^3 \leq Re \leq 6.45 \times 10^4$ aralığında üniform olmayan akış giriş şartlarında sınır tabaka üzerine yerleştirilen küre çevresindeki sürükleme kuvvetini ölçmüşlerdir.

Shirayama (1992) boya ve duman deneyleri ile küre çevresindeki akışın tek ve yan yana dizimi durumlarını değişik Reynolds sayılarında araştırmıştır.

Wu ve Faeth (1993), sabit tutulan kürelerden oluşan art izlerini su ve gliserin karışımı akışkanın bulunduğu bir kanalda Reynolds sayısının 30-4000 aralığında çalışmışlardır. Boya izlerinin lazerle aydınlatılmasına dayanan yöntemle ilgili akış alanı görüntülenmiş ve akım yönündeki hızları ise lazer ölçümüyle bulmuşlardır. Kürenin arka tarafında akışın sirküle ettiği bölgede $Re<200$ için simetrik ve kararlı, $200 \leq Re \leq 280$ için simetrik olmayan kararlı akış ve $Re \geq 280$ ise girdap kopmasıyla birlikte daimi olmayan kararsız akış oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Üç art izi bölgesi tanımlamışlardır. Bunlar küreye yapışık bölge, girdap kopması olduğunda hızlı bir şekilde girdap yapısının azaldığı bölge ve karışık düzenli art izi bölgeleridir. Wu ve Faeth (1994) diğer bir çalışmasında türbülans yoğunluğunun %4 olduğu bir ortamda küre art izi akış yapısını $135<Re<1560$ aralığında araştırmışlardır. Türbülans etkisinden dolayı arttırılan viskozite etkisinin akım yönündeki ortalama hızların laminer kalmasına katkı sağladığını belirtmişlerdir. Türbülans viskozitesinin etkinliğinin art izi ölçüm yeri ve uzunluk ölçeğinden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. İncelediği Reynolds sayısı aralığını düşük, yüksek ve geçiş bölgesi $300<Re<610$ olarak üçe ayırmış ve geçiş bölgesindeki türbülans sürtünmesindeki artışın daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Cheng ve ark. (1994), $0 \leq G/D \leq 5.0$ aralığında ve $Re=500$ değerinde duvar yakınındaki bir silindir etrafındaki akımı incelemek için akım görüntüleme ve girdap kopması frekansı ölçümleri yapmışlardır. G/D'nin 1.25'ten küçük değerlerinde sadece silindirin duvardan uzak yüzeyinden ayrılan girdap yolu oluştuğunu bildirmişlerdir. $1.25<G/D<2.0$ için simetrik olmayan girdap kopması ile oluşan akış yapısı baskın olsa da, hem simetrik hem de simetrik olmayan girdap kopması akış yapılarını gözlemlediklerini bildirmişlerdir.

Barker ve ark. (1997), küresel bir küt cismin akışa maruz kalan kısmının arkasında oluşan küreye yakın art izini iki boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemiyle incelemişlerdir. Hız ve girdap alanlarının belirtilen bölgede Re değerinin 202 ve 403 değeri için hesaplamışlardır. Girdap kopmasının $Re=403$ için oluştuğunu $Re=202$ için ise gerçekleşmediğini video görüntüleme, akış yolunun fotoğrafının çekilmesi (streak photos) ve sıcak tel anemometresi ile yaptıkları ölçümlerle de desteklemişlerdir. Sonuçta, niteliksel yaptıkları ölçümleri için daha detaylı araştırma yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Ryu ve Lee (1997), girdap döngüsü ve sabit bir küre arasındaki etkileşimden oluşan akıştaki girdap bozma etkisini incelemek için üç boyutlu sıkıştırılamaz akış için analitik çalışma yapmışlardır.

Williamson ve Govardhan (1997), üniform bir akışın olduğu kanala küreyi esnek olarak bağlamışlardır. Akışın etkisiyle kürenin akış yönünde ve art izi bölgesinin etkisiyle akış yönüne zıt yönde titreştiğini ve yaklaşık iki küre çapı kadar hareket ettiğini kayıt etmişlerdir. Bunun sonucunda akış içerisindeki kürenin titreşimli ve titreşimsiz (sabit küre) deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kürenin serbest titreşimli olması durumunda sürüklenme kuvvetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Akış yönünde ve akışa 90^o yönündeki doğal frekansların birbirine eşit olmadığını, akış yönündeki frekansın kürenin titreşim frekansı ile aynı olmasına karşın diğer yöndeki frekansın doğal frekansın iki katı olduğunu deneysel olarak elde etmişlerdir. Araştırma sonuçları çok küçük yapısal sönümlemeler için yapının verdiği cevabın büyüklüğünün boyutsuz doğal frekansın (Strouhal sayısı) fonksiyonu olarak düşünebileceğini, sadece kütle oranının ve art izi bölgesi mesafesinin doğal frekansı etkilediğini göstermektedir.

Alassar ve Badr (1997), salınım yapan küre üzerindeki viskoz akış problemini asimetrik akış kabulü yaparak sıkıştırılamayan akışkanlar için Navier-Stokes denklemini Legendre sonlu serileri ve fonksiyonları aracılığıyla sayısal olarak çözmüşlerdir. Akış özelliklerine Strouhal sayısı ve Reynolds sayısının etkilerini araştırarak mevcut deneysel ve potansiyel akış çözümleriyle karşılaştırmışlardır. Sürüklenme katsayısının, yüzey girdabı ve basınç dağılımı sonuçlarını ayrılma uzunluğu ile beraber sunmuşlardır.

Nunez ve Voigt (1999), girdap yapısı ve ilişkili yapıların dinamiğini analiz etmek için lazerli aydınlatma yöntemi ve üç boyutlu parçacık görüntü yöntemiyle Re değerinin 100 ile 700 aralığında küre arkasındaki art izi bölgesini kapsayan deneme ölçümleri yapmışlardır. Araştırmalarının girdap döngü uzunluğunun ve dinamik yapısının tanımlanması için nicel ve niteliksel sonuçlar sağladığını belirtmişlerdir. Daha detaylı ölçüm ve analizler yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Johnson ve Patel (1999), daimi ve daimi olmayan laminer akışta Re sayısı 300'e kadar sıkıştırılamaz viskoz akışın küreyi geçmesi durumlarında akışın yapısını sayısal olarak hesaplamışlar ve sonuçların doğruluğunu boya enjeksiyonu ile yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sayısal araştırmalarını daimi simetrik olmayan bölge, daimi simetrik bölge ve daimi olmayan bölgede ve bu bölgelerin arasındaki geçişlerin kararlı durumdan kararsız duruma gelişmesinin nasıl olduğu üzerine

yoğunlaştırmışlardır. Sayısal hesaplamada ilk ayrılmanın Re=20'de olduğunu ve bunun da önceki çalışmalarla uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Re=270 değerinden sonra akış yapısında kararsızlığın arttığını belirlemişlerdir. Sayısal ve görsel araştırma sonuçlarından buldukları karmaşık akış yapısının önemli olduğunu ve bunun anlaşılması için daha detaylı araştırmalar gerektiğini vurgulamışlardır.

Lei ve ark. (1999), düz bir plaka üzerindeki farklı sınır tabakası kalınlıklarında, pürüzsüz dairesel bir silindire gelen hidrodinamik kuvvetleri ve girdap kopmalarını irdelemişlerdir. Ayrıca, basınç dağılımına; duvarın yakınlığının, sınır tabakası kalınlığının ve sınır tabakası kalınlığı içerisindeki hız değişiminin etkilerini $13000 \leq Re \leq 14500$ ve $0 \leq G/D \leq 3.0$ aralığında deneysel incelemişlerdir.

Sungsu ve James (2000), küre arkasındaki art izi bölgesinde kayma gerilmesinin etkilerini araştırmak için üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal simülasyon yapmışlardır. Zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerini değiştirilmiş açık (explicit) zaman integrasyonu şemasıyla Reynolds sayısının 20 ile 500 aralığında çözmüşlerdir. Sonuçlarının mevcut sayısal ve deneysel sonuçlara çok yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Suryanarayana ve ark. (2000), su kanalında ve rüzgar tünelinde yaptıkları deneylerde küre üzerindeki doğal vantilasyonun sınır tabaka ayrılması ve art izi girdap kopması karakteristikleri üzerindeki etkisini $6x10^3$-$6.5x10^5$ Reynolds sayısı aralığı için araştırmışlardır. Kullandıkları kürenin çapı 200 mm küre ekvatorundan geçecek deliğin çapı ise 30 mm'dir. Kritik altı Reynolds sayılarında ($Re<2x10^5$) vantilasyonun laminer sınır tabaka ayrılmasının gerçekleştiği bölgede çok az bir aşağı akım değişimine neden olduğunu ve girdap kopma frekansında önemli bir değişimin olmadığını belirtmişledir. Süper kritik Reynolds sayılarında ($Re<4x10^5$) ise hiçbir ayrık girdap kopma frekansı bulunamamıştır. Bununla birilikte, bütün frekanslarda art izi kararsızlığında büyük düşüşler olduğunu belirtmişlerdir. Art izi kararsızlığının düşmesiyle toplam sürüklenmedeki düşmenin bir birleriyle olan tutarlılığını vurgulamışlardır.

Tomboulides ve Orszag (2000), sabit bir küreyi geçen sıkıştırılamaz viskoz akışkanın sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Çalışmalarında Re sayısının artmasıyla oluşan akış geçişleri ve bunların fiziksel mekanizmalarını tanımlamayı amaçlamışlardır. Silindirik ve kartezyen koordinatlarda karışık spektral eleman Fourier spektral yöntemlerini içeren uygulamalar geliştirmişlerdir. Paralel bilgisayarlar kullanarak çözümler yapmışlardır. Sonuçta, kürenin arkasındaki akışın geçiş bölgesinde doğrusal ve üç boyutlu daimi akış alanının düzlemsel olarak simetrik olduğunu bulmuşlardır.

Düşen küre ve doğrusal kararlılık analizlerini içeren sonuçların literatürde yapılan deneysel gözlemlerle uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça akıştaki tek frekansa sahip olan girdap oluşumunun düzlemsel simetrisinin bozulduğunu ve karmakarışık bir akış yapısının oluştuğunu bulmuşlardır. Silindirdeki kayma tabakasına benzer küçük boyutlu Kelvin-Helmholtz kararsızlıklarının (instability) devam ettiğini belirlemişlerdir.

Thompson ve ark. (2001), kürenin art izinin laminer akıştan türbülanslı akışa geçişte simetrinin bozulmasındaki değişimleri Re=272 değeri için sayısal olarak araştırmışlardır. Başlangıçta Re=272 için düzenli geçişin oluştuğu iki adet akım yönünde girdabın meydana geldiği daha sonra akışta Holf ayrılması ile ikiye bölünmenin geliştiği arz izi üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu durumda küreden oluşan kopma girdapları ve kuyruk (trailing) girdaplarının karmaşık etkileşimlerinin varlığını bulmuşlardır. Her iki geçiş için Landau modelini kullanarak hesaplamalar yapmışlardır. Sonuçları önceki yapılan gözlemsel deneylerle karşılaştırmışlar ve uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Kiya ve ark. (2001), küre ve dairesel diskin yakınında oluşan art izi bölgelerinin girdapsal yapısı ve kararsızlıkları üzerine yapılan araştırmaları içeren bir derleme yapmışlardır. Lineer üniversal kararsızlık analizinin küre art izinde düzenli ve Holf bölünmelerinin kritik Re sayısında elde edildiğini, bunun da sayısal (Direct Numerical Simulation-DNS) çözümlemeler ve deneylerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Küre ardında saç tokası girdaplarındaki kopmanın boyutsuz frekansını ifade eden Strouhal sayısının Re sayısına bağlı olduğunu ve laminer akıştan türbülanslı akışa geçişler gibi değişimleri yaptığını ifade etmişlerdir. Yüksek Re sayılarındaki girdap yapısı hakkında bilgilerin hala açıklanmadığını ve yüksek Re için detaylı deneyler ve sayısal araştırmalar yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Schouveiler ve Provansal (2002), yapmış oldukları deneysel çalışmada, üniform akış içerisindeki bir kürenin arkasında küre yüzeyinden periyodik olarak koparak oluşan girdap art izlerinin ölçümünü, tek noktada ölçüme dayanan Lazer Doppler Anemometresi ölçme metodu ile yapmışlardır. Ayrıca, değişik Reynolds sayıları için akış yönüne paralel hızdaki dalgalanmaların frekans ve genliklerini belirleyen deneyler yapmışlardır. Akış yapısında oluşan mekanizmaları teorik sonuçlarla karşılaştırarak yorumlamaya çalışmışlardır. Sonuç olarak, girdap ve hız değerleri ile ilgili daha detaylı ölçümler yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Constantinescu ve Squires (2003), sayısal olarak küre çevresindeki akışı simüle etmiş ve çeşitli türbülans modelleriyle karşılaşmışlardır.

Hatipoğlu ve Avcı (2003), düzenli bir akıntı durumunda kanal tabanı üzerinde veya kanal tabanına yarı gömülü halde bulunan bir silindir etrafındaki akımı Reynolds sayısının 13000 ve 26000 aralığında araştırmışlardır. Silindirin gömülme derinliğinin çapa oranının farklı değerleri için silindirin çevresindeki ayrılma bölgelerinin uzunlukları ile akım alanının özelliklerini deneysel ve teorik olarak belirlemişlerdir.

Mattner ve ark. (2003), sabit çaplı bir boru içine yerleştirilmiş küre için yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, Re sayısının 1100 değeri için akıştaki girdap dönmesi (swirling vortex) arttıkça küre arkasında oluşan ayrılma bölgesinin uzunluğunun azaldığını belirtmişlerdir. Bu azalmanın akıştaki kararsızlığı ve yük etkisini artırdığını ifade etmişlerdir. Teorik çalışma ve deneysel çalışmalar arasında uyumlu bir sonuç elde edilmesi, özellikle akışın girdap etkisiyle ayrılma noktasının tespiti için, çok hassas deney yapılması gerektiğini tavsiye önermişlerdir.

Aoki ve ark. (2003a), kauçuk beysbol topunun kaldırma ve sürükleme gibi aerodinamik özelliklerini, pürüzsüz yüzeye sahip küre ve farklı yüzey yapıları olan kürelerin karşılaştırmasını deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Akım fonksiyonlarının takip edilmesini (spark tracing) içeren ölçme metodu kullanarak nicel hız dağılımını ölçmüşlerdir. Beyzbol topundan dolayı oluşan akış yapıları ve küre çevresindeki akış mekanizmasını açıklamışlardır. Aoki ve ark. (2003b), golf topunun hareket halindeki özelliklerini; topun uçma hızı, dönme frekansı ve yüzeyde oluşturulan gamzelerin (yüzey pürüzlülüklerinin) etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Test ettikleri topa kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin etkisini üç parçalı yük hücresi (load cell) kullanarak çeşitli Reynolds sayıları, dönme hızı oranı, gamzelerin sayısı ve derinliğine bağlı olarak ölçmüşlerdir. Küre etrafındaki akışı yağ film metodu kullanarak gözlemlemişler ve sabit küre etrafındaki akışı ise PIV metoduyla araştırmışlardır. Sürükleme ve kaldırma katsayılarındaki değişimleri sabit ve dönen küre için akış yapısını dikkate alarak yorumlamışlardır.

Jeon ve ark. (2004), $Re=10^5$ için küre yüzeyindeki yarıktan periyodik olarak emme ve üfleme yaparak sürükleme direncinin düşürülmesi için deneyler yapmışlardır. Üfleme veya emme frekansını doğal girdap frekansının üçte biri mertebesinde almışlardır. Sürükleme direncinin %50 mertebesinde azaldığını bulmuşlardır. Daha düşük frekanslarda sürükleme direncindeki azalmanın önemsiz derecede olduğunu ifade etmişlerdir. Küre arkasındaki ters akış bölgesinin önemli derecede azaldığını ve golf

topu durumundaki pürüzlülük etkisine benzer bir sürükleme direnci değişimin oluştuğunu ifade etmişlerdir. Akışa verilen enerji frekansının kritik frekans değerinden daha düşük olduğundan sürükleme katsayısının kontrol olmayan küreye göre yaklaşık sabit veya biraz düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Yüksek frekansta akışa kuvvet uygulanması ile oluşan akıştaki bozulmalar sınır tabakanın içerisini büyütmekte ve küre üzerinde laminer sınır tabaka bölgesindeki akış ayrılmasını ertelemektedir. Kayma tabakası boyunca serbest akış bölgesinden art izine olan kütle ve momentum transferi ile akışın küre yüzeyine doğru hareketi sağlanmakta ve bu da akışın tekrar yüzeyle birleşmesi ile sonuçlanmaktadır. Böylece, küre yüzeyinde ayrılma kabarcığı oluşmakta ve yüzeyden akış ayrılması ertelenmektedir.

Alammar (2004) 43 mm çaplı bir kürede 243 adet emme ve üfleme delikleri olan veya 245 adet pürüzlü elemandan oluşturulan golf topu çevresindeki akışı simüle etmek için Spalart ve Allmaras türbülans modelini kullandı. Üfleme ve emme yapılan deliklerin çapı 0.3 mm ve pürüzlülük elemanının çapı ise 3.7 mm'dir. Simülasyon sonucu pürüzlülük elemanı içerisindeki akışın kararlı bir girdap yapısı ortaya çıkardığını açıkladı. Reynolds sayısının $Re=2x10^5$ ve buna karşılık gelen Ma=0.2 değeri için sürüklenme katsayısında %52 oranında azalma olduğunu belirtmiştir.

Vukman (2004) LDA sonuçlarını kürenin üç farklı durumu (pürüzsüz, akışı tetikleyici tel ve yüksek türbülanslı serbest akış) için sunmuştur. Deneyleri rüzgar tünelinde Re=51500 ve Re=48000 değerlerinde yapmıştır. Akış ve türbülans özelliklerinin üç durumda önemli oranda değiştiğini belirtmiştir. Yüzeye ince tel yerleştirerek yaptığı deney sonuçlarının küre yüzeyindeki ayrılma noktasının küre yüzeyinde ileriye doğru kaydığını ve yüzeydeki sınır tabakada bir geçişin olduğunu göstermiştir. Üç durumu karşılaştırdığında en düşük Reynolds gerilme değerini küre yüzeyine akışı tetikleyici tel durumunda bulmuştur.

Jared ve ark. (2005), 3-D stereoscopic PIV kullanarak, akış cidarından kürenin çapının 1, 2 ve 3 çap kadar uzak mesafede durması ve cidara doğru hareket etmesi durumlarında akış alanlarını incelemişlerdir. Çalışmalarını Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanlar için yapmışlar ve böylece değişken viskozite etkisi ve elastisitenin (variable shear viscosity, elastic) akış yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı akışkan çeşitleri ve kürenin cidardan belirli mesafelerden düşme durumları için akış yapısında önemli farklılıklar oluştuğunu vurgulamışlardır. Akış alanı yapısının kürenin cidardan bulunduğu mesafenin fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir.

Giwoong ve ark. (2006), Re= 3700 ve 10000 değerleri için sayısal benzeşim (LES) yöntemi kullanarak küre üzerindeki akış yapısını araştırmışlardır. Reynolds sayısı arttıkça türbülanslılığın arttığını belirtmişlerdir.

Choi ve ark. (2006) literatürde küre yüzeyinde gamze oluşturma ile sınır tabakada enerjisi artırılmış girdap üretimi ile ilgili bilgilerin Bearman ve Harvey (1976 ve 1993) tarafından sunulduğunu ifade etmiştir. Choi ve ark. (2006) golf topundaki gamzelerle sürüklenme katsayısındaki azalmayı gamze yüzeylerinde akım yönündeki hızları ölçerek araştırmıştır. Gamzelerin akışta yerel ayrılmalara neden olduğunu ve kayma tabakalarında kararsızlığı tetiklediğini ve bunun da büyük türbülans yoğunluğu üretimi ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir. Golf topu gibi gamzeli kürede düşük sürüklenme katsayısı oluşmasının nedeninin gamzeler içinde ayrılma kabarcıklarının oluşması ve akıştaki ayrılmanın ertelenmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrılma kabarcıklarının üretilmesi, küre yüzeyinden ayrılma ve tekrar birleşmede oluşan kapalı çevrim akım çizgileri kayma tabaka kararsızlığı etkisindeki küt cisimlerde sürüklenme katsayısındaki azalmanın akış kontrol stratejisi için önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Yun ve ark. (2006), Re=10000 için LES metoduyla küre art izindeki kayma tabakasındaki kararsızlığı ve girdap yapısının dönmesini araştırmışlardır. Bununla birlikte, bu sayısal benzeşimlerden elde ettikleri sonuçları doğrulamada güçlük çekmektedirler. Reynolds sayısının 10000 gibi kritik altı akış bölgesinde akış ayrılma açısı, dönümlü akış bölgesi uzunluğu ve türbülans istatistikleri gibi deneysel verilerin eksikliği nedeniyle sonuçlarını karşılaştıracak bilgileri önemli derecede talep ve ihtiyaç duyduklarını belirtmişlerdir.

Özgören ve ark. (2006) tek küre etrafındaki akış yapılarını üst görünüş görüntüleriyle PIV yöntemiyle deneysel incelemişler ve elde ettikleri sonuçları akış fiziği yönünden nicel olarak yorumlamışlardır.

Kumar ve ark. (2008) girdap kaynaklı titreşimlerin pasif akış kontrolü için son zamanlarda keşfedilen ve alınan patentlerle ilgili derleme çalışması yayınlamışlardır. Derleme çalışmaları gemi mühendisliğindeki durumların pratik uygulamalarında, akış ayrılmasını önleyecek şekilde küt cismin akımla uyumlu form şekline dönüştürülmesi, helisel yapıların küçük boruların yüzeye sarılması ile girdaptan kaynaklanan titreşimlerden cisimlerin korunması ile off-shore yapıların ömürlerinin artmasını beklendiğini kaydetmiştir.

Young ve Lee (2008), bir küre için yakın art izi bölgesindeki girdap yapısını PIV yöntemiyle sadece Re=11000 için araştırmışlardır. Ölçüm sonuçları küre art izinin dönen girdaplar, akım yönüne ters hızlar ve ölçüm düzlemi dışına hareket eden girdaplar içerdiğini kayıt etmişlerdir. Küreden oluşan girdapların dalgalı bir form oluşturduğunu göstermişlerdir. Zaman ortalamalı türbülanslı yapılarının nicel deney sonuçları ile uyumlu olduğunu ve elde ettikleri türbülanslı yoğunluk dağılımlarının sayısal tahmin metotlarını doğrulamada katkı sağlayabileceğini ifade etmişlerdir.

Tsutsui (2008), sınır tabaka içinde belirli yüksekliklere yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısını duman deneyleri, yüzeye yağ sürülmesi (surface-oil metodu) ve sıcak tel anemometresi ile yaptığı noktasal hız ölçümleri metotları ile incelemiştir. Kullandığı küre çapı 57 mm ve deneylerini $Re=8.3x10^4$ değerinde yapmıştır. Plaka yüzeyi ile küre arasındaki boşluğu 0 ile 30 mm arasında değiştirerek sınır tabaka ile küre iz bölgesi arasındaki akış yapısındaki değişimleri, basınç değişimlerini, girdap kopma frekansını, sürüklenme ve kaldırma kuvveti değişimlerini incelemiştir. Tsutsui (2008)'nin yaptığı akış görselleştirme metotlarını nitel sonuçlar verdiği için akış fiziği hakkında daha detaylı deneyler yapılması gerekmektedir.

Choi ve ark. (2008) yaptıkları derleme çalışmasında dairesel silindir, iki boyutlu küt cisimler ve küre etrafındaki akışların kontrol yöntemlerini değerlendirmiştir. Küt cisimler etrafında son zamanlarda yapılan üç boyutlu kuvvet, aktif geri beslemeli kontrol, yerel ve genel akış kararsızlığının kontrolü ve jet akışlarla kontrol uygulamalarını değerlendirmişlerdir. Sınır tabaka akış kontrol yöntemlerini sınıflandırmışlar ve kontrol yöntemlerinin art izi bölgelerindeki değişimlere etkileri ve önemli özelliklerini tartışmışlardır. Akış yapısının Reynolds sayısına bağlılığı, akışın kontrol edilmesiyle elde edilen en düşük sürüklenme katsayısı ve kontrol verimliliği kavramlarını tartışmışlardır.

Aköz ve ark.(2010), levha üzerine yerleştirilmiş dairesel kesitli bir silindir etrafında oluşan akış yapısını Parçacık Görüntülemeli Hız ölçme yöntemi ile deneysel araştırmışlardır. Oluşan girdap yapısının yüzeyde oluşan aşınmanın temel nedeni olduğunu ifade etmişlerdir. Silindir ön yüzeyinde oluşan ve kendi ekseni etrafında dönerek ilerleyen girdap yapısının silindir yüzeyine çarparak sönümlendiğini ve kaybolduğunu belirtmişlerdir. Silindiri geçen akış yapısının sürekli serbest kayma tabakasını beslemesinden dolayı art izinde çok değişken akış yapısının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Zaman ortalaması hesaplanmış datalardan silindir art izi bölgesinin Reynolds sayısına bağlı olarak kısaldığını bulmuşlardır. Devamlı oluşan akış gelişmesi

ve serbest kayma tabakası art izi bölgesi ile ana akış bölgesi arasında yüksek miktarda akışa neden olduğu ve bu olayın da silindirdeki sürükleme katsayısı ve yüzey aşınmasını etkilediğini ifade etmişlerdir.

Son ve ark. (2010) serbest akışın türbülans yoğunluğunun küre üzerindeki akış yapısına etkisini Reynolds sayısının $0.5x10^5$-$2.8x10^5$ aralığında incelemişlerdir. Kendi geliştirdikleri yöntemle akışta türbülans oluşturmuşlardır. Akıştaki türbülans şiddetinin küre yüzeyindeki sınır tabakadaki kararsızlığı tetiklediğini ve akış ayrılmasını geciktirdiğini ifade etmişlerdir. Laminer akış ayrılması oluştuğunda sınır tabaka kararsızlığı ve türbülans yoğunluğu kayma gerilmesinde oluşan kararsızlıkları tetiklemektedir. Yüksek momentumlu akış küre yüzeyine doğru hareket etmekte ve ayrılmış akış küre yüzeyine tekrar birleşmekte ve akış ayrılması gecikmekte ve böylece sürüklenme katsayısının azaldığını ifade etmişlerdir. Girdap oluşumu ve ayrılmış akış bölgesinin küre yüzeyinde oluşmaması türbülans yoğunluğunun sürüklenme katsayısına etkisinde önemli parametrelerdir.

Hassanzadeh ve ark. (2011) küre etrafındaki akış yapısını Reynolds sayısının Re=5000 değerinde sayısal yöntemle incelemişlerdir.

Özgören ve ark. (2011c) serbest akıma maruz kalmış dairesel bir silindir ve küre etrafındaki akış yapısını Reynolds sayısının Re=5000 ve 10000 değerlerinde nicel ve nitel akış görselleştirme yöntemleriyle deneysel olarak incelemişlerdir. Küçük ölçekli girdap yapılarının küre art izinde silindir art izine göre daha yoğun olduğunu belirtmişlerdir.

Bunlara ek olarak bu yüksek lisans tezi kapsamında Özgören ve ark. (2011a, 2011b, 2012a, 2012b, 2012c, 2013) PIV ve boya ile akış görselleştirme yöntemleriyle küre ve sınır tabaka etkileşimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaları kapsamında pürüzsüz küre ile sınır tabaka akışı etkileşimini araştırmalar ve farklı pasif akış kontrolü uygulamalarının bu akış yapısı üzerine etkilerini incelemişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3. 1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Sistemi ve Rhodamine 6G Akış Görselleştirme Düzeneği

Akışkanlar mekaniğinde en önemli problemlerden bir tanesi de incelenen bölgede aynı anda birden fazla noktada ölçüm yapabilmek suretiyle o bölgenin akış karakteristikleri hakkında bilgi sahibi olmaktır. Birçok hız ölçüm tekniği tek bir noktada zamana bağlı ölçümler yaparak akış hakkında bilgi verir. Karmaşık yapıya sahip özellikle iki boyutlu veya üç boyutlu akışlarda sadece bir noktada ölçüm yapmak suretiyle elde edilen veriler akışın yapısını yorumlamada yeterli olmamaktadır. İki ve üç boyutlu akışlar için aynı anda bir düzlemsel bölgedeki anlık hız alanlarını Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) cihazı kullanarak elde etmek mümkün olmaktadır. PIV ölçme tekniği ile belirli bir düzlemsel yüzey alanı aydınlatılarak birçok noktada hız vektörleri aynı anda ölçülmektedir. Akışkanlar mekaniğinde son zamanlarda kullanılmaya başlanan Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) Tekniği, bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte Dijital Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği (DPIV, Particle Image Velocimetry) olarak isimlendirilmektedir. Bu teknikler, daimi olmayan akışın yapısı hakkında çok detaylı bilgiler vermektedir. Örneğin, ayrılmış akış bölgesinde veya ölü akış bölgesinde belirli bir akış alanı içerisinde akış yapısını belirlemek için aynı anda binlerce noktada anlık hızları belirli bir frekans aralığında ölçmek gerekmektedir. Bu ölçme sayesinde daimi olmayan karmaşık akış yapısının analizi mümkün olmaktadır (Şahin ve ark., 2003).

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Yöntemi'nin (Particle Image Velocimetry, PIV) diğer hız ölçme yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. PIV yöntemi diğer hız ölçme yöntemleri ile karşılaştırıldığında; PIV yöntemi akışla direkt temas etmediği için ölçüm yapılan yerde akışın yapısında bozulmalara neden olmaz ve anlık olarak bir saniyede 15 kere veya daha fazla ölçüm yapılabilir. Günümüzde yüksek teknoloji içeren PIV yöntemiyle bulunan sonuçlar, akış fiziğinin temelini kavramada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırma sonuçlarının değerlendirilmesinde ve tasarım uygulamalarında güvenle kullanıla gelmiştir. Milisaniyeden daha kısa poz süresinde bütün alan görüntü yakalama kabiliyeti ile birlikte doğruluğu, esnekliği ve çok yönlülüğü; ses üstü akışlar, patlamalar, alev yayılması, kabarcık büyümesi ve patlaması, türbülanslı akış ve daimi olmayan akış çalışmalarında kullanılması, PIV sistemini aşırı derecede değerli kılmıştır (Çengel ve Cimbala, 2007). Bu nedenle, PIV yöntemi

uygulamalarına; dalmış cisimler (küre, silindir, elips, kare, bina vb.) etrafındaki akışlarda, içten yanmalı motorlarda, taşıt aerodinamiğinde, daimi olmayan aerodinamik ve türbülanslı akış uygulamalarında, kompleks geometriler içeren akışkanlar mekaniği uygulamalarında, jet akışlarında (lüle veya yayıcılarda), ayrılmış akışkanlarda, iki fazlı akışlarda, bio-mühendislikte, CFD modellerinin deneysel sonuçlarla doğrulanmasında, uçak mühendisliğinde (kanat ve uçak gövdesi tasarımında), çevreyle ilgili araştırmalarda (yanma araştırmalarında, dalga akışlarında, kıyı mühendisliği, gel-git akış hareketlerinin modellemesi, nehir hidrolojisi), sığ su akışlarında, boru ve kanal akışlarında, aerodinamik testler için rüzgar tüneli ölçümlerinde (trenler, uçaklar, arabalar binalar, köprüler, rüzgar türbinleri, fan kanadı tasarımında vb. cisimler etrafındaki akışlarda), hidrolik ve hidrodinamik (pompalar, kavitasyon, gemi gövdesi tasarımı), turbo makineler (fan, kompresör, türbin kanatları çevresindeki akış) gibi birçok alanda rastlamak mümkündür.

Dijital Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği yönteminde (DPIV) akış (su akışı) içerisine 11 mikrometre çapında, yoğunluğu su yoğunluğuna yakın parlak metal kaplı gümüş parçacıklar ekilmektedir. Lazer kaynağı tarafından aydınlatılan bu bölgede hareket eden parçacıkların görüntüsü senkronizer (eş zaman ayarlayıcı) vasıtasıyla dijital kamera ve lazer kaynağı aydınlatılma anında bilgisayar kontrollü olarak bilgisayar hafızasına kayıt edilmektedir. Bilgisayar lazer kaynağına belirli aralıklarla sinyal yollamaktadır (30 sinyal/saniye). Her sinyalde milisaniye mertebesindeki Δt zaman aralıkları ile iki fotoğraf dijital kamera tarafından çekilir ve bilgisayara aktarılır. Dijital kamerayla bilgisayar hafızasına tif formatındaki fotoğrafların proses edilmesi ile iki boyutlu hız vektörleri hesaplanmaktadır. Bilgisayarda geliştirilen programlar kullanılarak göz önüne alınan alan içerisinde hız vektörleri hesaplanır. Daha sonra geliştirilen çeşitli programlar kullanılarak akış ortamının analizleri yapılmaktadır. Girdap, akım çizgisi, Reynolds gerilmeleri, rms hız çalkantıları ve sirkülasyon gibi akışın yapısı hakkında bilgi veren diğer parametreler de hesaplanabilmektedir. PIV yöntemiyle yapılan ölçümlerle, iki boyutlu hız vektörleri kullanılarak zaman ortalamalı olmak üzere; ortalama girdap eş düzey eğrileri, ortalama hız, ortalama akım çizgileri ve akışa ait türbülans gerilmelerinin değişimleri hesaplanmakta ve değerlendirilmektedir. Bu akış ölçme tekniği, türbülanslı akış yapılarının fiziksel olarak anlaşılmasına son yıllarda büyük faydalar sağlamıştır.

Yapılan araştırma sonuçlarında, PIV yönteminde katı parçacıkların üniform olarak dağılmaması, görüntü alınması anında partiküllerin üst üste gelmesi, partiküllerin

görüntü alma anında lazer düzleminden dışarıya doğru hareket etmesi ve/veya düzlem dışındaki partiküllerin lazer düzlemine girmesi, hız vektörlerinin hesaplandığı alanın boyutu, elektronik ve optik gürültülerden kaynaklanan toplam belirsizlik değerinin %2 den az olduğunu belirtilmektedir Adrian (1991),Westerweell (1993) ve Özgören (2006).

PIV bir akış görüntüleme metodudur. Akış görüntülemeli ölçme sistemlerinin faydaları aşağıda özetlenmiştir.

a) Akış fiziğinin anlaşılmasını kolaylaştırır ve akışın fiziksel modeli hakkında bilgi verir.

b) Akış yapılarının doğru yorumlanması için; akıştaki türbülansın, cisim etrafında oluşan eddy (küçük girdap) hareketlerinin, akışın karmaşık üç boyutlu fiziksel yapısının anlaşılmasını sağlar. Ters akıştaki akış büyüklükleri ölçülebilir.

c) Akıştan dolayı oluşan, dinamik kuvvetler hakkında bilgi verir (basınç, yüzey kuvvetleri, viskoz kuvvetleri).

d) Küt cisimler etrafındaki akışların incelenmesi; bu cisimlerin etrafındaki akış yapısı (engeller, bina, silindir, küre vb.) hakkında detaylı bilgi verir.

e) Prop tip ölçümlerde (noktasal ölçümler, pitot tüpü ölçümü vb.) akışa müdahale vardır. Bu yöntemde akışa müdahale etmeden ölçüm yapılır.

f) Noktasal ölçümde sadece bir noktadaki zamanla hız değişimi ölçülür. Ancak, PIV yönteminde görüntülenen akış alanı içindeki tüm noktalarda aynı anda zamanla değişen hız ölçümü yapılabilir. Akış alanı üzerinde bazen 30000'nin üzerinde noktada ölçüm aynı ayna yapabilir.

g) Noktasal ölçüm yapan cihazlara göre deney yapma zamanı azalır (hazırlanmış deney düzenekleri farklı modeller için kolayca uyarlanır).

h) Ölçme metodu akışa müdahale etmediği için basınç düşüşüne neden olmaz.

i) Akışkanla doğrudan temas olmadığı için paslanma, kirlenme veya tıkanma gibi tehlikeler söz konusu değildir.

j) Öngörülen hız ölçüm doğrulukları %2-4 arasında değişir.

Bu tez çalışmasında, su kanalı içine yerleştirilen küre etrafında oluşan daimi olmayan akış yapısı boya ve parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniği (2D-DPIV) ile deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda boya deneyleri yapılmış ve küre etrafındaki akış yapısı hakkında genel bilgiler elde edebilmek için, küre etrafındaki akışın art iz bölgesine, küre yüzeyindeki 0.3 mm çapındaki deliklerden çok düşük hızda boya enjekte edilmiştir. Boya deneylerinde uygulanan yöntem şöyledir; ışığa duyarlı boya (Rhodamine 6G) su ile karıştırılarak

çözelti haline getirilir. Boya çözeltisi gün ışığında saydam görünümdedir. Ancak, boya karanlık bir ortamda lazer ile aydınlatıldığında parlak görünür haldedir. Bir kapta hazırlanan boya çözeltisi, belirli bir yükseklikten küre yüzeyindeki deliklerden akış ortamına enjekte edilir. Aydınlatma işlemi lazer ışığı ile yapılır. Karanlık ortamda boya ve dolayısıyla akış yapısı görünür hale getirilir. Işık rengi yeşil, kırmızı ve sarı renklerde lazer ve boyaya bağlı olarak oluşmaktadır. Görünür hale gelen akış yüksek hızlı ve çözünürlüklü bir kamera (SONY DCR TRV 355E ve Canon VIXIA HF S100 HD) ile film olarak kaydedilir. Çekilen film bir ticari program kullanılarak salise mertebesinde görüntülü resimlere ayrılmış ve seçilen fotoğraf görüntülerinden akış fiziğinin yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Boya deneylerinde laboratuarda bulunan lazer ünitesi ve lazer ışığı altında (532 nm dalga boyunda) parlayan Rhodamine 6G boya kullanılmıştır.

PIV sisteminin önemli parçaları, eş zamanlı kontrol cihazı (synchronizer), akışın aydınlatılması (lazer), optik sistemi (mercekler) ve ışığın yansımasını sağlayan partiküller, CCD (Charged Couple Device) kamera ve çekilen fotoğrafları bilgisayara aktaran donanım (frame grabber) ve bunları proses eden bilgisayar programıdır. Deney düzeneği kanal başlangıcından tamamen türbülanslı gelişmiş kanal akışın oluştuğu 4 m uzaklığa yerleştirilmiştir.

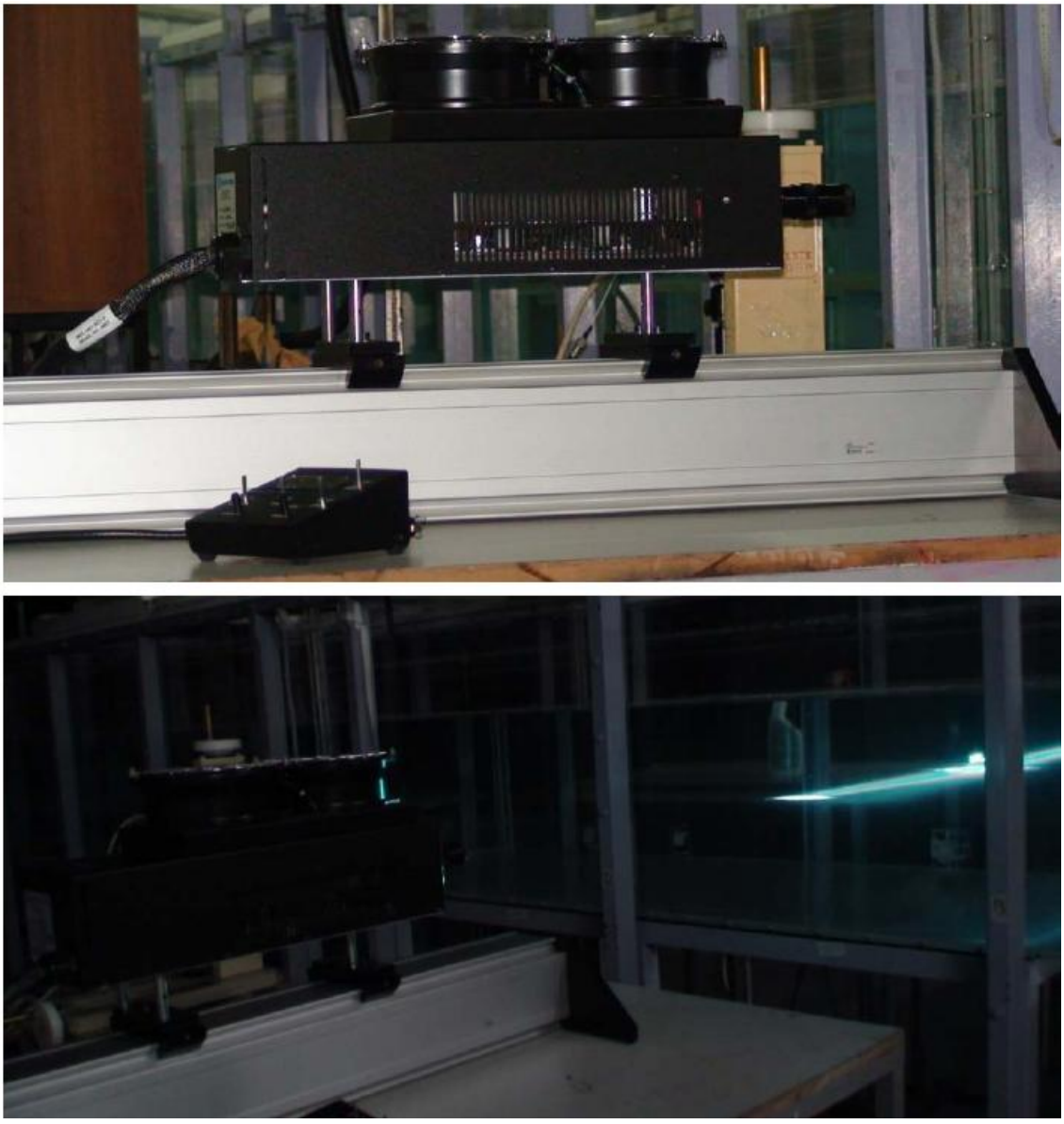
PIV tekniği ile yapılan hız ölçümlerinde mikron mertebesindeki parçacıkların akışkan hareketini takip ettiği düşüncesine dayanır. PIV ile hız ölçümü yönteminde, suyun içerisine, üzerine gelen lazer ışığını yansıtan ve ortalama 11 mikron çapa sahip gümüş kaplı parçacıklar ekilmektedir. Bu parçacıklar, çok küçük çapa sahip olduklarından ve yoğunlukları suyun yoğunluğuna çok yakın olduğundan içinde bulundukları su ile aynı hızda hareket etmektedir. Ölçüm süresince de homojen bir şekilde su içinde askıda kalmaktadır. Ölçüm yapmak istenilen bölgeye lazer demeti gönderilerek bir görüntüleme yüzeyi oluşturulur. Ölçüm yapılacak alan darbeli lazer ışık kaynağı ile aydınlatıldığında bu parçacıklar parlamaktadır. Kullanılacak partiküllerin genel özellikleri; lazer ışığını iyi yansıtmalı, korozyon oluşturmamalı, akışın gerçekleştiği ortamda kanal ekipmanları ve modelde aşınmalara neden olmamalı, zehirli olmamalı, akışkanın saydamlığının korunması için temiz olmalı ve çok küçük hız değerlerinin hesaplanabilmesi için lazer ışığının şiddeti partiküllerde çok fazla yansıma yapmamalıdır. Akışkan içinde asılı olarak bulunan partiküllerin hareketi; partikülün şeklinden dolayı sürükleme (drag) kuvveti, partikülün büyüklüğü, partikülün akışkana göre yoğunluğu, partikülün çevresindeki akışkana göre hızının değişimi, akışkan içindeki partikül yoğunluğu, akış hareketi süresince partiküllerin birbirleri arasındaki

etkileşimden, akışkanın uyguladığı kuvvetlerden (basınç ve sürtünme kuvvetlerinden) etkilenir.

Deneylerde kullanılan Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) cihazı ile akım hızının ölçülmesi şu şekilde gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümleri için PIV yöntemi iki adımdan oluşur: görselleştirme ve görüntü işleme. İlk adımda, akışkan hareketinin izlenmesi için uygun parçacıklar akışa ekilmektedir. Sonrasında darbe (puls) halinde bir adet lazer ışığı tabakası, istenen düzlemdeki akış alanının ince bir dilimini (düzlemini) aydınlatır ve ışık tabakasına dik açıda yerleştirilmiş dijital video kamera ile görüntüler alınır. Çok kısa bir zaman periyodundan sonra parçacıklar ikinci bir lazer ışığı tabakası ile tekrar aydınlatılır ve yeni konumları kaydedilir. Üst üste bindirilmiş bu iki kamera görüntüsündeki bilgi kullanılarak, oluşturulan gridler içindeki yer değiştirmeleri bulunur. Burada, 532 nm'lik çift dalga boyuna sahip kızıl ötesi radyasyon dalgası gönderebilen, her parlamada 120 mJ enerjiye sahip, lazerden çıkan ışık içbükey/dışbükey silindirik ve/veya küresel mercekler aracılığıyla 1.5 mm kalınlığında lazer ışık demeti (perdesi) oluşturabilen çift darbeli Nd:Yag lazeri kullanılmıştır. Lazer cihazı yüksek yoğunluklu bir soğutma birimi içeren bir lazer güç ünitesi tarafından beslenir. Mevcut lazer ışık kaynağı ile saniyede en çok 15 hız ölçümü alınabilmektedir. Lazer belli aralıklarla ışır ve iki ışıma arasında CCD kamera ile görüntüler alınır. Sonra görüntüler dijital olarak bilgisayara kaydedilir. Ölçüm alanında aydınlatılan parçacıkların hareketlerinin yakalanabilmesi için yüksek çözünürlüklü (1600x1180 piksel) bir CCD (Charge Coupled Device) kamera kullanılmaktadır. Eş zamanlayıcı sayesinde lazer parlaması ile kameranın eş zamanlı yani senkronize bir şekilde çalışması gereklidir. Yani, lazer parlaması ile kamera senkronize bir şekilde çalışmakta ve böylece lazer demetinin birinci anlık parlaması kamerada birinci kareye, ikinci parlaması da ikinci kareye kaydedilmekte ve ikinci kayıttan sonra her iki görüntü de bilgisayara aktarılmaktadır. Ölçüm alanında aydınlatılan parçacıkların hareketlerinin yakalanabilmesi için yüksek çözünürlüklü CCD kamera, lazer ışık perdesine dik bir pozisyonda yerleştirilir. Böylece lazer demetinin birinci anlık parlaması kamerada 1600x1180 piksel boyutunda birinci kareye, ikinci parlaması da ikinci kareye kaydedilmektedir. İşte bu iki kayıttan her iki kare de bilgisayara aktarılmakta ve üst üste getirilerek akış alanındaki partiküllerin izlediği yollar hesaplanmaktadır. Saniyede 30 kare yakalanarak, alınan görüntüler birbirleriyle çapraz korelasyon edilir. Çapraz korelasyon sonucunda milisaniye aralıktaki çekilen iki fotoğraftaki parçacıkların yer değiştirmesinden bir hız alanı olmak üzere toplam 15 Hz frekansta veri toplanmaktadır.

Bilgisayar yardımı ile elde edilen sinyaller işlenir ve kullanıcının arzu ettiği veri, sunum ve istatistiksel bilgilere dönüştürülür.

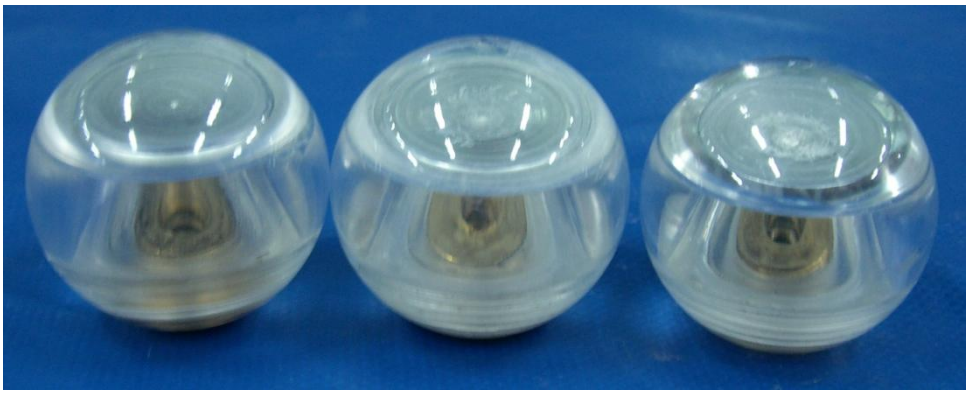
Boya deneylerinde kullanılan kesintisiz lazer ünitesi kaynağı fotoğraf görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir. Akış yapısının fiziksel olarak daha iyi anlaşılabilmesi için boya deneyleri yapılmıştır. Boya deneyleri sayesinde PIV ölçümleri sonucunda elde edilemeyen akım yolları görselleştirilebilmektedir. Bu sayede Kelvin Helmholtz girdapları ve KGC görülebilmektedir.



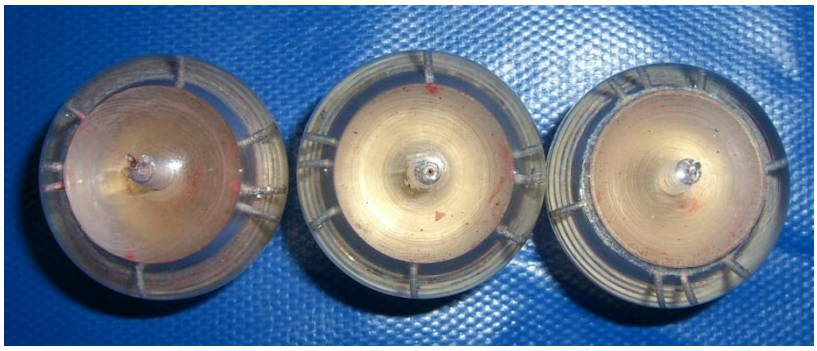
Şekil 3.1. Boya deneylerinde kullanılan kesintisiz lazer ünitesi

3. 2. Deneylerde Kullanılan Küreler

Deneylerde kullanılan küreler akrilik (pleksiglas) ve derlin malzemeden yapılmıştır. Küre çaplarının imalat hassasiyetleri; ±0.0025 mm hassasiyetli üç boyutlu koordinat ölçme cihazı "Fercanti Metrology System" ile ölçülmüş ve 42.5±0.005 mm olarak bulunmuştur. Şekil 3.2'de pürüzsüz küreler gösterilmiştir. Bu küreler boya deneyi ve PIV deneyi için farklı olarak imal edilmiştir. Boya deneylerinde kullanılan kürelerin üzerinde boya çıkışı için 0.3 mm çapında delikler bulunmaktadır. Şekil 3.3'te ise boya delikleri açılan küreler gösterilmiştir. Şekil 3.4'te imal ettirilen pürüzlü küre fotoğrafları, Şekil 3.5'te o-ringli küre fotoğrafları ve Şekil 3.6'da ise delikli kürelerin fotoğrafları verilmiştir.



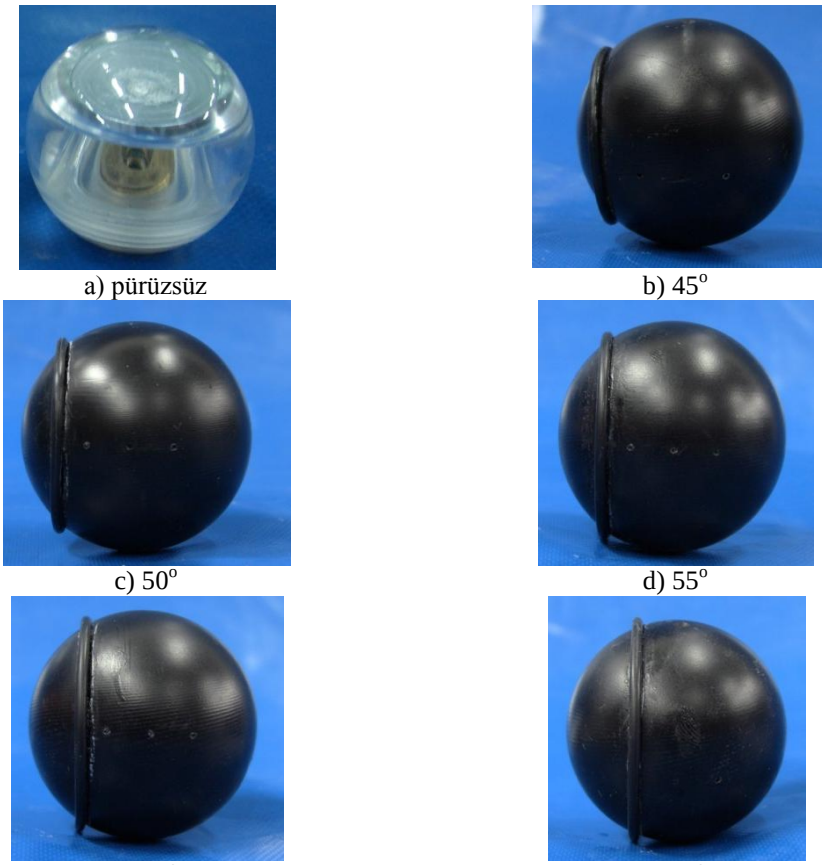
Şekil 3.2. PIV deneylerinde kullanılan akrilik malzemeden yaptırılmış küreler.



Şekil 3.3. Boya deneylerinde kullanılan küreler ve küre yüzeyinde oluşturulan boya delikleri.

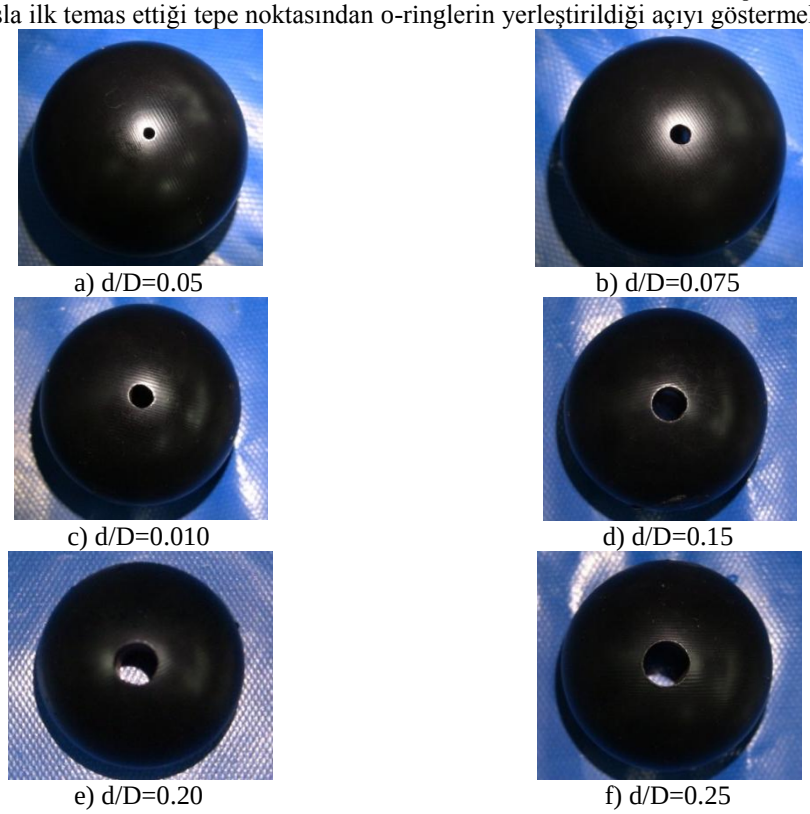


Şekil 3.4.PIV ve boya deneylerinde kullanılan pürüzlü küreler (D=42.5 mm ve $d_{pürüz}$=3mm)



a) pürüzsüz b) 45^{o} c) 50^{o} d) 55^{o} e) 60^{o} f) 70^{o}

Şekil 3.5. PIV ve boya deneylerinde kullanılano-ringli küreler (D=42.5 mm ve $d_{o\text{-}ring}$=2mm), açılar kürenin akışla ilk temas ettiği tepe noktasından o-ringlerin yerleştirildiği açıyı göstermektedir.



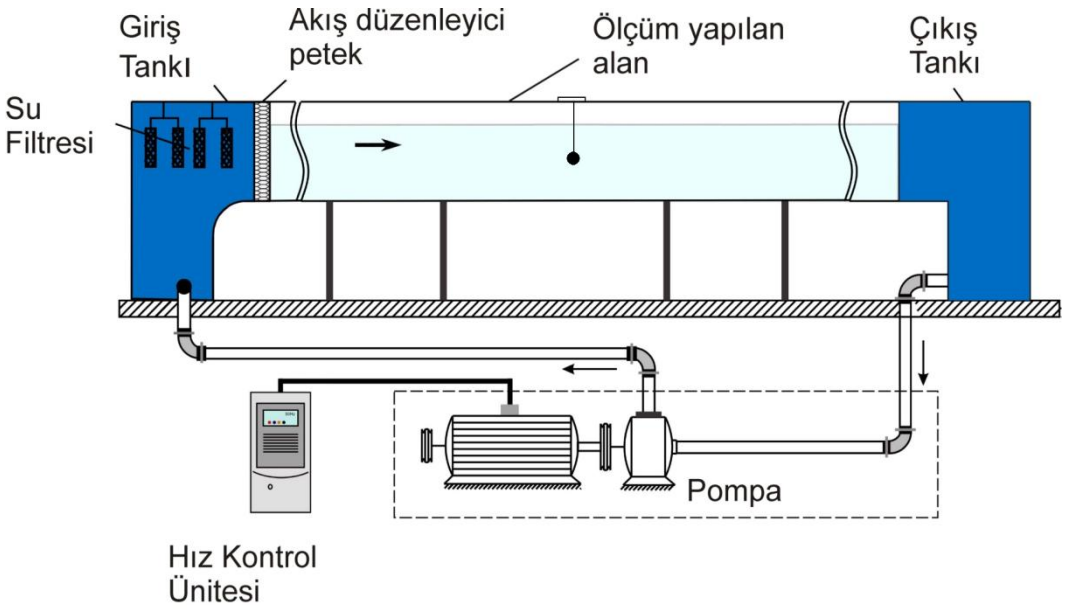
a) d/D=0.05 b) d/D=0.075 c) d/D=0.010 d) d/D=0.15 e) d/D=0.20 f) d/D=0.25

Şekil 3.6. PIV ve boya deneylerinde kullanılandelikli küreler

Akrilik malzemeden imal edilen kürelerin yüzeyi lazer ışığının kırılmasını azaltmak için parlatılmıştır. Derlin malzemeden yaptırılan küreler ise CNC tezgahta üretildiği şekilde lazer ışığını yansıtmasını azaltacak şekilde boyanarak kullanılmıştır. Küre deneyleri sırasında açık kanal su akışının derinliği ise 450 mm alınmıştır. Deneyler, tek küre ve kürelerin levha yüzeyinden yüksekliğinin küre çapına oranının (G/D), farklı değerlerinde ve Reynolds sayısının farklı değerleri için yapılmıştır. Lazer ışığının geçeceği küre merkezinde mercek etkisini ışının kırılmasını minimize etmek için kürenin içinde su ile doldurulan boş bir hazne oluşturulmuştur. Işığın geçtiği yerin cidar kalınlığı yaklaşık 2.5 mm'dir. Bu haznenin iç-dış yüzeyi ve küre yüzenin diğer kısımları viskoz sürtünme kuvvetlerin minimumda olmasını sağlamak ve lazer ışınlarının kırılmasını azaltmak amacıyla özel bir yöntemle parlatılarak pürüzlülükleri minimuma indirilmiştir.

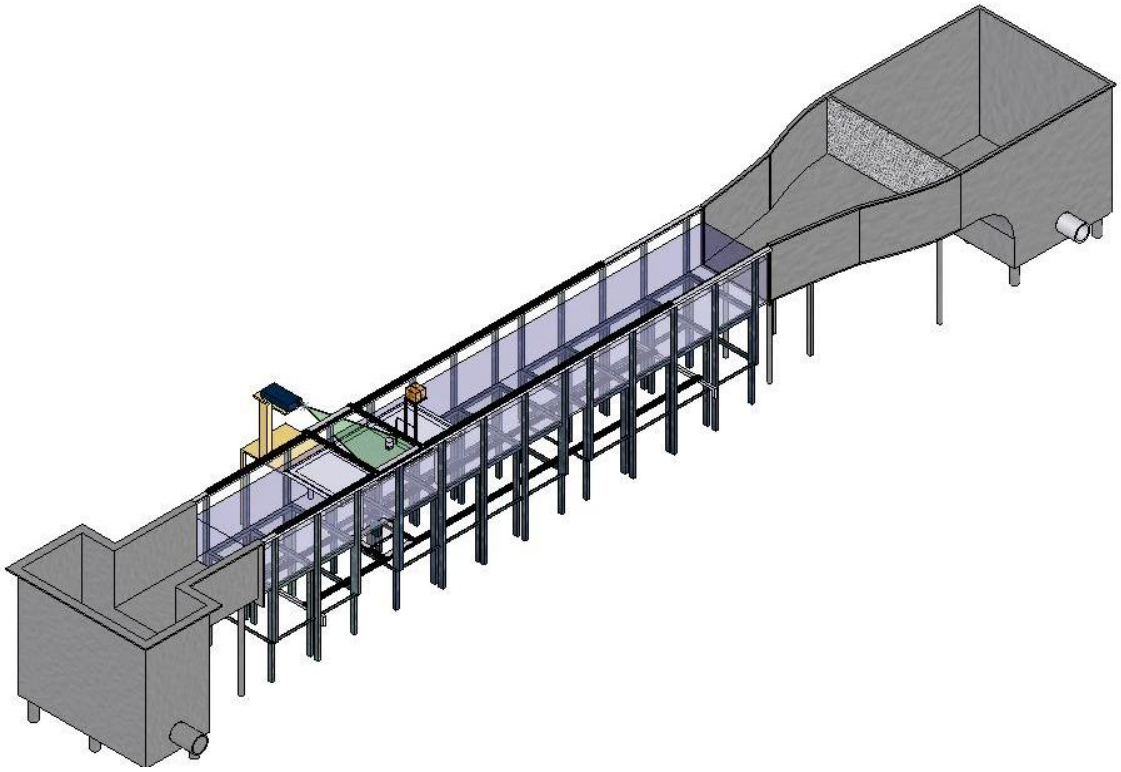
3. 3. Kapalı Devre Açık Su Kanalı ve Küre Tutturma Mekanizması

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Mekaniği Laboratuarında kurulu olan kapalı devre açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Su kanalı, iki adet su deposu ve bu iki depo arasında bulunan ve boyutları 8000x1000x750 mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) olan fleksiglas (döküm akrilik levha) kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.7'de açık su kanal düzeneğinin şematik şekli görülmektedir. Kanal tabanı ve yan duvarlar saydam pleksiglas (döküm akrilik levha) malzemeden yapılmış olup, böylece ölçümler için pürüzsüz ve saydam bir yüzey elde edilmiştir. Kanal içerisindeki suyun akışı, bir hız kontrol ünitesi yardımıyla değişik devirlerde çalıştırılan bir santrifüj pompa yardımıyla sağlanmaktadır. Suyun girişteki su tankından üniform olarak çıkmasını sağlamak amacıyla haznenin kanal kesitine ulaştığı bölgeye akış düzenleyici petek sistemleri yerleştirilerek kanal girişinde suyun mümkün olduğu kadar çalkantısız ve düzenli olarak girmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.7. Açık kanal deney düzeneği.

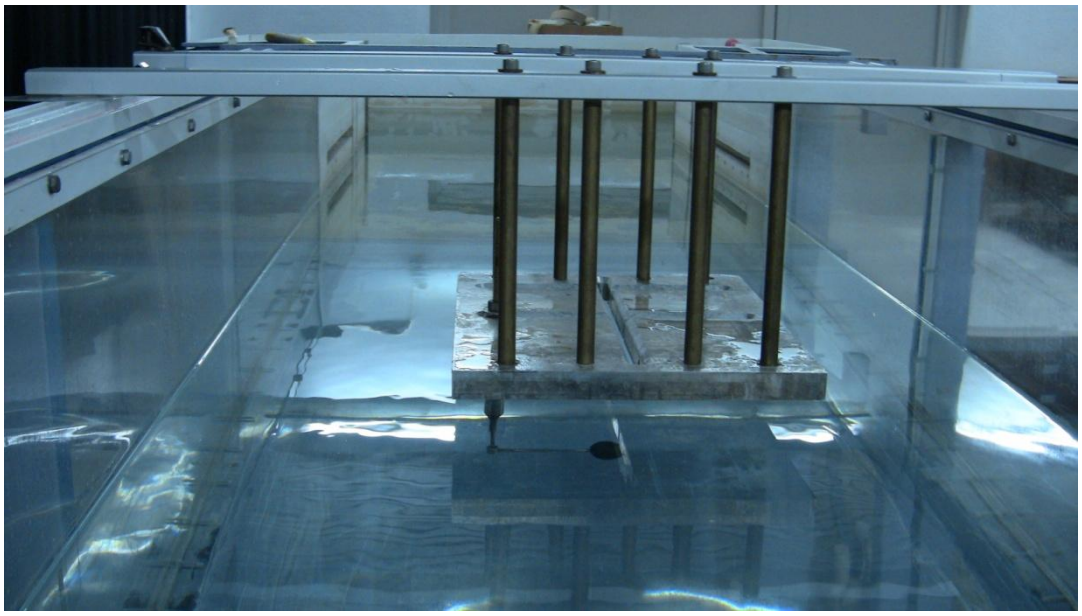
Kanalda su çevrimini sağlayan pompanın motor devri değiştirilerek kanal içerisindeki suyun hızı ayarlanabilmektedir. Pompa tek kademeli, salyangoz gövdeli yatay santrifüj pompa olup en yüksek pompa debisi 300 m^3/h'dir. Deneyler boyunca lazer kaynağı farklı yüksekliklere yerleştirilen kürenin ekvatorundan (merkezinden) geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Kürenin arkasında oluşan art izini kaplayacak şekilde aydınlatma yaptırılmış ve aydınlatılan alanda hız ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.8'de deneylerin yapıldığı su kanalı ve deney setinin yerleştirildiği konum perspektif görünüm olarak sunulmuştur.



Şekil 3.8. Deneylerin yapıldığı su kanalının perspektif görünüşü



Şekil 3.9. Deneylerin yapıldığı su kanalı



(a)



(b)

Şekil 3.10. Küre tutturma aparatı ve platformun fotoğraf görüntüleri

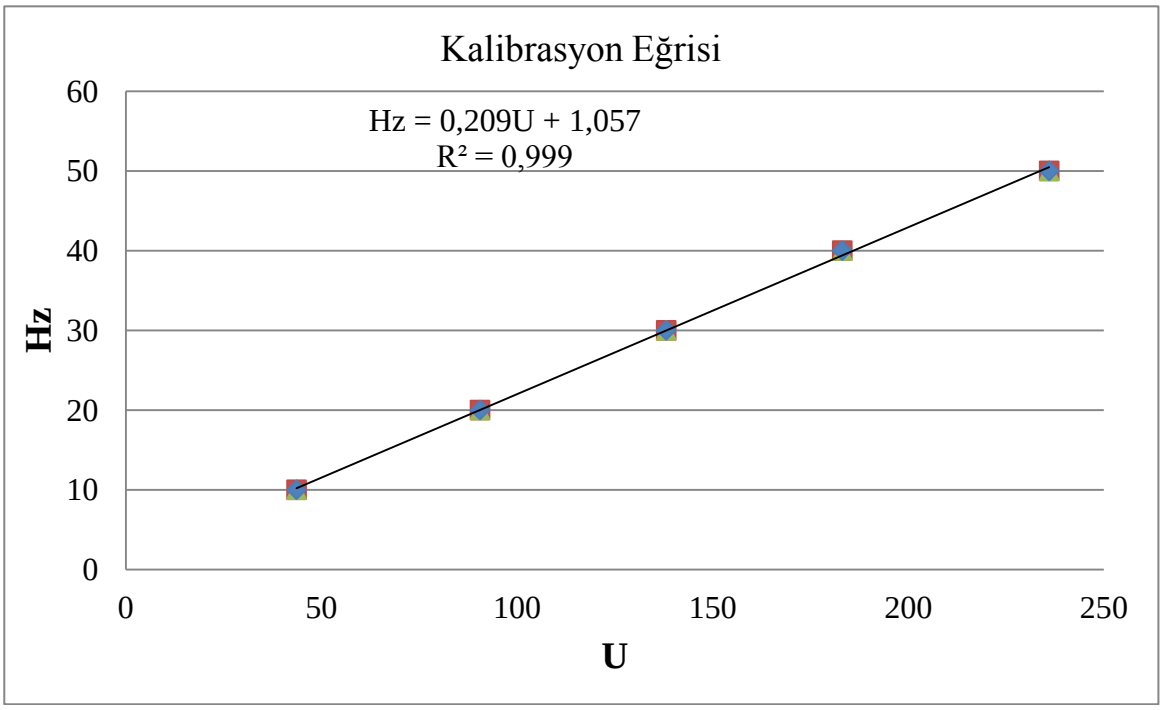
Kürenin su içerisinde tutulması için kürenin görüntüleme düzleminin arka kısmından 5 mm çaplı daire kesitli bir sapla kanal üzerine yerleştirilen bir düzeneğe tutturulmuştur. Kürelerin bağlantı sapları titreşim oluşturmayacak şekilde yapılmıştır. Bu bağlantı sapı ile küre üzerinde oluşan akış bozulması minimize edilmeye çalışılmıştır. Boya deneyleri için küre ile bağlantı mili arasında 10 cm uzunluğunda 5 mm çapında bir sap kullanılmıştır. Küre tutturma aparatı ve platformun fotoğrafları Şekil 3.10'da görülmektedir.

Deneyler, kanal içerisine gelişmiş akış elde etmek amacıyla konulan levha üzerinde oluşan gelişmiş sınır tabaka akışının oluşturulduğu bölgeye yerleştirilen kürenin art izi bölgesinde akış görüntüleme ile gerçekleştirilmiştir. Kürenin alt noktası ile levha yüzeyi arasındaki boşluğun temas etme durumundan G=0.1D, 0.25D, 0.5D, 0.75D 1.0D, 1.25D ve 1.5D olması durumlarında incelenen pürüzsüz küre ve pasif akış kontrolü uygulanmış küreler içinde yapılmıştır. Burada verilen deney sonuçları serbest su hızı 60 mm/s ile 235 mm/s arasında değiştirilmiştir. Küre çapına göre hesaplanan Reynolds sayısının değeri ise (Re=UD/ν) 2500, 5000, 7500 ve 10000 olarak alınmıştır. Froude sayısı su derinliği ve serbest akım hızına bağlı olarak $Fr = U_\infty / \sqrt{gh_w}$ =0.03-0.12 aralığında hesaplanmıştır ve bu değer kritik Froude sayısı 1.0'den küçük olduğu için akış kritik altı akış olarak değerlendirilmektedir.Delikli küre için deneyler delik çapının küre çapına oranı d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 için yapılmıştır.

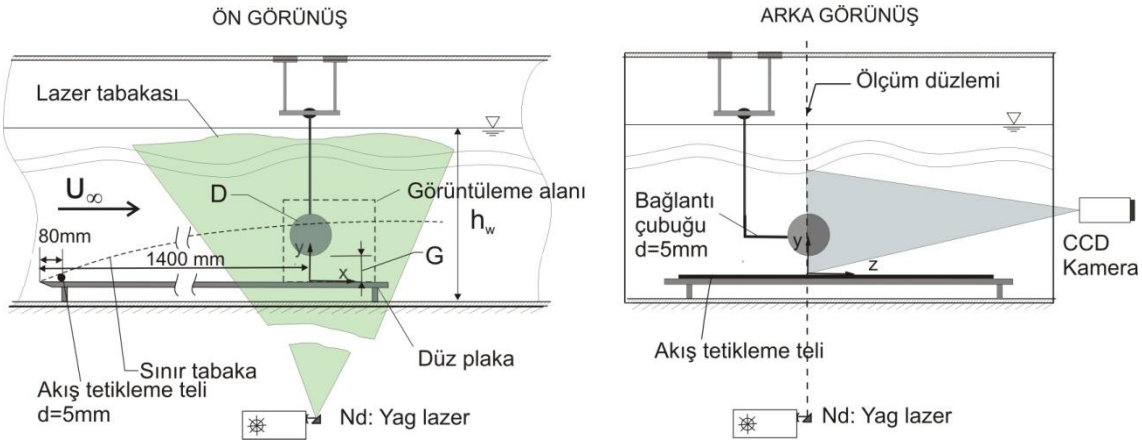
O-ringli küre için deneyler 2 mm ve 3 mm silindirik çaplarındaki o-ringin kürenin akışla ilk temas ettiği ilk durma açısı yerinden 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o'ye yerleştirilen o-ring düzenlemelerinde yapılmıştır. O-ringlerin 2 mm ve 3 mm çapları ve o-ringlerin 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o yerleşim açıları için yapılan deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Pürüzlü küre için özel imal ettirilen 42.5mm küre çapı, toplam 410 adet 3mm çaplı silindirik pürüzlülük elemanı küre yüzeyine yaklaşık eşkenar üçgen olarak oluşturulmuştur. Bu durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ancak su kanalında yapılan deneylerde yüksek Reynolds sayılarına çıkılamadığı için beklenen kontrol etkisi tam incelenememiştir.

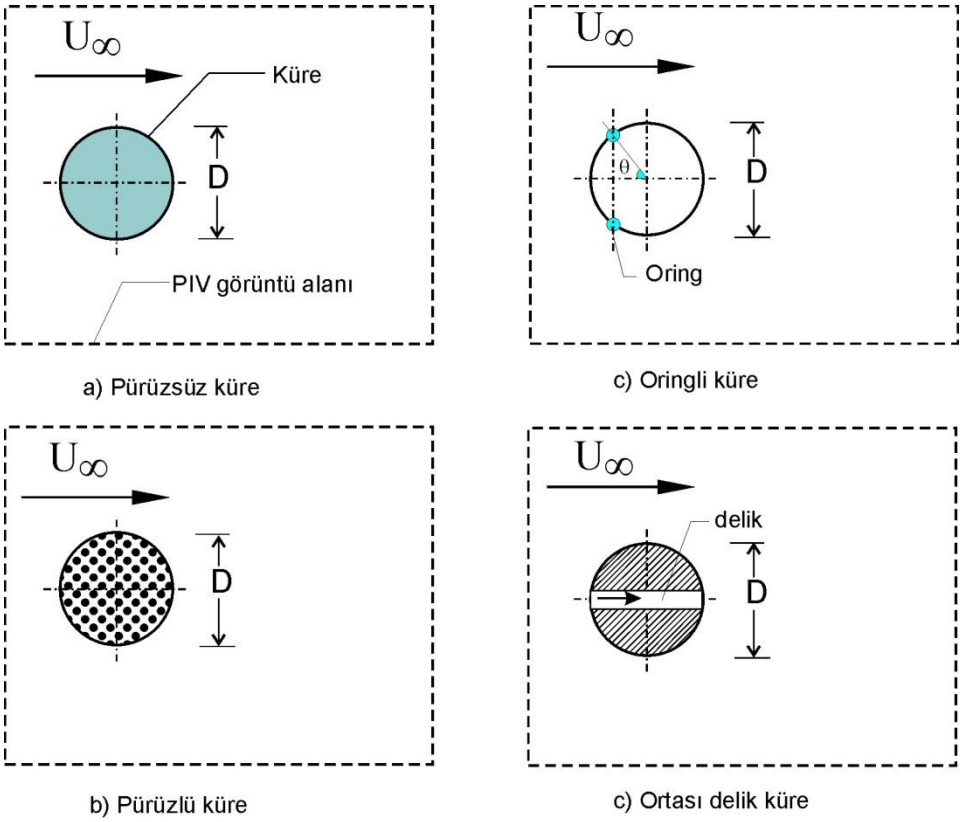
Boya deneylerine başlamadan önce deneylerin istenilen Reynolds sayılarında yapılması için kanal tabanından su yüksekliğinin 450 mm olması durumunda santrifüj pompanın elektrik motorunu farklı devirlerde çalıştırmasıyla kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon esnasında deneyler su kanalı içerisinde küre olmadan serbest akım şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elektrik motorunun farklı frekanslarda (0 ile 50 Hz aralığında) çalıştırılması ile elde edilen hızlar Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) tekniği ile belirlenmiş ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Şekil 3.12'de PIV sisteminin yerleşim düzeni ve Şekil 3.13'te ise deneylerde kullanılan kürelerin şematik şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kanal içerindeki su hızının 450 mm su yüksekliği için kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.12. Gelişmiş sınır tabaka içinde gerçekleştirilen deney sisteminin şematik gösterimi



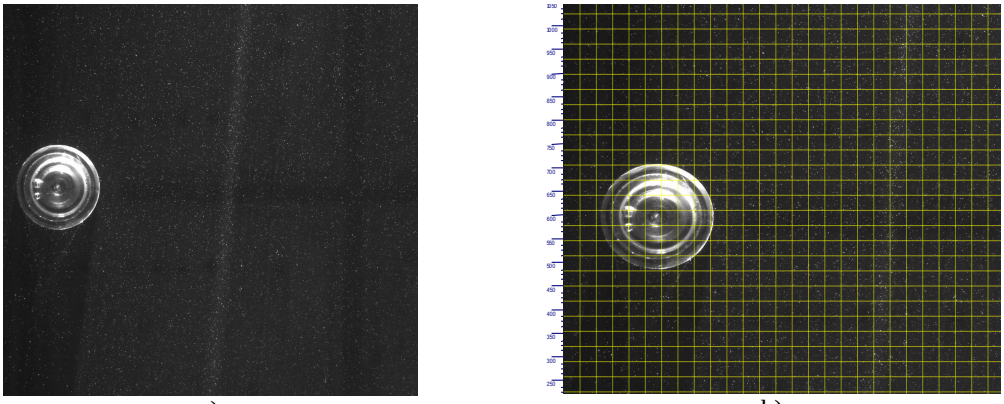
Şekil 3.13. PIV ve boya deneyi yapılan küreler (D=42.5 mm)

3. 4. Deney Sonuçlarının Analiz Edilmesi

Yukarıda açıklandığı gibi, PIV'nin çalışma prensibini test alanı içerisinde aydınlatılan parçacıkların yer değiştirmesinin tespiti olarak özetlemek mümkündür. Bu yer değiştirmenin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemler görüntü işlenmesi esnasındaki partiküllerin izlenmesi ve korelasyondur. Parçacıkların yer değiştirmesinin hesabı 32x32 piksel sorgulama ekranı ile çapraz korelasyon tekniği kullanılarak yapılacaktır. Şekil 3.14'te (a) kameradan alınan ve partiküllerin göründüğü tif formatlı fotoğraf, Şekil 3.14'te (b) kamera görüntüsünün sanal gridlere bölünmüş hali ve Şekil 3.15'te ise bir kürenin üst bölgesindeki akım alanı için kameradan aktarılan görüntüye çapraz korelasyon uygulanması sonucu elde edilen işlenmemiş vektör alanı örnek olarak verilmiştir.

Fotoğrafların bilgisayara kaydından sonra gerçekleşen olaylar detaylandırılırsa; art arda çok kısa zaman aralığında çekilen iki adet fotoğraf ve fotoğraflardaki partiküllerin yer değiştirilmesi Δx ve Δy, iki fotoğraf arasındaki zaman aralığı (Δt) ve ölçek değerine (M) bölünerek hız değerleri hesaplanır. Anlık hız değerlerini hesaplamak için art arda çekilen iki fotoğraf arasındaki zaman farkı milisaniye, örneğin 1-5 ms, mertebesinde alınır. PIV'de partiküllerin bireysel olarak izlediği yolu tespit

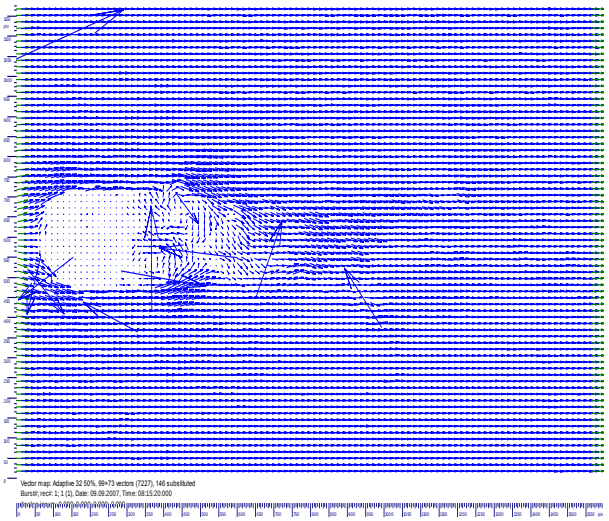
etmek için, partiküllerin belirli bir grid (1.509 mm x 1.509 mm) içerisinde gruplar olarak ortalama yer değiştirmeleri dikkate alınır.



a) b)

Şekil 3.14.a) Tek küre üzerinde anlık kamera görüntüsününtif formatı görünüşü b) sanal gridlere bölünmüş (tif formatı).

Kameradan aktarılan anlık fotoğraflar bilgisayara dijital fotoğraf dosyası formatında (TIF) hafızaya kaydedilmektedir. Bu dijital fotoğrafların prosesi ve analizi DANTEC-DPIV sistemi içerisinde yer alan FLOWMAP yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Her bir bölgede ard arda alınan toplam 350 adet görüntü kaydedilmektedir.



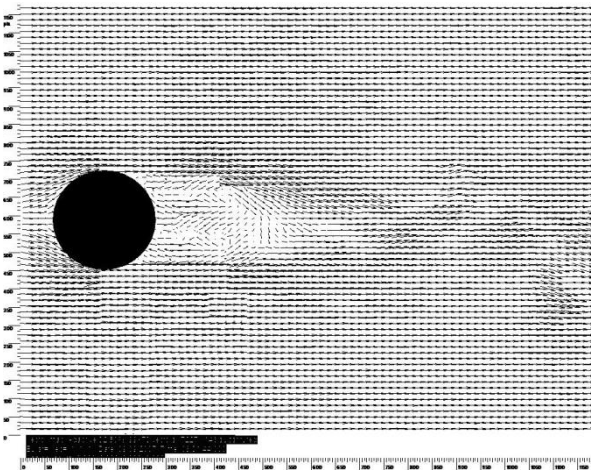
Şekil 3.15. Tek küre üzerinde çapraz-korelasyon işleminden sonraki ham vektör alanı (% 50 arttırılmış grid ölçüsü).

Ortalama yer değiştirmenin bulunmasından sonra lazer düzlemindeki her bir sanal griddeki ortalama hız vektörü aşağıdaki formülden hesaplanır.

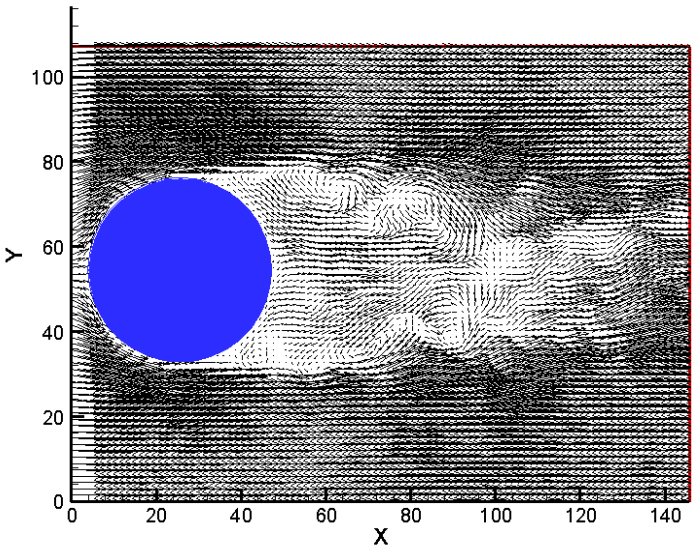
$$\vec{u} = \frac{\Delta x}{\Delta t * M} \tag{3.1}$$

$$\vec{v} = \frac{\Delta y}{\Delta t * M} \tag{3.2}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\vec{u}$ ve $\vec{v}$ iki boyutlu hızın vektörel bileşenleridir. Δt ise çapraz korelasyon edilecek iki görüntü çekimi arasındaki zaman farkını (s), Δx ve Δy ise korelasyon ağındaki partiküllerin x ve y yönünde ortalama yer değiştirmesini, M ise alınan görüntülerin büyültme ölçeğini gösterir. Hatalı vektörlerin kaldırılması için CLEANVEC paket yazılımı kullanılmıştır. CLEANVEC paket yazılımı ölçülen akış alanı içindeki vektör yapılarını karşılaştırmakta ve hatalı olanları silmektedir. Hatalı vektörler akış alanı içerisinde çevresindeki diğer vektörlerden aşırı miktarda daha büyük çıkmaktadır. Akışın bu noktalarda (çevresindeki diğer vektörler referans alınarak) o kadar çok ivmelenemeyeceği gerçeğine dayanarak aşırı büyük vektörler (hatalı vektörler) istatiksel olarak çevresindeki dokuz vektör kullanılarak tespit edilip silinmekte ve yerine yenisi interpolasyonla hesaplanmaktadır. Şekil 3.15'te verilen ham vektör alanındaki kötü vektörlerin, CLEANVEC yazılımı kullanılarak yapılan ileri proses işlemleri ile temizlenmesi sonucunda elde edilen vektör alanı Şekil 3.16'da ve interpolasyan ve filtreleme uygulanmış nihai hız alanı görüntüsü Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.16. Proses edilmiş vektör alanı (sanal olarak temizlenmiş vektör alanı).



Şekil 3.17. Temizlenmiş, yeni vektörleri hesaplanmış ve filtre edilmiş hız alanı

Vektör sayısını arttırmak ve Nyquist kriterini sağlamak için hız vektörü hesaplanacak ağ yapısı genelde %50 üst üste bindirilerek kaydırılır ve böylece hız alanını temsil etmek için ölçülen vektörlerin sayısı iki katına çıkartılır. Elde edilen hız alanındaki vektörlerin ağ ölçüleri ölçek faktörüne göre değişmekte olup, mevcut ölçme sistemde x ve y yönünde toplam 7227 (99x73) adet vektör hesaplanmıştır. Prosesler Dantec firmasına ait bilgisayar programıyla yukarda belirtildiği gibi kısmen yapılmıştır. Silinen kötü vektörlerin (akışı temsil etmeyen) yerine çevresindeki dokuz vektörlerin değeri kullanılarak ortalama bir vektör hesaplanmıştır. Her bir gridde hesaplanan anlık hızlardan faydalanılarak anlık girdap hesaplamaları, NFILVB isimli bilgisayar programı ile aşağıda açıklandığı şekilde yapılır. Hız vektörlerini kullanarak girdap eş düzey eğrilerini hesaplamak mümkün olmaktadır. Burada uygulanan hesaplama yöntemi aşağıda açıklanmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir. Dönümlü iki boyutlu sıkıştırılamaz daimi akışta girdap eşitliği

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{U} \tag{3.3}$$

İki boyutlu akış için kartezyen koordinatlarda girdap eşitliği.

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{3.4}$$

Yukarıda verilen eşitlikteki girdap değeri fotoğrafı çekilen akış alanında sonlu farklar metodu kullanılarak sınır ve cidarlarında bölgelerinde ise geri, merkezi ve ileri

sonlu farklar metodu kullanarak hesaplanabilir. Akış alanı içinde girdap dağılımı Stokes teoreminden faydalanılarak yerel hız ve bir çizgi boyunca yazıldığında aşağıdaki denklem yazılabilir. Stokes Teoremi,

$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{l} = \iint \left(\nabla \times \vec{V}\right) \cdot d\vec{s} = \iint \vec{\omega} \cdot d\vec{s} \tag{3.5}$$

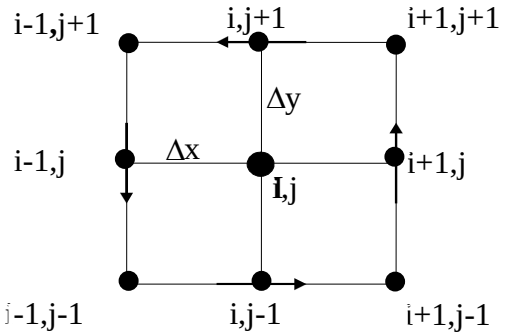
veya

$$\iint \left(\nabla \times \vec{U}\right) \cdot d\vec{A} = \oint \vec{U} d\vec{l} = \Gamma \tag{3.6}$$

Burada Γ çevrinti şiddeti ve $\vec{l}$ ise s yüzeyini çevreleyen yolun toplamıdır. Bu teorem (x,y) düzleminde PIV hız datası gridleri için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir .

$$\omega_z(i,j) = \frac{1}{A}\Gamma(i,j) = \frac{1}{A}\oint_{l(x,y)} \vec{V} \cdot d\vec{l} \tag{3.7}$$

Burada $\omega_z(i,j)$A alandaki anlık girdap değerini temsil eder. Şekildeki gibi dikdörtgen bir yol kullanılarak eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir. Akış alan düzleminde sonlu farklar uygulaması için oluşturulan grid örneği Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Akış düzleminde sonlu farklar uygulaması için oluşturulan grid örneği.

Burada Δx ve Δy, x ve y yönündeki grid aralıklarını göstermektedir. Girdap veya sirkülasyon değerinin hesaplaması aşağıdaki formül ile yapılır.

$$\omega_z(i,j) = \frac{1}{4\Delta x \Delta y}\Gamma(i,j) \tag{3.8}$$

$$\Gamma_{i,j} = \frac{1}{2}\Delta x\left(u_{i-1,j-1} + 2u_{i,j-1} + u_{i+1,j-1}\right) + \frac{1}{2}\Delta y\left(v_{i+1,j-1} + 2v_{i+1,j} + v_{i+1,j+1}\right) - \frac{1}{2}\Delta x\left(u_{i+1,j+1} + 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1}\right) - \frac{1}{2}\Delta y\left(v_{i-1,j+1} + 2v_{i-1,j} + v_{i-1,j-1}\right) \quad (3.9)$$

Datalarda dalgalanmalara çok hassas olan türevlerin kullanılması yerine kendi kendine dataları filtre eden (düzgünleştiren) bu metot sirkülasyon metodu olarak da adlandırılmaktadır.

Deneylerde her bir deney seti için 350 adetlik iki grup şeklinde anlık hız alanı ölçülmüştür. Bu iki grup birleştirilerek bir durum için toplamda 700 adet anlık hız alanı kullanılmıştır Bu anlık hız alanlarından her bir deney seti için ortalama hız, girdap, Reynolds gerilmeleri ve akım çizgisi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır. PIV görüntülerinin görüntü sayılarını azaltmak amacıyla zaman ortalama görüntüleri hesaplanmıştır. Bunun için aşağıdaki formüllerle işlemler gerçekleştirilir.

Akım yönündeki (x yönünde) hız bileşenlerinin ortalaması,

$$\left\langle u(i,j)\right\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_n(i,j) \quad (3.10)$$

Akım yönündeki (x yönünde) hız bileşenleri ortalamasınınboyutsuzlaştırılması,

$$\left\langle u(i,j)^*\right\rangle = \frac{\left\langle u(i,j)\right\rangle}{U_\infty} \quad (3.11)$$

Akım yönüne dik (y yönünde) hız bileşenlerinin ortalaması,

$$\left\langle v(i,j)\right\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} v_n(i,j) \quad (3.12)$$

Akım yönüne dik (y yönünde) hız bileşenlerinin ortalamasının boyutsuzlaştırılması,

$$\left\langle v(i,j)^*\right\rangle = \frac{\left\langle v(i,j)\right\rangle}{U_\infty} \quad (3.13)$$

Zaman ortalamalı girdap,

$$\left\langle \omega(i,j)\right\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \omega_n(i,j) \quad (3.14)$$

Zaman ortalamalı girdabın boyutsuzlaştırılması,

$$\left\langle \omega(\mathrm{i,\ j})^{*} \right\rangle = \left\langle \omega(\mathrm{i,\ j}) \right\rangle \left(\frac{D}{U_{\infty}} \right) \tag{3.15}$$

Akım yönündeki hızların çalkantı değerlerinin ortalaması (ortalama hız çalkantılarının karelerinin karekökünün ortalaması),

$$\mathrm{u(i,\ j)_{rms}} = \left[\frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{\mathrm{n=1}}^{\mathrm{N}} \left[\mathrm{u_n(i,\ j)} - \left\langle \mathrm{u(i,\ j)} \right\rangle \right]^2 \right]^{1/2} \tag{3.16}$$

Akım yönündeki hızların çalkantı değerlerinin ortalamasının boyutsuzlaştırılması,

$$\mathrm{u(i,\ j)^{*}_{rms}} = \frac{\mathrm{u(i,\ j)_{rms}}}{U_{\infty}} \tag{3.17}$$

Akım yönüne dik hızların çalkantı değerlerinin ortalamasının boyutsuzlaştırılması,

$$\mathrm{v(i,\ j)^{*}_{rms}} = \frac{\mathrm{v(i,\ j)_{rms}}}{U_{\infty}} \tag{3.18}$$

Girdap çalkantılarının ortalaması (ortalama girdap çalkantılarının karelerinin karekökünün ortalaması),

$$\omega(\mathrm{i,\ j})_{\mathrm{rms}} = \left[\frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{\mathrm{n=1}}^{\mathrm{N}} \left[\omega_{\mathrm{n}}(\mathrm{i,\ j}) - \left\langle \omega(\mathrm{i,\ j}) \right\rangle \right]^2 \right]^{1/2} \tag{3.19}$$

Girdap çalkantılarının ortalaması (ortalama girdap çalkantılarının karelerinin karekökünün ortalaması),

$$\omega(\mathrm{i,\ j})^{*}_{\mathrm{rms}} = \omega(\mathrm{i,\ j})^{*}_{\mathrm{rms}} \left(\frac{D}{U_{\infty}} \right) \tag{3.20}$$

Ortalama Reynolds gerilmesi,

$$\left\langle \mathrm{u'v'(i,\ j)} \right\rangle = \frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{\mathrm{n=1}}^{\mathrm{N}} \left[\mathrm{u_n(i,\ j)} - \left\langle \mathrm{u\ (i,\ j)} \right\rangle \right] \left[\mathrm{v_n(i,\ j)} - \left\langle \mathrm{v\ (i,\ j)} \right\rangle \right] \tag{3.21}$$

Ortalama Reynolds gerilmesinin boyutsuzlaştırılması,

$$\left\langle \mathrm{u'v'(i,\ j)^{*}} \right\rangle = \frac{\left\langle \mathrm{u'v'(i,\ j)} \right\rangle}{U_{\infty}^{2}} \tag{3.22}$$

Akım yönündeki (x yönünde) hız bileşenlerinin normal gerilmesi,

$$\langle u'u'(i,j)\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[u_n(i,j) - \langle u\ (i,j)\rangle\right]\left[u_n(i,j) - \langle u\ (i,j)\rangle\right] \tag{3.23}$$

Akım yönüne dik (y yönünde) hız bileşenlerinin normal gerilmesi,

$$\langle v'v'(i,j)\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[v_n(i,j) - \langle v\ (i,j)\rangle\right]\left[v_n(i,j) - \langle v\ (i,j)\rangle\right] \tag{3.24}$$

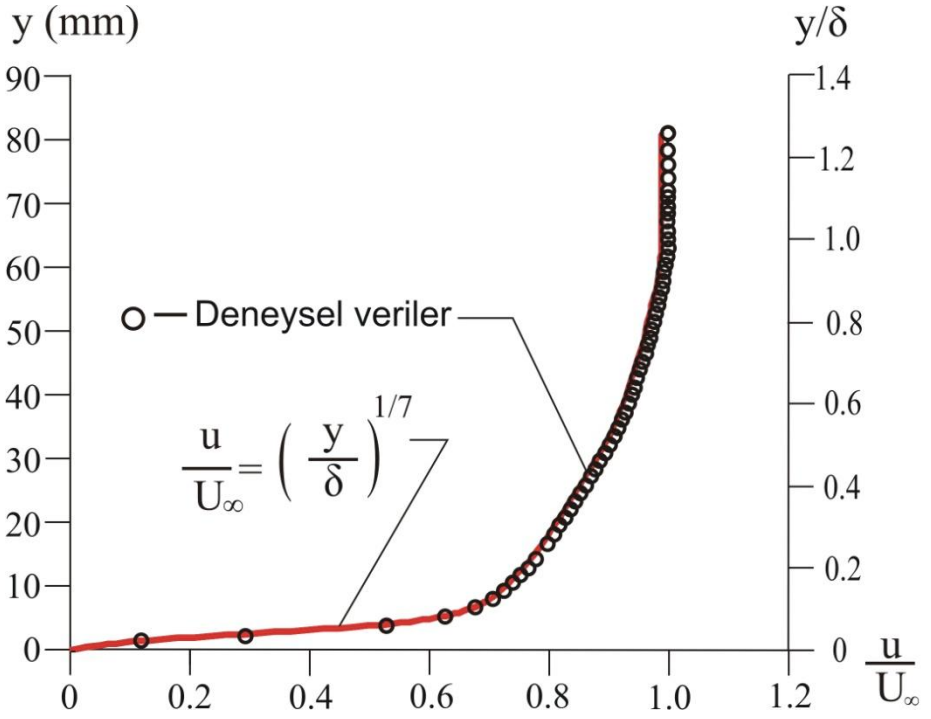
Türbülans kinetik enerjisi (TKE) seviyesi,

$$TKE = \frac{1}{2}\left(\frac{\langle u'u'(i,j)\rangle}{U_\infty^2} + \frac{\langle v'v'(i,j)\rangle}{U_\infty^2}\right) \tag{3.25}$$

Eşitliklerde N, toplam anlık görüntü sayısını, n ise bir deney setinde çekilen fotoğrafların anlık görüntüsünü, (i,j) ise akış alanındaki gridlerin pozisyonunu ve sayısını, <> sembolü zaman ortalaması alınmış görüntüyü göstermektedir.

3. 5. Levha üzerinde Türbülanslı Gelişmiş Sınır Tabaka Akışının Oluşturulması

Bilindiği gibi düz levha üzerinde türbülanslı sınır tabaka oluşması için çok uzun kanallar gerekmektedir. Su tünellerinde oluşan türbülans yoğunluğunu artırmamak ve Froude sayısının kritik altı seviyelerde muhafaza edebilmek için serbest akım hızları düşük tutulmaktadır. Düşük serbest akım hızlarında plaka üzerinde oluşan laminer sınır tabakanın türbülanslı sınır tabakaya dönüştürülmesini sağlamak için, levha üzerinde daha hızlı türbülansa geçiş sağlayan yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de sınır tabakanın oluşmaya başlayacağı bölgenin giriş kısmına ince tel çubuk (tripwire) koyarak levha cidarında türbülans oluşturmaktır. Bu çalışmada sınır tabaka deneylerine başlamadan önce bu yöntem uygulanarak kürenin levha üzerine konulacağı yerde türbülanslı hız profili elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle 2000 mm x 980 mm x10 mm boyutlarında keskin hücum açısı oluşturan bir plaka imal edilmiştir. Bu plaka üzerinde hidrodinamik olarak akış gelişmesini sağlamak için hücum kenarına yakın değişik çaplarda bir veya birden fazla çubuklar konularak denemeler yapılmıştır. Burada küre çapına göre tarif edilen Reynolds sayısı 5000 değeri için 5 mm çapında paslanmaz çelikten imal edilen çubuğun levhanın hücum kenarından 80 mm içeriye yerleştirilmesiyle, levhanın hücum kenarından 1400 mm uzaklıkta hız profili ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler PIV metodu ile kürenin konacağı görüntü alanını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Anlık olarak ölçülen 350 datanın ortalaması alınmış ve dikey bir çizgi boyunca deneysel hız datalarının değişimi Şekil 3.19'da sunulmuştur.



Şekil 3.19. Keskin giriş kenarı olan bir levha üzerinde türbülans oluşturan bir tel kullanarak küre çapına göre tarif edilen Re=5000 değerinde türbülanslı hız profilinin dağılımı. Bu profilin türbülanslı akışlar için ifade edilen kuvvet yasasından ($u/U_\infty=(y/\delta)^{1/n}$ burada n=7, δ:sınır tabaka kalınlığı, u:yatay hız bileşeni) hesaplanan ve deneysel verilere göre elde edilen u/U_∞ hız değerleri ile karşılaştırılması.

Hız değerlerinin levhada yaklaşık 63 mm yukarda serbest akım değerlerine %1'den daha küçük bir farkla ulaştığı belirlendiği için hidrodinamik sınır tabaka kalınlığı δ=63 mm olarak saptanmıştır. Elde edilen hız profili değerlerinden yer değiştirime kalınlığı δ*, momentum kalınlığı θ ve şekil faktörü $H= \delta^*/\theta$ değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak $\delta^*/\delta = 0.18$, $\theta/\delta = 0.13$ ve $H= \delta*/\theta =1.42$ olarak bulunmuştur. Literatürde şekil faktörünün tam gelişmiş türbülanslı akıştaki aralığı $1.2<H<1.4$ olarak belirtilmektedir ve bu çalışmada elde edilen H=1.42 değeri literatürle oldukça iyi derecede uyumludur. Deneysel olarak elde edilen hız profilinin ikinci doğrulaması ise kuvvet yasası olarak bilinen $u/U_\infty =(y/\delta)^{1/n}$ eşitliğinde n=7 ve deneylerden elde edilen sınır tabaka kalınlığı δ ve serbest akım hızı U_∞ değerleri kullanılarak yapılmıştır. Buradan hesaplanan değerler Şekil 3.19'da sürekli çizgi ile gösterilerek deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.19'da görüldüğü gibi oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sayısal çalışmaların doğrulanması için yapılacak çalışmalarda giriş hız şartlarının kuvvet yasasına göre alınabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Pürüzsüz Kürenin Sınır Tabaka ile Etkileşiminin Boya ve PIV Deney Sonuçları

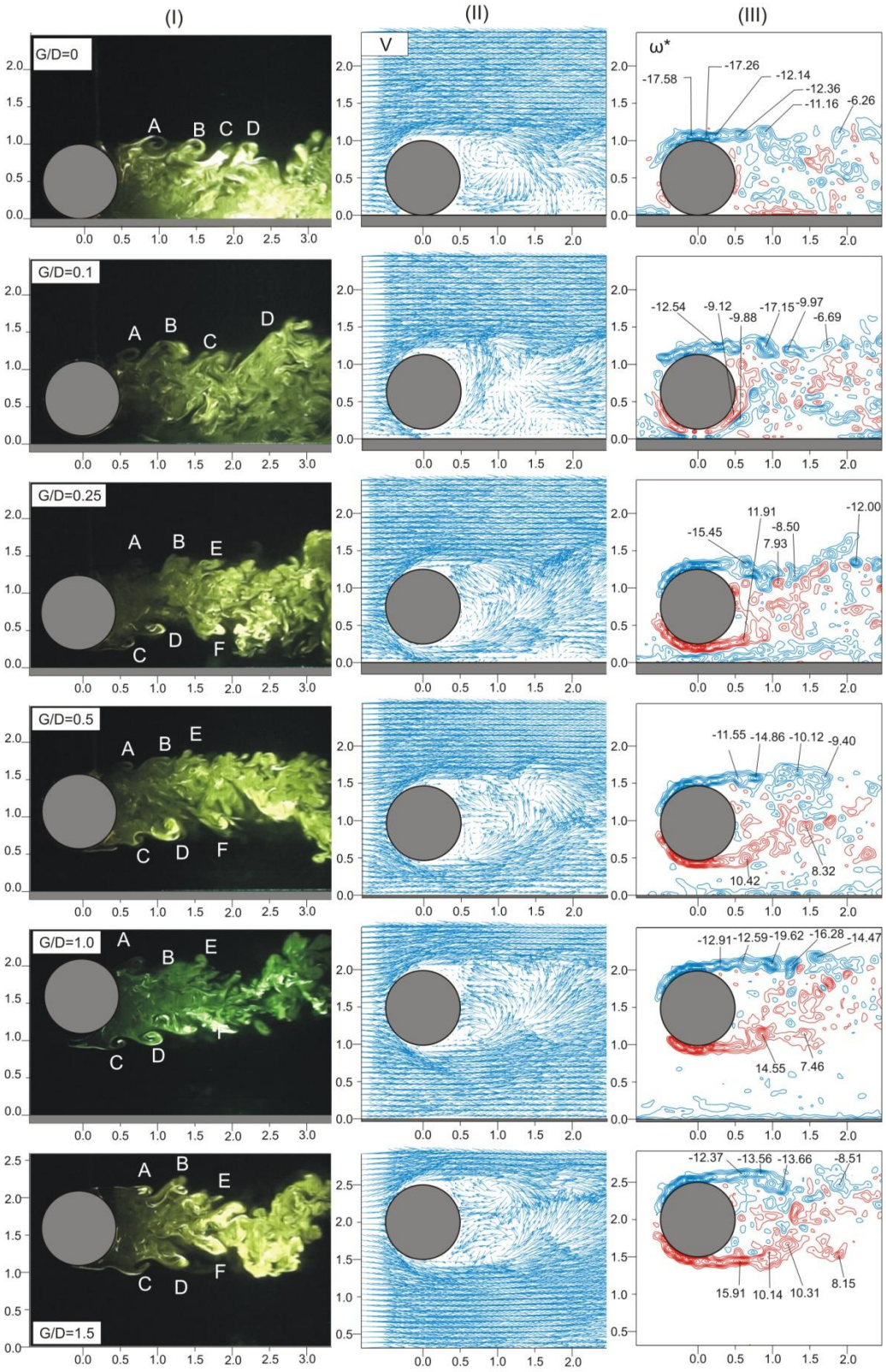
Şekil 4.1'de Re=5000 için 0<G/D<1.50 aralığında boya deney sonuçlarından örnekler, anlık hız vektörleri ve anlık girdap eş düzey eğrileri verilmiştir. Küre yüzeyinden ihmal edilebilecek mertebede düşük hızda akan boya küre çevresi ve art izi boyunca türbülanslı bölge içerisinde taşınarak küre çevresinde oluşan ve kopan girdapları görünür hale getirmektedir. Boya deneyleri ile elde edilen sonuçlarda nitel olarak görülen büyük ve küçük ölçekli girdap yapılarının büyüklüğü nicel olarak PIV sonuçlarından olan anlık girdap eş düzey eğrilerinde görülmektedir (Şekil 4.1, Sütun III). Şekil 4.1'de görüldüğü gibi küre çevresinden oluşan üç boyutlu ve karmaşık akış yapısından dolayı anlık girdap eş düzey eğrilerinde düzensizlikler oluşmaktadır. Şekillerde mavi sürekli çizgiler saat yönünde dönen negatif girdapları kırmızı sürekli çizgiler ise saat yönünün tersinde dönen pozitif girdapları ifade etmektedir. Boya deneylerinde görülen Kelvin-Helmholtz girdapları A-F harfleri ile adlandırılmıştır. Kürenin çevresinden oluşan serbest kayma tabakası art izi bölgesi ile serbest akım bölgesini ayırmakta olup, bu bölgedeki şiddetli hız değişiminden dolayı büyük ve küçük boyutlarda çeşitli girdaplar oluşmaktadır. Açıklık oranının artmasıyla oluşan jet akışlar ve sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinden dolayı art izi bölgesindeki hız çalkantıları artmaktadır. Hızın artması, art izi bölgesine doğru momentum ve kütle transferinin artışına neden olmaktadır. Bu şekilde çalkantılı akışın oluşması hem büyük girdapların içerisinde hem de çevresinde küçük girdapların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, genelde küt cisimlerde görülen bir özelliktir.

Kürenin düz levha ile tam temas ettiği durumda, kürenin arka kısmında düşük hız ve düşük basınç bölgesi oluşmaktadır. Küre art izi bölgesindeki ayrılmış akış ile sınır tabakanın etkisinde olan akış bölgesi arasındaki hız farkının yüksek olmasından dolayı şiddetli ve dalgalı periyodik Kelvin-Helmholtz girdapları oluşmakta ve art izi bölgesindeki düşük basıncın etkisiyle ayrılmış akış levha yüzeyine tekrar birleşmektedir. Kelvin-Helmholtz girdapları akış içinde hız farkı olan bölgelerde ya da faklı iki akışkanın bir birine temas ettiği ara yüzeylerde meydana gelir. Kürenin düz levha ile tam temas ettiği durumda iki boyutlu görüntü düzleminde akış ayrılması sadece kürenin üst bölgesinde gerçekleştiği için kayma tabakası boyunca ve küre art izi bölgesinde genellikle negatif girdaplar oluşmaktadır. İki boyutlu görüntü düzleminde

küre simetri ekseninin üst kısmında oluşan Kelvin-Helmholtz girdapları A, B, C ve D harfleri ile gösterilmiştir. Burada A ile gösterilen girdap akış ayrılması ve küre art izi ile sınır tabaka akışı arasındaki hız farkından dolayı oluşan girdapların başlangıç halini göstermektedir. Girdap akışla birlikte aşağı akım yönünde ilerlerken büyüyerek şiddeti azalmaktadır. Daha sonra art izi bölgesindeki düşük basıncın etkisi ile art izi bölgesine doğru yönelmektedir. D ile gösterilen girdap incelendiğinde yapısal olarak bozulduğu görülmektedir. Bu durum anlık girdap eş düzey eğrilerinden de (Şekil 4.1, Sütun III) görüldüğü gibi boya deney sonuçları ile de uyumludur. Kürenin hemen üst kısmında girdabın dönüş hızı en üst düzeydedir (-17.26). Girdaplar aşağı akım yönüne doğru ilerledikçe şiddetleri -17.26'dan, -12.14, -12.36, -11.16 ve -6.26'ya düşmüştür. Görüldüğü gibi art izi bölgesinde mavi renkle gösterilen saat yönünde dönen negatif değerdeki girdaplar hakimdir. Bunun nedeni akışın iki boyutlu görüntü düzleminde kürenin sadece üst kısmından ayrılıyor olmasındandır.

Açıklık oranı G/D=0.10 olarak ayarlandığında kürenin alt noktasıyla levha yüzeyi arasındaki boşluktan jet formunda bir akış oluşmaktadır. Oluşan jet akış anlık vektör alanından (Şekil 4.1, Sütun II) net bir şekilde görülebilmektedir. Serbest akım yönüne dik yukarı yönde üst kayma tabakasına doğru ilerleyen jet akış art izindeki vektörel alanda yüksek hızlı koyu bir bölge oluşturmuştur. Bu açıklık oranında oluşan jet akış kürenin arka bölgesinde eğrisel yüzey boyunca yapışarak ilerlemiş ve kürenin üst bölgesindeki kayma tabaksı ile etkileşime girip Kelvin-Helmholtz girdaplarını serbest akıma dik yukarı yönde itmiştir. Oluşan jet akışın etkisiyle Kelvin-Helmholtz girdaplarının levhaya olan yönelimi azalmıştır ve levhaya paralel bir yönde ilerleme eğilimi göstermiştir. Bu aralık değerinde jet akışın kürenin eğrisel yüzeyini bu şekilde takip etme eğilimi küre art izi bölgesine büyük oranda enerji ve momentum yüklü kütle transferinin gerçekleşmesine neden olmuştur ve bu durum da basınç farkından kaynaklanan sürükleme direncinin azalacağı ve art izi bölgesindeki karışımın artmasıyla da ısı transferinin iyileşeceği şeklinde yorumlanabilir. Boya deneyleri incelendiğinde kürenin alt kısmında Kelvin-Helmholtz girdaplarının oluştuğu görülmemiştir (G/D=0.10). Anlık girdap eş düzey eğrileri incelendiğinde ise kürenin hemen alt kısmından kırmızı renkle gösterilen pozitif değerde saat yönünün tersinde dönen girdap yapıları oluşmuştur. Bu bölgede oluşan pozitif girdaplar jet akışın etkisi ile küre art izine doğru taşınırken şiddetleri de azalmaktadır. Kürenin alt noktası ve levhanın yüzeyindeki kaymama koşulundan ve jet formundaki akışın orta noktasında hızın en

yüksek olmasından kaynaklanan hız profilinden dolayı jet akışın üst kısmında pozitif alt kısmında ise negatif değerlerde girdaplar oluşmuştur.



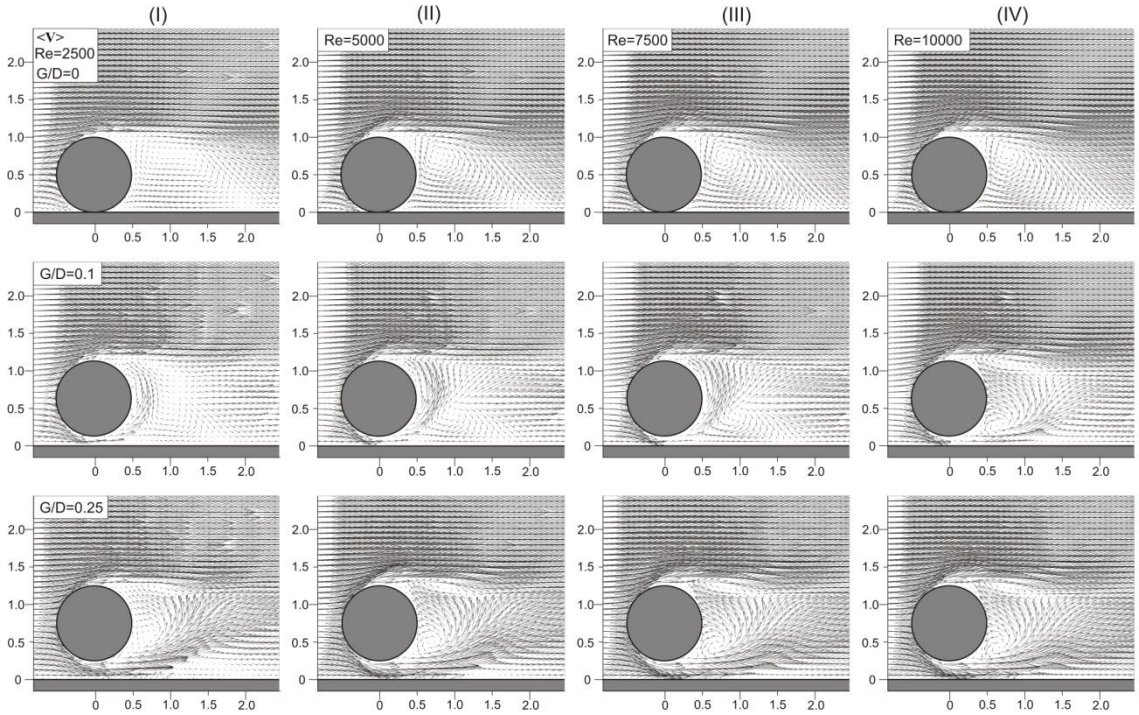
Şekil 4.1. Pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının anlık boya, anlık vektör alanı V ve anlık girdap ω* yapılarının küreyle plaka arasındaki boşluk oranı $0 \leq G/D \leq 1.5$ ve Re=5000 için değişimi. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|\omega^*|_{min} = < |\omega^*| >_{min} = 2$'dir.

Açıklık oranı G/D=0.25 olarak ayarlandığında, artan aralıkla birlikte jet formundaki akışın küre yüzeyini takip etme eğilimi azalmış ve levhaya paralel bir hal almıştır. Jet akışın bu şekildeki yapısının bir sonucu olarak küre yüzeyinden ayrılmış akış tekrar levha yüzeyiyle birleşmeden Karman Girdap Caddelerine (Karman Vortex Street) benzer "S" şeklini yaparak akım yönünde yoluna devam etmektedir. Ancak, kürenin etkisi ile levha yüzeyinin hemen üst kısmında ayrılmış bir akış bölgesinin göstergesi olan negatif değerdeki girdaplı bölge levhaya paralel bir şekilde oluşmuştur. Anlık hız vektörleri ve anlık girdap eşdüzey eğrilerinden görülebildiği gibi küre art izi ile levha üzerindeki sınır tabakanın etkileşiminden dolayı levha üzerinde girdap kaynaklı akış ayrılmaları gerçekleşmektedir. Bu durum daha sonra ortalama akım çizgileri ile daha detaylı açıklanacaktır. Boya deneyleri incelendiğinde ise C, D ve F ile gösterilen Kelvin-Helmholtz girdapları görülmektedir.

Kürenin G/D=0.10 açıklık oranında jet akışın küre arka yüzeyini takip etmesi nedeniyle pozitif ve negatif değerdeki girdaplar birlikte art izi bölgesine taşınırken, açıklık oranı G/D=0.25 olduğu durumda pozitif ve negatif değerdeki girdaplar ayrılmakta pozitif olanlar art izi içine yönlenip negatif olanlar daha dışarıda kalmaktadır.

G/D=0.50 ve daha yüksek açıklık oranlarında jet formundaki akış etkisini tamamen kaybetse de sınır tabadaki üniform olmayan hız profilinden dolayı kürenin alt ve üst kısımlarında kopan girdapların büyüklüklerinde farklılıklar oluşmuştur.

G/D=1.0 açıklık oranına kadar kürenin alt ve üst kısmında meydana gelen akış ayrılmalarının oluşturduğu girdap büyüklüklerinde farklılıklar görülmektedir. Bu durumun nedeni sınır tabaka içerisinde üniform olmayan hız profilinin kürenin alt ve üst kısımlarında meydana gelen akış ayrılma hızlarında farklılık oluşturmasıdır. G/D=1.0 ve 1.5 açıklık oranlarında anlık girdap eş düzey eğrilerinden görüldüğü kadarıyla sınır tabakanın etkisi kaybolmuş ya da azalmıştır. Bu açıklık miktarından kürenin üst kısmından ve alt kısmından kopan girdapların şiddetleri yaklaşık olarak eşittir. Ancak, bu değerler anlık akış karakteristiklerini vermektedir ve daha önce belirtildiği gibi küre art izinde daimi olmayan karmaşık akış yapısı hakimdir. Ancak, zaman ortalaması alınmış büyüklükler incelendiğinde daha kesin yargılara varılabilmektedir.



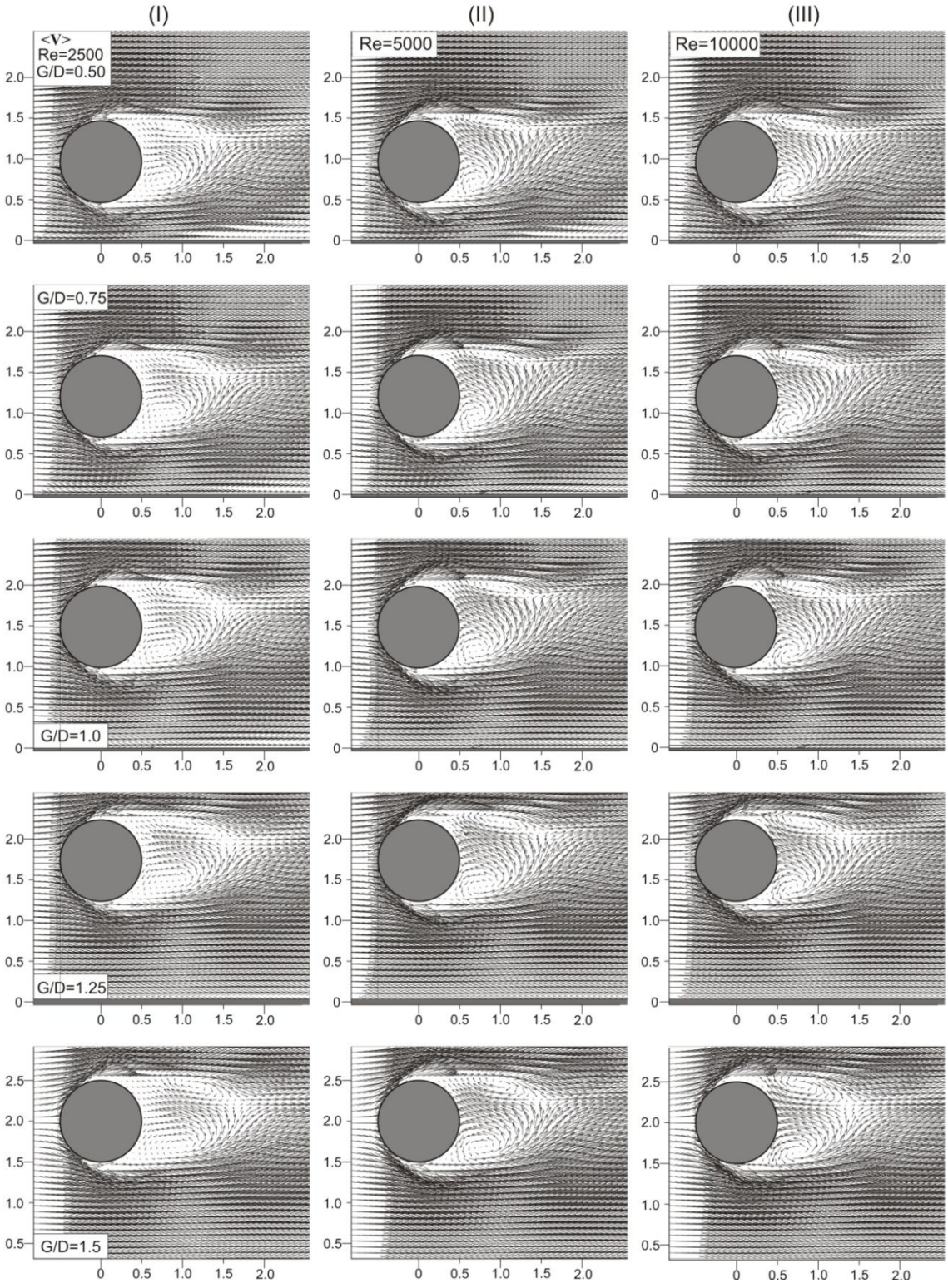
Şekil 4.2. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama vektör alanı <V>' nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 4.2'de pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama hız vektör alanlarının <V> küreyle plaka arasındaki boşluk oranı değerleri G/D=0, 0.1 ve 0.25 için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması verilmiştir. Zaman ortalaması alınmış hız vektörlerini <V> gösteren resimlere bakıldığında küre arkasındaki düşük hıza sahip bölge art izi bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Kürenin levha üzerine tam temas ettiği durum olan G/D=0 açıklık oranında zaman ortalaması alınmış hız vektörlerine bakıldığında art izi büyüklüğünde Reynolds sayısına bağlı olarak dikkate değer bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak, Reynolds sayısı 2500 değerinden 10000 değerine yükseldikçe art izi bölgesi içerisindeki vektör boyutlarının serbest akım bölgesindeki vektör boyutlarına oranı artmaktadır. Aynı zamanda kürenin hemen sırt kısmına yaklaşık bir bölgede simetri küre ekseninin hemen üst kısmında oluşan dönümlü akış bölgesi daha belirgin bir şekilde oluşmuştur. G/D=0.1 açıklık oranındaki zaman ortalaması alınmış hız vektörleri incelendiğinde oluşan jet akışın fiziksel yapısı daha net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.2). Re=2500'de kürenin alt kısmından gelen jet akış kürenin hemen sırt kısmına yapışık bir şekilde ilerleyerek kürenin üst kısmındaki kayma tabakasıyla etkileşime geçmektedir. Bu durum Re=5000 ve 7500

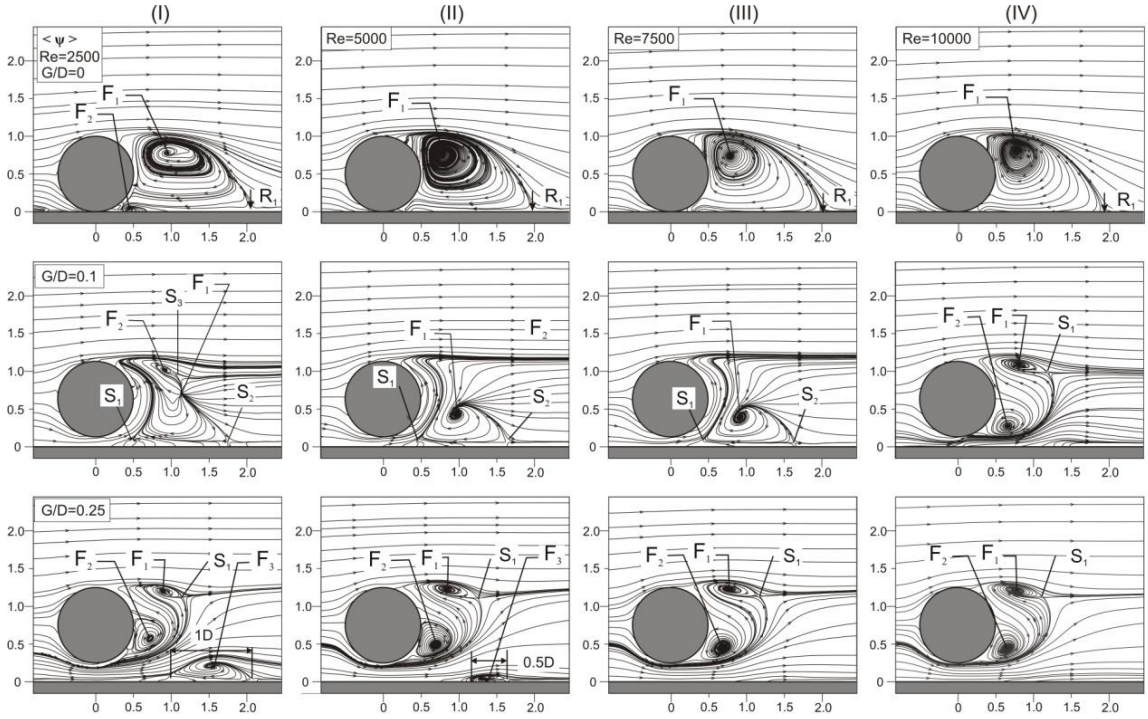
değerlerinde de aynı şekilde meydana gelmiştir. Ancak, jet akış artan enerjisi ile daha belirgin hale gelerek art izi bölgesine doğru yayılmaktadır. Aynı açıklık oranında Reynolds sayısı 10000 değerine artırıldığında jet akış artık kürenin sırt kısmından ayrılmaktadır ve doğrultusu aşağı akım yönüne kaymıştır. Bu durumda akış ayrılması küre simetri ekseninin hem alt kısmında hem de üst kısmında meydana gelmiş ve bir birine ters yönde iki adet dönümlü akış bölgesi oluşmuştur.

Açıklık oranı G/D=0.25'e artırıldığında jet akış hala devam etmekle birlikte küre art izinin akış yapısında Reynolds sayısına bağlı belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Bütün Reynolds sayılarında küre alt kısmındaki akış küre yüzeyinden ayrılarak üst kısmındakine benzer bir şekilde dönümlü akış bölgesi oluşturmuştur. Ancak, levha üzerindeki sınır tabaka akışında Reynolds sayısına bağlı değişimler oluşmaktadır. Bütün Reynolds sayılarında levha üzerindeki akışta, küre merkezinden yaklaşık 1D (42.5 mm) ve 2D (85 mm) aşağı akım yönündeki mesafeler arasında ve jet akışın hemen alt kısmındaki bölgede düşük hız alanlarının oluştuğu görülmektedir. Bu düşük hız alanlarının uzunluğu ve yüksekliği Reynolds sayısı arttıkça azalmıştır.

Şekil 4.2'de ortalama hız vektör alanının<V> küreyle plaka arasındaki boşluk oranları 0.5 ≤G/D≤1.5 için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması sunulmuştur. G/D=0.50 açıklık oranında her Reynolds sayısında da küre art izinin yukarıya doğru kaydığı görülmektedir. Bu kayma daha yüksek açıklık oranlarında azalmaktadır. Zaman ortalaması alınmış hız vektörleri incelendiğinde bütün Reynolds sayıları için açıklık oranı G/D=0.5'ten G/D=1.25'e artırıldığında art izi bölgesinin genişlediği ve G/D=1.25 ve 1.5 değerlerinde sabitlenerek serbest akıma maruz kalmış kürenin art izi büyüklüğüne yakın bir değere ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama vektör alanı <V>'nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.5, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(kolon II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması.



Şekil 4.4. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama akım çizgileri<Ψ>'nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te zaman ortalaması alınmış akım çizgileri <Ψ> art izi bölgesinin boyutu ve akış yapısı hakkında detaylı bilgi vermektedir. Ayrıca, levha ile küre arasındaki açıklıkta oluşan jet formundaki akışın yönlenme açısı, akışta oluşan serbest durma noktaları (S), akışın levha üzerinde tekrar birleşme noktası (R) ve dönümlü akış bölgelerinin odak noktalarının (F) yerlerini göstermektedir. Akım çizgisi resimlerinde kürenin çevresinden ayrılan akım çizgilerinin birleştiği yer "S" simgesi ile gösterilmiştir. Küre çevresinden ayrılan akışın düz levha üzerinde tekrar birleştiği yer R_1 simgesi ile gösterilmiştir. F ile gösterilen akım çizgilerinin sirkülâsyonu kürenin üst tarafından merkeze doğru saat yönünde bir noktada toplanırken, alt kısımdan oluşan akım çizgileri ters yönde meydana gelmektedir.

G/D=0 açıklık aralığında Reynolds sayısının bütün değerleri için bir adet saat yönünde dönen odak noktası oluşmaktadır (Şekil 4.4). Bunun nedeni iki boyutlu düzlemde gösterilen akışın sadece kürenin üst bölgesinden ayrılmasıdır. Küre üst kısmından ayrılan akış küre merkezinden yaklaşık olarak aşağı akım yönünde 2D (85 mm) uzaklıkta levha yüzeyine tekrar birleşmektedir. Reynolds sayısı 2500 değerinden 10000 değerine yükseltildiğinde ayrılmış akışın levha yüzeyine tekrar birleştiği yer akışın enerjisinin artmasına rağmen değişim göstermemiştir.

Açıklık oranı G/D=0.1 olarak ayarlandığında kürenin art izinde oluşan akış yapısı Reynolds sayısına bağlı olarak diğer açıklık oranlarına göre büyük değişiklik göstermiştir (Şekil 4.4). Re=2500 değerinde iki adeti (S_1 ve S_2) levha cidarı üzerinde bir adeti (S_3) küre simetri ekseninin üst kısmındaki kayma tabakasında olmak üzere toplam üç adet durma noktası oluşmuştur. Jet akış küre sırt bölgesini takip edip üst bölgedeki kayma tabakası ile etkileşime girerek aşağı akım yönünde ilerlerken, yaklaşık olarak küre merkezi simetri ekseninin hemen hizasında odak noktası F_1 olan büyük bir ayrılma kabarcığı oluşturmuştur. Ayrılma kabarcığının odak merkezi F_1 ile gösterilmiştir. Buna ek olarak küre simetri ekseninin üst kısmında odak noktası F_2 ile gösterilen küçük bir dönümlü akış bölgesi oluşmuştur. Reynolds sayısının değeri 5000'e çıkartıldığında odak noktası F_2 ile gösterilen küçük dönümlü akış bölgesi kaybolurken büyük ayrılma kabarcığının içinde oluşan F_1 odaklı dönümlü akış bölgesi Re=7500 değerine kadar gelişmeye devam etmiştir. Reynolds sayısı 10000 değerine çıkartıldığında büyük ayrılma kabarcığı tamamen kaybolmuş, küre art izi bölgesinde üniform akış içerisine yerleştirilmiş kürenin art izi bölgesine benzer şekilde hem üst kısımda hem de alt kısımda olmak üzere iki adet dönümlü akış bölgesi oluşmuştur.Ancak, akım çizgilerinin oluşturduğu dönümlü akış bölgesinin büyüklüklerinde ve odak noktalarının yerlerinde asimetriklik meydana gelmiştir. Bunun nedeni jet akışın küreyi sararak alt kısmındaki akış ayrılmasını geciktirmesidir.

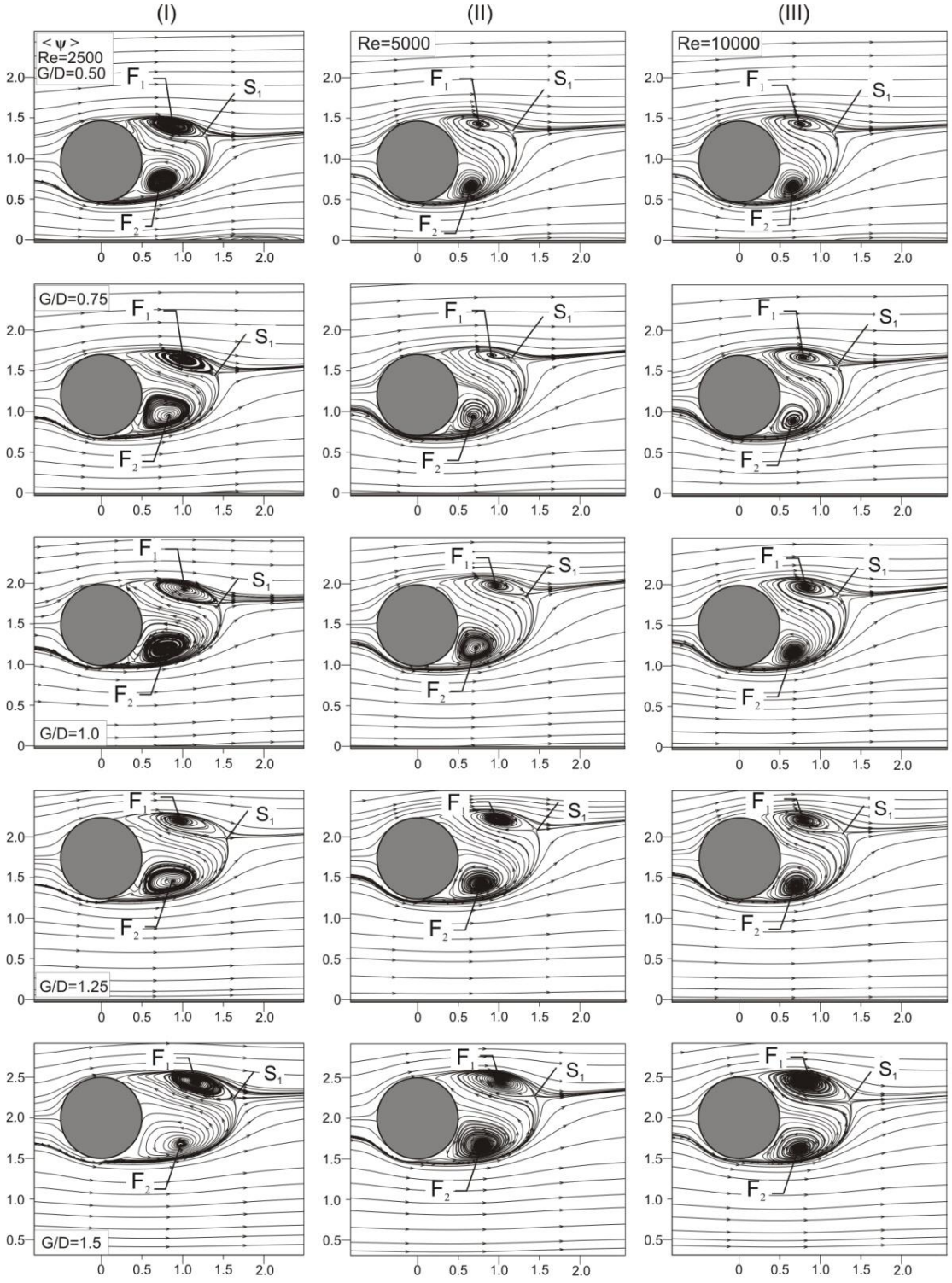
G/D=0.25 açıklık ve Re=2500 değerinde odak noktası F_3 ile gösterilen ve küre merkezinden yaklaşık 1.6D uzaklıkta aşağı akım bölgesinde oluşan ikincil bir ayrılma kabarcığının oluşturduğu dönümlü akış bölgesi görülmektedir. Dönümlü akış bölgesinin uzunluğu yaklaşık 1D (42.5mm) kadardır. Reynolds sayısı 5000 değerine çıkarıldığında bu dönümlü akış bölgesinin odak noktası yukarı akım yönüne doğru ilerlerken uzunluğu 0.5D'ye düşmüştür. Reynolds sayısının 7500 ve 10000 değerlerinde ise levha üzerinde belirgin bir akış ayrılması oluşmadığından akım çizgisi yapılarında dönümlü akış bölgesi görülmemektedir. Levha cidarında meydana gelen akış ayrılmalarının nedeni şu şekilde açıklanabilir: Kürenin çevresinden oluşan serbest kayma tabakası ile art izi bölgesi arasındaki hız farkından dolayı oluşan girdaplar aşağı akım yönünde levha cidarı boyunca taşınmaktadır. Girdapların dönerek ilerlemesi basınç çalkantılarının oluşmasına neden olur. Oluşan bu basınç çalkantıları levha cidarındaki akışın ayrılmasına katkı sağlar. Aynı zamanda art izi bölgesindeki düşük basınçtan dolayı levha üzerinde oluşan sınır tabaka akışı yukarı yönde sapma eğilimi gösterir. Bu durumun bir sonucu olarak da levha üzerindeki akışta girdap ve akım yönüne ters akışla

artan basınç gradyanı kaynaklı akış ayrılmaları gerçekleşmektedir. Akış ayrılmaları levha cidarında dinamik yüklerin oluşmasına neden olurken aşındırıcı etki yapar. Bunlara ek olarak odak noktaları F_1 ve F_2 ile gösterilen dönümlü akış bölgelerinin büyüklüklerinde farklılıklar oluşmuştur. Sınır tabaka içindeki üniform olmayan hız profilinden dolayı üst kayma tabakasında oluşan dönümlü akış bölgesi uzunluk (x ekseni doğrultusunda) olarak daha büyükken, jet akıştan dolayı da alt kayma tabakasında oluşan dönümlü akış bölgesi yükseklik (y ekseni doğrultusunda) olarak daha büyüktür. S ile gösterilen durma noktalarının küre simetri eksenine göre konumuna bakıldığında ise art izi bölgesinin (y ekseni doğrultusunda) yukarıya doğru saptığı görülmektedir. Bu durumda küre üzerine etkiyen toplam sürükleme kuvvetinin yukarı yönde de bileşeni olduğu ve dolayısıyla bir kaldırma kuvvetinin oluşacağı söylenebilir. G/D=0.25 açıklık oranı için art izi bölgesinin küre merkezinden ölçülen uzunluğu Re=2500, 5000, 7500 ve 10000 için sırasıyla 1.15D, 1.26D, 1.17D ve 1.12D'dir. Görüldüğü gibi art izi bölgesinin uzunluğu Reynolds sayısı 2500'den 5000'e artırılırken artmış daha sonra azalarak Reynolds sayısının 10000 değerinde en küçük değeri almıştır. Re=2500 değerinde art izi bölgesinin Re=5000 ve 10000 değerlerine göre daha küçük olmasının nedeni, küre ile levha arasındaki boşlukta meydana gelen jet akışın küre sırtını takip etme eğilimidir. Reynolds sayısı 5000'e çıkartıldığında bu eğilim azalmış ve art izi uzamıştır. Reynolds sayısı 7500 ve 10000'e çıkartıldığında ise akışın enerjisinin artması ile art izi tekrar kısalmıştır.

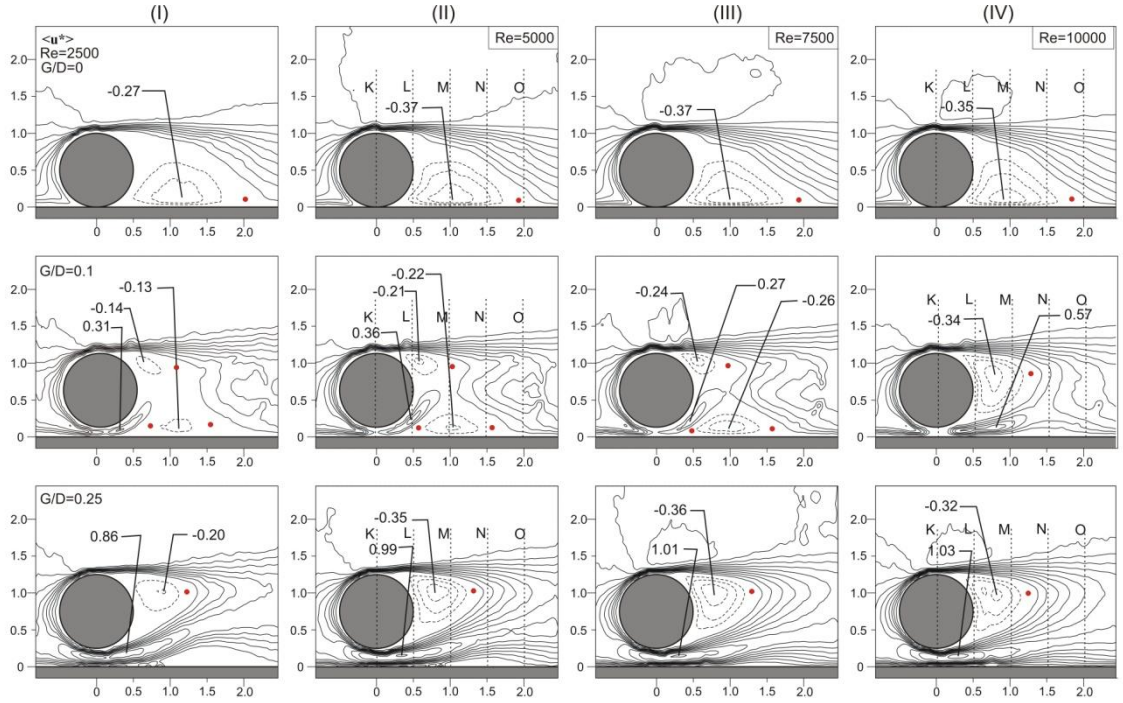
Açıklık oranı G/D=0.50'ye yükseltildiğinde açıklık oranı G/D=0.25'e göre küre art izinde meydana gelen değişim sadece art izinin büyüklüğünde olmuştur. Re=2500'de art izi bölgesinin uzunluğu küre merkezinden ölçüldüğünde 1.15D'den 1.26D'ye yükselirken bu durum Re=5000 ve 10000 için sırasıyla 1.26D'den 1.15D'ye düşüş ve 1.12D'den 1.15D'ye yükseliş şeklinde gerçekleşmiştir. Levha üzerinde akış ayrılmalarından kaynaklanan dönümlü akış bölgesi Re=5000 ve 10000 durumları için tamamen kaybolmuştur. Re=2500 durumunda ise akım çizgileri dönümlü bir akış bölgesi ve odak noktası oluşturmamış olsa da küre merkezinden yaklaşık 1D ve 2.5D mesafeleri arasında serbest akıma ve levhaya göre paralelliklerini kısmen kaybetmiştir. Bu da levha yüzeyine yakın bölgedeki sınır tabaka akışında çok az da olsa bir sapmanın olduğunu göstermektedir.

Bütün Reynolds sayıları için açılık oranı G/D=0.50'den G/D=1.5'e çıkartıldığında sınır tabaka içerisinden çıktıkça art izi bölgesinin uzunluğu artmaktadır. Örneğin G/D=0.50 ve Re=2500'de art izi bölgesinin uzunluğu küre merkezinden

ölçüldüğünde 1.26D'den 1.62D'ye yükselirken bu durum Re=5000 ve 10000 için sırasıyla 1.15D'den 1.45D'ye ve 1.15D'den 1.37D'ye yükseliş şeklinde belirlenmiştir. Açıklık oranı G/D=1.5 olduğunda küre jet akışın etkisinden tamamen çıkmış olsa da sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinin kısmi etkisi ile art izi bölgesinde bir miktar asimetriklik görülmektedir (Şekil 4.5). G/D=1.5 açıklık oranında küre art izi bölgesinin büyüklüğü tamamen Reynolds sayısının bir fonksiyonu şeklinde değişmektedir. Bu durum G/D=1.25 açıklık oranı için de kısmen geçerlidir. Görüldüğü gibi Reynolds sayısının (G/D=1.5 için) Re=2500, 5000 ve 10000 değerleri için kürenin art izi bölgesinin küre merkezinden uzunluğu sırasıyla 1.62D, 1.45D ve 1.37D olmaktadır. Reynolds sayısı artıkça art izi bölgesinin büyüklüğü küçülmüştür.



Şekil 4.5. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama akım çizgileri<Ψ>'nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması.



Şekil 4.6. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız <u*> eş düzey eğrilerinin, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|<u^*>|_{min}=|<\Delta u^*>|_{min}= 0.1$'dir.

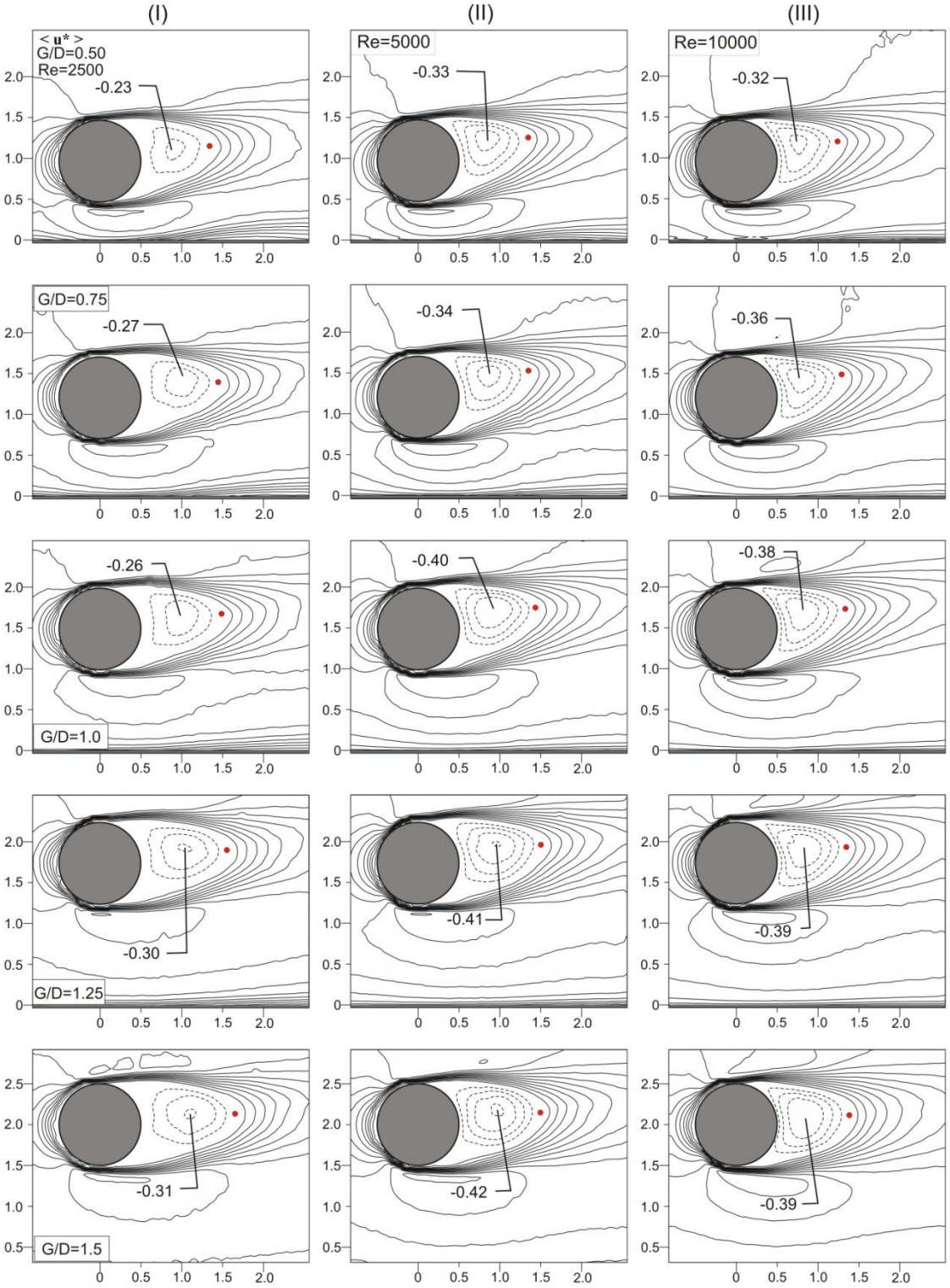
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız<u*> eş düzey eğrilerinin, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da akım yönüne dik yöndeki ortalama hız <v*> eş düzey eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Kürenin levhaya tam olarak temas ettiği durumda daha önce de belirtildiği gibi iki boyutlu görüntü düzleminde akış kürenin üst kısmından ayrılmakta belirli bir mesafe sonra küre art izindeki düşük basıncın da etkisiyle levha yüzeyine tekrar birleşmektedir. Tam birleşme noktasında zaman ortalaması alınmış akım çizgilerinden net bir şekilde görüldüğü gibi akışın bir kısmı aşağı akım yönünde ilerlerken bir kısmı da art izi bölgesine doğru yukarı akım yönünde ilerleyerek art izi içinde dönümlü bir akış bölgesi oluşturmaktadır (Şekil 4.4). Zaman ortalaması alınmış akım çizgileri resimlerinde R ile gösterilen nokta burada küçük içi dolu daire sembolü ile gösterilmiştir. Daire sembolü ile gösterilen yerlerde zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşeni<u*>'ın değeri akışın serbest akım doğrultusunda yön değiştirmesinden dolayı sıfır olmaktadır. Ters basıncın etkisiyle küre arkasındaki bölgede (eş düzey eğrilerinde kesik çizgilerle gösterilmektedir) negatif hız bölgesi oluşmaktadır. Negatif eş düzey eğrilerinin tepe

değer noktalarının oluşum mesafesi Reynolds sayısı arttıkça küreye doğru yaklaşmaktadır. Negatif eş düzey eğrileri en büyük değerini Reynolds sayısının 7500 olduğu durumda almıştır. Küre art izi bölgesindeki akım yönüne dik yöndeki ortalama hızların <v*> negatif bileşenlerinin en yüksek tepe değerleri Reynolds sayısı ile birlikte artmış ve daha fazla bir alan kaplamıştır. Akım yönüne dik yöndeki ortalama hızların <v*> negatif değerlerinin artması levha yüzeyine olan akışkan akımının artması anlamına gelmektedir.

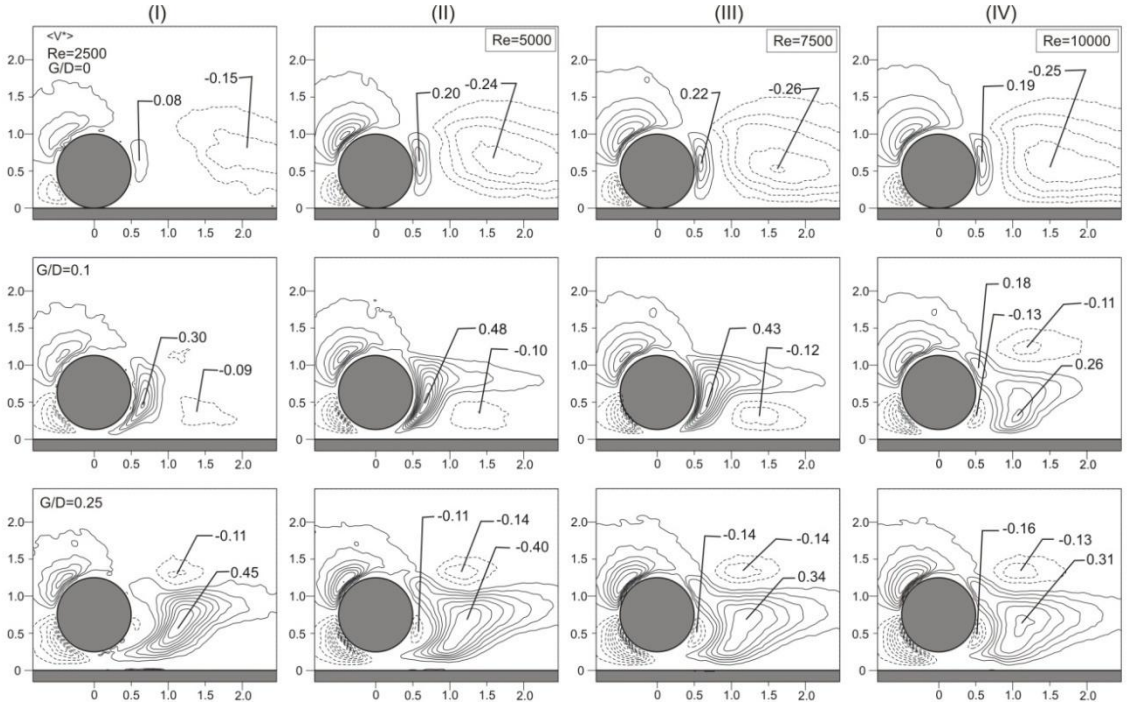
Açıklık oranı G/D=0.1'e yükseltildiğinde Re=2500, 5000 ve 7500 durumlarında küre ile levha arasındaki boşluktan geçen jet akışın etkisiyle, G/D=0 açıklık oranında tek bir küme halinde bulunan negatif hız bölgesi <u*>eş düzey eğrileri ikiye bölünmüştür. Küre simetri ekseninin üst kısmında kalan negatif hız bölgesinin <u*> şiddetlerinin tepe değerleri Re=2500, 5000 ve 7500 için sırasıyla serbest akım hızlarının yaklaşık %14, %21 ve %24'ü kadardır. Küre simetri ekseninin alt kısmında ise negatif hız bölgesinin <u*> şiddetlerinin tepe değerleri Re=2500, 5000 ve 7500 için sırasıyla serbest akım hızlarının yaklaşık %13, %21 ve %26'sı seviyesinde olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi jet akış, Re=7500 için negatif hız bölgesini neredeyse iki ayrı bölgeye bölmüştür. Reynolds sayısının 10000 değerinde küre ile levha arasındaki boşluktan geçen jet akışın yapısı farklıdır. Enerjisi artan akış küre art izi bölgesinin düşük basınç etkisinden kurtularak serbest akım doğrultusuna paralel olarak ilerlemiş ve dolayısıyla diğer durumlardan farklı olarak küre art izi bölgesinde akım yönündeki negatif hız bölgesini temsil eden eş düzey eğrileri tek bir grup şeklinde oluşmuştur. Jet akışın Re=10000 durumu için sahip olduğu akım doğrultusuna paralel $<u^*>$ hızının tepe değeri yaklaşık olarak serbest akım hızının %57'si kadar ölçülmüştür. Bu değer diğer Reynolds sayılarında ölçülen değerlerden daha fazladır. Akım yönüne dik yöndeki hız bileşenleri <v*> eş düzey eğrilerinin, kürenin sırt kısmındaki bölgede (Şekil 4.8) jet akışın y ekseni doğrultusundaki hareketi sonucunda en yüksek tepe değerleri artmıştır. Reynolds sayısının Re=5000 ve 7500 seviyesinde yüksek çıkan bu değer Reynolds sayısının Re=10000 değerinde düşmüştür. Reynolds sayısının Re=2500, 5000 ve 7500 değerlerinde levhanın üst kısmında tepe değerleri sırasıyla -0.09, -0.10 ve -0.12 olan <v*> negatif hız bölgesi oluşmuştur. Bu daha önce ortalama akım çizgilerinde gösterilen dönümlü akış bölgesinin bir sonucudur, çünkü, bu negatif hız bölgesi Reynolds sayısının Re=10000 seviyesinde kaybolmuştur.

Açıklık oranı G/D=0.25'e çıkarıldığında küre ile levha arasındaki jet akışta bütün Reynolds sayıları için büyük oranda artış olmuştur. Re=2500 için jet akışın en yüksek<u*> hız değeri serbest akım hızının %86'sına ulaşırken bu değer Re=5000, 7500 ve 10000 için sırasıyla %99, %100 ve %100'dür. Bu oranlar sınır tabaka akışında jet akışın oluştuğu bölgede küresiz duruma göre daha yüksek çıkmıştır, yani akış küre ile levha arasında hızlanmıştır. Jet akışın enerjisinin artması ve küre ile levha arasındaki boşluğun büyümesi jet akışın yapısını da değiştirmiştir. G/D=0.1 açıklık oranında Re=2500, 5000 ve 7500 durumlarında jet akış tarafından ikiye bölünen <u*> negatif hız bölgeleri G/D=0.25 açıklık oranında tek bir bölgede oluşmuştur. Re=10000 durumunda ise akış yapısında belirgin bir değişim olmamış sadece negatif hızların tepe değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni <v^*> eş düzey eğrilerinin (Şekil 4.8) jet akışın olduğu bölgedeki en yüksek tepe değerleri Re=2500 ve Re=10000 için artarken Re=5000 ve Re=7500 için azalmıştır. Daha yüksek açıklık oranlarında akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşeni <v*> eş düzey eğrilerinde küre art izinin üst bölgesinde negatif, alt bölgesinde pozitif hız bölgesi oluşmuştur. Pozitif hız bölgesinin şiddeti her zaman negatif hız bölgesinin şiddetinden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni küre art izinin y ekseni doğrultusunda yukarı yönde kaymış olup simetrikliğini kaybetmesindendir.

Açıklık oranı G/D=0.50'ye yükseltildiğinde Re=2500 durumu için <u*> negatif hız değerlerinin büyüklüğü artmış Re=5000 ve 10000 durumlarında ise azalmıştır. Daha yüksek açıklık oranlarında zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşeni<u*> eş düzey eğrileri incelendiğinde akış yapısında meydana gelen en belirgin değişim bütün Reynolds sayılarında (Re=2500, 5000 ve 10000) küre art izinde meydana gelen negatif hız bölgelerinin tepe değerlerinin artması ve küre sırtına doğru yaklaşmasıdır (Şekil 4.7). Açıklık oranı G/D=1.5'e yükseltildiğinde negatif hız bölgeleri en büyük değeri alırken tepe değerlerin oluştukları yer de akış yapısının simetrik bir yapı kazanmasından ötürü küre simetri ekseninin hizasında oluşmuştur. Zaman ortalaması alınmış akım doğrultusuna paralel hız bileşeni <u*> kürenin hemen arkasında negatif hız eş düzey eğrilerine sahiptir. Bu negatif hız bölgeleri küt cisim olan kürenin ön ve arkasındaki basınç farkından kaynaklanmaktadır. Hız değerleri kürenin arka yüzeyine yakın yerlerde sıfıra çok yakın değerler almıştır. Ortalama <v*> hız bileşenleri hem kürenin önünde hem de kürenin arkasında negatif ve pozitif hız eş düzey eğrilerini oluşturmaktadır. Bu tür yapının oluşması küreye doğru yaklaşan akışın küre çevresinde

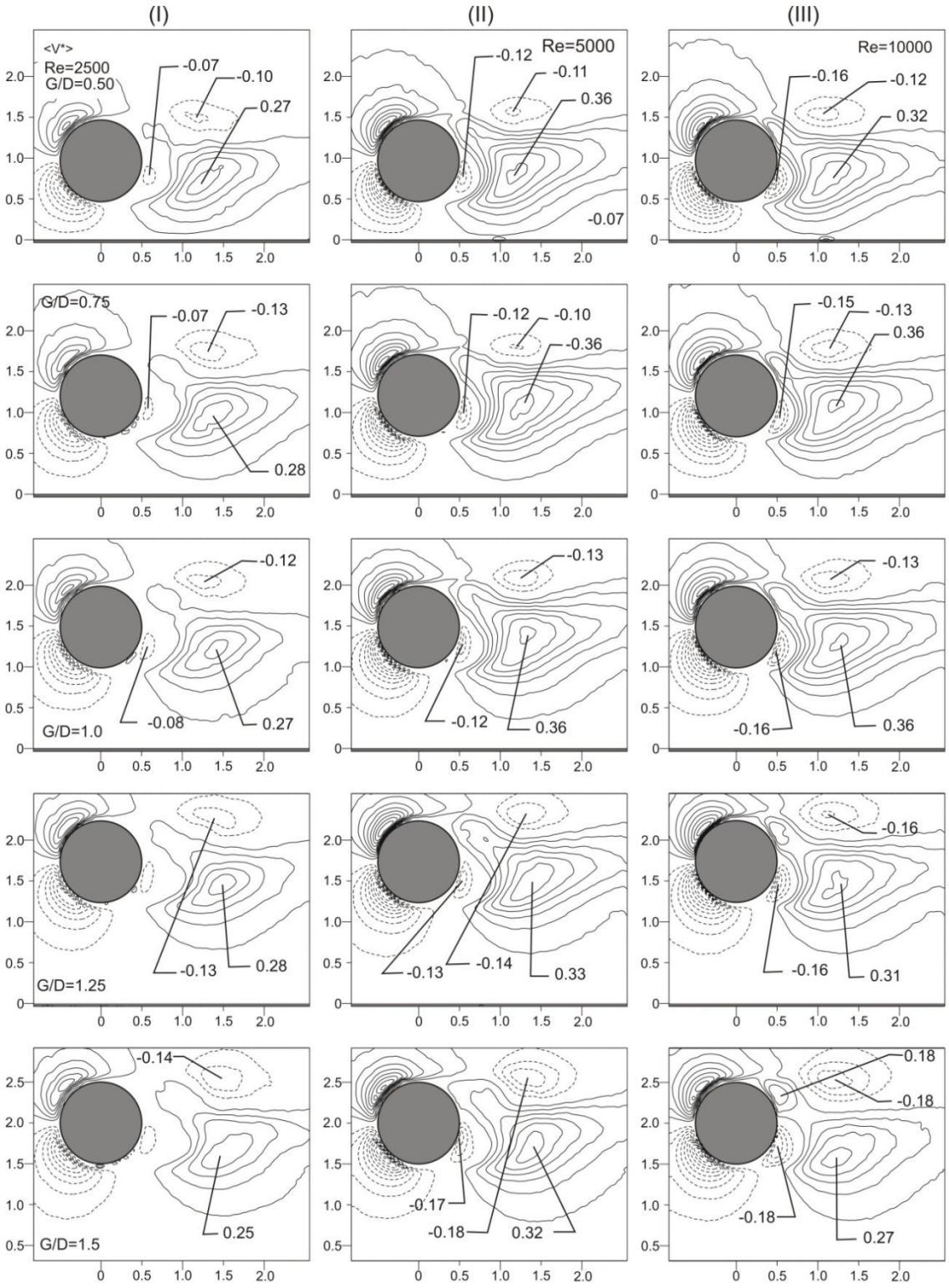


Şekil 4.7. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <u*> , küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (kolon II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|<u^*>|_{min} = |<\Delta u^*>|_{min} = 0.1$'dir.

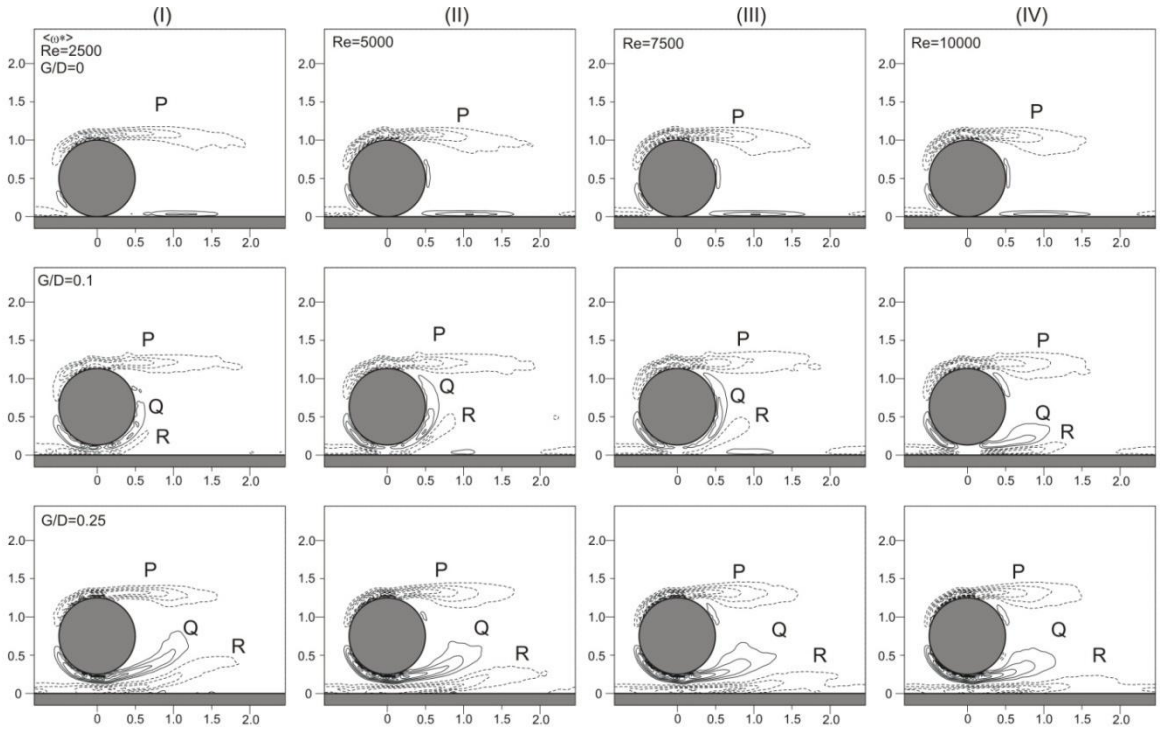


Şekil 4.8. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik ortalama hız eş düzey eğrilerinin <v*> , küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.10 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $\left| < v^* > \right|_{min} = \left| <\Delta v^* > \right|_{min} = 0.05$'tir.

ivmelenmesinden kaynaklanmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça küre arkasında negatif eş düzey hız eğrilerinin değerleri azalmaktadır. Bu da küre arkasına yakın bölgede momentum ve kütle transferini arttırıcı bir akışın gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir. Sonuç olarak bu tür akış yapısının oluşması küreye olan dinamik yüklemeyi de artıracaktır.



Şekil 4. 9. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik ortalama hız eş düzey eğrilerinin <v*> , küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|<v^*>|_{min} = |<\Delta v^*>|_{min} = 0.05$'tir.



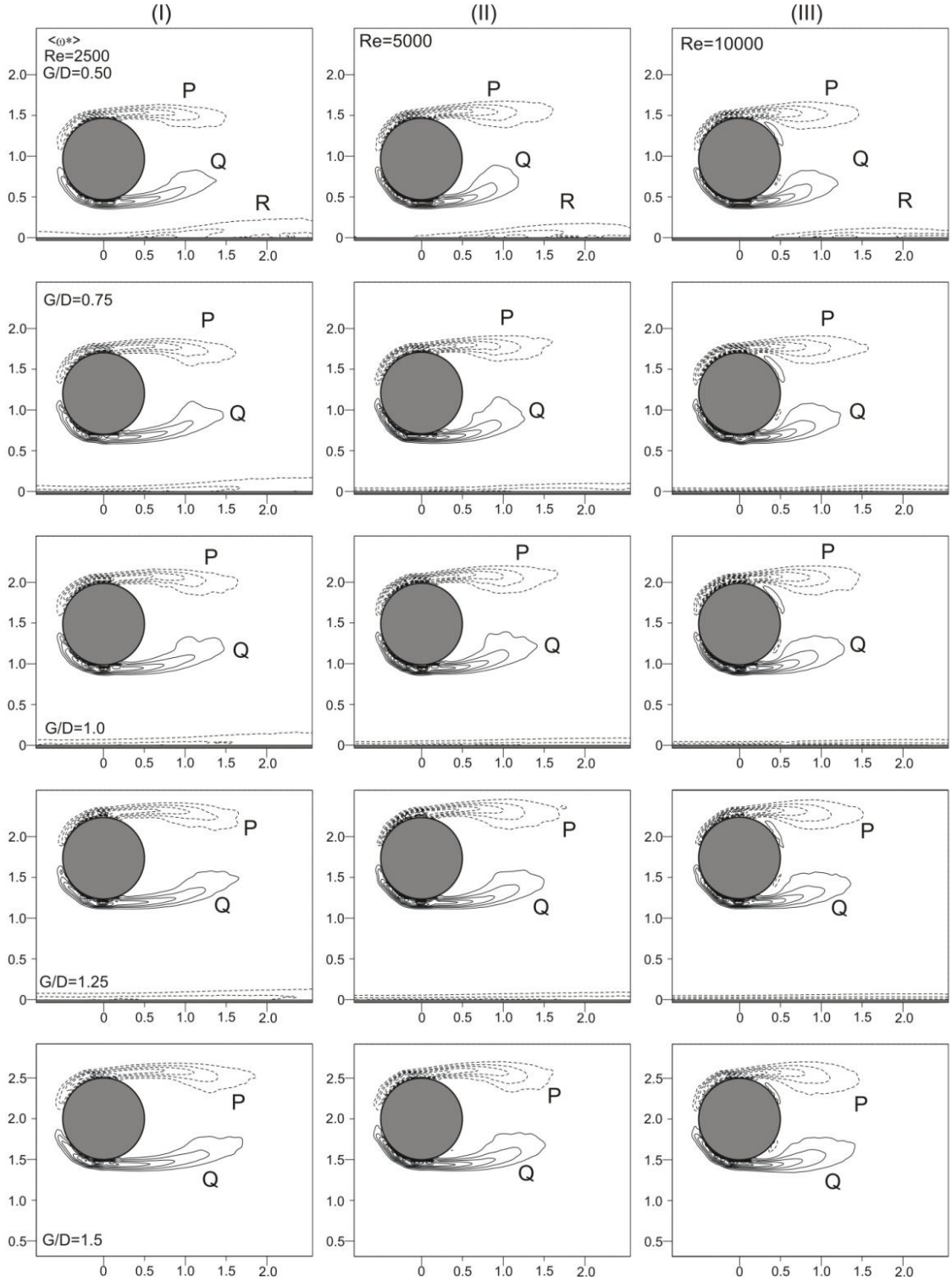
Şekil 4.10. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap $< \omega^* >$ eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun II) ve10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|< \omega^* >|_{min} = |< \Delta\omega^* >|_{min} = 2$'dir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap $< \omega^* >$ eş düzey eğrileri sunulmuştur. Sürekli çizgiler pozitif değerdeki yapıları, kesikli çizgiler ise negatif değerdeki yapıları göstermektedir. Açıklık oranı G/D=0 için (Şekil 4.10) daha önce bahsedildiği gibi kürenin akış görüntüleme düzleminde sadece üst kısmından akış ayrılması gerçekleştiği için P harfi ile belirtilen negatif girdap yapıları görülmektedir. Reynolds sayısının 2500 değeri için ince ve uzun bir yapı oluşturan girdaplar Reynolds sayısı arttıkça daha geniş bir yapıda oluşmuştur. Açıklık oranı G/D=0.1'e artırıldığında kürenin üst bölgesinde oluşan kayma tabakası Reynolds sayısının 2500, 5000 ve 7500 değerlerinde küre alt kısmından küre sırtı boyunca ilerleyen jet akışın itmesiyle akışa paralel bir yapı kazanmıştır. Küre alt kısmında jet akışın etkisiyle Q ve R ile gösterilen ve sırasıyla pozitif ve negatif değerler alan girdaplar küre art izi bölgesi içine doğru yönelmiştir. Ancak, Re=10000 değerinde Q ve R levhaya paralel bir konumda oluşmuştur. Reynolds sayısı 2500'den 7500'e artırılırken Q ile gösterilen pozitif değerdeki girdapların üst kayma tabakasında P ile gösterilen negatif değerdeki girdaplarla etkileşimi artmıştır. R ile gösterilen negatif değerdeki girdaplar da uzayarak kürenin art izi bölgesine doğru daha fazla girmiştir. G/D=0.25 açıklık oranında küre art izi bölgesi ile sınır tabakanın etkileşimi hala devam etmektedir.

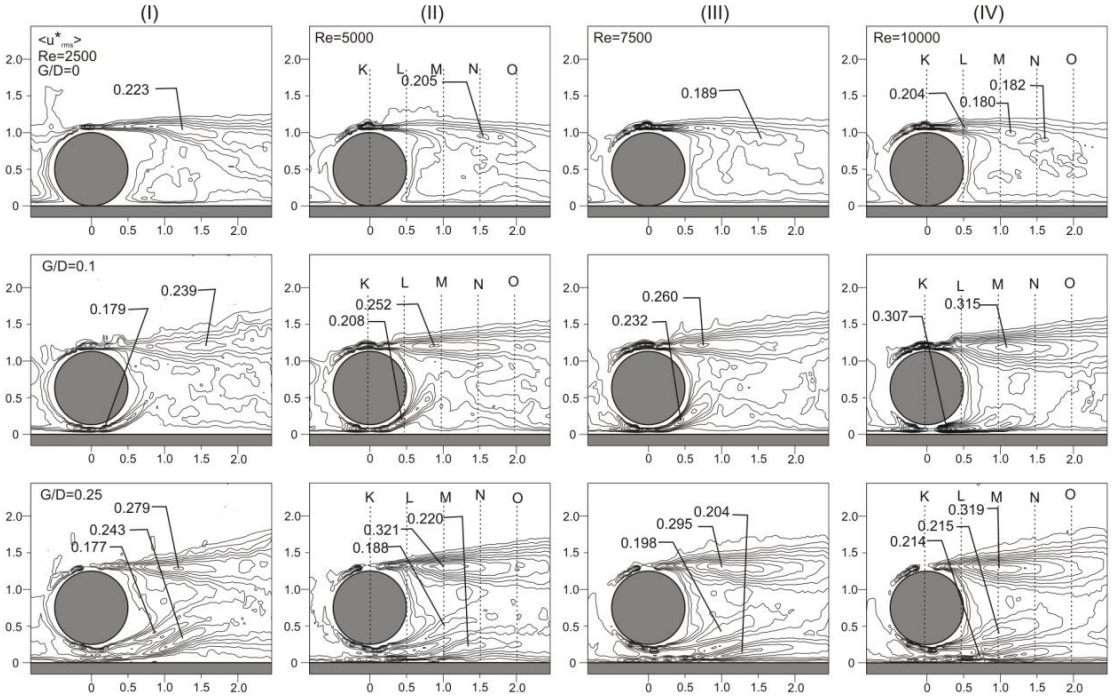
Reynolds sayısının 2500 ve 5000 değeri için negatif girdapların yönelimi akışın levha üzerinden ayrıldığının bir kanıtıdır. Ancak, Reynolds sayısı 7500 ve 10000'e çıkartıldığında R ile gösterilen negatif girdapların oluşturduğu eş düzey eğrileri levhaya yapışık bir hal almaktadır. Bu durum Re=7500 ve 10000 değerlerinde levha yüzeyinde akış ayrılmasının olmadığının bir kanıtıdır ve R ile gösterilen girdapların oluşum nedeni jet akışın etkisinden dolayı levha yüzeyindeki sınır tabaka akışında büyük bir hız farkının (gradyanının) oluşmasıdır.

Açıklık oranı G/D=0.50'ye çıkartıldığında (Şekil 4.10) R ile gösterilen negatif girdaplar Re=2500, 5000 ve 10000 için tamamen levha yüzeyine paralel ve birleşik bir halde oluşmuştur. Bu girdapların yukarı yöndeki yönelimlerinin ortadan tamamen kalkmasının nedeni kürenin levhadan yeterince uzaklaşmış olmasıdır. Bu açıklık miktarında küre art izi bölgesinde oluşan düşük basınç bölgesi levha yüzeyindeki sınır tabaka akışını saptıracak kadar etkili olamamıştır. Ancak, kürenin levha yüzeyindeki akışa etkisi çok az miktarda olsa da devam etmektedir. Bu etki ise Reynolds sayısının artmasıyla azalmaktadır. Açıklık oranı G/D=0.75'e çıkartıldığında artık kürenin levha yüzeyindeki sınır tabaka akışına bir etkisi kalmamış, levha yüzeyinde görülen negatif girdapların nedeni de sınır tabaka akışında levhaya yakın bölgede hız farkının (gradyanının) en büyük değerde olmasıdır.

Daha yüksek açıklık oranlarında da (Şekil 4.11) P girdaplarının oluşturduğu eş düzey eğrileri Q'ya göre daha uzundur. Bunun nedeni sınır tabaka akışının sahip olduğu üniform olmayan hız profilidir. G/D=1.5 açıklık oranında ise her üç Reynolds sayısında da P ve Q girdaplarının oluşturduğu eş düzey eğrilerinin boylarının eşitlendiği görülmektedir (Şekil 4.11).Bu açıklık oranında Reynolds sayısı arttıkça eş düzey eğrilerinin oluşturduğu yapı x ekseni doğrultusunda kısalırken y ekseni doğrultusunda uzamıştır.



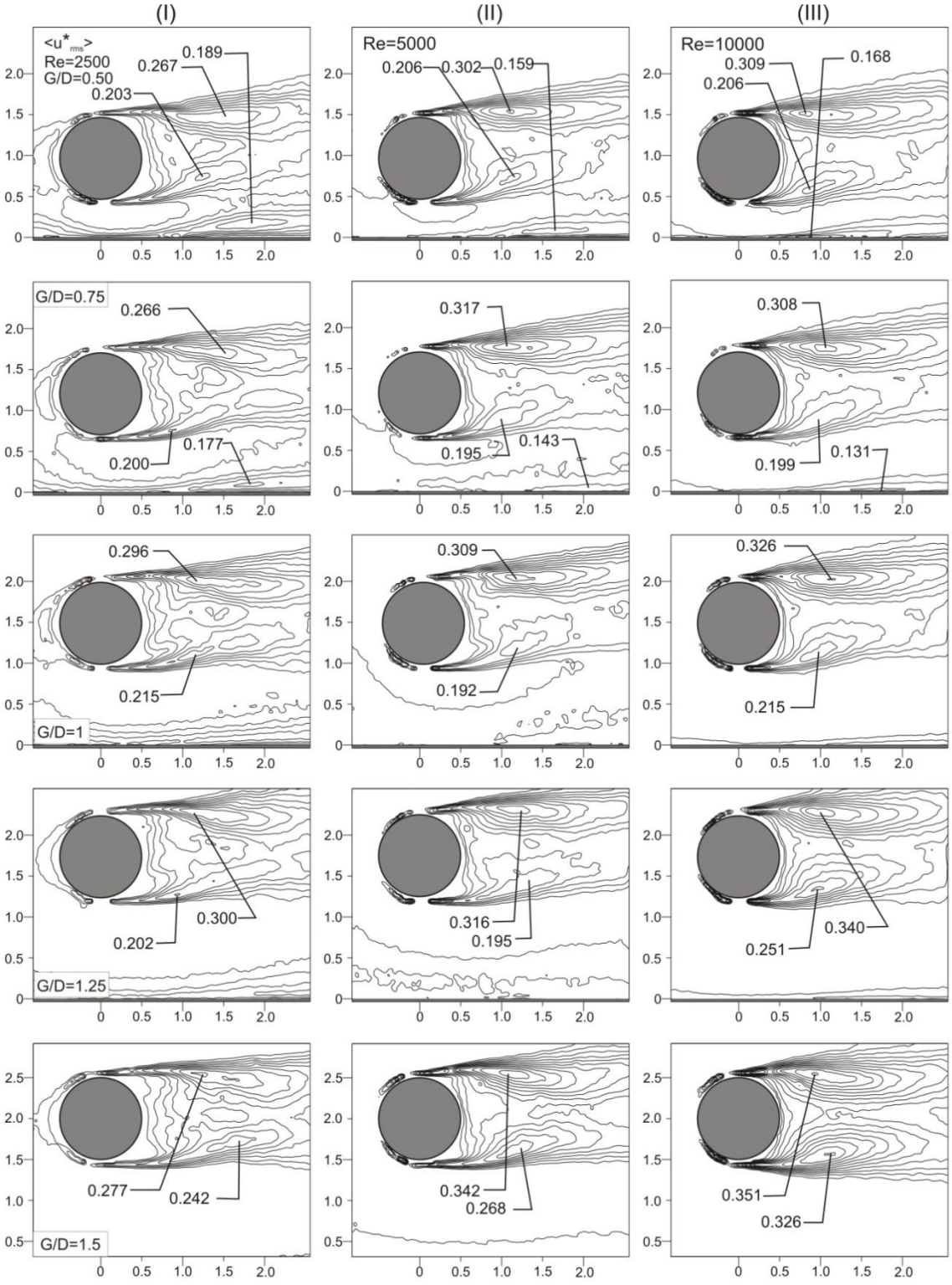
Şekil 4.11. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap $< \omega^* >$ eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II) ve10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri veeş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| < \omega^* > \right|_{min} = \left| < \Delta\omega^* > \right|_{min} = 2$'dir.



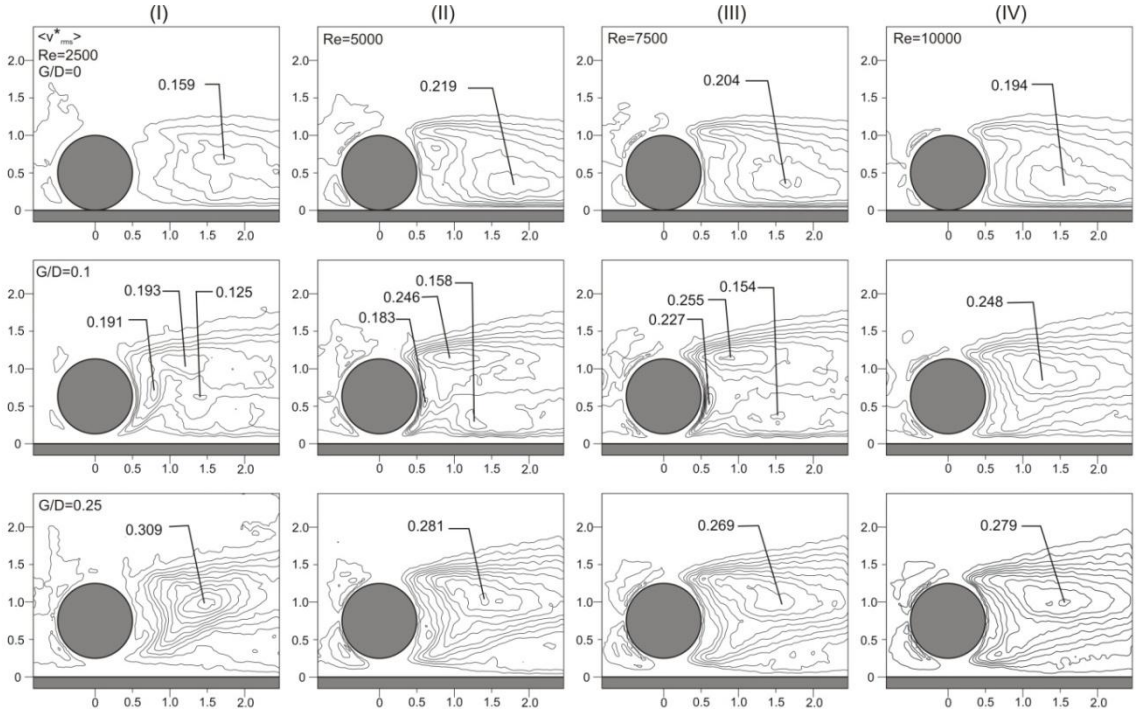
Şekil 4.12. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız çalkantıları $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1, 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.075 ve aralarındaki artım $\left| \langle \Delta u^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.025'tir.

Şekil 4.12'de ve Şekil 4.13'te sınır tabaka içerisine yerleştirilmiş küre çevresinde oluşan akım yönündeki hız çalkantılarının karşılaştırılması sunulmuştur. Akım yönündeki hız çalkantılarının $< u^*_{rms} >$ tepe değerleri, kürenin levhayla temas ettiği durumda x ekseni doğrultusunda küre merkezinden Reynolds sayısının 2500, 5000, 7500, ve 10000 değerleri için sırasıyla yaklaşık 1.24D, 1.55D, 1.55D, 0.5D aşağı akım yönünde oluşmuştur. G/D=0.10 açıklık oranında belirgin bir şekilde oluşan jet formundaki akışın etkisiyle kürenin üst bölgesindeki akış ayrılmasından kaynaklanan akım yönündeki hız çalkantılarının tepe değerlerinde G/D=0 açıklık oranına göre Reynolds sayısının 2500, 5000, 7500, ve 10000 değerleri için sırasıyla %7, %23, %38 ve %55 artış meydana gelirken, Re=2500 hariç diğer Reynolds sayılarında tepe değerlerin oluştuğu yer küreye doğru yukarı akım yönünde kaymıştır. Küre alt kısmı ile levha cidarı arasındaki boşlukta meydana gelen jet akışın içindeki hız çalkantı değerleri incelendiğinde, Reynolds sayısı arttıkça çalkantının da arttığı görülmektedir. G/D=0.25 açıklık oranında küre üst kısmında oluşan hız çalkantıların tepe değerinde bir artış olmakla birlikte oluştuğu yer Re=2500 değerinde yukarı akım yönüne doğru ilerlerken, Re=5000, 7500 ve 10000 değerlerinde aşağı akım yönünde ilerlemiştir. Bu açıklık

oranında kürenin alt kısmındaki akış ayrılmasından kaynaklanan kayma tabakası ve jet akışla levha cidarındaki durgun bölgenin oluşturduğu kayma tabakasının neden olduğu akım yönündeki hız çalkantılarının tepe değerleri Re=2500 için sırasıyla 0.177 ve 0.243'tür. Ortalama akım çizgileri (Şekil 4.4) incelendiğinde bu çalkantılara neden olan levha üzerinde meydana gelen akış ayrılmaları net bir şekilde görülmektedir. Reynolds sayısı 10000'e artırıldığında bu iki değer yaklaşık olarak 0.215'te eşitlenmiştir. G/D=0.50'de (Şekil 4.12) daha önce bahsedilen levha üzerindeki akış ayrılmalarının akım yönündeki hız çalkantılarının tepe değerleri Re=2500, 5000 ve 10000 için sırasıyla 0.189, 0.159 ve 0.168 olarak bulunmuştur. Küre art izinde alt kayma tabakasındaki akım yönündeki hız çalkantıları (G/D=0.25 açıklık oranına göre karşılaştırıldığında) Re=2500 ve 5000 değerleri için artarken Re=10000 değerinde düşüş göstermiştir. Aynı durum için üst kayma tabakasındaki hız çalkantı değerleri ise bütün Reynolds sayıları için düşüş göstermiştir. Açıklık oranı G/D=0.75'e çıktığında ise (Şekil 4.13) Re=2500, 5000 ve 10000 için sırasıyla levha üzerindeki akış ayrılmalarının akım yönündeki hız çalkantılarının tepe değerleri 0.177, 0.143, 0.131'e düşmüştür. Bu açıklık oranında levha üzerinde meydana gelen hız çalkantılarının Reynolds sayısı arttıkça daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni küre art izi ile levhanın hemen üzerinde meydana gelen sınır tabaka akışının etkileşiminin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. G/D=1.0'da ise hemen levha cidarı üzerinde gerçekleşen sınır tabaka akışına kürenin bir etkisi kalmamıştır (Şekil 4.13). Bütün açıklık oranlarında kürenin üst bölgesindeki kayma tabakasında meydana gelen akım yönündeki hız çalkantıları alt kayma tabakasına göre daha büyük çıkmıştır. Bunun nedeni sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinde üst bölgedeki hızların daha büyük olmasındandır. G/D=1.5 açıklık oranında da alt ve üst bölgedeki çalkantı değerlerinde farklılıklar vardır, ancak, Reynolds sayısı arttıkça bu farkın azaldığı görülmektedir. G/D=1.5'te Reynolds sayısı artırıldıkça akım yönündeki hız çalkantı değerleri artmıştır.



Şekil 4.13. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız çalkantıları $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.075 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta u^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.025'tir.

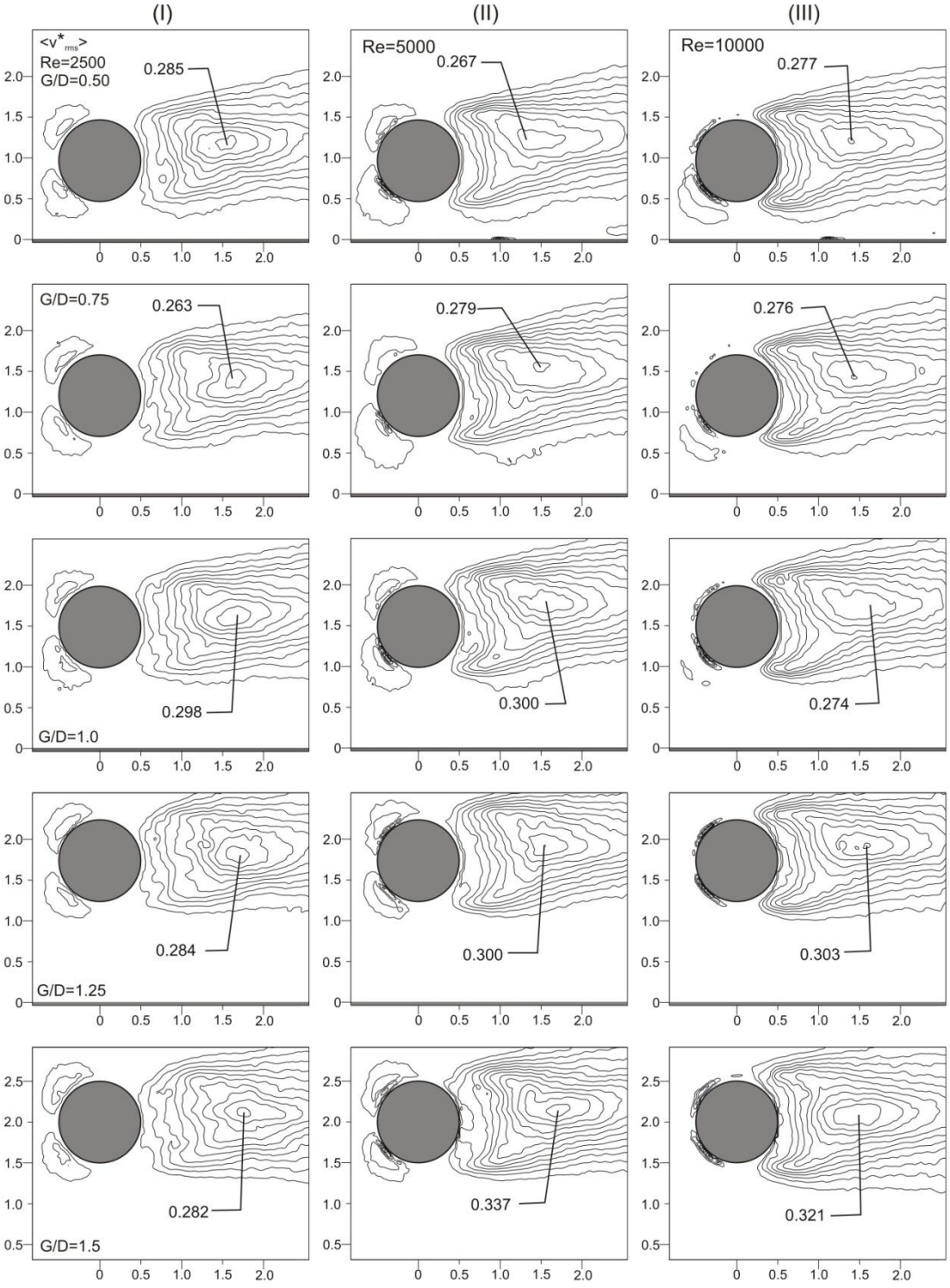


Şekil 4.14. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akıma dik yöndeki hız çalkantılarının$<v^*_{rms}>$, ortalama değerlerinin eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left|<v^*_{rms}>\right|_{min}$=0.050 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left|<\Delta v^*_{rms}>\right|_{min}$=0.025'tir.

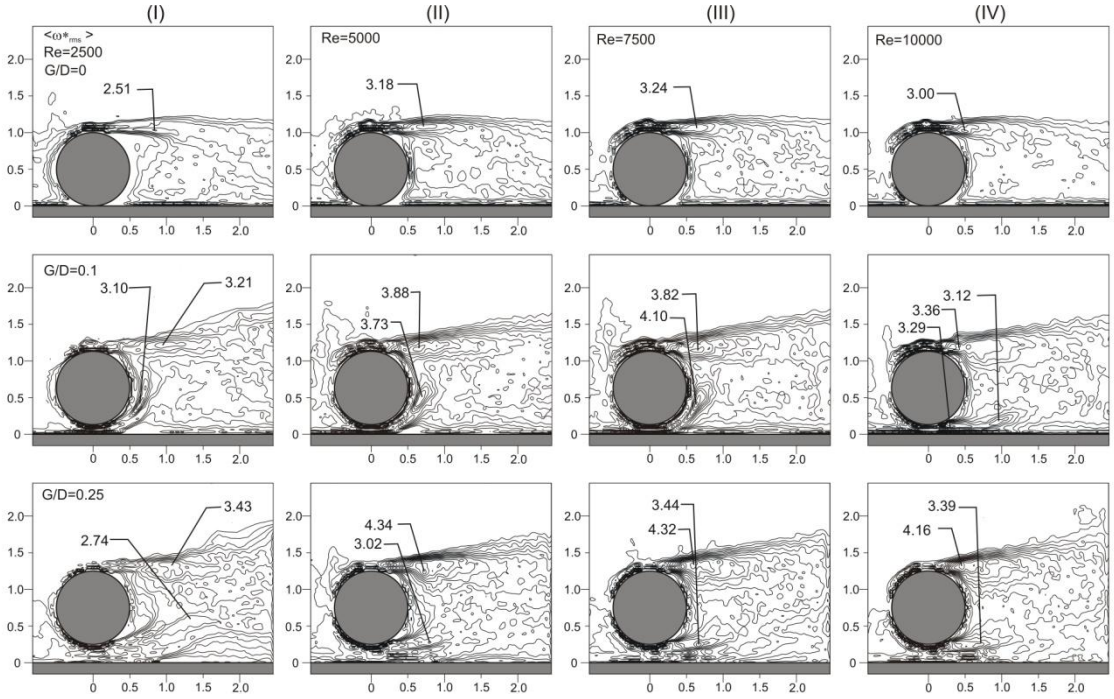
Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te sınır tabaka içerisine yerleştirilmiş küre çevresinde oluşan akım yönüne dik yöndeki hız çalkantılarının karşılaştırılması sunulmuştur. Üniform akış şartlarında akıma dik yöndeki hız bileşenlerinin çalkantılarının değişimi $< v^*_{rms} >$ küre simetri ekseni civarında tepe değerini alır. Ancak, kürenin levhayla tam temas ettiği durumda, tepe değer noktası Re=2500 değerinde küre simetri ekseninin üstünde ve küre merkezinden yaklaşık 1.72D aşağı akım yönünde oluşurken, Re=5000, 75000 ve 10000 değerlerinde küre simetri ekseninin altında ve sırasıyla 1.8D, 1.63D, 1.55D yönünde oluşmuştur (Şekil 4.14).

Açıklık oranı G/D=0.10 (Şekil 4.14) olduğunda Re=2500, 5000 ve 7500 değerlerinde $< v^*_{rms} >$hız çalkantısı küre art izinde oluşan ayrılma kabarcığının etkisiyle üç farklı noktada tepe değer almıştır. Kürenin hemen sırt kısmı boyunca üst kayma tabakasına doğru ilerleyen jet akışın oluşturduğu akım yönüne dik ortalama hız bileşeni çalkantılarının eş düzey eğrilerinin Re=2500, 5000 ve 10000 için tepe değerleri sırasıyla 0.191, 0.183, 0.227'dir. Reynolds sayısı 10000 değerine çıkartıldığında ise daha önce belirtildiği gibi kürenin arkasındaki ve levhanın üst kısmındaki ayrılma kabarcığı

kaybolmuş $< v^*_{rms} >$hız çalkantıları tek bir noktada tepe değer almıştır. Açıklık oranı G/D=0.25'e çıkarıldığında bütün Reynolds değerleri için akış yapısı tek bir noktada tepe değer oluştururken çalkantı şiddetlerinin tepe değerlerinde Reynolds sayısına bağlı olarak artış gerçekleşmiştir. En büyük artış %60 ile Re=2500 değerinde gerçekleşirken Re=5000, 7500 ve 10000 değerleri için sırasıyla %14, %5 ve %12.5'lik artışlar olmuştur. G/D=0.25'te ve G/D=1.5'e kadar olan daha yüksek açıklık oranlarında üniform akış şartlarına maruz kalmış kürede olduğu gibi $< v^*_{rms} >$ değerleride bir tepe değer noktası oluşmuştur. Ancak, oluşan bu tepe değerlerin yerleri sınır tabaka ile olan etkileşimden dolayı her zaman küre simetri ekseninin üst kısmında meydana gelirken, G/D=1.5'te nispeten küre simetri ekseni hizasında meydana gelmiştir. Açıklık oranı G/D= 0.5'ten, G/D=1.5'e artırıldıkça Reynolds sayısının 5000 olduğu durumda $< v^*_{rms} >$ hız çalkantılarının tepe değeri 0.267'den 0.337'ye kadar artış göstermiştir. Re=10000 durumunda ise G/D=0.5, 0.75 ve 1.0'da $< v^*_{rms} >$hız çalkantılarının tepe değerlerinde açıklığa bağlı bir artış olmamış ve yaklaşık aynı büyüklükte oluşmuştur. Açıklık oranı G/D=1.5'e çıkartıldığında ise $< v^*_{rms} >$hız çalkantılarının tepe değeri 0.321'e yükselmiştir (Şekil 4.15). Aynı durum için Re=2500 değerinde $< v^*_{rms} >$ hız çalkantılarının en yüksek tepe değerlerinde açıklık oranının artışına bağlı olarak belirgin bir artış eğilimi gerçekleşmemiştir.



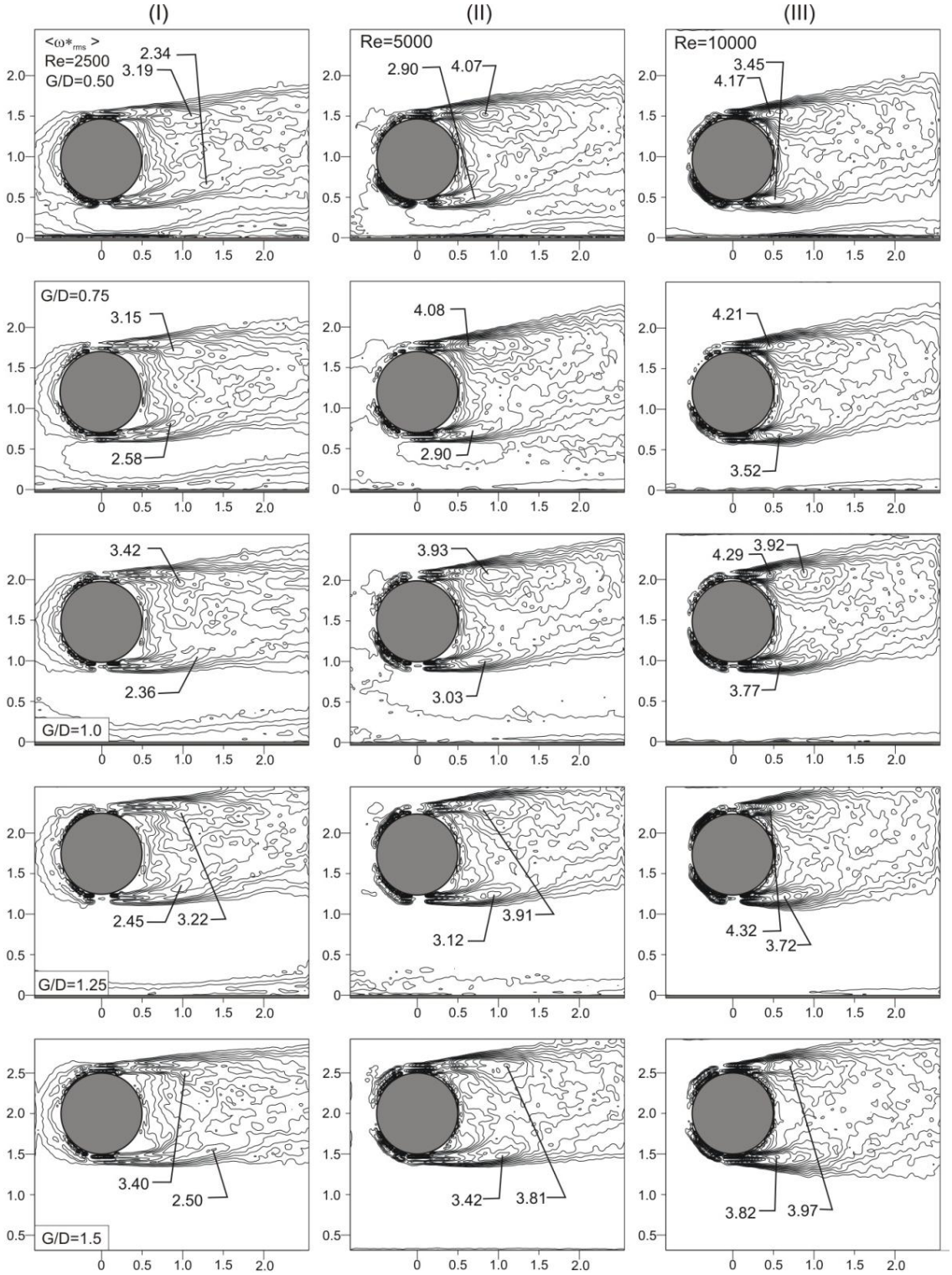
Şekil 4.15. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının akım doğrultusuna dik yöndeki hız çalkantılarının $\langle v^*_{rms} \rangle$, ortalama değerlerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.050 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*_{rms} \rangle \right|_{min}$=0.025' tir.



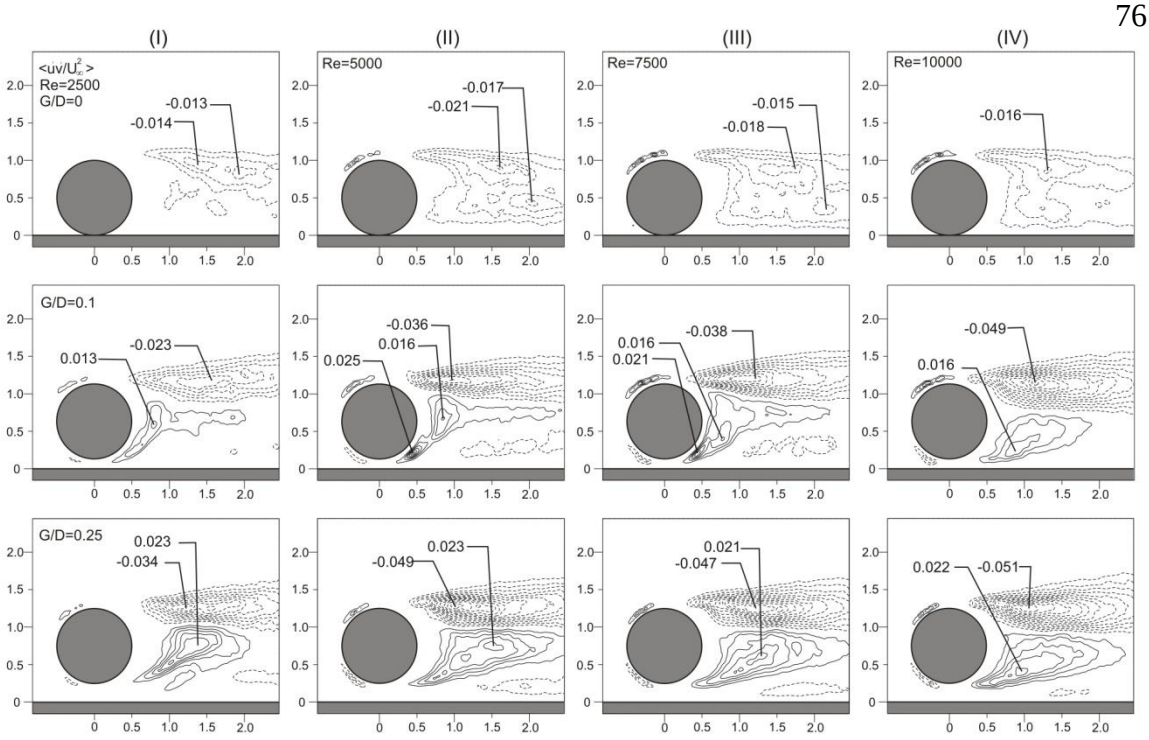
Şekil 4.16. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap çalkantıları eş düzey eğrilerinin $< \omega^*_{rms} >$, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1, ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $| < \omega^*_{rms} > |_{min}$=1 ve arasındaki artım $| <\Delta\ \omega^*_{rms} > |_{min}$=0.25'tir.

Şekil 4.16.'da pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap çalkantıları $< \omega^*_{rms} >$ eş düzey eğrilerinin küreyle plaka arasındaki boşluk oranının G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri ve Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 4.17.'de ise bu karşılaştırmalar $0.50 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerleri için verilmiştir.

Bütün açıklık oranlarında akış yapısının kürenin oluşturduğu üç boyutlu akış yapısından dolayı çalkantılı bir görünüm sergilediği ve bu görünümün serbest kayma tabakaları boyunca tepe değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak, $0.1 \leq G/D \leq 0.75$ açıklık aralığında, levha yüzeyinde ayrılmış akışın oluşturduğu ve tepe değerleri olan girdap çalkantı eş düzey eğrileri oluştuğu da görülmektedir. Burada oluşan çalkantılı yapı küre art izindeki türbülanslı ve üç boyutlu akış yapısının bir kanıtı olarak değerlendirebilir.



Şekil 4.17. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama girdap çalkantıları eş düzey eğrilerinin$< \omega^*_{rms} >$, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| < \omega^*_{rms} > \right|_{min}$=1 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| <\Delta\ \omega^*_{rms} > \right|_{min}$=0.25'tir.



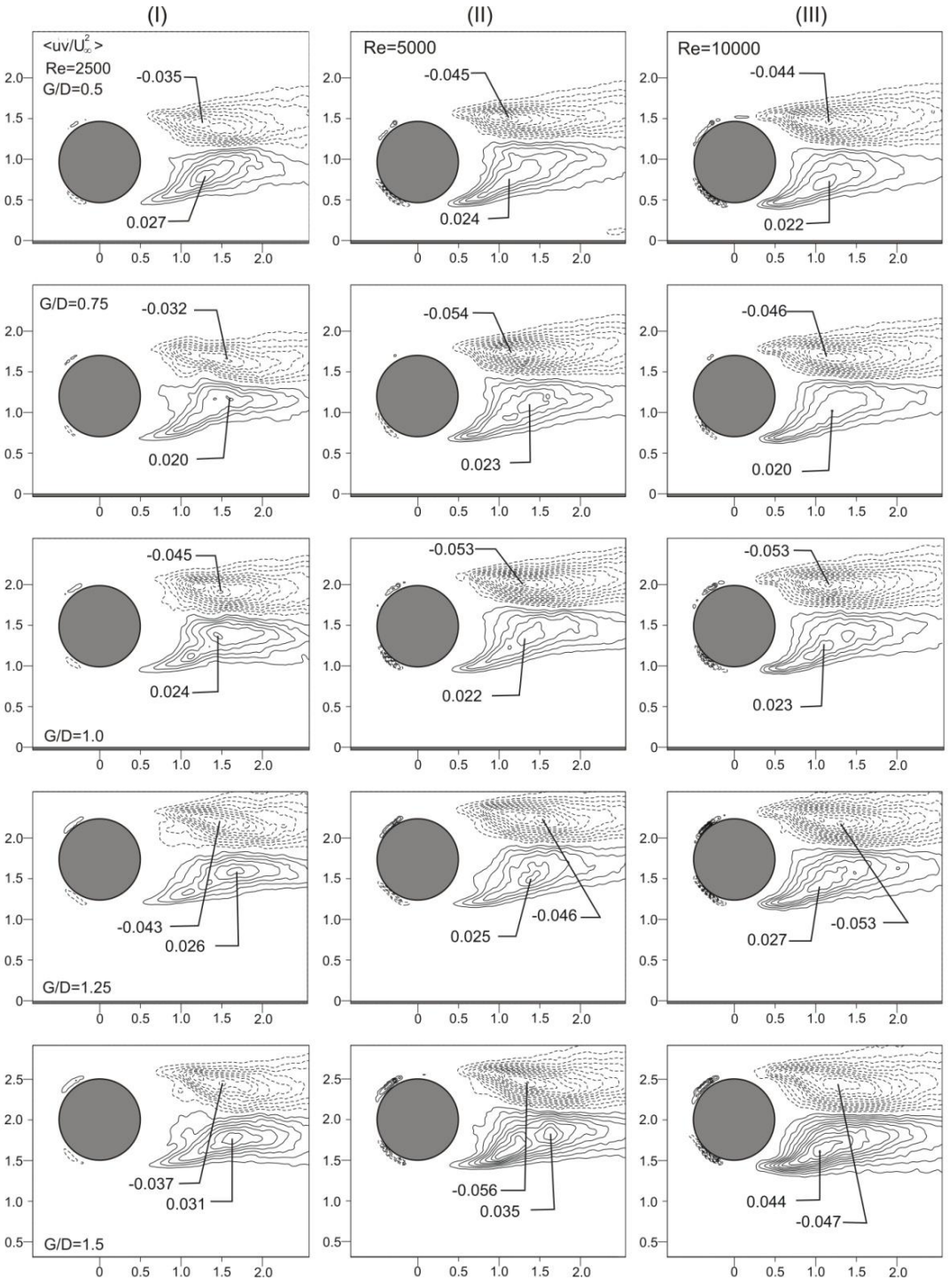
Şekil 4.18. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (kolon II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $|< u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<\Delta u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004'tür.

Küre art izi ile sınır tabaka etkileşiminde boşluk oranı G/D'nin Reynolds sayısına bağlı olarak etkisini daha ayrıntılı görebilmek için Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da farklı Reynolds sayılarında ve açıklık oranlarında Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ eş düzey eğrileri sunulmuştur. Üniform akış şartlarında iki boyutlu görüntü düzleminde Reynolds gerilmelerinin eş düzey eğrileri küre simetri eksenin alt ve üst kısmında pozitif ve negatif olmak üzere iki adet tepe değer noktası oluşturur. Ancak, küre ile levhanın tam temas halinde olduğu G/D=0 açıklık oranında görüntü düzleminde akış ayrılmasının sadece üst serbest kayma tabakasında olmasından dolayı art izi bölgesinde yalnızca negatif değerde Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ olduğu gözlemlenmiştir. Re=2500, 5000 ve 7500 değerlerinde negatif gerilmelerin eş düzey eğrilerinde büyüklükleri birbirinden çok az farlılıkta olan iki adet tepe değer noktası oluşmuştur. Açıklık oranı G/D=0.1'e yükseltildiğinde ise küre alt kısmında oluşan kayma gerilmesinden ve jet akıştan kaynaklanan pozitif değere sahip Reynolds gerilmeleri oluşmuştur. Re=2500, 5000 ve 7500 değerlerinde (G/D=0.1) kürenin alt kısımda oluşan pozitif değerdeki Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ iki yerde tepe değer almıştır. Tepe değerlerin oluştuğu birinci yer kürenin hemen altındaki jet akışın hızlandığı bölgede

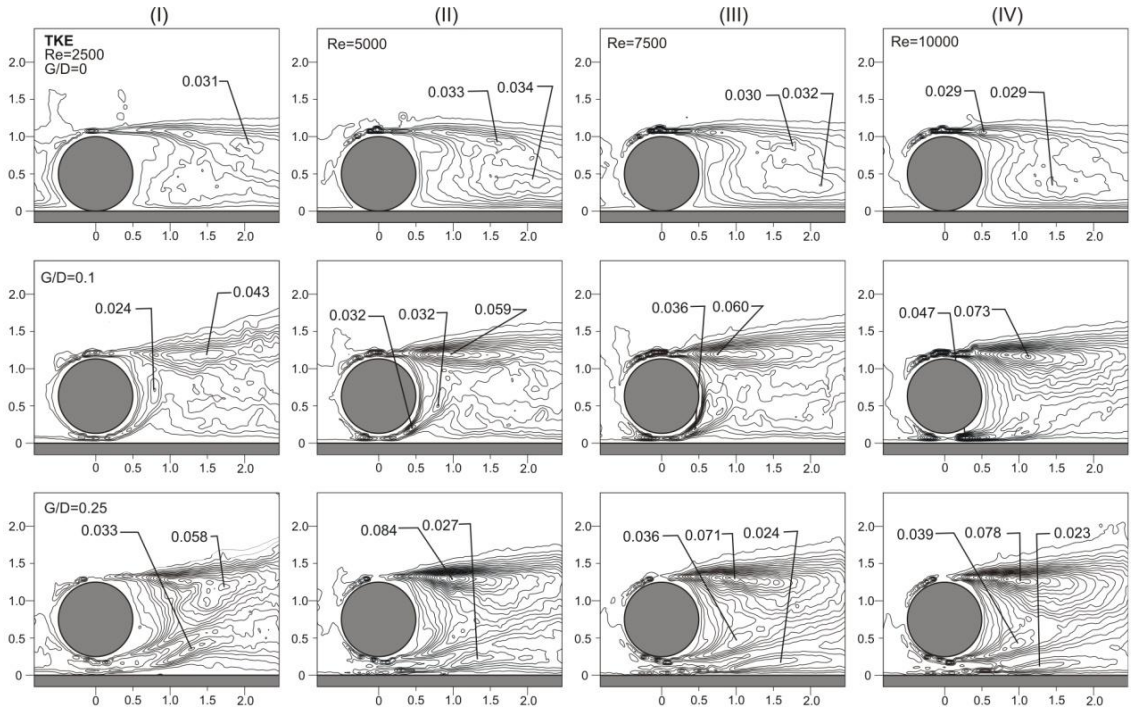
iken, diğeri jet akışın küre art izinin içine dağılmaya başladığı bölgede oluşmuştur. Küre art izinde üst kayma tabakasında oluşan gerilmelerin oluşturduğu tepe değerler incelendiğinde Reynolds sayısının artırılmasıyla Reynolds gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu açıklık oranında Reynolds sayısı 10000 değerine yükseltildiğinde küre art izi bölgesindeki Reynolds gerilmelerinin eş düzey eğrilerinde üst kayma tabakası bölgesinde negatif alt kayma tabakası bölgesinde pozitif olmak üzere iki adet tepe değer noktası oluşmuştur. Ancak, üst kayma tabakasının Reynolds gerilmesi şiddetinin tepe değeri alt kayma tabakasınınkinden çok daha büyük çıkmıştır. Üst kısımdaki kesik çizgilerle (negatif değerler) gösterilen eş düzey eğrileri görüntü düzleminde büyük bir alan kaplarken alt kısımdaki sürekli çizgilerle (pozitif değerler) gösterilen eş düzey eğrileri daha düşük bir alan kaplamıştır. Açıklık oranı G/D=0.25'e yükseltildiğinde jet akışın, kürenin alt kısmındaki eş düzey eğrilerinin yapısı üzerine etkisi azalmıştır. Üst kayma tabakasında oluşan Reynolds gerilmelerinin şiddetinin tepe değerleri ise Re=2500, 5000 ve 7500 değerleri için belirgin bir şekilde artarken Re=10000 değeri için bir değişiklik olmamıştır. Bunun nedeni jet akışın G/D=0.1 açıklık oranında Re=2500, 5000 ve 7500 için etkili olup G/D=0.25'te etkisini kısmen kaybetmesindendir. Re=10000'de ise her iki açıklık oranında da jet akışın Reynolds gerilmesi değerlerinin dağılımı üzerine belirgin bir etkisi olmamaktadır. Açıklık oranı G/D=0.5'e yükseltildiğinde Re=2500 için üst kayma tabakasında oluşan Reynolds gerilmelerinin tepe değerlerinde hiç bir değişme olmamış alt kısımda ise 0.023'ten 0.027'ye çok küçük bir değişim meydana gelmiştir. Re=5000 için üst kayma tabakasında oluşan Reynolds gerilmelerinin tepe değerinde -0.049'dan -0.045'e çok az bir düşüş gerçekleşirken alt kısımdaki kayma tabakasındaki Reynolds gerilmelerinde bir değişim gözlemlenmemiştir. Re=10000 değerinde ise üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmelerinin tepe değeri -0.051'den -0.044'e düşerken alt kayma tabakasındaki Reynolds gerilmelerinin tepe değeri jet akış etkisinden dolayı 0.022'de sabit kalmıştır.

Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ dağılımı kürenin levha yüzeyinden G/D=1.5 (Şekil 4.19) oranında uzaklaştığı konuma kadar asimetrik yapısını korurken bu açıklık oranında neredeyse simetrik bir yapı oluşturmuştur. En simetrik yapı Re=10000 değerinde alt ve üst kayma tabakalarındaki Reynolds gerilmelerinin tepe değerlerinin sırasıyla 0.044 ve -0.047 olduğu durumda oluşmuştur. Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ büyüklüğü küre arkasında aşağı akım yönünde ilerledikçe, art izi bölgesi ile çevresi arasında gerçekleşen yüksek orandaki kütle transferinden dolayı

önce artmakta ve daha sonra dönümlü akışın art izinde ilerlemesi esnasında enerjisinin azalmasından dolayı düşmektedir.



Şekil 4.19. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$, küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.5, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000(Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $|< u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004 ve arasındaki artım $|<\Delta u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004'tür.

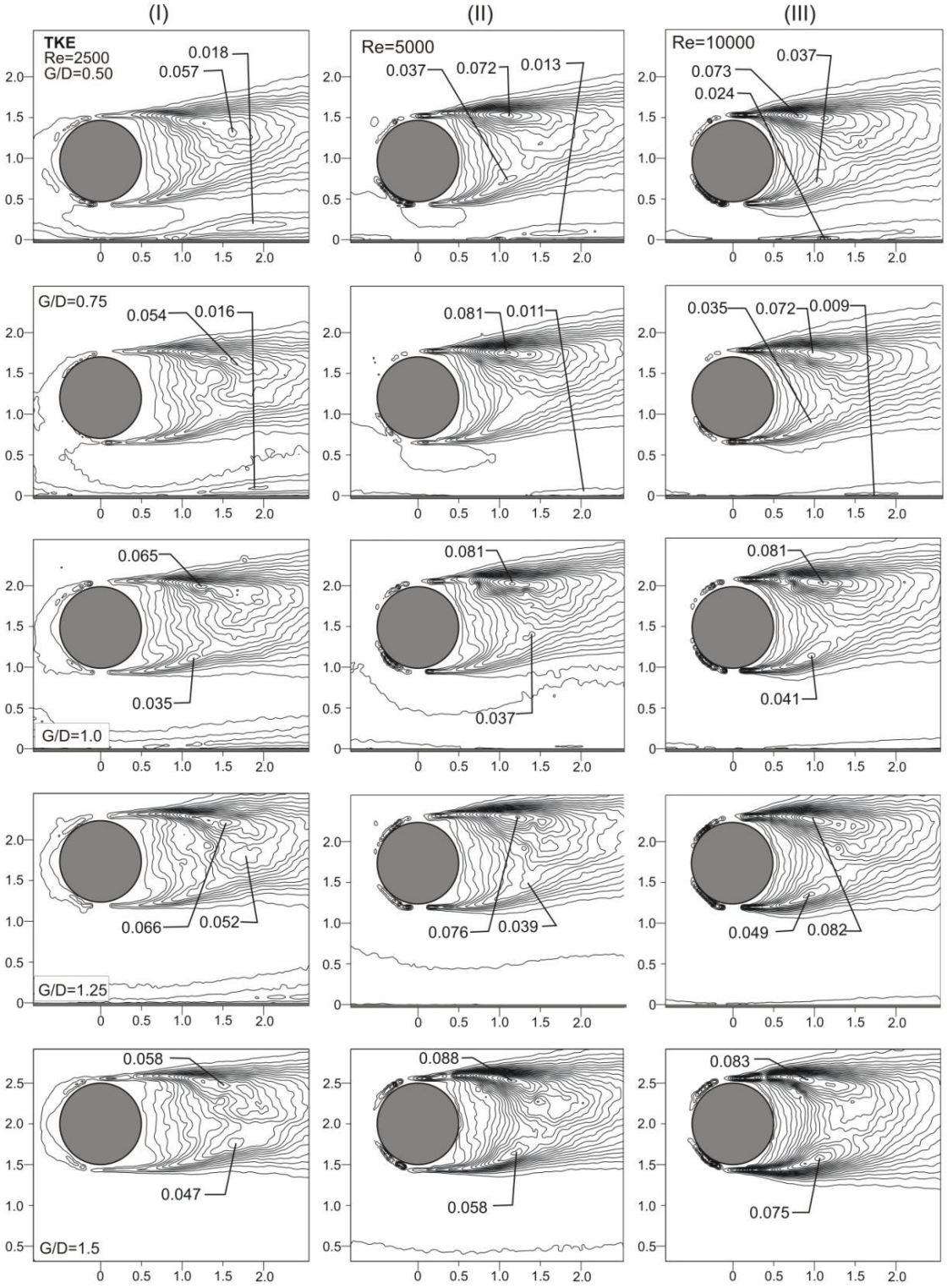


Şekil 4. 20. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama Türbülans kinetik enerjisi eş düzey eğrilerinin (TKE), küre ie levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. TKE eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım 0.004'tür.

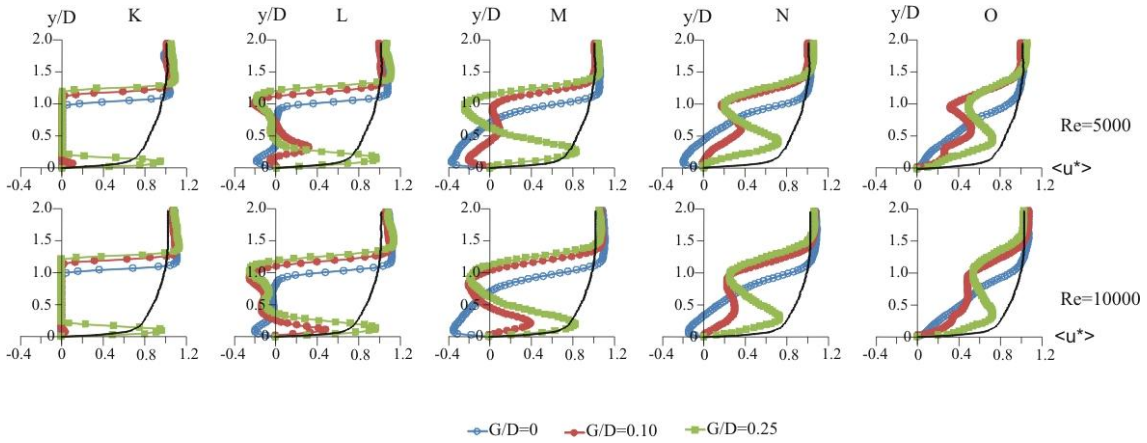
Pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama türbülans kinetik enerji eş düzey eğrilerinin (TKE) küreyle plaka arasındaki boşluk oranı G/D=0, 0.1 ve 0.25 değerlerinde ve Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), 7500 (Sütun III) ve 10000 (Sütun IV) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması Şekil 4.20'de ve Şekil 4.21'de ise boşluk oranının $0.50 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II) ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre karşılaştırılması sunulmuştur. TKE küre sırtından başlayarak aşağı akım yönünde artmakta ve tepe değerine ulaşmaktadır. Bu değerler her bir Reynolds sayısı ve boşluk oranı için resimlerin üzerinde gösterilmiştir. Değerler daha sonra akım yönünde ilerledikçe serbest akım etkisinden dolayı azalmaktadır. Kürenin levhaya tam temas ettiği ve akış ayrılmasının iki boyutlu görüntü düzleminde sadece kürenin üst kısımda olduğu G/D=0 açıklık oranında TKE eş düzey eğrileri tepe değerlerini serbest üst kayma tabakasında almıştır. Bu değer Re=2500'de 0.031 olurken Re=10000 olduğunda neredeyse aynı mertebede 0.029'a düşmüş ve yukarı akım yönünde küre sırtına doğru daha yakın bir yerde oluşmuştur. TKE eş düzey eğrilerinin oluşturduğu diğer tepe değer noktalarının değeri Re=2500, 5000, 7500 ve 10000 için sırasıyla 0.031, 0.034, 0.032 ve 0.029'dur. Görüldüğü gibi bu değerlerin büyüklüğünde Reynolds sayısının bir etkisi

olmamıştır. Ancak, tepe değerlerin oluştuğu yerler Reynolds sayısına bağlı olarak değişim göstermiştir. Örneğin Re=2500'de tepe değer küre simetri ekseninin üst kısmında oluşurken, Reynolds sayısı 10000'e artırıldıkça küre simetri ekseninin alt kısmına doğru kaymaktadır. Açıklık oranı G/D=0.1'e yükseltildiğinde levha ile küre arasındaki boşluktan yüksek TKE'ye sahip akışkanın geçtiği Şekil 4.20'den görülmektedir. Boşluktan geçen akışkanın TKE değerleri Reynolds sayısı arttıkça artmıştır. Küre ile levha arasındaki açıklık oranının G/D=0'dan G/D=0.1'e yükseltilmesi ile üst kayma tabakasının TKE şiddetlerinin tepe değerleri artmıştır. Bu artış Re=2500, 5000, 7500 ve 10000 için sırasıyla %28, %79, %100 ve %150 oranlarında gerçekleşmiştir. Açıklık oranı G/D=0.25'e çıkartıldığında üst kayma tabakasının TKE şiddetlerinin tepe değerleri (G/D=0.1'e göre) artmaya devam etmiş, ancak, artış miktarları azalmıştır. Bu artış Re=2500, 5000, 7500 ve 10000 için sırasıyla %35 %42, %18 ve %7 oranlarında gerçekleşmiştir. Küre simetri eksenin alt kısmında ise TKE eş düzey eğrileri akışın kürenin alt kısmından ayrılarak oluşturduğu kayma tabakasında ve levha yüzeyindeki akış ayrılmalarının neden olduğu türbülansın etkisiyle levha yüzeyinin hemen üst kısmında tepe değerler oluşturmuş ve tepe değerler bu bölgede en yüksek değerini almıştır. Levha yüzeyindeki ayrılmış sınır tabaka akışının TKE şiddetleri Reynolds sayısının artması ile azalış göstermiştir. G/D=0.5 için Re=2500 durumu incelendiğinde üst kayma tabakasındaki TKE şiddetinin tepe değerinde bir önceki açıklık oranına göre bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Re=2500 için TKE eş düzey eğrileri incelendiğinde alt bölgedeki kayma tabakasının net bir tepe değeri noktası oluşturmadığı görülmektedir. Bu duruma art izinin levha yüzeyinden yukarıya doğru kaymış olması etkilidir. Aynı durum için akım yönüne dik ortalama hız bileşeni çalkantıları eş düzey eğrilerinin $< v^*_{rms} >$ (Şekil 4.14) dağılımı incelendiğinde $< v^*_{rms} >$ çalkantılarının en yüksek değere ulaştığı yerin küre simetri ekseninin üst kısmına doğru kaydığı görülmektedir. Akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları eş düzey eğrilerinin $< u^*_{rms} >$(Şekil 4.12) dağılımına bakıldığında ise, küre üst kayma tabakasının tepe değerlerinin alt kayma tabakasındakine göre büyük olduğu görülmektedir. Bu durum TKE değerlerinin küre simetri ekseninin üst kısmında daha baskın olmasına neden olmaktadır. Re=5000 ve 10000 için ise alt kayma tabakasındaki TKE değerlerinin tepe noktaları daha belirgin bir hal almıştır. Üst kayma tabakasındaki TKE'nin tepe değerlerinde ise bir önceki açıklık oranına göre az miktarda düşüş meydana gelmiştir. G/D=0.50 ve 0.75 için levha yüzeyindeki TKE şiddetleri düşmeye devam etmiş daha

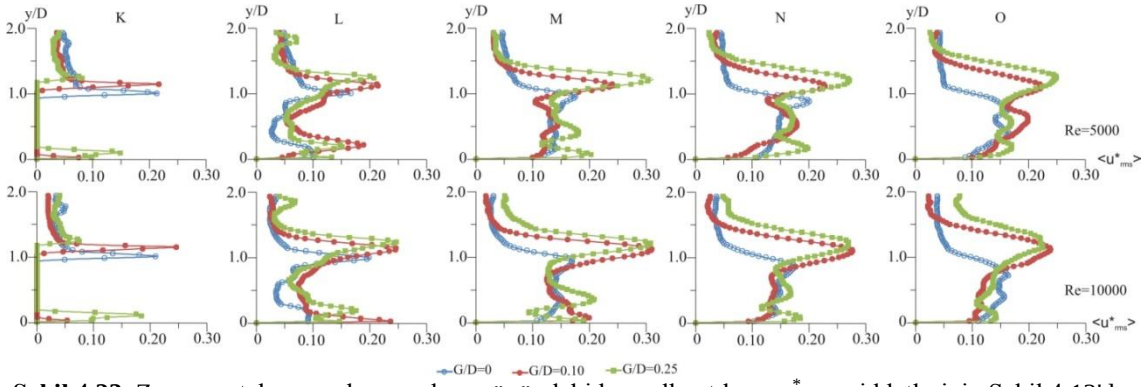
yüksek açıklık oranlarında ise ihmal edilecek mertebededir. Bununla birlikte daha büyük boşluk oranları G/D=1.0, 1.25 ve 1.50 için jet akışın etkisi tamamen kaybolmakta fakat üniform olmayan sınır tabaka akışının etkisi devam etmektedir. TKE eş düzey eğrilerinin küre art izi bölgesi merkezinin üst tarafında ve alt tarafındaki tepe değerleri incelendiğinde üst taraftaki TKE şiddetinin alttakine göre daha büyük tepe değeri aldığı görülmektedir. Dönümlü akış yapısının hareketinden dolayı art izine doğru gerçekleşen çalkantılı akış TKE şiddetlerini de artırmaktadır. Art izi bölgesinin serbest akımla olan cidarı boyunca hız vektörlerinde oluşan çalkantılar yüksek ve düşük hıza sahip bölgeler meydana getirmekte ve bu da akım yönünde ikincil girdapların oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu hareket TKE'nin yayılmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.21. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısının ortalama Türbülans kinetik enerjisi eş düzey eğrilerinin (TKE), küre ile levha yüzeyi arasındaki mesafenin G/D=0.50, 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 değerleri için Reynolds sayısının Re=2500 (Sütun I), 5000 (Sütun II), ve 10000 (Sütun III) değerlerine göre değişiminin karşılaştırılması. TKE eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve aralarındaki artım 0.004'tür.



Şekil 4.22. Zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşeni <u*> şiddetlerinin Şekil 4.6'da verilen <u*> eş düzey eğrilerinin K, L, M, N ve O çizgileri boyunca G/D=0, 0.1 ve 0.25 için değişimi. Üst satırdaki değişimler Re=5000, alt satırdaki değişimler ise Re=10000 değerlerini göstermektedir. K, L, M, N ve O dik çizgileri sırasıyla küre merkezi (K), küre merkezinden 0.5D, 1D, 1.5D ve 2D mesafelerinde dağılımları göstermektedir. Sürekli çizgi küre olmadığı durumda deneysel olarak elde edilen sınır tabaka hız profilini göstermektedir.



Şekil 4.23. Zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin Şekil 4.12'de verilen $<u^*_{rms}>$ eş düzey eğrilerinin K, L, M, N ve O çizgileri boyunca G/D=0, 0.1 ve 0.25 için değişimi. Üst satırdaki değişimler Re=5000, alt satırdaki değişimler ise Re=10000 değerlerini göstermektedir. K, L, M, N ve O dik çizgileri sırasıyla küre merkezi, küre merkezinden 0.5D, 1D, 1.5D ve 2D mesafelerinde dağılımları göstermektedir.

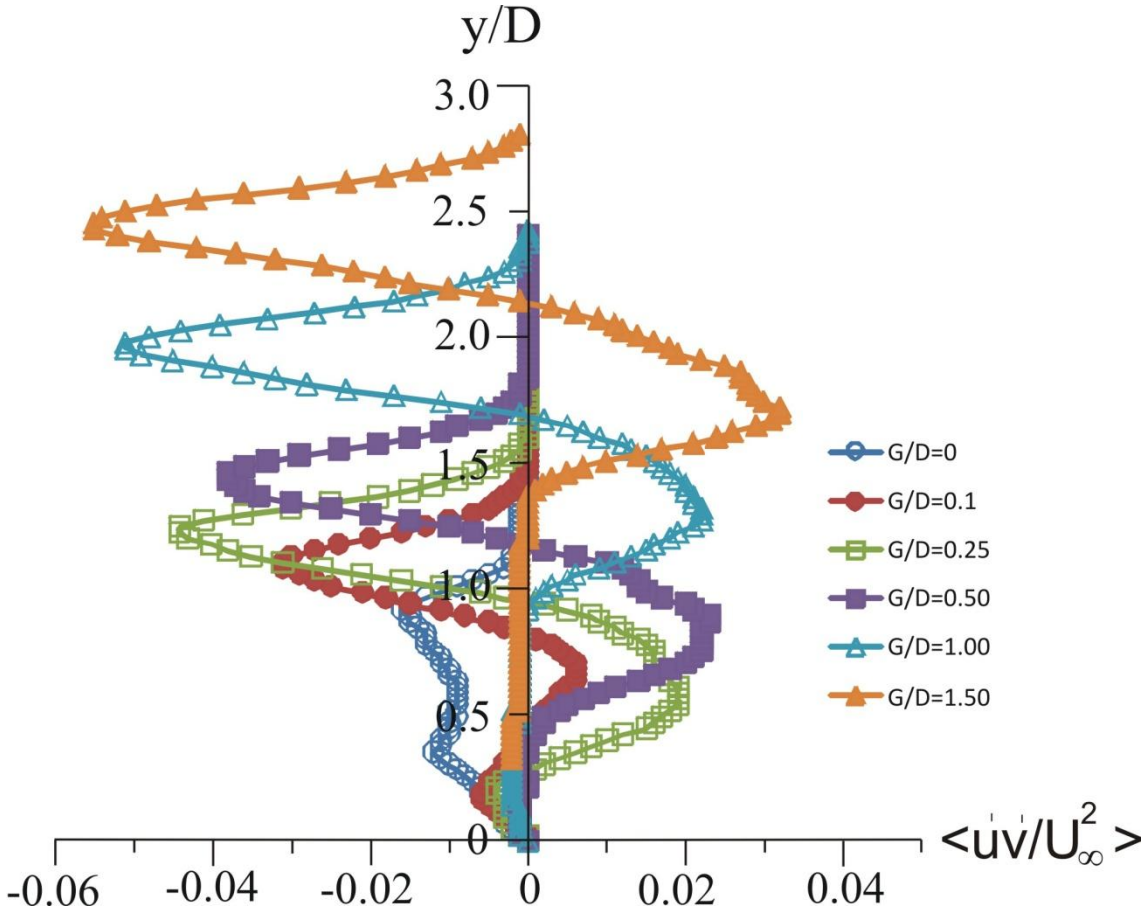
Zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşeni <u*> ve akım yönündeki hız çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin Şekil 4.6 ve Şekil 4.12'de verilen eş düzey eğrilerinin K, L, M, N ve O çizgileri boyunca açıklık oranları G/D=0, 0.1 ve 0.25 için değişimi Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir. Üst satırdaki değişimler Re=5000, alt satırdaki değişimler ise Re=10000 değerlerini göstermektedir. K, L, M, N ve O dik çizgileri sırasıyla küre merkezi (K), küre merkezinden 0.5D (L), 1D (M), 1.5D (N) ve 2D (O) mesafelerindeki dağılımları göstermektedir. Burada sürekli çizgi kürenin levha yüzeyinde olmaması durumunda oluşan deneysel sınır tabaka hız profilidir. Akım yönündeki negatif hız değerleri kürenin arkasında oluşan ayrılmış akış bölgesini açıklamaktadır. G/D=0 açıklık oranında ve Reynolds sayısının 5000 değerinde ve 0.5D

(L), 1D (M), 1.5D (N) çizgileri boyunca negatif hız alanları oluşmuştur (Şekil 4.22). Reynolds sayısı 10000 değerine çıkarıldığında yine aynı bölgelerde aynı büyüklükte negatif hız alanları oluşmuştur. Açıklık oranı G/D=0.10 ve Re=5000 için, küre ile levhanın hemen alt kısmında jet akışın etkisi ile hız artmıştır. Ancak, sınır tabakaya küre yerleştirilmeden elde edilen hız büyüklüğünden daha küçük bir değerdedir. Başka bir ifadeyle bu açıklık viskoz kuvvetlerin etkisinden dolayı akışın ivmelenmesi ve hızlanması için çok küçüktür. Reynolds sayısı Re=10000 değerine artırıldığında ise bu bölgenin hız büyüklüğü daha da azalmıştır. Reynolds sayısının 5000 değerinde L çizgisi boyunca y ekseninde levhadan yüksekliğin 0D-0.25D olduğu yerde negatif hız bölgesi oluşurken y ekseninde levhadan yüksekliğin 0.25D-0.50D olduğu bölgede pozitif hız değerleri almaktadır. Levhadan daha yukarıya çıkıldığında ise (yaklaşık 0.6D -1.15D) tekrar negatif hız bölgesi oluşmuştur. L çizgisi için Reynolds sayısı 10000 değerine çıkarıldığında levhadan 0D-0.25D yükseklik aralığında jet akışın etkisi ile pozitif akış bölgesi oluşurken levhadan yüksekliğin 0.25D-1.15D arasında tekrar negatif hız bölgesi yer almıştır. M çizgisi boyunca ise levhadan olan yüksekliğin 0D-0.50D olduğu yerde Re=5000 için negatif hız bölgesi oluşurken Re=10000 için pozitif hız bölgesi oluşmuştur. Levhadan olan yüksekliğin 0.5D-1.0D olduğu yerde ise Re=5000 değerinde pozitif, Re=10000 değerinde negatif hız bölgesi oluşmuştur. M çizgisi boyunca levha yüzeyinden farklı yüksekliklerde Reynolds sayısına bağlı olarak hız değerlerinin bu kadar değişmesinin nedeni küre ile levha arasındaki jet akış yapısının Reynolds sayısı ile farklı olmasındandır. Reynolds sayısının 5000 değerinde jet akış küre üst kayma tabakasına yönelirken Reynolds sayısının 10000 değerinde akım yönünde yönelmiştir (Şekil 4.22). N ve O çizgileri boyunca ise tamamen pozitif hız bölgesi oluşmuştur ve Reynolds sayısına bağlı olarak akış yapısında kayda değer bir değişim olmamıştır. Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda jet akış bölgesindeki hız değerleri artmıştır. K çizgisi boyunca hız bileşenleri Reynolds sayısının 5000 ve 10000 değerlerinde küre ile levhanın arasında kalan bölgede, küresiz durumdaki sınır tabaka hız değerlerini geçmiş, üstelik serbest akım seviyesine çıkmıştır. Küre merkezinden 0.50D (L çizgisi) ve 1.0D (M çizgisi) aşağı akım yönlerinde de jet akış etkisini kaybetmeden sürdürmekte ve küresiz durumdaki hız profilinin hız büyüklüğü değerlerini geçmektedir. Bu durum küre ile levha arasındaki boşluk oranı G/D=0.25 olduğunda akışın ivmelendiğini göstermektedir. G/D=0.10 açıklık oranında da jet akışın olduğu bölgede hız bileşenleri tepe noktası oluşturmaktadır, ancak, jet akışın hız büyülüğü, küresiz durumdaki hız büyüklüğünden küçüktür. Aslında akış bu durumda kürenin etkisinden dolayı

yavaşlamaktadır. M ve N çizgileri boyunca ise her iki Reynolds sayısı değerinde de jet akış sürmekte ancak şiddeti zayıflamıştır.

Zaman ortalaması alınmış akım yönüne paralel hız çalkantıları $<u^*_{rms}>$ (Şekil 4.23) kürenin alt bölgesinde küçük bir bölgeyi işgal ederken kürenin üst kısmında ise daha geniş bir alanı kaplamaktadır. Bunun nedeni ise kürenin üst bölgesinde hız değerlerinin yüksek olmasından dolayı daha şiddetli girdap kopmalarının olmasından kaynaklanmaktadır. Küre ile levha arasındaki açıklık oranı arttıkça kürenin üst ve alt kayma tabakası arasındaki çalkantı şiddetlerinin farkı azalmaktadır. Bunun nedeni, küre ile levha arasındaki boşluktan geçen jet akışın çalkantılı bir yapı oluşturmasındandır. G/D=0.25 için jet akıştan dolayı üç adet farklı şiddette tepe değerleri oluşmaktadır. Bu değerlerden iki tanesi girdap kopması sonucunda oluşan kayma tabalarında oluşmaktadır. Bir tanesi ise küre ile levha üzerindeki sınır tabaka etkisinden dolayı ortaya çıkmaktadır.

Reynolds gerilmelerin $<u'v'/U_\infty^2>$ küre arkasından 0.83D uzakta dikey bir çizgi boyunca küre alt yüzeyi ile plaka yüzeyi arasındaki boşluğun $0 \leq G/D \leq 1.5$ olması durumda Re=5000 değerinde değişimi Şekil 4.24'te verilmiştir. Boşluk oranı G/D=0 olması durumunda, küre üst yüzeyinden olan negatif Reynolds gerilmeleri $<u'v'/U_\infty^2>$ oluşmaktadır. Art izinin yukarı bölgesinde negatif şiddeti yüksek Reynolds gerilmeleri $<u'v'/U_\infty^2>$ oluşurken kürenin alt kısmından pozitif Reynolds gerilmeleri $<u'v'/U_\infty^2>$ oluştuğu görülmüştür. Boşluk oranı arttıkça sınır tabaka akışı etkisinin azalmasından dolayı Reynolds gerilmelerin $<u'v'/U_\infty^2>$ tepe değerleri daha büyük olmaktadır. Açıklık oranı arttıkça pozitif değerdeki Reynolds gerilemelerinin şiddeti artmakta ve pozitif ve negatif değerdeki gerilme şiddetleri simetrik bir yapı oluşturmaktadır.

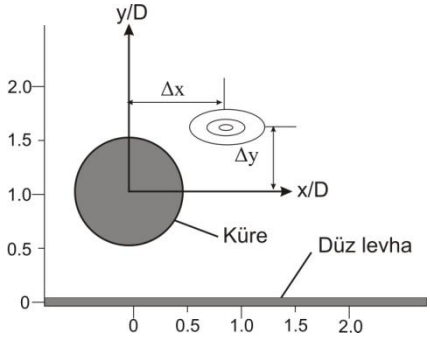


Şekil 4.24. Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küre arkasından 0.83D uzakta dikey bir çizgi boyunca küre alt yüzeyi ile plaka yüzeyi arasındaki boşluğun $0 \leq G/D \leq 1.5$ olması durumunda Re=5000 değerinde değişimi.

Çizelge 4.1'de akış alanının karakteristik özelliklerinin kritik değerleri ve bu değerlerin gerçekleştiği yerler verilmiştir. Burada verilen sonuçlar özellikle HAD çalışması yapanlara referans teşkil edecek nitelikte düzenlenmiştir.

Çizelge 4.1. Reynolds sayısının 5000 değeri Reynolds gerilmeleri, akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları, akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantıları ve ortalama akım çizgilerinin kritik yerleri ve değerleri (en yüksek tepe değerleri) tabloda sunulmuştur. Tabloda verilen Δx ve Δy yerleri tablonun altında şematik şekil üzerinde gösterilmiştir.

Açıklık Oranı	$\langle u^* \rangle$ (Δx/D, Δy/D)	$\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ (Δx/D, Δy/D)	$\langle u^*_{rms} \rangle$ (Δx/D, Δy/D)	$\langle v^*_{rms} \rangle$ (Δx/D, Δy/D)	$\langle \Psi \rangle$ (Δx/D, Δy/D)	TKE (Δx/D, Δy/D)
G/D=0	0 (1.98, -0.49)	-0.021 (1.63, 0.42)	0.205 (1.56, 0.44)	0.219 (1.82, -0.17)	R_1 (2.01, -0.5)	0.033 (1.61, 0.45)
	-0.370 (1.05, -0.41)	-0.017 (2.06,-0.06)			F_1 (2.22, 0.22)	0.034 (2.10, -0.07)
G/D=0.1	0 (1.04, 0.32)	-0.036 (0.97, 0.60)	0.252 (0.9, 0.59)	0.246 (0.97, 0.53)	F_1 (0.99, -0.20)	0.059 (0.98, 0.57)
	0 (1.66, -0.50)	0.016 (0.86,-0.04)		0.158 (1.30, -0.34)		
	0 (0.56,-0.59)				S_1 (0.56,-0.59)	0.032 (0.79, -0.13)
	-0.211 (0.58, 0.39)	0.025 (1.45, 0.48)	0.208 (0.45,-0.43)	0.183 (0.62, 0.07)	S_2 (1.69, -0.59)	0.032 (0.46, -0.44)
	-0.215 (1.05, -0.51)					
G/D=0.25	-0.347 (0.80, 0.25)	-0.049 (1.03, 0.52)	0.321 (1.05, 0.55)	0.281 (1.42, 0.30)	F_1 (0.86, 0.48)	0.084 (1.00, 0.54)
					F_2 (0.71, -0.26)	
	0 (1.32, 0.27)	-0.023 (1.54, 0)	-0.220 (1.36,-0.52)		F_3 (1.38, -0.68)	-0.027 (1.35, -0.55)
					S_1 (1.25, 0.37)	
G/D =0.5	-0.333 (0.86, 0.25)	-0.045 (1.14, 0.54)	0.302 (1.12, 0.60)	0.267 (1.34, 0.26)	F_1 (0.76, 0.45)	0.072 (1.14, 0.55)
	0 (1.34, 0.29)	0.024 (1.14, 0.24)	0.206 (1.17, 0.22)		F_2 (0.67, -0.37)	0.037 (1.11, -0.24)
					S_1 (1.16, 0.36)	
G/D =1.0	-0.397 (0.93, 0.26)	-0.053 (1.30, 0.53)	0.309 (1.17, 0.56)	0.300 (1.59, 0.32)	F_1 (0.98, 0.49)	0.081 (1.18, 0.55)
	0 (1.46, 0.28)	0.022 (1.34,-0.16)	0.192 (1.17,-0.28)		F_2 (0.73, -0.27)	0.037 (1.41, -0.09)
					S_1 (1.35, 0.37)	
G/D =1.5	-0.415 (0.98, 0.18)	-0.056 (1.36, 0.45)	0.342 (1.08, 0.56)	0.337 (1.73, 0.32)	F_1 (1.03, 0.46)	0.088 (1.17,0.55)
	0 (1.52, 0.18)	0.035 (1.66,-0.19)	0.268 (1.26,-0.37)		F_2 (0.83, -0.34)	0.058 (1.23, -0.39)
					S_1 (1.45, -0.28)	



4.2. Pürüzsüz ve O-ringli Kürelerin Sınır Tabaka ile Etkileşimin Boya, Anlık ve Ortalaması Alınmış PIV SonuçlarıylaKarşılaştırılması

Pürüzsüz küre ve yüzeyine farklı açılarda 2 mm ve 3 mm çapında (silindirik çap) o-ring yerleştirilerek pasif akış kontrolü uygulanmış kürenin sınır tabaka ile etkileşimi sonucu oluşan akış yapısı bu bölümde incelenmiştir. O-ringlerle uygulanan pasif kontrolün etkisi, boya deneyleri (sadece 2 mm çapındaki o-ringler için),anlık girdap eş düzey eğrileri ω*, ortalama vektör alanları <V>, ortalama akım çizgileri <ψ>, akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $< u^*_{rms} >$ ve akım yönüne dik hız bileşeni çalkantıları $< v^*_{rms} >$ incelenerek değerlendirilmiştir.

Bütün sonuçlar incelendiğinde değişik çaplarda olan ve farklı açılarda yerleştirilmiş o-ringin etkilerinin küre ile levha arasındaki açıklığa bağlı olarak değiştiği görülmüştür. O-ring çapı ve yerleştirildiği yere göre küre merkezinde belirlenen Δx/D mesafeleri Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Kürenin levhayla tam temas halinde olduğu G/D=0 açıklık oranında anlık girdap eş düzey eğrilerinden de görüldüğü iki boyutlu görüntü düzleminde akış sadece küre üst kayma tabakasından ayrılmıştır ve negatif girdap alanları oluşmuştur. Boya deneylerinden (Şekil 4.25) o-ring takılmış kürelerde Kelvin Helmholtz girdaplarının pürüzsüz küredeki kadar belirgin oluşmadığı görülmektedir. Küre yüzeyine yerleştirilen o-ringler küre yüzeyinden ayrılan akışın türbülans seviyesini artırmıştır. Akış ayrılmasının geciktirilmesi ise kayma tabakasındaki girdap şiddetlerini azaltmıştır. Anlık girdap eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27) girdap şiddetlerinin azaldığı ve küre art izi bölgesine doğru daha kısa bir mesafede taşınmaya başlandığı görülmektedir. Bu nedenle küre üst kayma bölgesinden ayrılan akış levha yüzeyine, o-ring takılmış kürelerde daha erken birleşmektedir. Küre üst kayma tabaksından ayrılan akış küre yüzeyinde 60°'lik konuma 2 mm'lik o-ring yerleştirildiğinde küre merkezinden yaklaşık 1.43D aşağı akım yönünde birleşmektedir ve bu bütün küreler için en kısa birleşme uzaklığıdır (Çizelge 4.2) ve art izi bölgesinin en kısa olduğu durumdur. Ayrılmış akış o-ring'in yerleştirilme açısı 55°'ye düşürülüp çapı 3 mm'ye çıkarıldığında ise yaklaşık olarak 1.45D aşağı akım yönünde levha yüzeyine birleşmektedir (Çizelge 4.2.). Çapı artan o-ring daha dar bir açıda aynı etkiyi doğurmuştur. Pürüzsüz küre için bu mesafe 2D (85 mm) kadardır. Akım yönündeki hız bileşenlerinin çalkantı değerleri $< u^*_{rms} >$ incelendiğinde en düşük şiddetli çalkantının 2

mm çapındaki o-ringin (Şekil 4.38.) 50°'ye yerleştirilmesi ve 3 mm çapındaki o-ringin (Şekil 4.39) ise 45°'ye yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Ancak 3 mm çapındaki o-ringler hız çalkantı değerlerinde bir azalma sağlamamıştır, üstelik 45°'den sonraki her yerleşim açısında $< u^*_{rms} >$ çalkantı şiddetleri artmıştır. 45°'ye yerleştirilen 3 mm o-ringin $< u^*_{rms} >$ çalkantı değerlerinde bir artış ya da azalış oluşturmamıştır, sadece $< u^*_{rms} >$ şiddetlerinin tepe değerini aldığı yer küre sırtına doğru yaklaştırmıştır. 50°'ye yerleştirilen o-ring ise $< u^*_{rms} >$ şiddetlerinin tepe değerini pürüzsüz küreye göre %14 azaltmıştır. Art izinin en kısa olduğu durumda küre yüzeyinde 60°'lik konuma 2 mm'lik o-ring yerleştirildiğinde ise $< u^*_{rms} >$ şiddetinin tepe değerinin pürüzsüz küreye göre çok az arttığı ancak tepe değeri aldığı yerin küre sırtına doğru yukarı akım yönünde yaklaştığı görülmüştür. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantı değerleri $< v^*_{rms} >$ 2 mm çapındaki o-ringin 60°'ye yerleştirilmesi (Şekil 4.42) ile en küçük değeri alırken, 3 mm çapındaki o-ringin 45°'ye yerleştirilmesi (Şekil 4.43) ile en küçük değeri almıştır. $< v^*_{rms} >$ çalkantılarının tepe değerleri pürüzsüz küreye göre karşılaştırıldığında 2 mm çapındaki o-ringin 60°'ye yerleştirilmesi ile %15 oranında düşerken, 3mm çapındaki o-ringin 45°'ye yerleştirilmesi ile %19 oranında düşmüştür.

Açıklık oranı G/D=0.10'a çıkarıldığında pürüzsüz kürede daha önce belirtildiği gibi jet akışın küre art izine doğru kaymasıyla küre üst kayma tabakasında ayrılmış akış levha yüzeyine birleşmemektedir ve kürenin arka bölgesinde aşağı akım yönünde büyük bir ayrılma kabarcığı oluşmaktadır. Çapı 2mm olan o-ringin etkisi incelendiğinde bu yapının o-ringin yerleştirilme açısı ile büyük oranda değiştiği gözlemlenmiştir. Akış alanındaki ortalama vektör <V> değerleri incelendiğinde pürüzsüz küre durumunda küre ile levha arasındaki boşluktan gerçekleşen jet akış küre sırtı boyunca y ekseni doğrultusunda yukarı yönde ilerlemekte ve üst kayma tabakasındaki akışla etkileşime geçmektedir (Şekil 4.30.). Jet akışın bu yapısı küre art izindeki akış yapısını önemli derecede değiştirmektedir. Kullanılan o-ringler küre üzerindeki akış ayrılmasını etkilediği için jet akışın yapısında da değişiklik olmasına neden olmuştur. Ortalama vektör alanlarında görüldüğü gibi (Şekil 4.30.) 2 mm çapındaki o-ringin 45°'ye yerleştirildiği durumda jet akış küre üst kayma tabakasına doğru olan hareketini aynı şekilde devam ettirmiş, açı 50°'ye çıkarıldığında üst kayma tabakasına doğru hareket eden jet akışın vektörel hız bileşenlerinin büyüklüğü azalmış, 50°'ye çıkarıldığında ise

artık jet akış üst kayma tabakasına yönelmemektedir. Boya deney sonuçlarından ve anlık girdap eş düzey eğrilerinden de 2 mm o-ringin 45° ve 50°'ye yerleştirildiği durumda küre ile levha arasındaki boşluktan gerçekleşen jet akışın küre üst kayma tabakasına doğru olan hareketi görülmektedir. Ortalama vektör alanlarından hesaplanan ortalama akım çizgileri <ψ>görünümünde jet akışın o-ringin yerleştirilme açısı ile olan değişimi ve akış yapısındaki etkisi şöyle açıklanabilir: Pürüzsüz küre durumunda gözlemlenen odak noktası F_1 ile gösterilen ayrılma kabarcığı, 2 mm çapındaki o-ringin 45°'ye yerleştirildiği durumda aynı şekilde oluşurken, o-ringin yerleştirilme açısı 55°'ye çıkarıldığında ayrılma kabarcığı tamamen kaybolmuş ve küre arkasında farklı büyüklüklerde iki adet dönümlü akış bölgesi oluşmuştur (Şekil 4.34). O-ring 50°'ye yerleştirildiğinde ise bu iki farklı yapı arasında bir çeşit geçiş özelliği taşıyan karmaşık biryapı oluşmuştur ve bu durumda dört adet odak noktası oluşurken (F_1, F_2, F_3 ve F_4) iki adet de durma noktasının (S_1 ve S_2) oluştuğu gözlemlenmiştir. O-ringin 60°'ye yerleştirildiği durumda da 55°'dekine benzer bir yapı oluşurken açı 70°'ye çıkarıldığında pürüzsüz kürede gözlemlenen büyük ayrılma kabarcığı tekrar oluşmuştur. 2 mm çapındaki o-ringin 70°'ye yerleşmesi durumunda küre ile levha arasındaki boşluktan gerçekleşen jet akış tekrar küre üst kayma tabakasına yönelmiştir. Ancak, jet akışın oluşturduğu pozitif ve negatif değerdeki girdap şiddetleri azalmıştır (Şekil 4.26). Bu durum o-ringin oluşturduğu yerel akış ayrılmasının küre yüzeyine birleşmeden art izine doğru yönlendiği şeklinde yorumlanabilir. Aynı açıklık seviyesinde (G/D=0.1) o-ring çapı 3 mm için akış alanındaki jet akışın ortalama hız vektörleri<V> (Şekil 4.31) jet akışın o-ringin 45°'lik yerleşiminde üst kayma tabakasına olan yönelimine devam ettiğini göstermektedir. Ancak, artan o-ring çapı akış yapısını daha düşük açılarda değiştirmiş, jet akış o-ringin 50°'ye yerleştirilmesi durumunda üst kayma tabakasına olan yönelimi kaybolmuştur. Ortalama akım çizgilerinden<ψ> görüldüğü gibi (Şekil 4.34) 50°'ye yerleştirilmiş 2 mmçapındaki o-ringli kürede olduğu gibi bir geçiş özelliği taşıyan yapı oluşmamış doğrudan birbirine zıt yönde dönen ve odak noktaları F_1 ve F_2 olan iki adet dönümlü akış bölgesi oluşmuştur.

G/D=0.10 açıklık seviyesinde 2 mm o-ring takılmış kürelerin akış görüntüleme düzleminin üst kayma tabakasında $< u^*_{rms} >$ hız çalkantı şiddetlerinde o-ringin yerleşim açısına göre artış ve azalışlar olmuştur. 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50° ve 70° lik yerleşimlerinde $< u^*_{rms} >$ hız çalkantı şiddetlerinin tepe değerlerinde artış olmuştur (Şekil 4.38). Küre üst kayma tabakasındaki $< u^*_{rms} >$ hız çalkantı şiddetlerinin en yüksek tepe

değerlerinde o-ringin 55°'ye yerleşimiyle %17, 60°'ye yerleşimiyle ise %29 oranında düşüşler elde edilmiştir. O-ringin 50°'ye yerleştirildiği durumda, daha önce ortalama akım çizgileri ve ortalama vektör alanları şekillerinde anlatıldığı gibi, küre ile levha arasındaki jet akış bir çeşit geçiş formuna girmiştir. Bu durumda, $<u^*_{rms}>$ eş düzey eğrileri,biri y ekseni doğrultusunda yukarı yönde diğeri x ekseni doğrultusunda aşağı akım yönünde iki adet belirgin tepe noktası oluşturmuştur. O-ring çapı 3 mm için o-ringin 45°'ye yerleştirildiği durumda $<u^*_{rms}>$hız çalkantı şiddetlerinin tepe değerlerinde artış olmuştur. Yerleşim açıları 50° ve 60°'de ise sırasıyla pürüzsüz küreye göre %19 ve %23 oranında azalma olmuştur. Akım yönündeki hız çalkantı $<u^*_{rms}>$ değerlerindeki değişimde o-ringin çapına ve yerleşim açılarına bağlı olarak küre ile levha arasındaki jet akış yapısını değiştirmesinin en önemli etmen olduğu söylenebilir.

G/D=0.10 açıklık oranında akım yönüne dik yöndeki hız bileşenlerinin $<v^*_{rms}>$ çalkantıları pürüzsüz kürede üç faklı noktada, 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50° ve 70°'lik yerleşimlerinde iki noktada, 55° ve 60°'lik yerleşimlerinde ise tek noktada tepe değeri almıştır (Şekil 4.42.). 3 mm çapındaki o-ringin 45°'lik yerleşiminde üç noktada, 50° ve 55°'lik yerleşimlerinde tek noktada tepe değer almıştır (Şekil 4.43.). Akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantılarının $<v^*_{rms}>$, o-ringin çapı ve yerleştirilme açılarına göre farklı sayılarda tepe değerler almasının nedeni bu açıklık oranında jet akışın küre art izi bölgesindeki akış yapısı üzerinde çok etkili olmasındandır.

G/D=0.25'te bütün o-ring çaplarında ve yerleşim açılarında ortalama vektör alanlarında<V> görüldüğü gibi jet akışın üst kayma tabakasına olan yönelimi ortadan kalkmıştır (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31) ve daha önce bahsedilen pürüzsüz küre durumunda levha üzerinde meydana gelen akış ayrılmaları o-ringli küre durumlarının hiç birinde oluşmamıştır. Ancak, 45°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ringli küre durumunda ortalama akım çizgilerinden görüldüğü üzere levha üzerinde kısmen bir akış ayrılması oluşmuştur (Şekil 4.34.). Yerleştirme açısı veya o-ring çapı artırıldığında bu ayrılmanın tamamen kaybolduğu görülmektedir. G/D=0.25 açıklık oranında küre art izi bölgesinin en küçük olduğu durum, durma noktasının küre merkezinden yaklaşık 0.75D aşağı akım yönünde, 3 mm çapındaki o-ringin küre yüzeyine 60°'lik konuma yerleştirildiği zaman oluşmuştur (Çizelge 4.3.). Pürüzsüz küre durumunda bu mesafe 1.25D'dir. 2 mm çapındaki o-ringin yerleştirilme açıları artırıldıkça art izi bölgesi kısalmaya devam etmiş 60° ve 70° yerleştirilme açılarında en küçük değerlerini alarak sabitlenmiştir. Ancak,

yerleşim açısı 70° olduğunda art izi bölgesinin yüksekliğinde artış olmuştur. 3 mm çapındaki o-ringin etkileri yerleştirilme açılarına göre incelendiğinde art izi bölgesi uzunluğundaki düşüş 60°'ye kadar olmuş 70°'de ise aniden yükselerek pürüzsüz kürenin değerine ulaşırken art izi bölgesinin genişliği pürüzsüz kürenin art izi bölgesinin genişliğini geçmiştir (Çizelge 4.3.).

G/D=0.25 açıklık oranında küre yüzeyine yerleştirilen 2 mm çapındaki o-ringin yerleşim açıları 60°'ye kadar akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ küre üst kayma tabakasındaki şiddetlerinin tepe değerleri azalmış, yerleşim açısı 70°'ye çıkarıldığında ise aniden artmış ve pürüzsüz küredeki çalkantı şiddetinin tepe değerini geçmiştir (Şekil 4.38). Küre yüzeyine yerleştirilen 2 mm çapındaki o-ringin yerleşim açıları 60° olduğunda küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetinin en yüksek tepe değeri pürüzsüz küreye göre %31 oranında azalmıştır. O-ring çapı 3 mm'ye çıkarıldığında küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri (Şekil 4.39) pürüzsüz küre ve o-ringin, 45° 50°, 55°, 60° ve 70°' konumları için sırasıyla 0.321, 0.219, 0.232, 0.221, 0.286 ve 0.385'tir. 3 mm çapındaki o-ring için $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek değerindeki en çok düşüş %32 ile 45°'ye olan yerleşimde olmuştur. Akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ küre alt kayma tabakasındaki şiddetleri ise yerleşim açısı 55°'ye kadar artmış 60°'de pürüzsüz küreyle aynı seviyeye inmiştir. Açı 70°'ye artırıldığında ise jet akışın etkisi ile alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı değerlerinin tepe noktası küre altına doğru kaymış ve şiddeti artarak pürüzsüz küredekini geçmiştir. 3 mm çapındaki o-ring yerleştirilmiş kürelerde ise küre alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin tepe değerleri pürüzsüz küre ve o-ringin, 45° 50°, 55°, 60° ve 70° konumları için sırasıyla 0.188, 0.229, 0.202, 0.199, 0.186 ve 0.160'tır. Küre alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetinin en yüksek değerinde 3 mm çapındaki o-ringin 70°'ye yerleştirildiği durumda azalma olmuştur. Levha yüzeyinin üst kısmındaki sınır tabaka akışında oluşan $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri, pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin 45° 50°, 55°, 60° ve 70°'ye yerleşim açıları için sırasıyla 0.220, 0.233, 0.210, 0.195, 0.218 ve 0.250 olarak hesaplanmıştır. 2 mm çapındaki o-ring için $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerindeki en çok düşüş %11'le 55°'ye olan yerleşimde olmuştur. Levha

yüzeyinin üst kısmındaki sınır tabaka akışında oluşan $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri 2 mm çapındaki o-ringin 45° 50°, 55°, 60° ve 70°'ye yerleşim açıları için sırasıyla 0.185, 0.205, 0.204, 0.215, 0.253'tür (Şekil 4.38). 3 mm çapındaki o-ring için $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin tepe değerindeki en çok düşüş %16 ile 45°'ye olan yerleşimde olmuştur (Şekil 4.39).

G/D=0.25 açıklık miktarında akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ 2 mm çapındaki o-ringin farklı açılara yerleştirilmesiyle değişimi Şekil 4.42'de, 3 mm çapındaki o-ringin farklı açılara yerleştirilmesiyle değişimi Şekil 4. 43'de verilmiştir. 2 mm çapındaki o-ringin küre etrafına yerleşim açısı 60°'ye kadar artırıldıkça $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek değerleri azalmış 70°'de $<v^*_{rms}>$ şiddetinin en yüksek değeri artarak pürüzsüz küreninkini geçmiştir. Akım yönüne dik hız bileşeni $<v^*_{rms}>$ çalkantılarında en çok azalma 55° ve 60°'ye olan yerleşimlerde olmuştur ve her ikisi için de %15 düzeyindedir. O-ring çapı 3 mm için$<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek değerlerinde bütün yerleşim açılarında azalma gerçekleşmiştir. En çok azalma 45°'ye yerleştirilen o-ringde olmuştur ve %50 düzeyindedir.

G/D=0.50 açıklık oranında art izinde durma noktası "S" nin küre merkezinden uzaklıkları 2 mm o-ring takılmış küre için o-ringin yerleşim açısı 45° ve 55°'de düşmekte, 60°'de 55°'deki ile aynı değeri almakta ve 70°'de ise yaklaşık olarak pürüzsüz kürenin değerine ulaşmaktadır. (Çizelge 4.3) Ancak, art izi bölgesi genişlik olarak ise pürüzsüz küreninkinden daha büyük olmaktadır. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi 3 mm çapındaki o-ringler 45°, 50°, 55° ve 60°'lik yerleşim açılarında akışı 2 mm çapındaki o-ringlere göre daha iyi kontrol etmiş ancak, yerleşim açısı 70°'ye çıkartıldığında art izi bölgesi ani bir artış göstermiş ve en büyük yapıyı bu durumda almıştır. 3 mm çapındaki o-ringin 55° ve 60°'lik yerleşimlerinde normal şartlarda F_1 ve F_2 odak noktaları ile gösterilen dönümlü akış bölgelerinin yapılarında bozulmalar olmuş ve net bir durma noktası belirlenememiştir (Şekil 4.35).

G/D=0.50 açıklık oranında akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ (Şekil 4.38) küre üst kayma tabakasındaki şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri pürüzsüz küre, ve 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.302, 0.305, 0.303, 0.264, 0.298 ve 0.329'dur. Akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının$<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri üst

kayma tabakasında, 45°ve 50°'ye yerleştirilen 2 mm çapındaki o-ringle değişmemiş, 55° ve 60°'lik yerleşimlerde azalmış, 70°'lik yerleşimde ise artarak akış kontrol uygulanmamış pürüzsüz küre durumundakini geçmiştir. Küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetlerinin (Şekil 4.38) en yüksek tepe değerleri 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.251, 0.213, 0.224, 0.282 ve 0.316'dır. 3 mm çapındaki o-ring 70°'ye yerleştirildiğinde küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetlerinin en yüksek tepe değeri artarak pürüzsüz küre durumundakini geçerken diğer yerleşim açılarında azalmıştır. Akışın en iyi kontrol edildiği durum o-ring çapına ve yerleşim açısına göre değişim göstermiştir. Küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri 2 mm o-ring için en çok, 55°'ye yerleştirilmesi ile pürüzsüz küreye göre %13 oranında düşerken, 3 mm o-ring için en çok, 50°'ye yerleştirilmesi ile %29 oranında düşmüştür. Görüldüğü gibi akışın en iyi kontrol edildiği durumlarda o-ring çapı artarken yerleşim açısı düşmüştür. Akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ küre alt kayma tabakasındaki şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.206, 0.241, 0.203, 0.163, 0.204 ve 0.242'dir. Pürüzsüz küre durumunda 0.206 olan $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değeri 2 mm o-ringin 45° ve 70°'ye olan yerleşimlerinde artarak pürüzsüz küre durumundakini geçmiştir. Diğer yerleşim açılarında ise pürüzsüz küreye göre azalma olmuştur. En çok azalma da %21 oranında bir azalmayla 55°'ye olan yerleşimde olmuştur. Akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ küre alt kayma tabakasındaki şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri (Şekil 4.39) 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.205, 0.199, 0.234, 0.239 ve 0.223'tür. Pürüzsüz küre durumunda 0.206 olan $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değeri 3 mm o-ringin 45°'ye olan yerleşiminde değişmemiş, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimlerinde artmış 50°'ye olan yerleşiminde ise %3 azalmıştır. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantı $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinde de kullanılan o-ringlerle etkili bir akış kontrolü sağlanmıştır. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantı $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri (Şekil 4.42) pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.267, 0.310, 0.317, 0.274, 0.257

ve 0.303'tür. 2 mm çapındaki o-ringin 60°'ye yerleşiminde $<v^*_{rms}>$ şiddetinin en yüksek tepe değerinde sadece %4 lük bir düşüş olurken diğer yerleşim açılarında pürüzsüz küreye göre artış olmuştur. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantı $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri (Şekil 4.43) 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.251, 0.286, 0.197, 0.237 ve 0.278'dir. 3 mm çapındaki o-ringin 55°'ye yerleşiminde $<v^*_{rms}>$ şiddetinin en yüksek tepe değerinde %26'lık bir düşüş olurken 50° ve 70°'lik yerleşim açılarında pürüzsüz küreye göre artış olmuştur.

G/D=0.75'te artık küre tamamıyla jet akışın etkisinden kurtulmuş ancak hala sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profiline maruzdur. Sınır tabakanın üniform olmayan hız profili kürenin üst ve alt kısmında meydana gelen girdap kopma şiddetlerinde farklılıklar oluşturmaktadır. Bu durum ortalama akım çizgileriyle gösterilen kürenin alt ve üst kısmındaki dönümlü akış bölgelerinin yapılarında farklılıklar oluşmasına neden olmaktadır. 2 mm çapındaki o-ringin etkilerini görmek için Çizelge 4.3'te verilen küre merkezi ile serbest durma noktaları "S" lerin arasındaki mesafeler incelendiğinde en kısa mesafenin 60°'ye yerleştirilmiş o-ring için olduğu görülmektedir. 50° ve 55°'lik yerleşimler karşılaştırıldığında ise 50°'lik yerleşimde küre merkezi ile serbest durma noktası arasındaki mesafenin 55°'lik yerleşimdekine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak bunun nedeni akışı daha iyi kontrol etmesinden çok akış yapısının asimetrik çıkmasındandır. Başka bir ifadeyle levhadan yukarıya doğru kayan art izi bölgesi durma noktasının küre merkezine olan x eksenindeki uzaklığını küçültmüştür. Art izi bölgesi boyutunun genel büyüklüğü ortalama akım çizgileri yapılarından (Şekil 4.36) net bir şekilde görülmektedir ki 2 mm çapındaki o-ring için 55°'lik yerleşimdeki art izi bölgesinin büyüklüğü 50°'lik yerleşimdekinden daha küçük çıkmıştır, üstelik tamamen simetrik bir yapıda oluşmuştur. Küre üst kayma tabakasındaki ve alt kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetinin (Şekil 4.40) en yüksek tepe değeri 55°'lik yerleşimde en küçük çıkmıştır. Akım yönüne dik yöndeki hız çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değeri ise 60°'lik yerleşimde en düşük çıkmıştır. 3 mm çapındaki o-ring için da 55°'lik yerleşimde ortalama akım çizgilerinde durma noktası tespit edilememiştir (Şekil 4.41). 3 mm çapındaki o-ringler 45°, 50° ve 60°'lik yerleşimlerde akışı kontrol ederken 70°' lik yerleşimde art izinde pürüzsüz küreye göre

büyük bir artış olmuştur. 3 mm çapındaki o-ringler için küre üst kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değeri 55°'lik yerleşim açısında en küçük çıkarken alt kayma tabaksında 50°'lik yerleşim açısında en küçük çıkmıştır. Akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantıları $<v^*_{rms}>$ şiddetlerininen yüksek tepe değerleri 60°'lik yerleşim açısında en küçük değerini almıştır.

G/D=1, 1.25 ve 1.50 açıklık oranlarında bütün durumlarda art izi bölgelerinin büyüklükleri daha düşük açıklık oranlarına göre daha büyük çıkmıştır (Çizelge 4.3). Sınır tabaka içerisinden çıktıkça kürenin art izi bölgelerinin boyutları büyümüştür. Sınır tabaka hız profili incelendiğinde de bu aralıklara denk gelen yükseklikte hız profili daha düşük bir eğime sahiptir bu da hız profilinin akış yapısı üzerinde daha az etkili olmasına neden olmaktadır. G/D=1, 1.25 ve 1.50 açıklık oranlarında 2 mm çapındaki o-ringin etkileri yerleşim açılarına göre incelendiğinde 55°'ye kadar art izi bölgesinin uzunluğu kısalmış, 60°'de bir miktar artıp 70°'ye çıkarıldığında ise en büyük yapıya ulaşmıştır (Çizelge 4.3). 3 mm çapındaki o-ringlerde ise her üç açıklık oranında da art izi 50°'lik yerleşime kadar küçülmüş daha sonra artarak 70°'de en büyük yapıya ulaşmıştır (Çizelge 4.3). Küre üniform akış şartlarınaçıkıldığında (G/D=1.50) en küçük art izi bölgesi 50°'ye yerleştirilmiş 3 mm çapındaki o-ringli küre ile 55°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ringli kürenin arkasında oluşmuştur. 3 mm çapındaki o-ringin 50°'de yaptığı etkiyi 2 mm çapındaki o-ring 55°'de yapmıştır. Üstelik bu durumlarda küre art izi bölgesini oluşturan akış yapısı pürüzsüz küreye göre daha erken simetrik bir yapıya ulaşmıştır.

G/D=1.50 olduğunda o-ring çapı ve yerleşim açısı ortalama akış karakteristiklerine yukarıdaki gibi etki etmiştir. Ortalama akım çizgilerinden ölçülen ve ortalama vektör alanlarından da görülebildiği kadarıyla en iyi akış kontrolü 50°'ye yerleştirilmiş 3 mm çapındaki o-ringle ve 55°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ringle sağlanmıştır. Bu durumlarda en düşük sürükleme katsayısının elde edilebileceği söylenebilir. Ancak, daha kesin bir yargı için sürükleme kuvvetinin ölçülmesi gerekmektedir. Türbülans istatistiklerinin değerlendirilmesi ile de sürükleme kuvvetindeki çalkantılar hakkında yorum yapılabilir. Bunun için akım yönündeki $<u^*_{rms}>$ ve akım yönüne dik yöndeki $<v^*_{rms}>$ hız bileşenlerinin çalkantı şiddetleri incelenmiştir. Akım yönündeki hız çalkantı değerleri incelenirken kürenin üst ve alt kayma tabakalarındaki şiddetleri ayrı ayrı incelenecek ve değerlendirilecektir.

Küre üst kayma tabakasında akım yönündeki hız bileşenleri çalkantı şiddetlerinin $<u^*_{rms}>$ (Şekil 4.40).en yüksek tepedeğerleri, pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.342, 0.282, 0.245, 0.243, 0.391 ve 0.311'dir. Küre alt kayma tabakasındaki değerler ise , pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.268, 0.212, 0.303, 0.240, 0.318 ve 0.236'dır. Küre üst kayma tabakasında $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değeri sadece yerleşim açısı 60° için artmış diğer yerleşim açılarında azalmıştır. Küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerindeki en çok azalma pürüzsüz küreye göre %29 oranında ve 55°'lik yerleşimde olmuştur. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri ise 50° ve 60°'lik yerleşimlerde pürüzsüz küreye göre büyük çıkmış, 45°, 55° ve 70°'lik yerleşimlerde pürüzsüz küreye göre küçük çıkmıştır. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerindeki en çok azalma pürüzsüz küreye göre %21 oranında ve 45°'lik yerleşimde olmuştur.

Küre üst kayma tabakasında (G/D=1.50 için) akım yönündeki hız bileşenleri çalkantı şiddetlerinin $<u^*_{rms}>$ (Şekil 4. 41) en yüksek tepe değerleri pürüzsüz küre ve 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.342, 0.246, 0.187, 0.313, 0.321 ve 0.309'dur. Alt kayma tabakasındaki değerler ise , pürüzsüz küre ve 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla ,0.268, 0.257, 0.232, 0.275, 0.244 ve 0.233'tür. Üst kayma tabakasında $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri bütün yerleşim açılarında azalmıştır. Üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerindeki en çok azalma pürüzsüz küreye göre %45 oranında ve 50°'lik yerleşimde olmuştur. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri ise 55°'lik yerleşimlerde pürüzsüz küreye göre büyük çıkmış diğer yerleşimlerde pürüzsüz küreye göre küçük çıkmıştır. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerindeki en çok azalma pürüzsüz küreye göre %13 oranında ve 50°'lik yerleşimde olmuştur.

G/D=1.50 için akım yönüne dik yöndeki hız bileşenlerinin çalkantı $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek değerleri (Şekil 4.44) pürüzsüz küre ve 2 mm çapındaki o-ringin

45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.337, 0.258, 0.282, 0.292, 0.280 ve 0.266'dır. Akım yönüne dik yöndeki $< v^*_{rms} >$ şiddetlerinin en yüksek değerleri (Şekil 4.45) 3 mm çapındaki o-ringin 45°, 50°, 55°, 60° ve 70°'ye olan yerleşimleri için sırasıyla 0.260, 0.296, 0.246, 0.281 ve 0.288'dir. 2 mm çapındaki o-ringin küre yüzeyine bütün yerleşim açılarında $< v^*_{rms} >$ şiddetleri azalmıştır. Aynı şekilde 3 mm çapındaki o-ring için de bütün yerleşim açılarında $< v^*_{rms} >$ şiddetleri azalmıştır. 2 mm o-ring için en iyi kontrol 45°'lik yerleşimde oluşmaktadır ve bu açıda $< v^*_{rms} >$ şiddetlerinin en yüksek değeri pürüzsüz küreye göre %23 oranında düşürülmüştür. 3 mm çapındaki o-ring için ise en iyi kontrol 55°'lik yerleşimde sağlanmıştır ve bu açıda $< v^*_{rms} >$ şiddetlerinin en yüksek değeri pürüzsüz küreye göre %27 oranında düşürülmüştür.

Farklı açıklık oranlarında o-ringin yerleşim açısına ve çapına bağlı olarak akış kontrolünün etkisinin değiştiği gözlemlenmiştir. Küre yüzeyine yerleştirilen o-ring yüzeyde oluşan sınır tabaka akışında ayrılmalar meydana getirerek sınır tabakanın türbülans seviyesini artırır. Türbülanslı bir sınır tabaka akış ayrılmasına karşı laminer sınır tabakadan daha dirençlidir. Burada o-ring çapı ve yerleştirilme açısı küre yüzeyindeki sınır tabaka akışının ayrılmasını tetiklemede kritik öneme sahiptir. Yerel olarak her hangi bir tetiklemeyle akış ayrılmasına uğrayan sınır tabaka sonra yüzeye tekrar tutunur ve daha dolgun bir hızprofili ile yoluna devam eder, daha dolgun hız profili de (türbülanslı akışlarda görülen) daha önce belirtildiği gibi akış ayrılmasına dirençlidir. Ancak, eğer akış ana akış ayrılmasının olacağı bölgeden çok önce yani erken tetiklenirse sınır tabaka cidarda yol aldıkça bu özelliğini kaybedebilir, ya da eğer akış ana akış ayrılmasının olacağı bölgeye çok yakın bir yerde tetiklenir de yerel akış ayrılması oluşturulursa, yerel olarak ayrılan akış cidara tekrar birleşmeye zaman bulamayacağından ana akış ayrılmasını geciktirici özelliğini kaybedecektir. Aynı şekilde yerel akış ayrılmasını oluşturacak tetikleyicinin boyutları da önemlidir. Eğer tetikleyici yeterli büyüklükte olmazsa, sınır tabaka ana akış ayrılmasını geciktirebileceği gerekli türbülans seviyesine ulaşamayacaktır. Tetikleyici çok büyük olursa da yerel olarak ayrılan akış tekrar birleşmek için gerekli mesafeyi bulamayacağından ana akış ayrılmasında gecikme olmayacaktır. Boya deneylerinde görülen art izi yapılarında Kelvin Helmholtz girdaplarının oluşumu 2 mm çapındaki o-ring için yerleşim açısı 55°'ye kadar bozulmuştur. Daha yüksek yerleşim açılarında ise Kelvin Helmholtz girdaplarının oluşum sıklığı azalırken boyutları artmıştır. Küre üst ve alt kayma

tabaksındaki girdap oluşumları incelendiğinde (Şekil 4.26) 2 mm çapındaki o-ringin 45°, 50° ve 55°'lik yerleşimlerinde girdap şiddetlerinin azaldığı ve akış alanında daha az bir bölgeye yayıldığı görülmektedir. Yerleşim açısı 60° ve 70°'ye çıkartıldığında ise kayma tabakalarında oluşan girdap şiddetleri artmış ve akış alanında daha büyük bir bölgeye yayılmıştır. O-ring çapının 3 mm olduğu durumda ise girdap şiddetlerindeki azalma o-ring yerleşim açısı 45° ve 50°'de olurken daha yüksek yerleşim açılarında girdapların hem şiddeti artmış hem de akış alanındaki yayıldıkları bölge artmıştır. Girdap şiddetlerinin artması ve daha büyük alanlara yayılmasının sonucu olarak ortalama akış değerlerinden de görüldüğü gibi art izi büyümüştür. Girdap yapılarının daha büyük bir alana yayılması ve aşağı akım yönünde daha uzak mesafelere iletilmesi küre arkasında bulunacak diğer cisimlerin daha çok etkilenmesine neden olan bir sonuçtur. Mevcut deneylerde üniform akış şartlarına çıkıldığında ana akış ayrılması en çok 2 mm'lik o-ringin 55°'lik mesafeye yerleştirilmesi ile geciktirilebilmiştir. Açı 50°'ye düşürüldüğünde ve o-ring çapı 3 mm'ye çıkartıldığındada benzer sonuçların elde edilmesinin nedeni yukarıda belirtilen durumdan dolayıdır. Akış ayrılmasını en çok geciktiren açı-çap kombinasyonunun küre ile levhaarasındaki açıklık oranına bağlı olarak değişiklik göstermesinin nedeni ise cisme gelen akışın başlangıç koşullarının jet akışın oluşması ve sınır tabakada üniform olmayan hız profilinden etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.

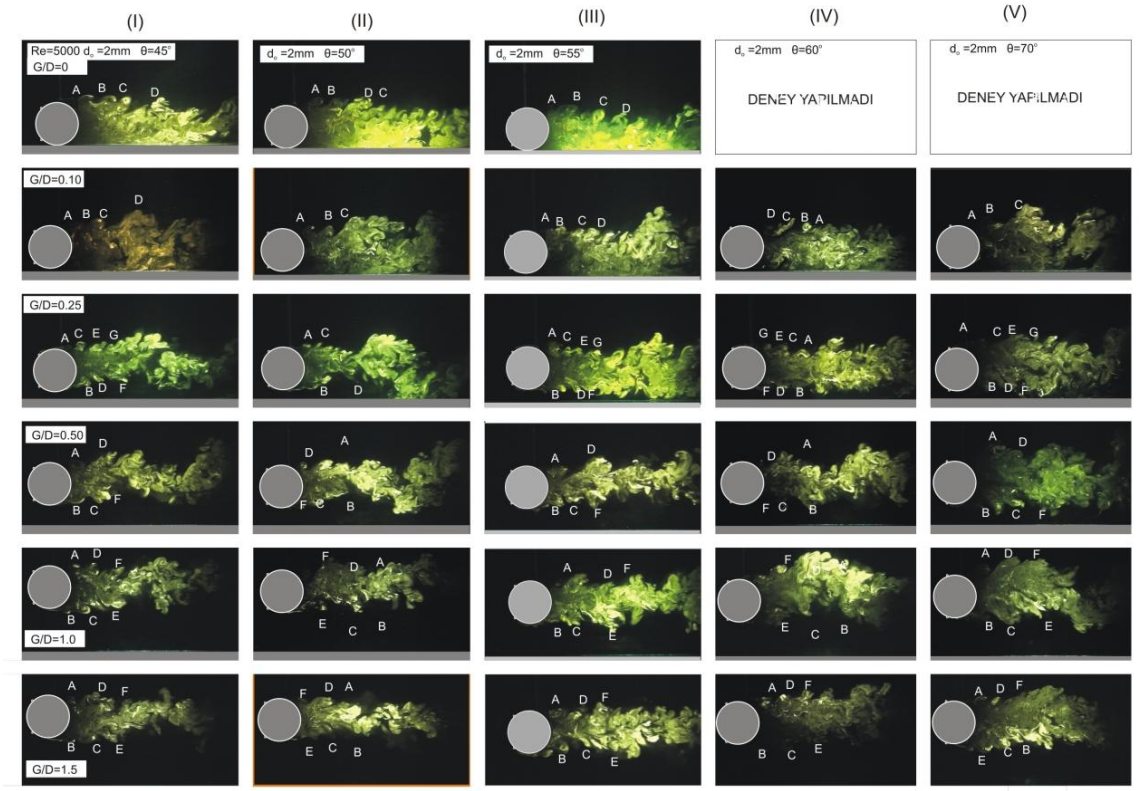
Çizelge 4.2. Ortalama akım çizgisi <Ψ> şekillerinde gösterilen birleşme noktası R'nin, küre yüzeyine yerleştirilen 2 mm ve 3 mm çapındaki o-ringler için Re=5000 değerinde değişimi.

O-ring çapı	Boşluk oranı G/D	Pürüzsüz küre R	$\theta = 45°$ R	$\theta = 50°$ R	$\theta = 55°$ R	$\theta = 60°$ R	$\theta = 70°$ R
d_o=2mm	0	2.01	1.85	1.96	1.53	1.43	-
d_o=3mm	0	2.01	1.78	1.68	1.45	-	-

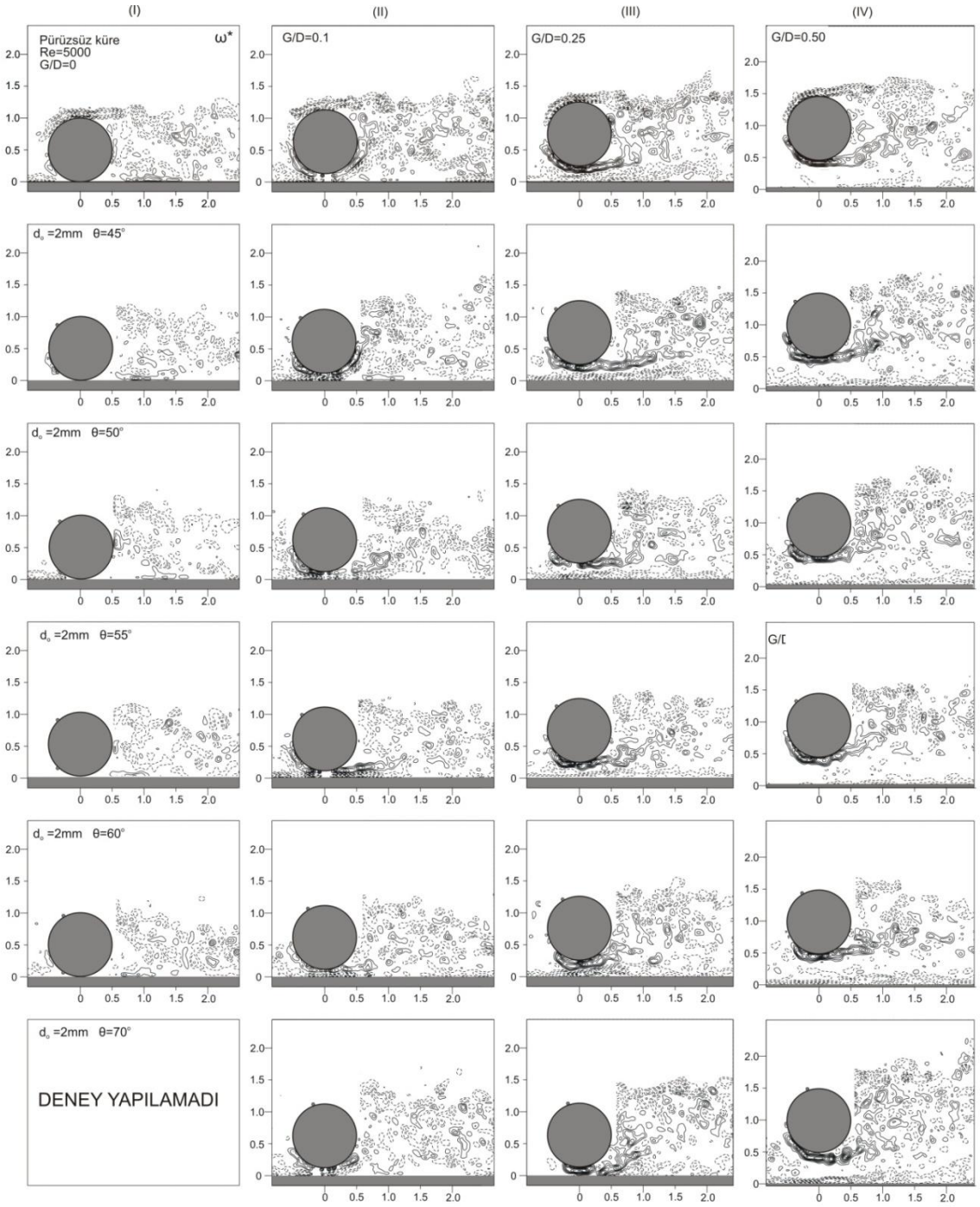
Çizelge 4.3. Ortalama akım çizgisi <Ψ> şekillerinde gösterilen durma noktası S'nin, küre yüzeyine yerleştirilen 2 mm ve 3 mm çapındaki o-ringler için Re=5000 değerinde değişimi.

"Boşluk oranı G/D	O-ring çapı	Pürüzsüz küre S	$\theta = 45°$ S	$\theta = 50°$ S	$\theta = 55°$ S	$\theta = 60°$ S	$\theta = 70°$ S
0.25	d_o=2mm	1.25	1.16	1.15	1.05	0.92	0.92
	d_o=3mm		1.05	0.98	0.94	0.75	1.25
0.50	d_o=2mm	1.16	1.14	1.01	0.79	0.79	1.15
	d_o=3mm		1.06	0.92	0.80	0.73	1.34
0.75	d_o=2mm	1.15	1.21	0.85	0.93	0.76	1.24
	d_o=3mm		1.06	0.80	-	1.00	1.55
1.0	d_o=2mm	1.35	1.32	1.14	0.86	0.88	1.45
	d_o=3mm		1.07	0.89	0.91	1.19	1.67
1.25	d_o=2mm	1.45	1.32	1.19	0.87	0.95	1.60
	d_o=3mm		1.15	0.90	0.90	1.40	1.75
1.50	d_o=2mm	1.45	1.38	1.20	0.90	0.99	1.58

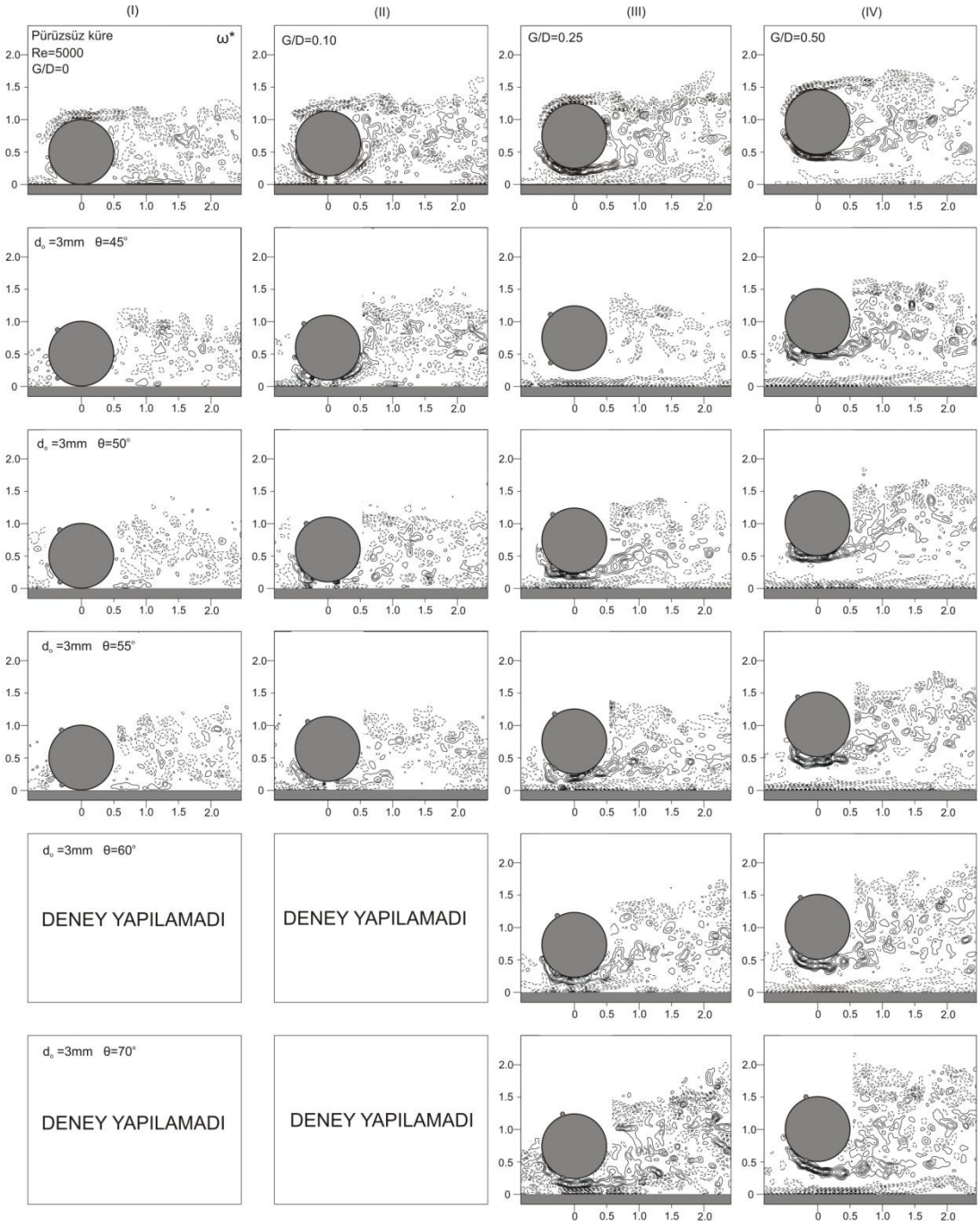
	d_o=3mm		1.15	0.86	0.96	1.50	1.80



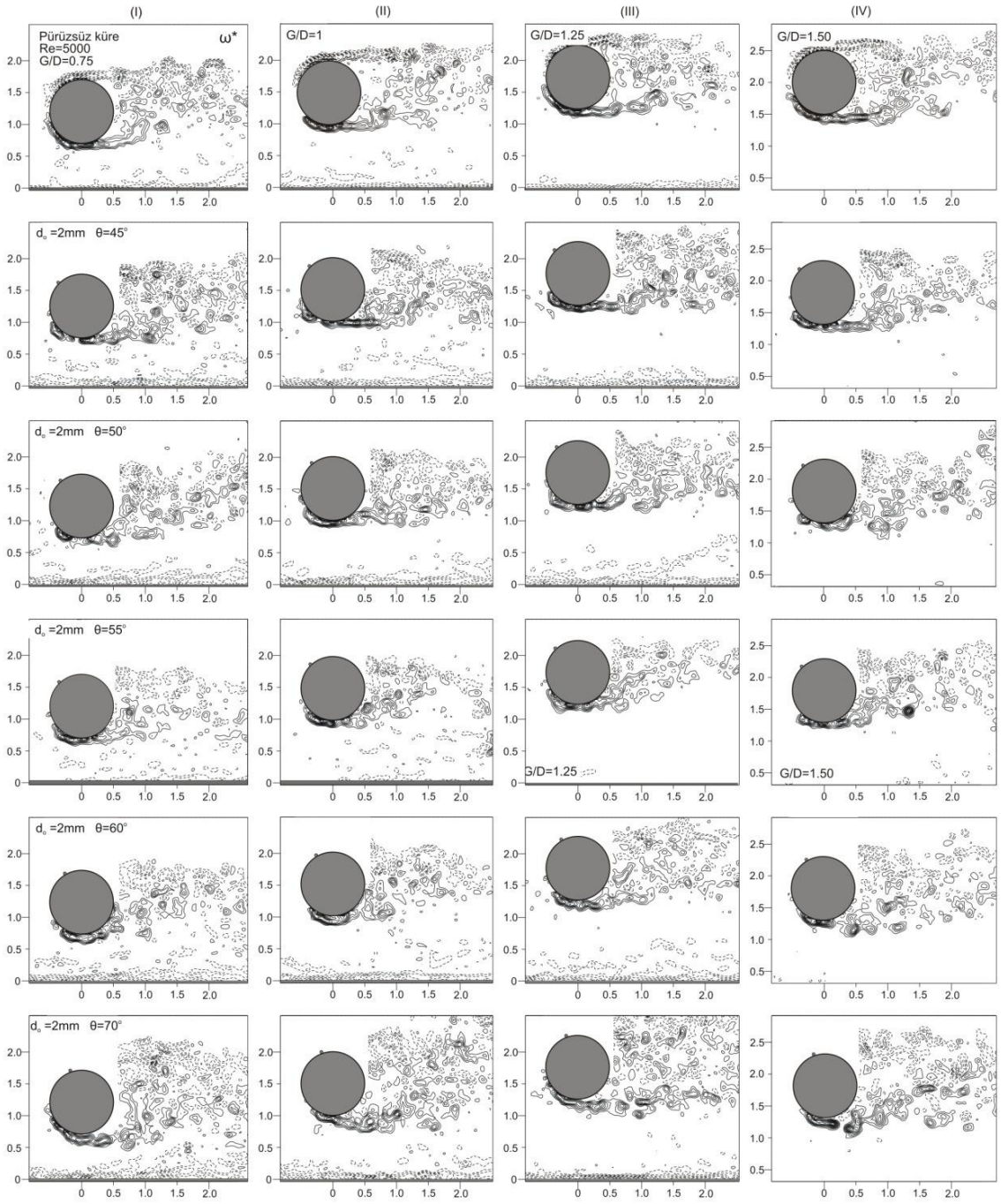
Şekil 4.25. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının boya sonuçlarınınküre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o' ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



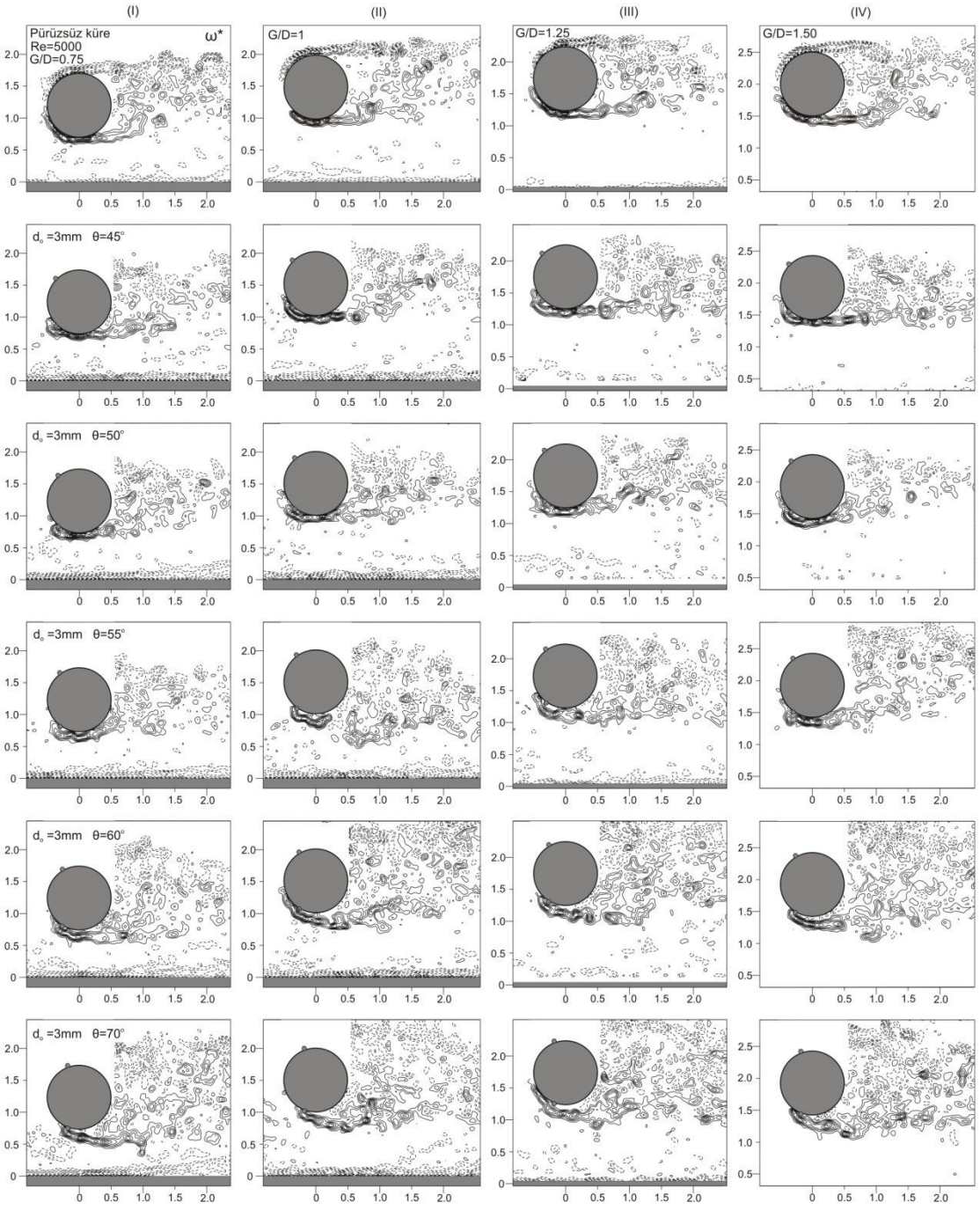
Şekil 4.26. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^{o}, 50^{o}, 55^{o}, 60^{o} ce 70^{o}'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|\Delta\omega^*|_{min} = |\omega^*|_{min} = 2$'dir.



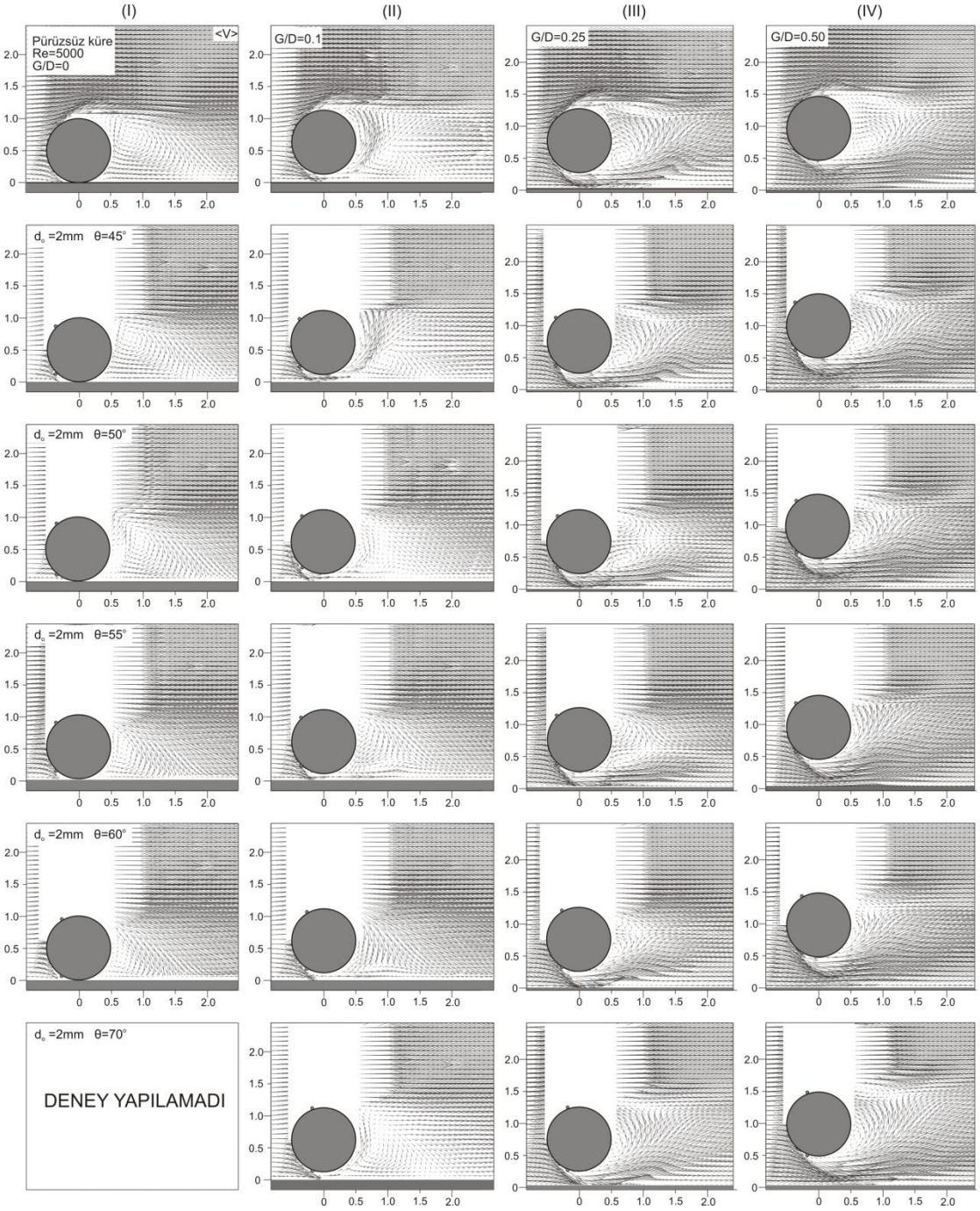
Şekil 4.27. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|\Delta\omega^*|_{min} = |\omega^*|_{min} = 2$'dir.



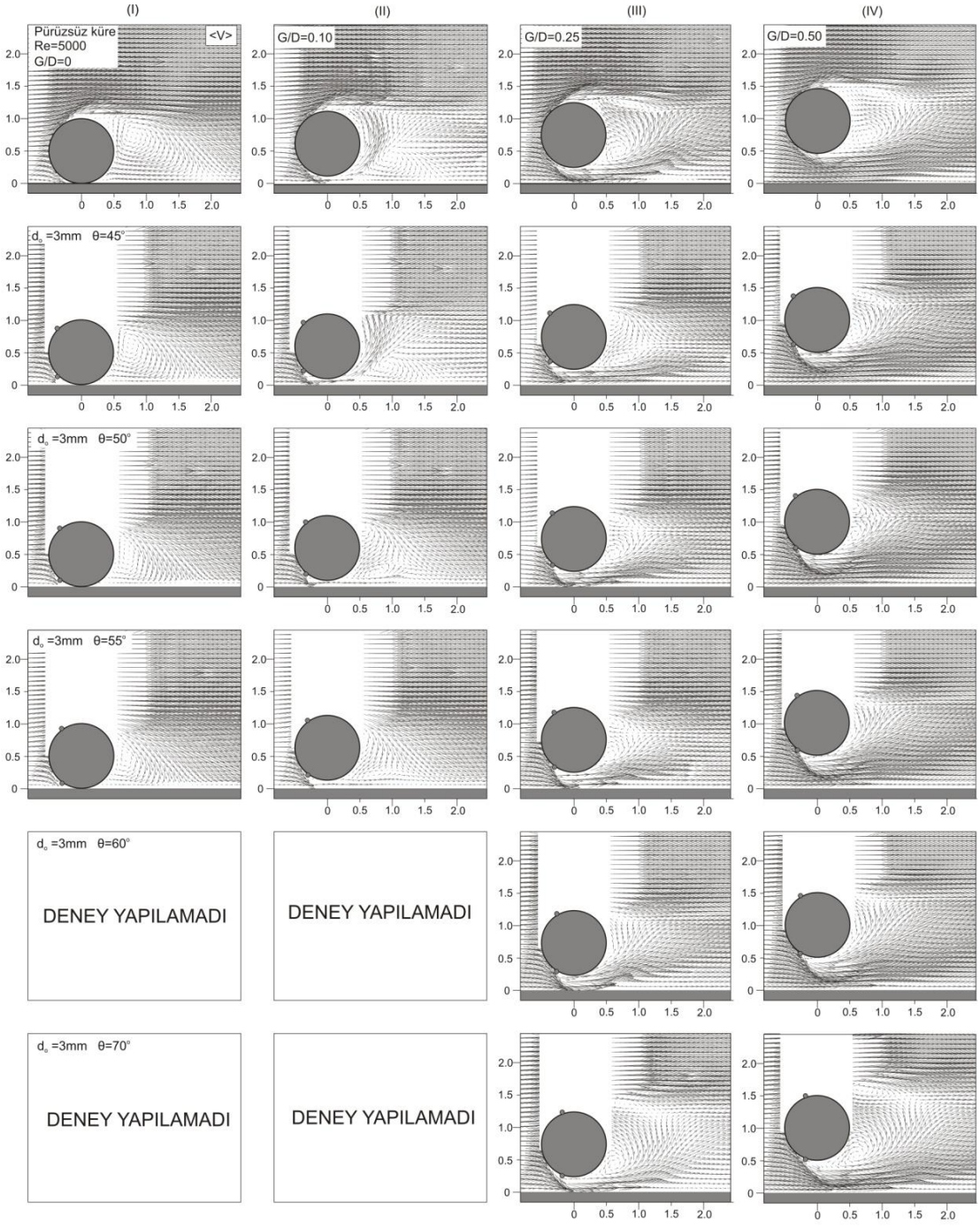
Şekil 4.28. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45°, 50°,55°, 60° ve 70°'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|\Delta\omega^*|_{min} = |\omega^*|_{min} = 2$'dir.



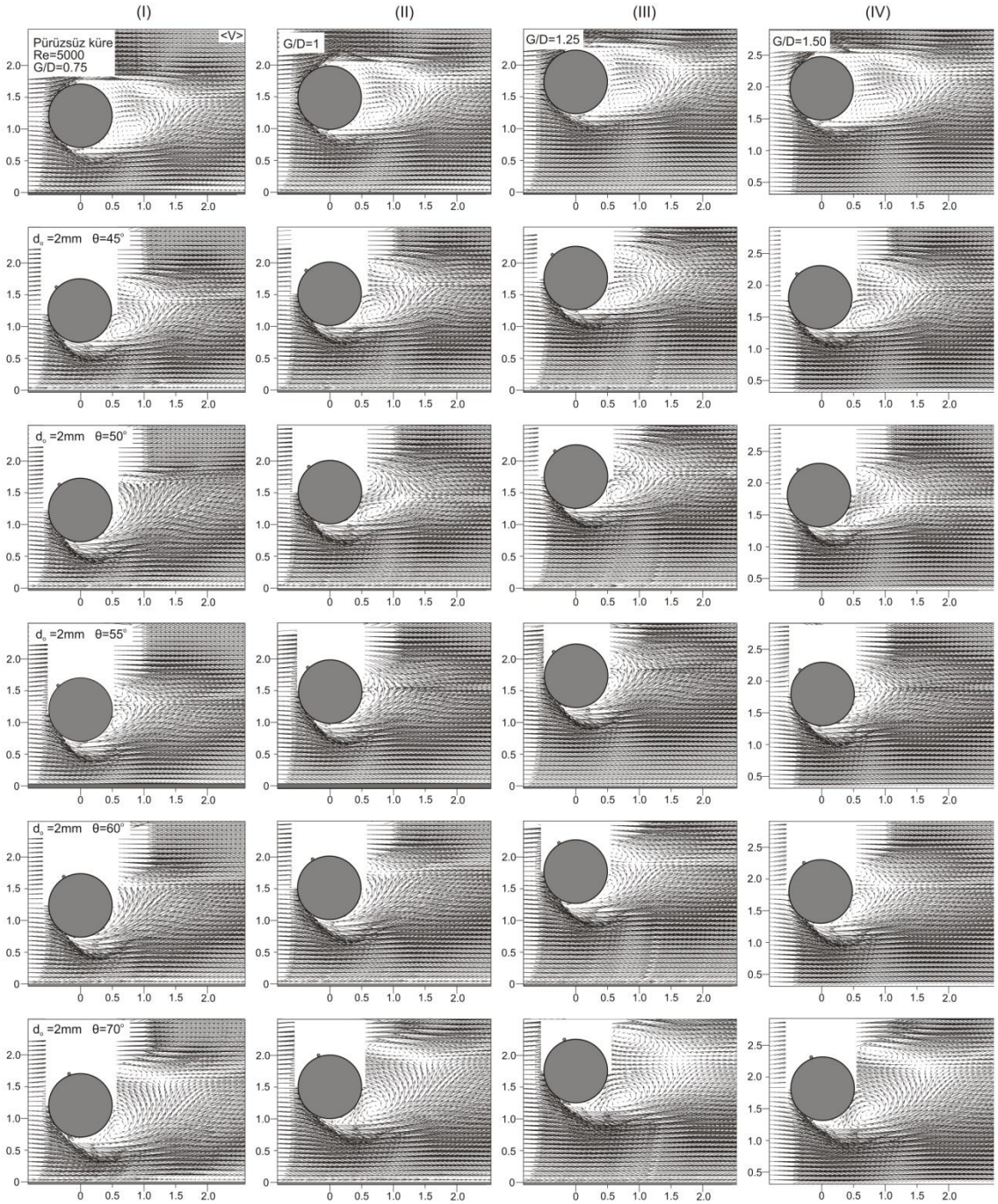
Şekil 4.29. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^{o}, 50^{o},55^{o}, 60^{o} ve 70^{o}'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $\left|\Delta\omega^*\right|_{min} = \left|\omega^*\right|_{min} = 2$'dir.



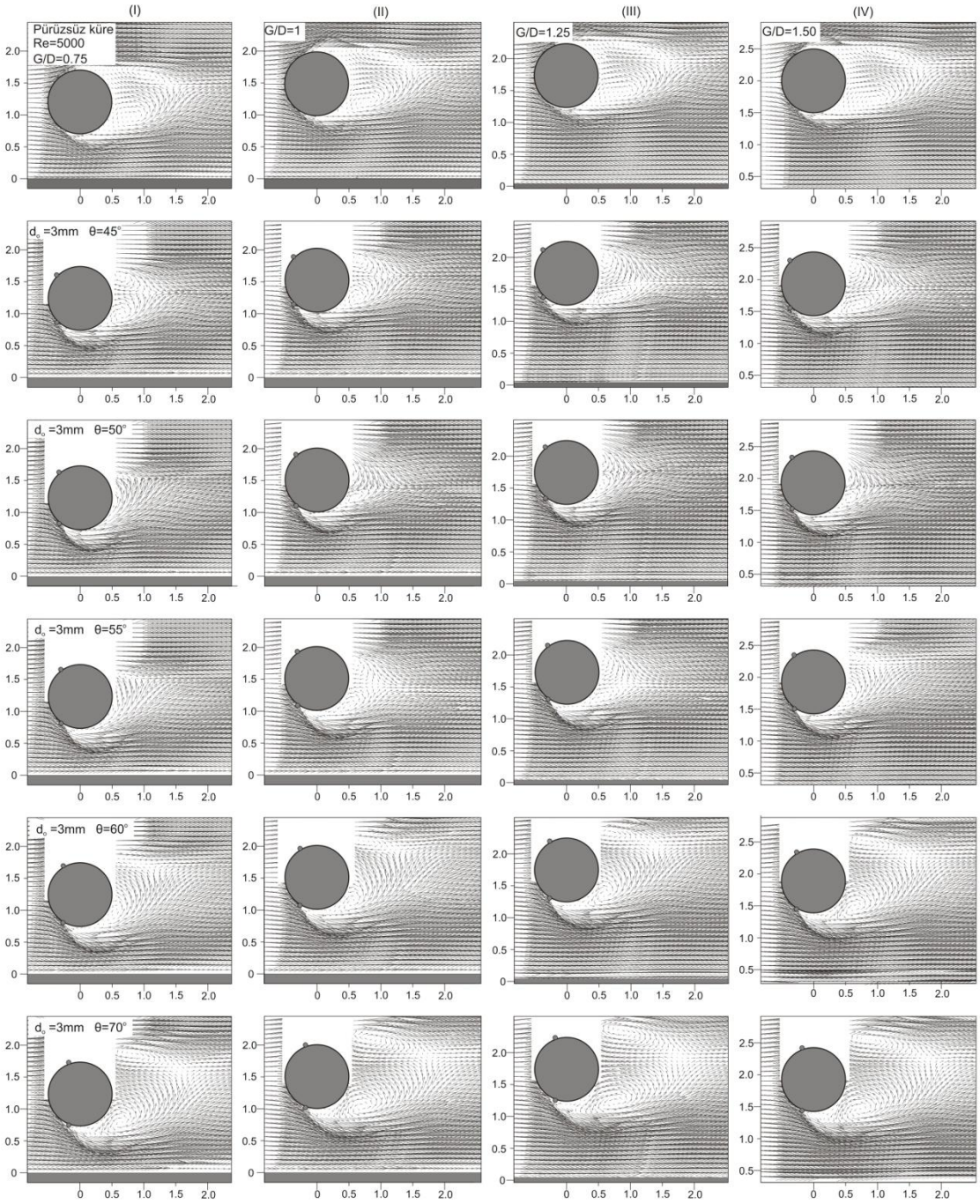
Şekil 4.30. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış hız vektör alanının<V> pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o'ye2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle plaka arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



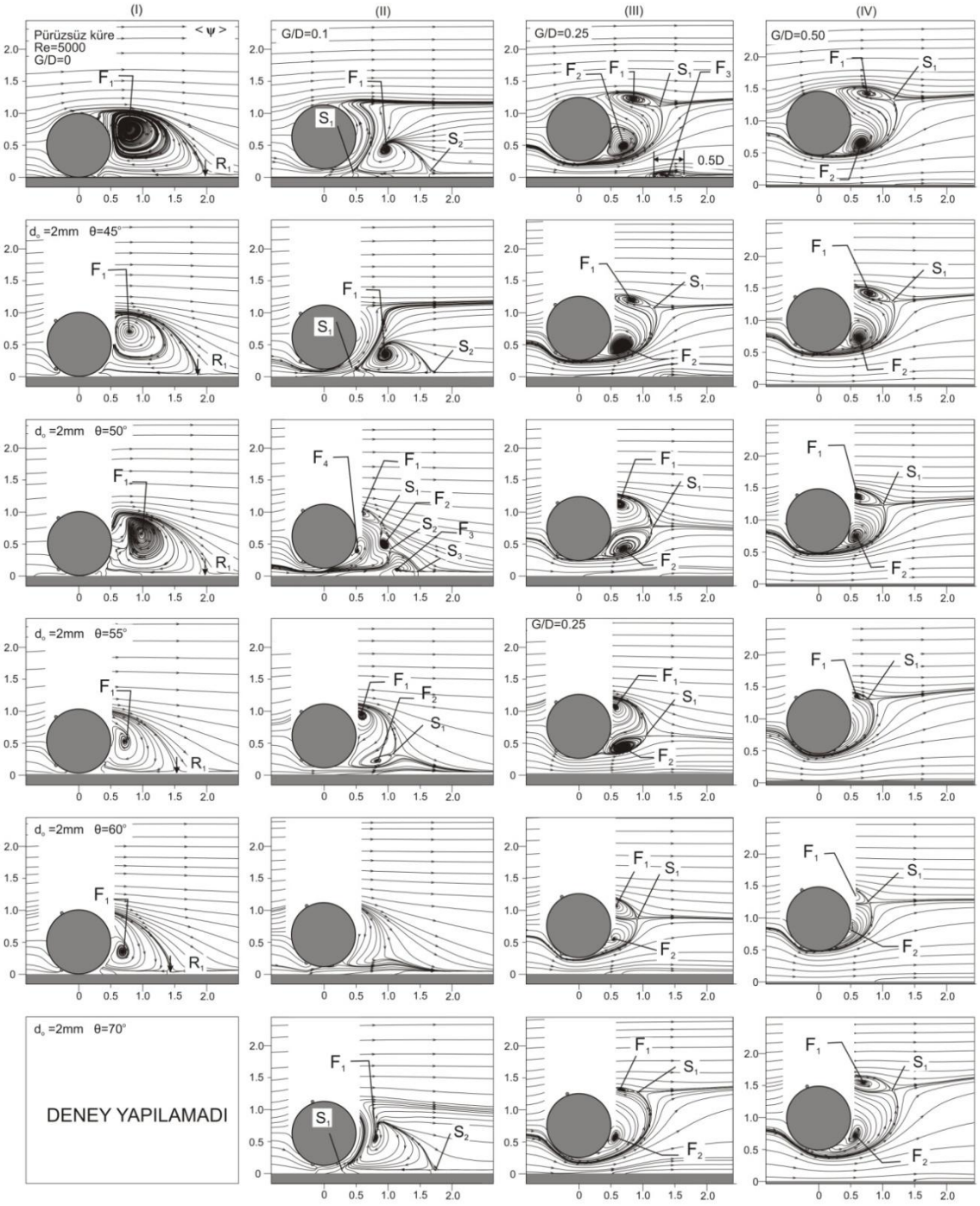
Şekil 4.31.Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış hız vektör alanı <V>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



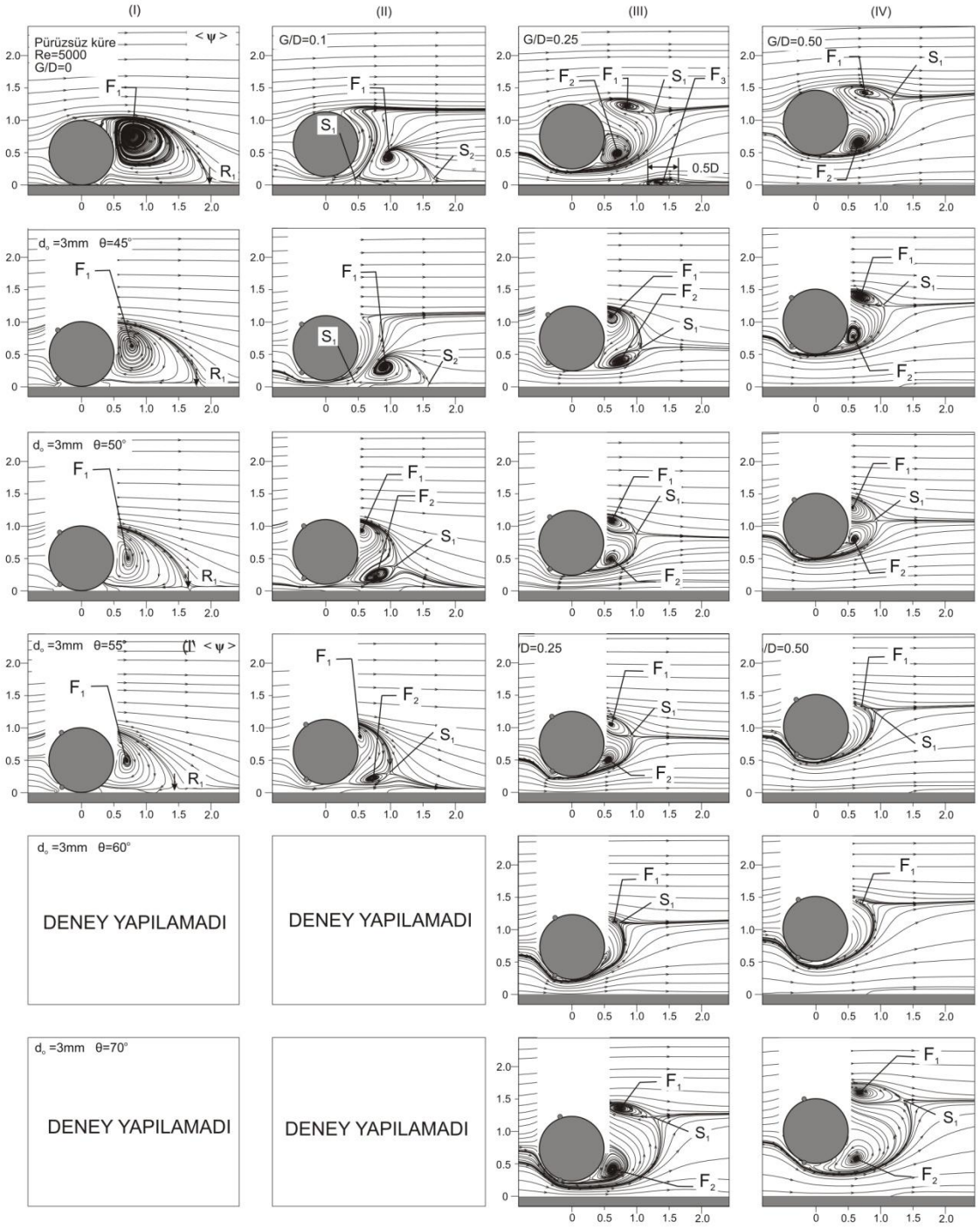
Şekil 4.32.Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış hız vektör alanı <V>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



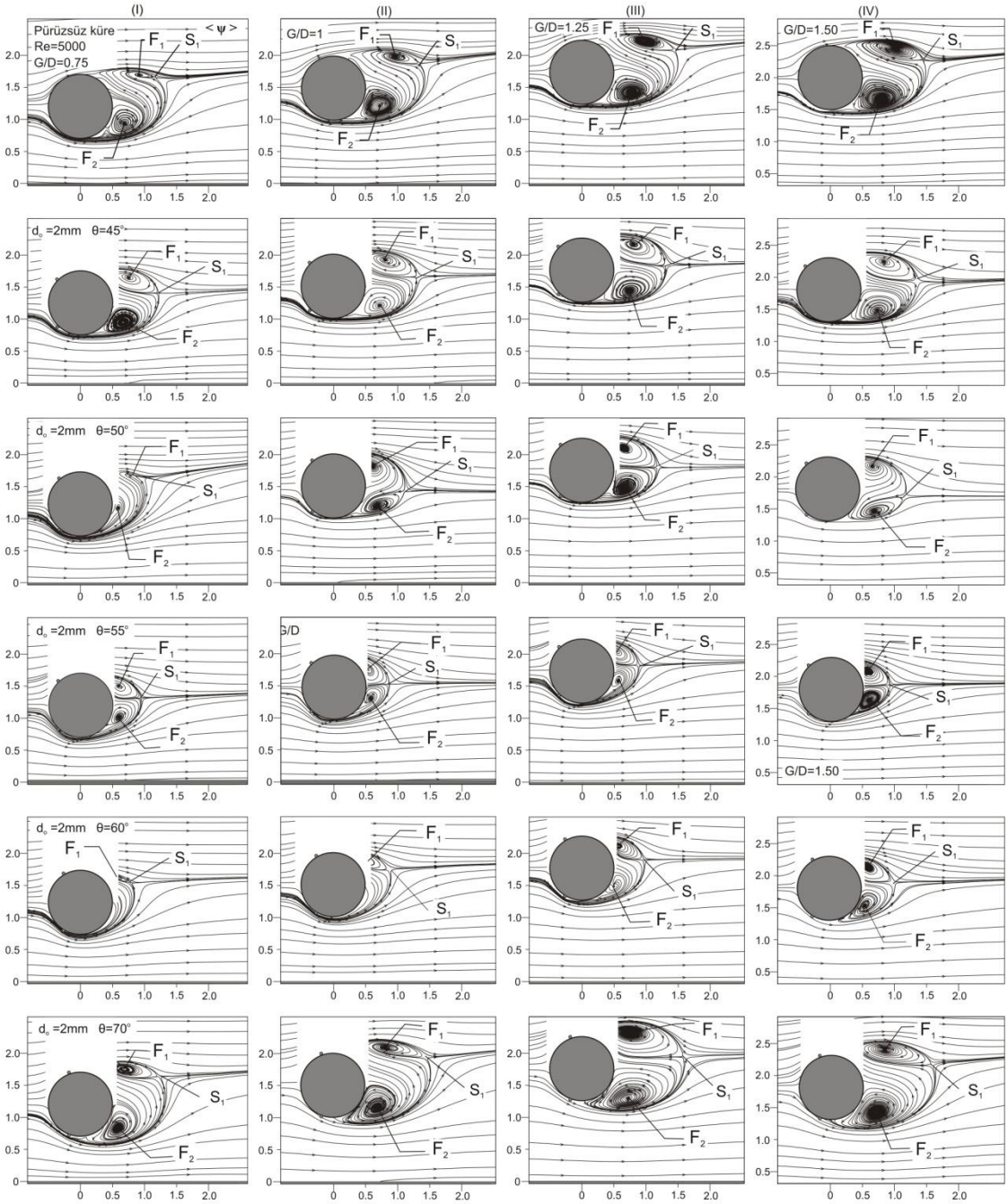
Şekil 4.33.Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış hız vektör alanı <V>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o, 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



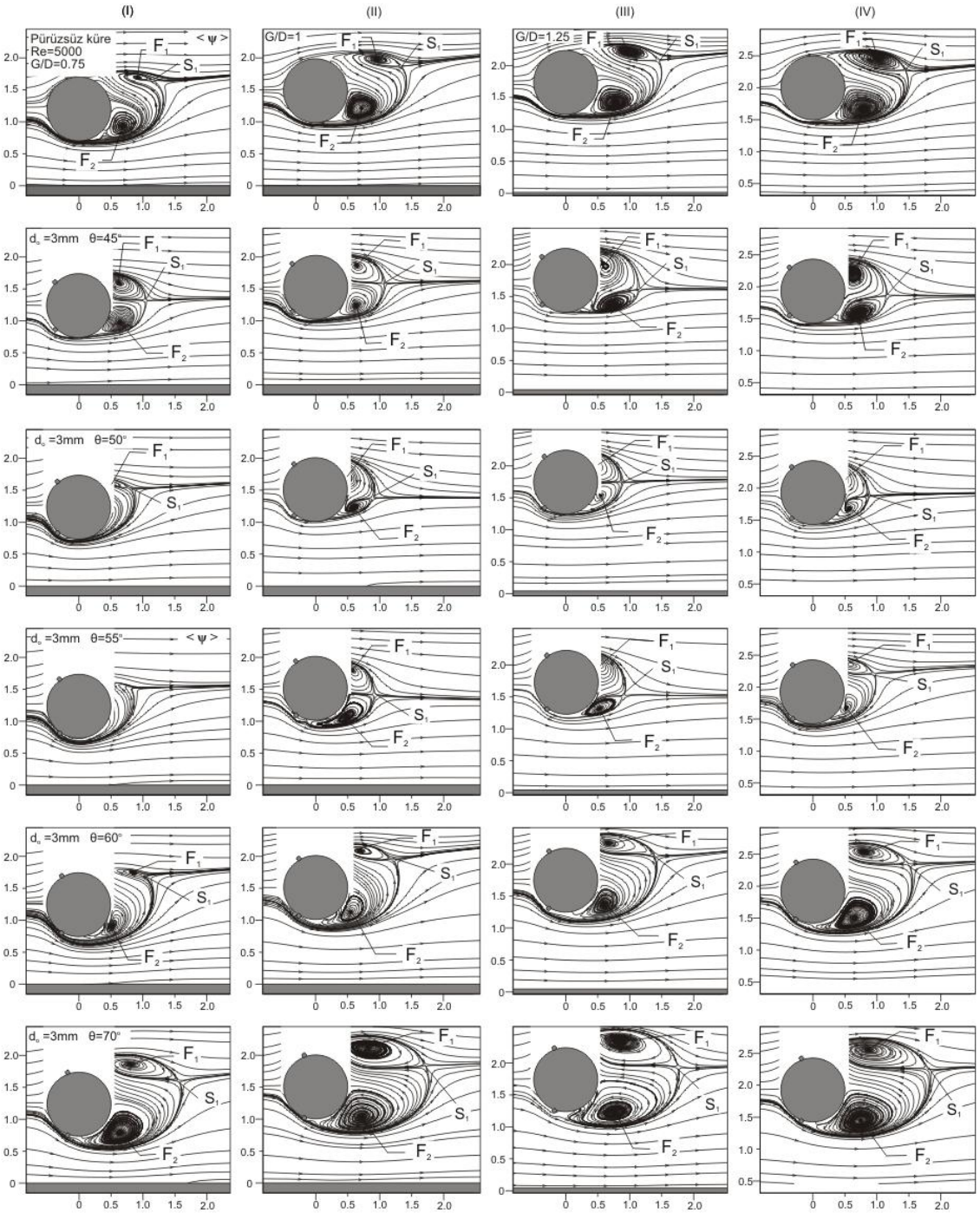
Şekil 4.34. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış akım çizgileri<ψ>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^{o}, 50^{o},55^{o}, 60^{o}, 70^{o}'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.≤G/D≤0.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



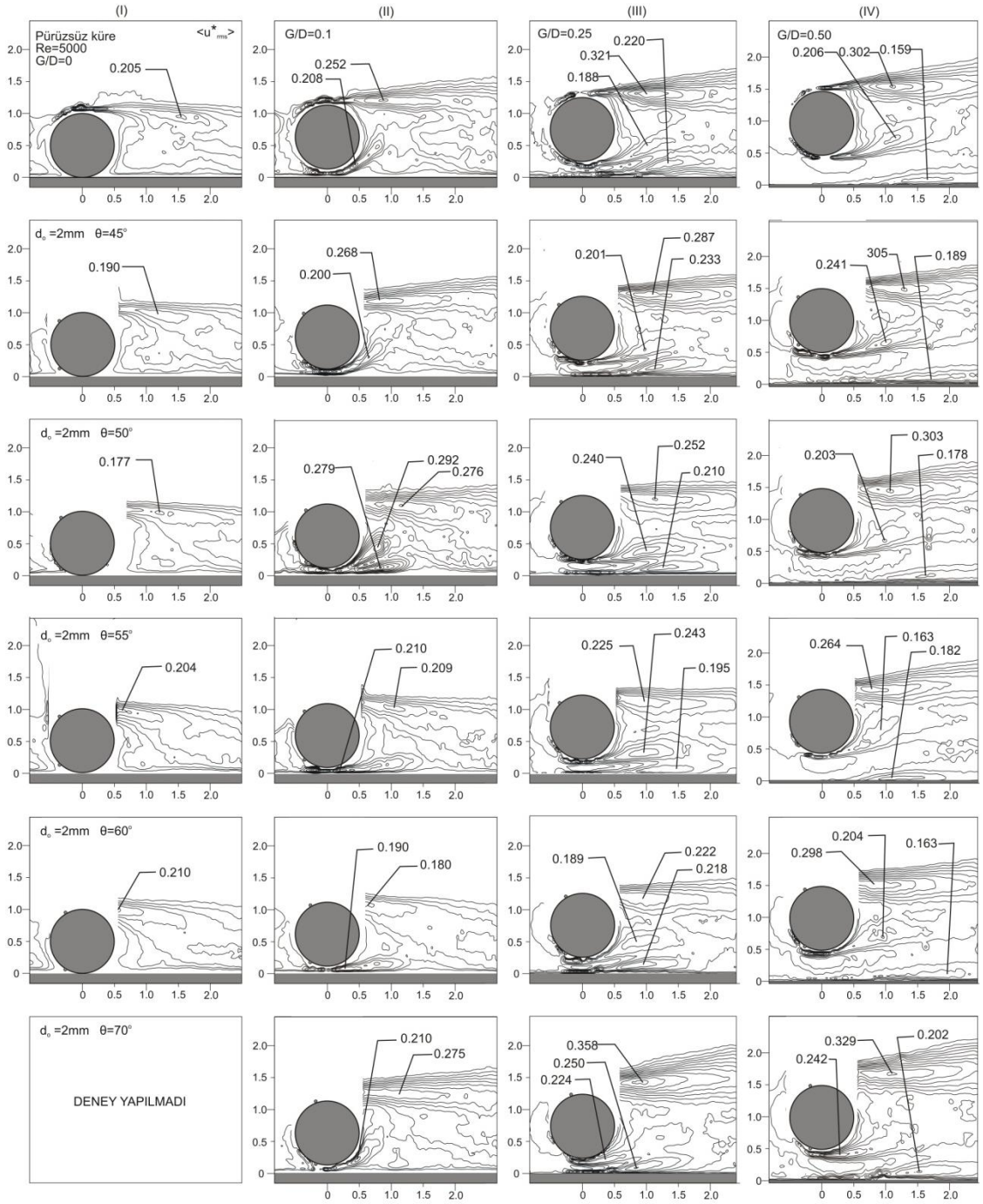
Şekil 4.35. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış akım çizgileri<ψ>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.≤G/D≤0.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



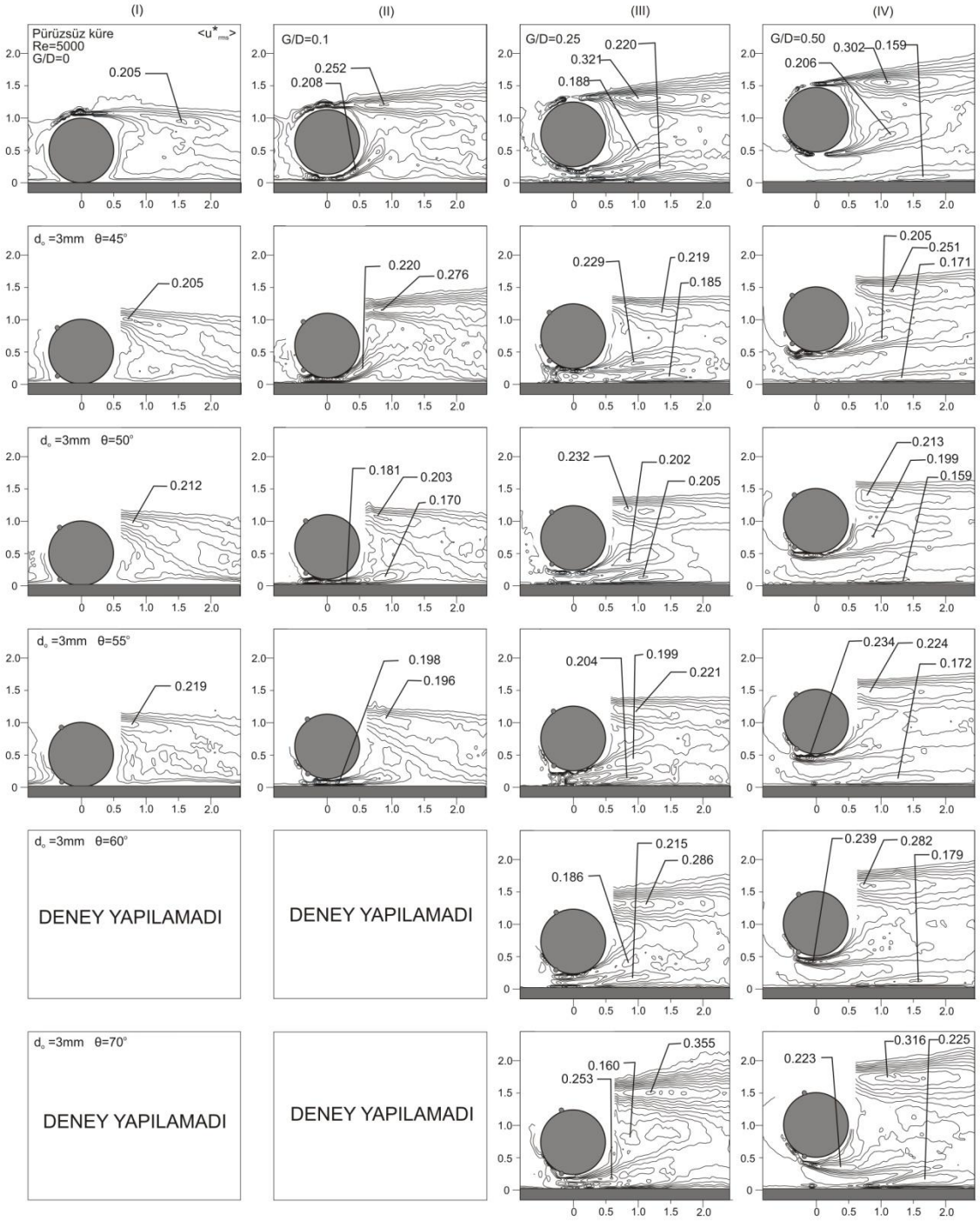
Şekil 4.36. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış akım çizgileri<ψ>'nin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



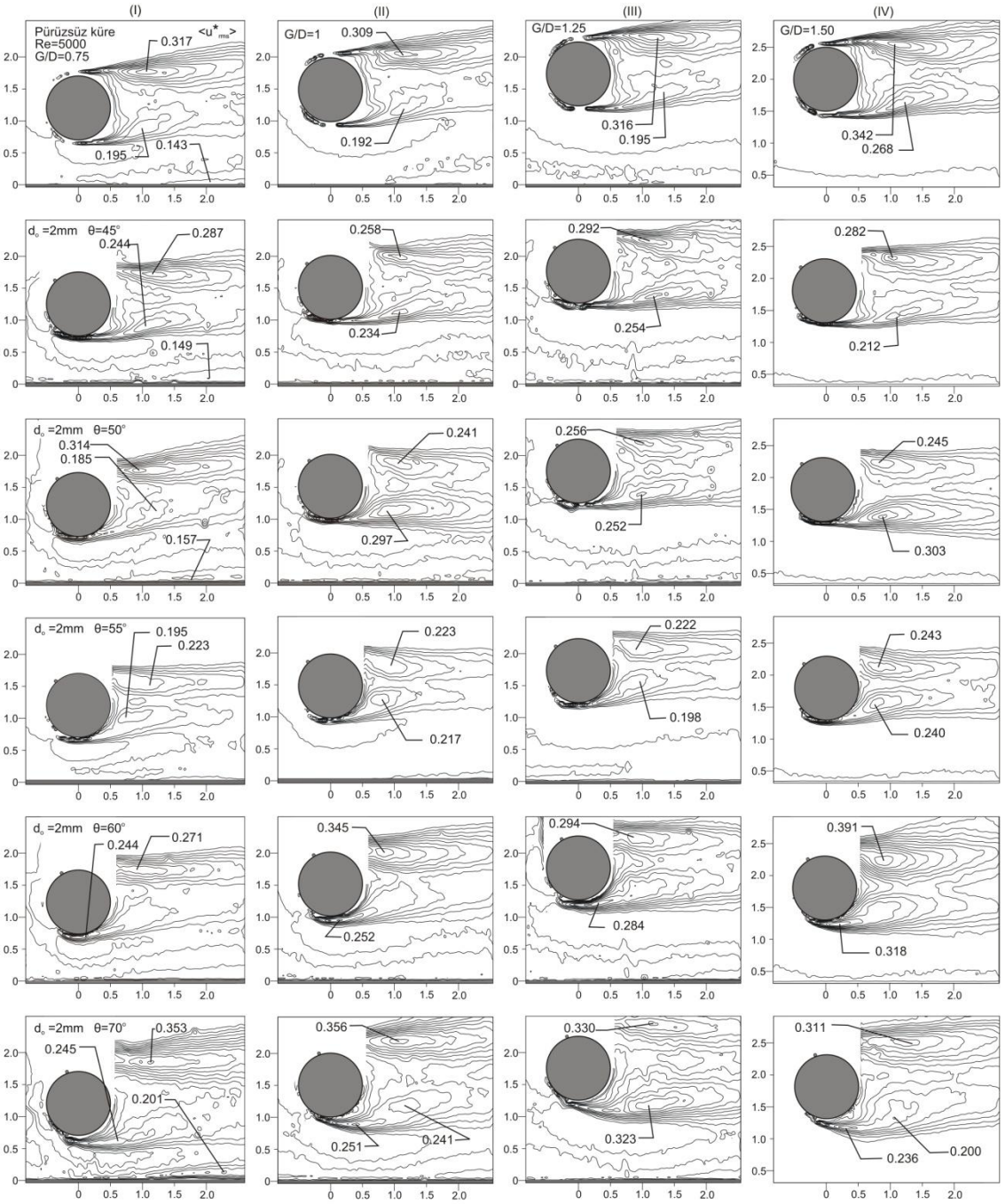
Şekil 4.37. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının zaman ortalaması alınmış akım çizgilerinin <ψ>pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^{o}, 50^{o},55^{o}, 60^{o} ve70^{o}' ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle plaka arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



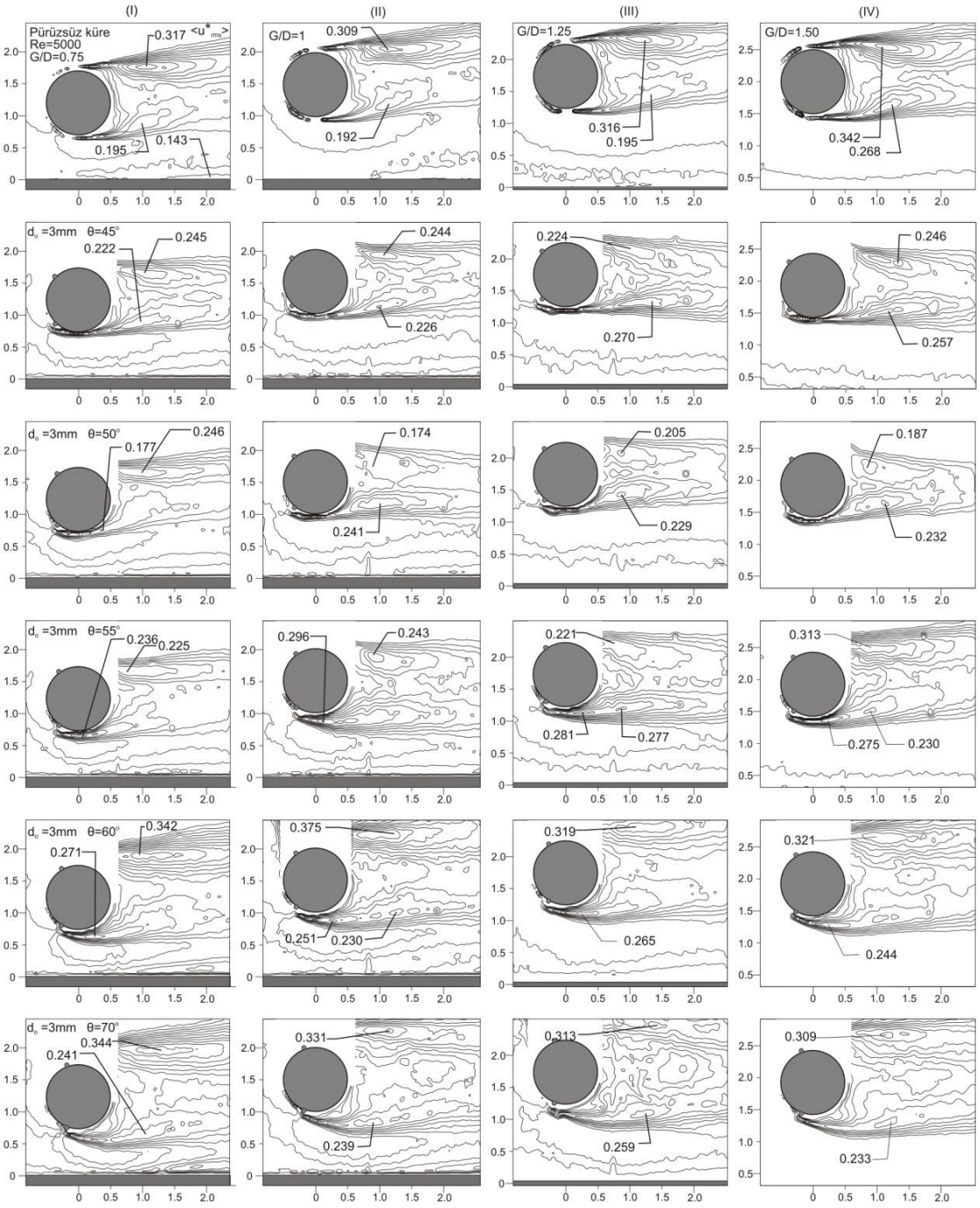
Şekil 4.38. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının<u*$_{rms}$> pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^{o} , 50^{o},55^{o}, 60^{o} ve 70^{o}'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left|<u^{*}_{rms}>\right|_{min}$=0.075 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left|<\Delta u^{*}_{rms}>\right|_{min}$=0.025'tir.



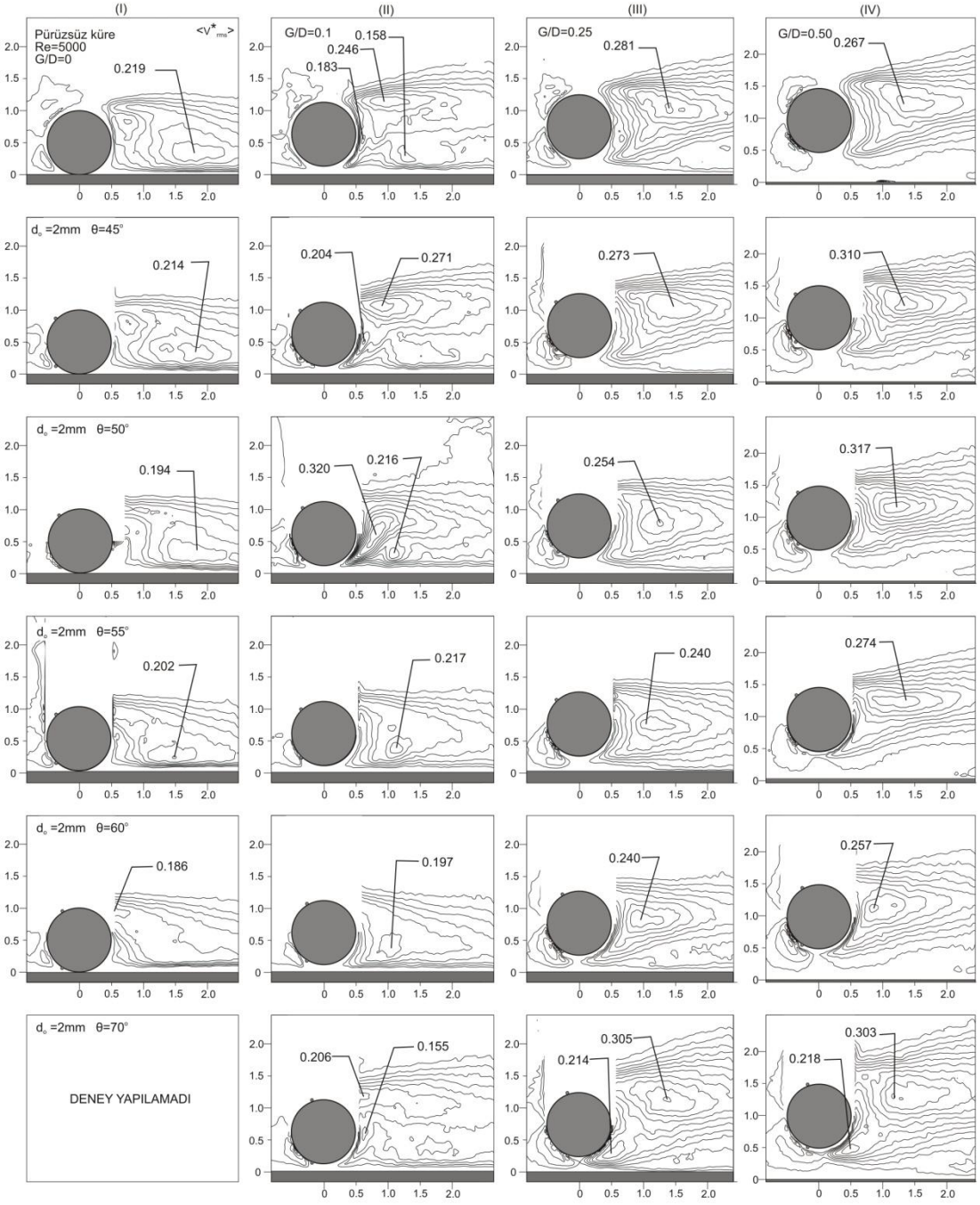
Şekil 4.39. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $< u^*_{rms} >$ pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o' ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| <u^*_{rms}> \right|_{min}=0.075$ vearasındaki artım $\left| <\Delta u^*_{rms}> \right|_{min}=0.025$'tir.



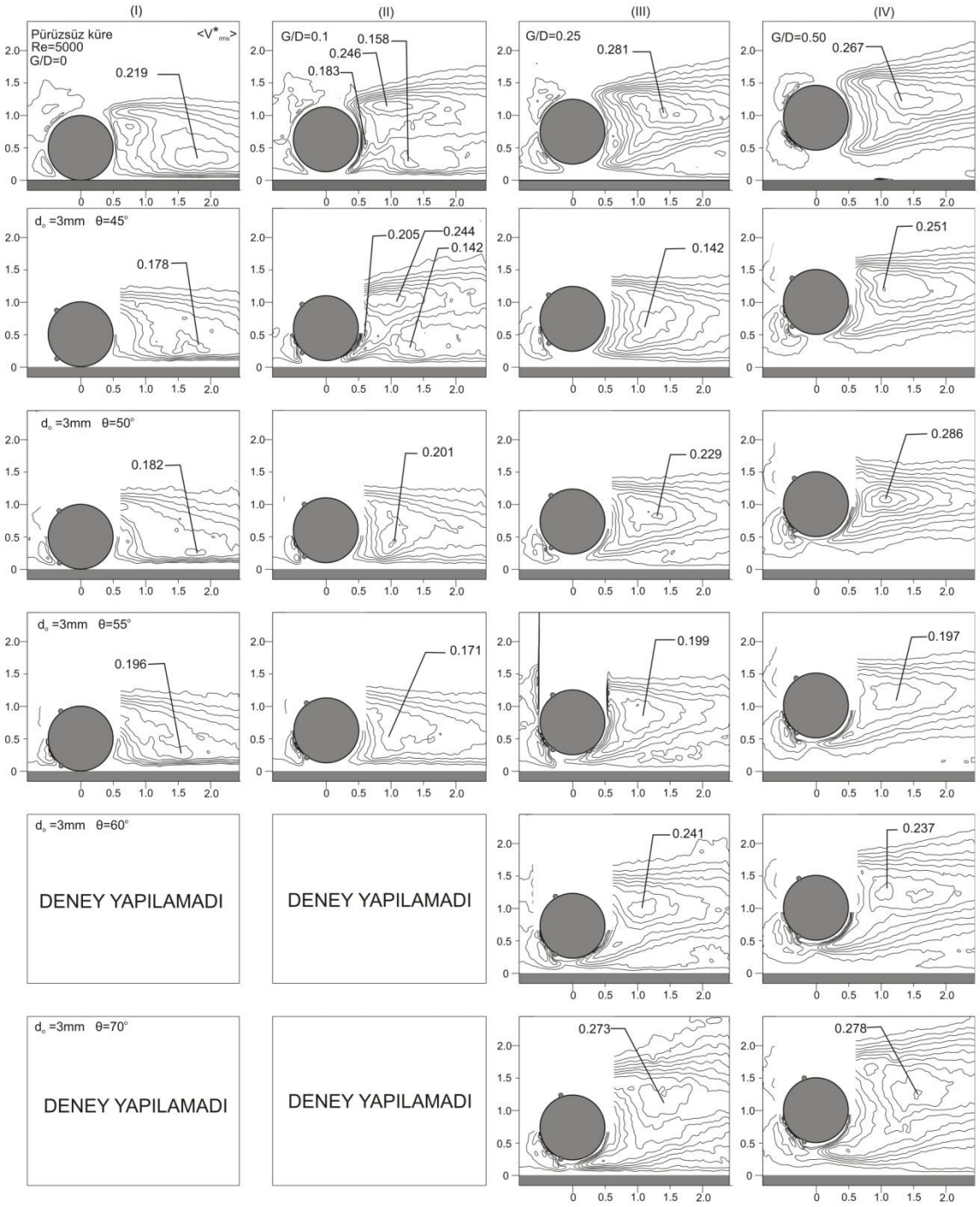
Şekil 4.40. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $< u^*_{rms} >$ pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75 ≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| <u^*_{rms}> \right|_{min}$=0.075 vearasındaki artım $\left| <\Delta u^*_{rms}> \right|_{min}$=0.025'tir.



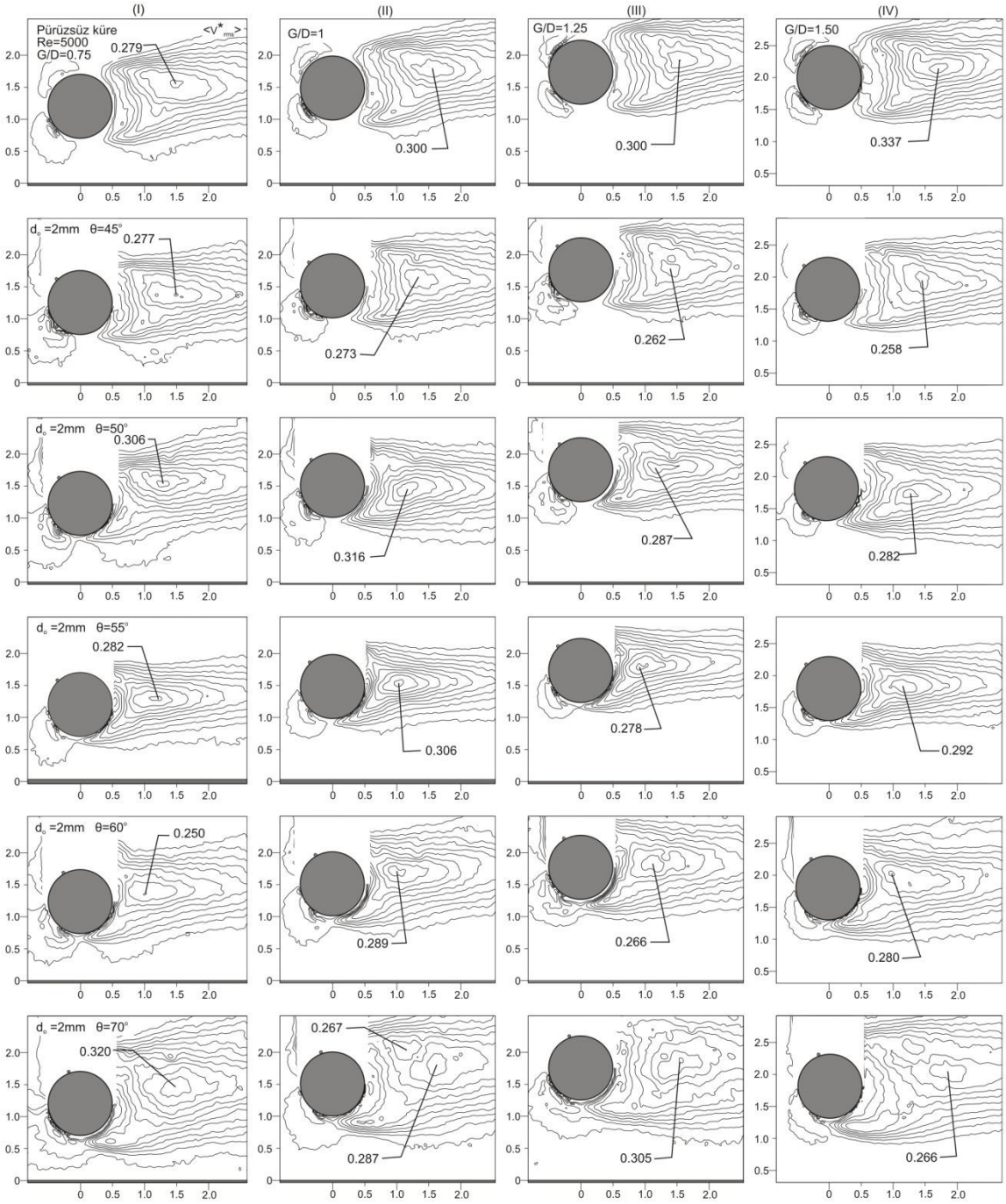
Şekil 4.41.Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $< u^*_{rms} >$ pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75 ≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| <u^*_{rms}> \right|_{min}$=0.075 ve arasındaki artım $\left| <\Delta u^*_{rms}> \right|_{min}$=0.025'tir.



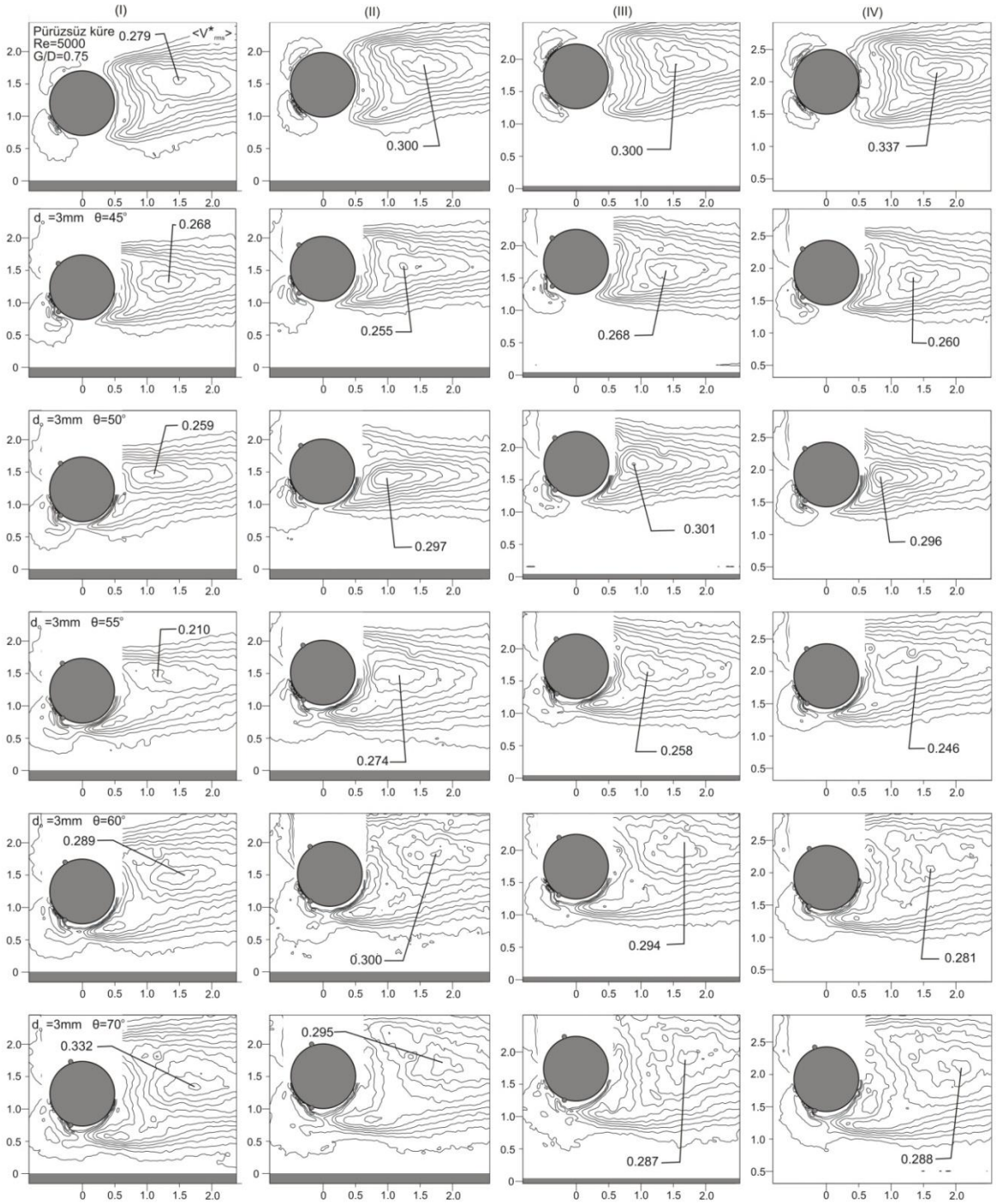
Şekil 4.42. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik hız çalkantılarının $< v^*_{rms} >$pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o ve 70^o'ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle plaka arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $|<v^*_{rms}>|_{min}$=0.075 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<\Delta v^*_{rms}>|_{min}$=0.025'tir.



Şekil 4.43. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik hız çalkantılarının $\langle v^*_{rms} \rangle$ pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o, 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ vearasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$'tir.



Şekil 4.44. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik hız çalkantıları $\langle v^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o,55^o, 60^o, 70^o" ye 2 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ ve arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$' tir.



Şekil 4.45. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik hız çalkantıları $< v^*_{rms} >$ eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve küre üzerine 45^o, 50^o, 55^o, 60^o ve 70^o'ye 3 mm çapında o-ring yerleştirilmiş küreyle plaka arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| <v^*_{rms}> \right|_{min}=0.050$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| <\Delta v^*_{rms}> \right|_{min}=0.025$'tir.

4.3. Pürüzsüz ve Delikli Kürelerin Sınır Tabaka ile Etkileşiminin Boya, Anlık ve Ortalaması Alınmış PIV SonuçlularıylaKarşılaştırılması

Pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.1, 0.15, 0.20, 0.25 oranlarında delik açılmış kürelerin sınır tabaka ile etkileşimi sonucu oluşan akış yapısı bu bölümde incelenmiştir. Farklı delik çaplarından gerçekleşen jet akışın küre-sınır tabaka akışı etkileşimi sonucu oluşan akış yapısına etkisi, boya ile akış görselleştirme sonuçları, anlık girdap ω*, ortalama vektör alanı <V>, ortalama akım çizgisi <ψ>, ortalama girdap< ω*>, akım yönündeki ortalama hız <u*>, akıma dik yöndeki ortalama hız <v*>, akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^*_{rms}>$, akıma dik yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<v^*_{rms}>$, ortalama Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) gibi akış karakteristikleri ile incelenmiştir.

Boya deney sonuçları ve anlık girdap eş düzey eğrileri küre ile levha arasındaki açıklık oranına ve küre deliklerinin çapına bağlı olarak art izinin anlık yapısı hakkında bilgi vermektedir. Açıklık oranı G/D=0 olduğunda iki boyutlu görüntü düzleminde küre üst kısmından ayrılan akış saat yönünde dönen girdap yapıları oluşturmakta ve bu girdaplar aşağı akım yönünde ilerlerken şiddetleri azalmaktadır (Şekil 4.46). Delikli küre durumlarında ise küre deliğinden art izine boşalan (enjekte olan) akış küre art izi bölgesinde jet çıkışında belirli bir mesafe boyunca pozitif ve negatif değerde girdap yapıları oluşturmuştur. Küre delik çapı arttıkça jet çıkışında oluşan girdapların şiddeti ve art izine karışım uzunluğu artarken küre üst kayma tabakasındaki ayrılmış akışın oluşturduğu girdap şiddetleri azalmıştır (Şekil 4.47).

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.1 olduğunda küre ile levha arasından gerçekleşen jet akış küre deliğinden gerçekleşen jet akışın art izinde aşağı akım yönünde ilerlediği mesafeyi küçültmüştür. Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda küre ile levha arsındaki jet akışın yapısı değiştiğinden delik içinden gerçekleşen jet akışla etkileşimi ortadan kalkmış ve küre deliğinden gerçekleşen jet akışın küre art izi bölgesindeki karışım uzunluğu artmıştır. G/D=0.50 açıklık oranında boya deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.46) delik çapı arttıkça küre art izinin simetrik bir yapıya ulaştığı görülürken küre üst ve alt kayma tabakasındaki girdap şiddetleri eşit olmaya başlamaktadır.

Küre ile levha arasındaki jet akışın hiç oluşmadığı ve sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilinden kısmen uzaklaşıldığı G/D=1.5 açıklık oranında delik çap oranları d/D=0.20 ve 0.25'te küre üst kayma tabakasındaki ve alt kayma

tabakasındaki ayrılmış akışın aşağı akım yönünde etkileşimleri azalmıştır (Şekil 4.46) Bu durum KGC oluşmasını engellemektedir. Küre yüzeyindeki deliklerden akışı bozmadan enjekte edilen boya küre art izinde ayrılma tabakaları boyunca ilerlemektedir. Kullanılan boyanın akışkan içerisinde difüzyon özelliği çok azdır, görselleştirme yapılan süre içerisinde boya küre üst kayma tabakasındaki türbülanslı ayrılmış akış bölgesiyle serbest akımdaki türbülanssız bölge arasındaki sınır bölgesini geçmemektedir. Başka bir ifadeyle boya sadece akışkan hareketiyle taşınmaktadır. Bu durumda küre yüzeyinden enjekte edilen boyanın küre art izi bölgesi içine taşınması art izindeki düşük basınçtan kaynaklanmaktadır. Küre deliğinden gerçekleşen jet akış ise boya ile görselleştirilmediğinden art izi içinde siyah renksiz bir bölge oluşturmaktadır. Delik çapı arttıkça bu renksiz bölgenin art izi içinde kapladığı alan artmaktadır, bu da art izi içindeki geri akışın azaldığının bir göstergesidir. Kayma tabakalarında kürenin deliğinden çıkan akışın oluşturduğu art izi yapısı değişmiş ve akış yapısında küçük ölçekli bir adet girdap çifti oluşmuştur. Bu da art izi bölgesinin simetrik olmayan yapısında simetrikliğe doğru düzelmesine etki yapmaktadır.

Ortalama vektör alanlarının delik çapına göre değişimi Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de sunulmuştur. Serbest akım bölgesine göre açık renkte görülen küre art izi bölgelerindeki, delik içinden art izine boşalan jet akışın oluşturduğu hız vektörleri koyu bir bölge oluşturmuştur. Bunun nedeni durgun veya geri akışların olduğu art izi bölgesinin jet akışla birlikte ivmelenip hareketlenmesidir. Delik çapının artırılması ile birlikte art izindeki hareketlilik artarken jet akışın art izi bölgesindeki etkinlik uzunluğu da artmıştır. Bu durum jet akış bölgesindeki vektör uzunluklarından anlaşılabilmektedir. Bütün küreler aynı hızdaki akış şartlarına maruz kalmalarına rağmen delik çapının artması ile birlikte jetin art izi bölgesinde daha uzun mesafelere bozulmadan etkimesinin iki temel nedeni vardır. Birinci olarak delik çapı büyüdükçe delik içindeki akışkanın maruz kaldığı viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine oranı azalmaktadır. Bu nedenle kürenin ön kısmından delik içine akışkanın girmesi kolaylaşmakta ve delik çıkışında akışkanın hızı daha büyük olmaktadır. İkinci neden ise, artan delik çapı ile delik içerisinden daha yüksek debilerde akışkan geçmekte ve küre art izi bölgesindeki durgun ya da geri akışla etkileşen jet daha büyük bir çapa sahip olduğu için viskoz kuvvetlerin etkisinde bozulmadan daha uzun yol alabilmektedir. Şekil 4.10.da (Sütun I) verilen akım yönündeki ortalama hız <u*> eş düzey eğrileri bu durumu kanıtlar niteliktedir. Akım yönündeki ortalama hız <u*> eş düzey eğrilerinde küre deliğinden geçen jet akışın oluşturduğu en yüksek değerler d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 için

sırasıyla 0.43, 0.72, 0.83 ve 0.95'tir. Görüldüğü gibi artan delik çapı ile delik çıkışında jetin merkezindeki hızın tepe değeri artmıştır. Ortalama vektör alanlarından (Şekil 4.49) görüldüğü gibi G/D=0 açıklık oranında delikten art izine boşalan jet akış y ekseni doğrultusunda yukarı yönde yönelmiştir (d/D=0.10 ve 0.15 için). Ancak, artan delik çapı ile birlikte bu yönelim azalmıştır. d/D=0.20 ve 0.25 oranında deliğe sahip kürelerdeki jet akışta bu yönelim gerçekleşmemiştir. Bu durumun nedeni Şekil 4.51'de sunulan ortalama akım çizgisi <ψ> yapılarından anlaşılabilir. Levha üzerine konulan küre levha üzerinde gerçekleşen sınır tabaka akışına engel olmaktadır. Küreye çarpan akış küre etrafından ayrılmakta ve bir miktar sonra levha yüzeyine Coando etkisi ile tekrar birleşmektedir. Küre art izi bölgesindeki düşük basıncın etkisi ile de levha yüzeyine birleşen akışın bir kısmı art izi bölgesine yönelip dönümlü bir akış bölgesi oluşturmaktadır. (Özgören ve ark. 2013) Oluşan dönümlü akışın oluşturduğu odak noktası pürüzsüz kürede F_1 ile gösterilmiştir (Şekil 4.51**)** Pürüzsüz kürenin hemen sırt kısmındaki vektörlerin (Şekil 4.50) ve akım çizgilerinin (Şekil 4.51) yönelimi y ekseni doğrultusunda yukarı yöndedir. Bu bölgedeki akış tepe değeri serbest akım hızının %20'si olan pozitif işaretli akım yönüne dik yönde <v*> hız büyüklükleri oluşturmuştur (Şekil 4.57, Sütun I). Şekil 4. 51'de delik çapı oranı d/D=0.10 olan kürenin ortalama akım çizgilerine bakıldığında delikten gelen jet akışın art izi bölgesindeki dönümlü akışın kürenin hemen sırt kısmındaki bölümü ile (y ekseni doğrultusunda yukarı yönde) etkileşime geçtiği görülmektedir. Etkileşim sonucunda jet akış da yukarı yönde yönelmiş ve dönümlü akışla birlikte dairesel bir hareket yapmıştır. Başka bir ifadeyle küre art izinde odak noktası F_1 ile gösterilen dönümlü akış jet akışı yukarı yönde itmiş ve sonrasında iki akış yapısı beraber hareket ederek birleşmiştir. Delik çapı oranı d/D=0.15'e artırıldığında da aynı durum gerçekleşmiştir. Ancak, jet akışın, artan hızı ve çapı ile birlikte, yukarı yöne olan yönelimi azalmıştır. Art izi bölgesinde oluşan dönümlü akış bölgesinin odak noktası F_1'in konumu da (y ekseni doğrultusunda) aşağıya kaymıştır. Delik çapı oranı d/D=0.20'ye artırıldığında jet akışın kazandığı momentum değeri, art izindeki akış ayrılmasından kaynaklı dönümlü akış bölgesini değiştirecek kadar artmıştır. Kürenin üst kısmından ayrılan akışın bir kısmı R_1 ile gösterilen noktada levha yüzeyine birleşirken, bir kısmı da kürenin sırt kısmına yakın bir yerde odak noktası F_2 ile gösterilen ikinci bir dönümlü akış bölgesi oluşturmuştur. Başka bir ifadeyle jet akış üst kayma tabakasından ayrılan akışı ikiye bölmüş ve yönelimini değiştirmiştir. Delik çapı d/D=0.25 oranına yükseldiğinde F_2 odak noktalı dönümlü akış bölgesinin büyüklüğü artmıştır. Art izi bölgesinin uzunluğunda (küre merkezi ile akışın

levhaya birleşme noktası olan R_1'in arasındaki x ekseni üzerindeki uzunluğu) delikten geçen jet akışın etkisi ile bir değişim olmamıştır. Ancak, delik çapının d/D=0.25 oranında art izi bölgesinin yüksekliği azalmıştır. Akım yönündeki ortalama hız bileşeni <u*>, eş düzey eğrilerinin (Şekil 4.55, Sütun I) negatif değerleri (negatif eş düzey eğrileri üzerinde okunan en yüksek tepe değerleri) incelendiğinde jet akış art izi bölgesi içindeki geri akış şiddetlerinde bir azalma meydana getirmemiştir. Ancak,<u*> eş düzey eğrilerinin kesik çizgilerle gösterilen kısmı incelendiğinde negatif hız bölgesinin küre art izi bölgesinde artan delik çapı ile birlikte daha az bir alan kapladığı görülmektedir. Şekil 4.53'teki (Sütun I) ortalama girdap< ω*>eş düzey eğrilerinde kürenin levhaya temas halindeki durumu içinyukarda bahsedilen akış ayrılmalarının neden olduğu girdap yapılarının ortalama değerleri verilmiştir. P ile gösterilen girdaplar küre üst bölgesinden gerçekleşen akış ayrılmasının, a ve b ile gösterilen girdaplar ise küre deliğinden art izine boşalan jet akışın neden olduğu bir birine zıt işaretli girdaplardır. Şekil 4.49'da anlık girdap eş düzey eğrilerindeki art izi bölgesini tamamen kaplayan pozitif ve negatif değerdeki küçük ölçekli girdaplar bir birlerini sönümlemişler geriye sadece kayma tabakalarında meydana gelen büyük ölçekli girdap yapıları kalmıştır. Delik çapı arttıkça a ve b ile gösterilen girdapların art izi bölgesinde kapladığı alan ve şiddetleri artmıştır.

Açıklık oranı G/D=0.1 olduğunda pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısı daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Küre deliğinden gerçekleşen jet akışın etkisini anlamak için pürüzsüz küre etrafında meydana gelen akış yapısı hakkında kısaca bilgi vermek faydalı olacaktır. Çünkü, bu açıklık miktarı Re=5000 değerinde küre etrafında meydana gelen akışta en dikkate değer akış yapılarının meydana geldiği durumdur. Ortalama vektör alanlarında (Şekil 4.50, Sütun II) kürenin hemen arka kısmında y ekseni doğrultusunda yukarı yönde yönelmiş hız vektörleri görülmektedir. Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız <v*> eş düzey eğrilerinden okunan tepe değerlere göre bu vektörlerin en yüksek<v*> hızı bileşeni büyüklüğü serbest akım hızının %48'i kadardır. Ortalama akım çizgileri (Şekil 4.51, Sütun II) yapılarına bakıldığında küre ile levha arasından gelen jet akış küre üst kayma tabakasındaki ayrılmış akış bölgesi ile etkileşime geçmektedir. Bu sırada kürenin art izi bölgesinde yönü dışarıya doğru olan kararsız bir dönümlü akış bölgesi oluşmuştur ve odak noktası F_1 ile gösterilmiştir. Ortalama vektörlerden (Şekil 4.50, Sütun II) görülmektedir ki, küre deliğinden gelen jet akış, küre ile levha arasındaki boşlukta oluşan ve üst ayrılma tabakasına gelmekte olan jet akışı aşağı akım yönünde itmektedir. Küredeki deliğin çapı arttıkça delikten gelen jet

akışın küre ile levha arasındaki boşluktan gelen jet akışı itme miktarı artmış ve bu durum akış yapısında önemli değişikliklere yol açmıştır. Delik çapının d/D=0.10 olduğu durumda ortalama akım çizgileri delikten boşalan jet akışın hemen üst kısmında küre sırtı ile neredeyse birleşmiş dönümlü bir akış bölgesi oluşturmuştur. Odak noktası F_2 ile gösterilen bu dönümlü akış bölgesinin oluşum nedeni, küre deliğinden gelen jet akışın bir kısmının küre alt kısmı ile levha arasından gelen jet akış tarafından yukarı akım yönünde itilmesidir. Delik çapı d/D=0.15 oranına artırıldığında odak noktası F_2 ile gösterilen dönümlü akış bölgesinin büyüklüğü artmıştır. F_2 odak noktalı dönümlü akış bölgesinin büyüklüğünün artması kürenin üst kısmından ayrılan akışın yapısını etkilemiştir. Küre üst kısmından ayrılan akış odak noktası F_3 ile gösterilen ve F_2 odak noktalı dönümlü akış bölgesinin hemen üzerinde ve ona zıt yönlü, bir dönümlü akış bölgesi oluşturmuştur. Buna ek olarak bu iki dönümlü akış bölgesinin aşağı akım yönünde ve küre ile levha arasından gelen akışın üst kayma tabakasıyla etkileşip aşağı akım yönünde ilerlemeye başladığı yerin yukarı akım yönünde S_2 ile gösterilen bir durma noktası oluşmuştur. Delik çapı d/D=0.20 ve 0.25 oranlarına artırıldığında da aynı akış olayları gerçekleşmiş ancak F_1 odaklı dönümlü akış bölgesi ile F_2 odaklı dönümlü akış bölgelerinin arasından geçen akışta küre içinden gelen jet akışın küre ile levha arasından gelen jet akışa göre baskın olduğu görülmüştür. Akım yönündeki ortalama hız <u*> eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.55, Sütun II) küre ile levha arasından gelen jet akışın ve küre deliğinden gelen jet akışın oluşturduğu tepe değerler sırası ile 0.27 ve 0.90'dır. Küre ile levha arasındaki boşluktan gelen akışın yaklaşık 3.3 katı bir hız tepe değerine sahip olan küre deliğinden gerçekleşen jet akışın, akış yapısı üzerinde daha baskın etkiye sahip olması doğaldır.

Açıklık oranı G/D=0'dan, G/D=0.1'e yükseldiğinde sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilinden dolayı küre daha yüksek hızlara maruz kalır. Küre ekvatoruna açılan deliğin giriş noktasına gelen akış hızı daha fazla olduğunda delikten geçen akışkan debisinin ve hızının artması beklenir. Bu durumda delik çıkışında, art izine boşalmakta olan jet akışın hızı daha yüksek olacaktır. Ancak,<u*> eş düzey eğrileri (Şekil 4.55, Sütun II) incelendiğinde sonucun, (delik çapı oranının d/D=0.20 olduğu durum haricinde) beklenildiği gibi çıkmadığı görülmektedir. Delik çapının d/D=0.10 ve 0.15 olduğu durumlarda <u*> hızlarının tepe değerleri sabit kalmış, delik çapının d/D=0.25 olduğu durumda ise azalmıştır. Buna neden olan etmen kürenin arka kısmındaki akış yapısı, yani art izi bölgesinin yapısıdır. Küre ile levha arasından gelen

jet akış küre art izi bölgesini doldurmuş, belirgin bir art izi yapısının oluşmasına izin vermemiş, dolayısıyla art izi bölgesinde normal şartlardaki gibi bir basınç düşüşü gerçekleşmemiştir. Bunun sonucunda küre deliğinden geçen jet akışın debisi artması gerekirken azalmış ya da sabit kalmıştır. Açıklık oranı G/D=0'dan, G/D=0.1 oranına yükseltildiğinde her bir kürenin arkasındaki <u*> eş düzey eğrilerinin oluşturduğu negatif hız bölgesi ikiye bölünmüş ve şiddetleri azalmıştır. Şekil 4.53'te açıklık oranı G/D=0.1 olduğunda kürenin alt kısmı ile levha arasındaki boşluktan geçen jet akışın neden olduğu pozitif ve negatif girdaplar Q ve R ile gösterilmiştir. Pürüzsüz kürede Q ile gösterilen girdap bölgesi küre üst bölgesindeki ayrılma tabakasına kadar ulaşırken, delikli küre durumlarında, küre deliğinden gelen jet akışın etkisi ile üst ayrılma tabakasına kadar ulaşması engellenmiştir. Küre deliğinden gelen jet akışın neden olduğu negatif girdap bölgesi (b ile gösterilen) küre alt bölgesinden gelen jet akışın oluşturduğu pozitif ve negatif değerdeki (Q ve R ile gösterilen) girdap bölgesi ile etkileşime girmiş ve birleşmiştir.

Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda ortalama vektör alanlarında (Şekil 4.49) vektörlerin yönelimine göre, pürüzsüz küre ve küre ekvatorundaki bütün delik çaplarında küre ile levha arasında oluşan jet akışın art izi bölgesi içine olan yönelimi ortadan kalkmış ve akım yönüne kısmen paralel bir hal almıştır. Zaman ortalaması alınmış vektör alanlarından <V> hesaplanan akım çizgileri <ψ> (Şekil 4.51) kürenin alt ve üst kayma tabakalarındaki akış ayrılmalarının neden olduğu odak noktaları F_1 ve F_2 ile gösterilen dönümlü akış bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Küre ile levha arasındaki jet akış akım yönünde paralel hale gelirken, levhanın üst kısmında ve küre merkezinden 1D ve 1.5D uzaklıkların arasında kalan bölgede ortalama vektör alanları düşük hız bölgesi oluşturmuştur. Bu düşük hızlı vektör alanlarına karşılık gelen akım çizgileri <ψ> (Şekil 4.51) o bölgede dönümlü bir akış alanının oluştuğunu göstermektedir. Levha üzerindeki dönümlü akış bölgesinin odak noktası pürüzsüz küre için F_3, d/D=0.15 delik çapına sahip küre için F_4 ile gösterilmiştir ve uzunluğu 0.5D kadardır. Delik çapı d/D=0.20 ve 0.25'e artırıldığında ise levha üzerinde dönümlü akış bölgesi oluşmamıştır. Küre art izi bölgesinde, küre deliğinden gelen jet akışın neden olduğu odak noktası F_3 ile gösterilen dönümlü bir akış bölgesi oluşmuştur. Bu bölgenin büyüklüğü artan delik çapı ile artmıştır. Pürüzsüz kürede küre etrafından ayrılan akış küre art izi bölgesinin sonunda S_1 ile gösterilen yerde birleşmekte ve bir durma noktası oluşturmaktadır. Delik çapı arttıkça delikten geçen jet akış, durma noktasını üst kayma

tabakasına doğru itmiş ve simetrik olmayan bir yapı oluşturmuştur. Ancak, delik çapı d/D=0.20 ve 0.25 olduğunda jet akış, üst ve alt kayma tabakalarındaki ayrılmış akışların bir biri ile birleşmesini engellemiştir. Art izindeki ölü akış bölgesi azalmış, jet akışın etkisi ile ölü akış bölgesi yerini hareketli bir yapıya bırakmıştır. Zaman ortalaması alınmış akım yönüne paralel hız <u*> eş düşey eğrilerinde, küre art izindeki pozitif değerdeki hız bölgelerinin büyüklüğünün arttığı negatif değerdeki hız bölgelerinin büyüklüğünün ise azaldığı görülmektedir. Açıklık oranı G/D=0.10'dan G/D=0.25'e artırıldığında, küre ile levha arasındaki jet akışın, akım yönüne paralel hız <u*> büyüklükleri artarken akım yönüne dik <v*> hız bileşenlerinin büyüklüğü azalmıştır. P, Q, R, a ve b ile gösterilen ortalama girdap < ω*> yapılarının ise birbiriyle olan etkileşimleri azalmış, a ve b girdaplarının şiddeti artmıştır.

Açıklık oranı G/D=0.50'ye yükseltildiğinde küre art izi akış yapısında belirgin bir değişim olmamıştır. Ancak, küre ile levha arasındaki etkileşimin azalması levha üzerindeki sınır tabaka akışında değişimlerin olmasına neden olmuştur. Levha üzerindeki akış ayrılmaları artık olmamaktadır. Ortalama girdap< ω*> eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.53) R ile gösterilen negatif girdap yapısı artık levha yüzeyine birleşik bir şekilde oluşmaktadır, açıklık oranı G/D=0.75'e çıkıldığında ise tamamen kaybolmuştur (Şekil 4.54).

Ortalama akım çizgileri <ψ>yapılarından (Şekil 4.52) görüldüğü gibi açıklık oranları G/D=0.75 ve G/D=1.0'da küre art izleri düşük açıklık oranlarına göre daha büyüktür. Delik içerisinden art içine boşalan jet akış, art izi uzunluğunu belirgin şekilde değiştirmese de yüksekliğini azaltmıştır.

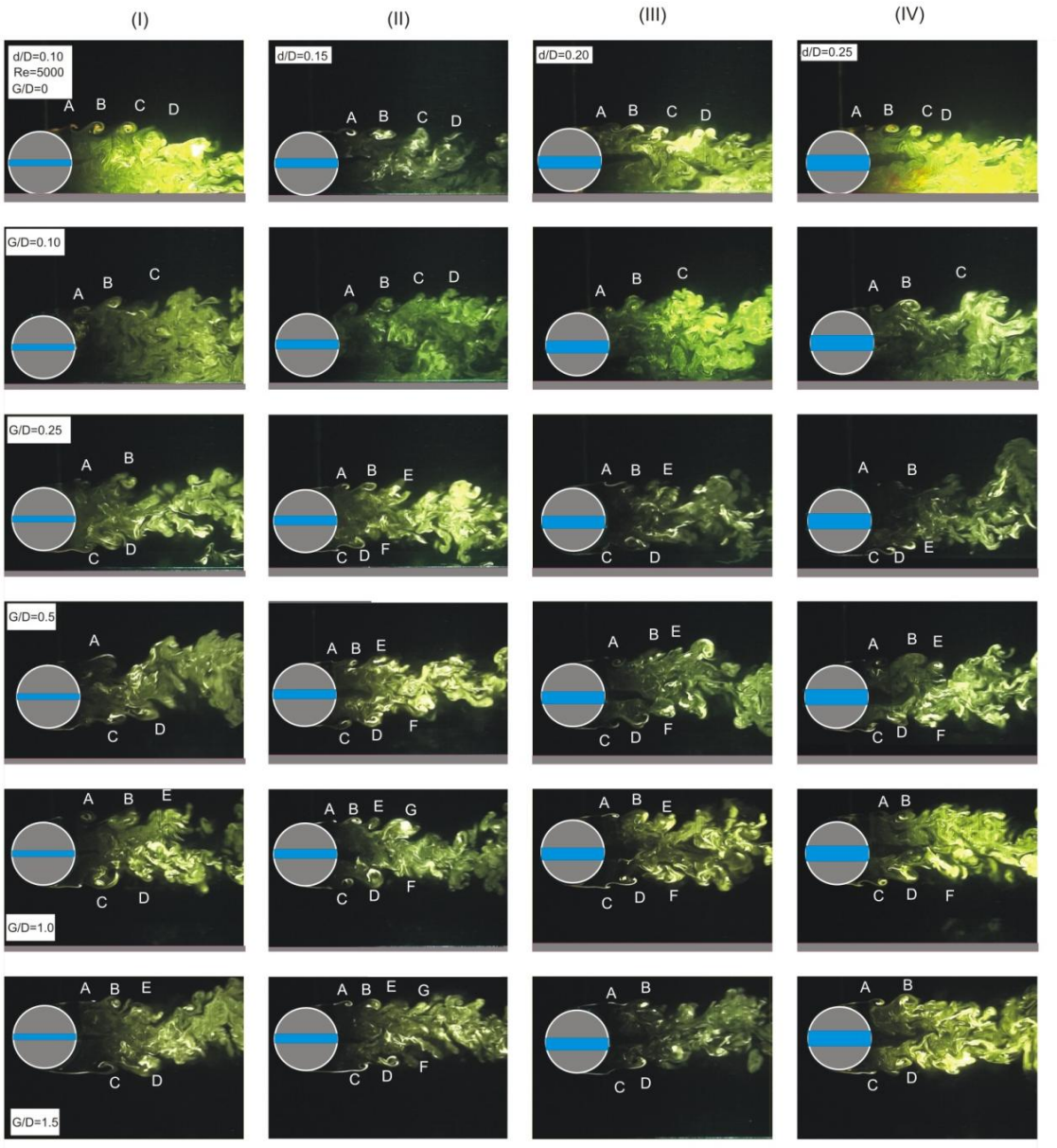
Açıklık oranı G/D=1.25 olduğunda küre deliğinden küre art izine boşalan jet akışın art izi üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Ortalama akım çizgileri <ψ> (Şekil 4.52) yapılarına bakıldığında art izindeki en büyük değişimi d/D=0.20 ve d/D=0.25 oranlarında çapa sahip küre deliklerinden gerçekleşen jet akışlar oluşturmuştur. Büyüyen delik çapı ile birlikte jet akışların art izi bölgesi içinde sönümlenme miktarları azalmış, tam olarak sönümlenmeden art izi içinden serbest akım bölgesine ulaşabilmiştir. d/D=0.25 oranında delik çapına sahip küre etrafındaki akış yapısında (Şekil 4.52, Sütun III) bu durum çok daha belirgindir. Küre deliğinden art izine boşalan jet akış, kürenin üst ve alt kayma tabakalarından gelen ayrılmış akışın art izi bölgesi sonunda birleşmelerine engel olmuş, odak noktaları F_1 ve F_2 olan bir

birinden bağımsız ve etkileşimi olmayan iki adet dönümlü akış bölgesinin oluşmasına neden olmuştur. Bu sırada jet akış küre art izini geçerek serbest akıma karışmıştır.

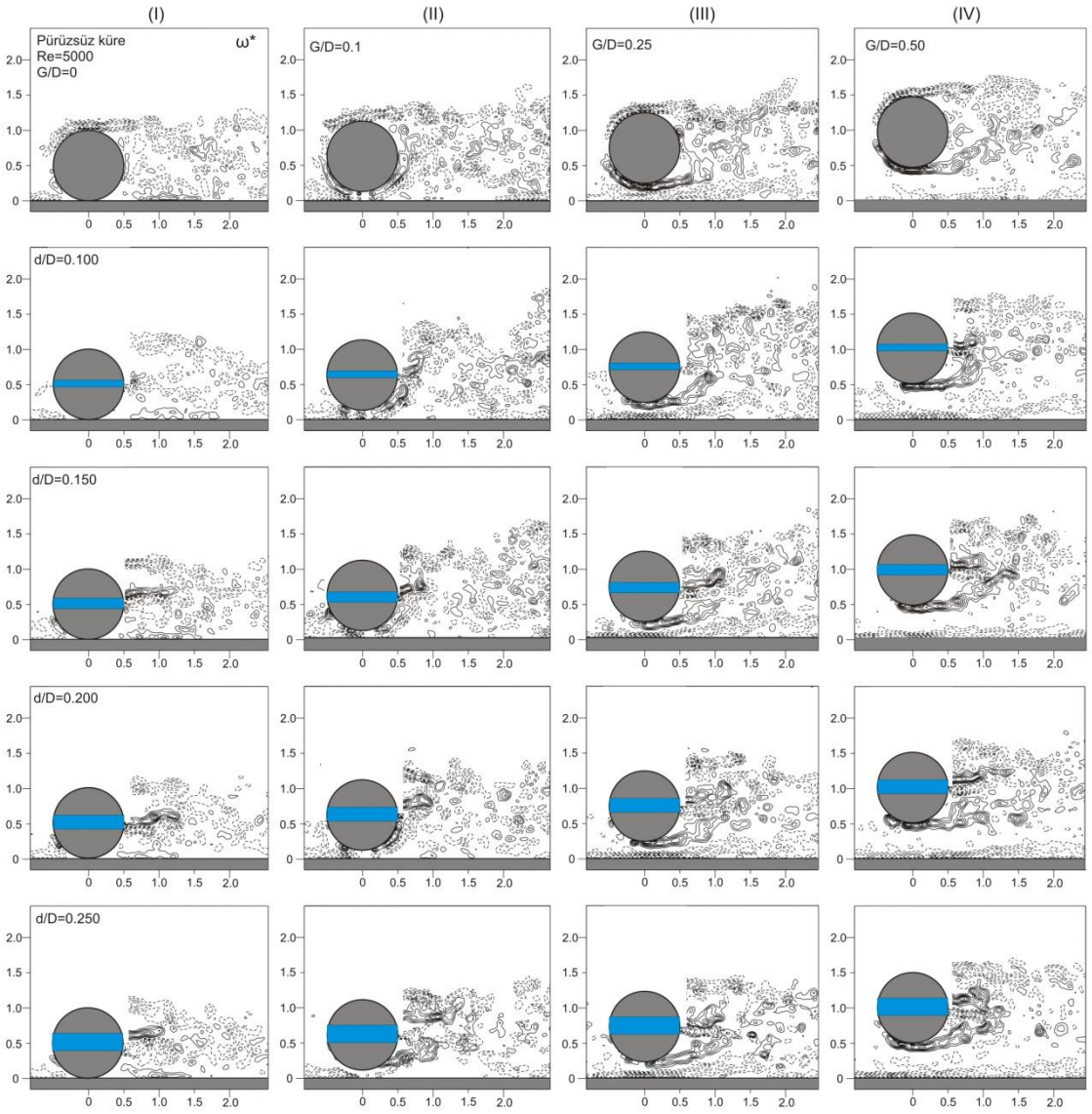
G/D=1.50 açıklık oranı küre ile levha arasındaki açıklık miktarının en fazla olduğu durumdur. Küre etrafındaki akışa sınır tabaka akışının etkisi önemli oranda azalmıştır. Küre ekvatoruna açılan farklı çaplardaki deliklerin küre art izi bölgesine etkisi kısaca şu şekilde açıklanabilir. Delik çapı oranı d/D=0.10 için ortalama vektör alanında <V> (Şekil 4.50) delik çıkışında çok az bir bölgede serbest akım yönünde hız alanı oluşmuştur. Akım yönüne paralel hız <u*> eş düşey eğrilerinde bu hız alanının tepe değeri serbest akım hızının %40'ıdır. Ortalama akım çizgilerinde <ψ> (Şekil 4.52) deliğin hemen çıkışında odak noktası F_3 ile gösterilen küçük bir dönümlü akış bölgesi oluşmuştur. Ortalama girdap< ω*> eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.54) delik çıkışında a ve b ile gösterilen pozitif ve negatif değerde iki adet düşük şiddette girdap bölgesi oluşmuştur. Delik çap oranı d/D=0.15'e artırıldığında delik içerisinden geçen jet akışın oluşturduğu vektörler art izinde daha geniş ve uzun bir alan kaplamıştır (Şekil 4.50). Akım yönündeki ortalama hızları gösteren eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.56) jet akışın merkezindeki en yüksek hız değeri serbest akım hızının %98'ine ulaşmıştır. Bu sırada küre art izindeki negatif hız bölgesi jet akışın etkisiyle ikiye bölünmüş ve şiddeti azalmıştır. Jet akışın art izinde oluşturduğu ortalama akım çizgilerinin yönelimi yukarı kayma tabakasına doğrudur. Yukarı kayma tabakasına yönelen jet akış odak noktası F_3 ile gösterilen dönümlü akış bölgesinin oluşmasına neden olmuştur. Delik çapı oranı d/D=0.20 olduğunda ise jet akışın oluşturduğu ortalama akım çizgileri küre art izi bölgesinde tam olarak sönümlenmeden kısmen serbest akım bölgesine ulaşmıştır. Bu sırada kürenin üst kayma tabakasından gelen ayrılmış akışla alt tabakasından gelen ayrılmış akışın birleşmesi önlenmiştir. Delikten gelen jet akışın akım yönündeki hız bileşenlerinin tepe değeri ise serbest akım hızına ulaşmıştır. Delik çapı d/D=0.25 oranına ulaştığında küre deliğinden gelen jet akış küre art izini iki eşit parçaya bölmüştür. Delik ekseni boyunca küre art izinde serbest akım yönünde hareketli bir bölge oluşurken jet akışla üst kayma bölgesi arasında ve jet akışla alt kayma bölgesi arasında jet akış ekseninde simetrik olan iki adet dönümlü akış bölgesi oluşmuştur. Bu bölgelerin odak noktaları F_1 ve F_2 ile gösterilmiştir. Odak noktaları F_3 ve F_4 ile gösterilen dönümlü akış bölgeleri ise jet akışın art izindeki durgun akış bölgesi ve hareketli kayma tabaları ile etkileşimi sonucu oluşmuştur. Küre art izinde pürüzsüz kürede olduğu gibi küre ekseni hizasında durma noktası oluşmamıştır. Ancak, jet akışla

kayma tabakalarının oluşturduğu dönümlü akış bölgelerinin aşağı akım yönünde S_1 ve S_2 ile gösterilen iki adet durma noktası oluşmuştur.

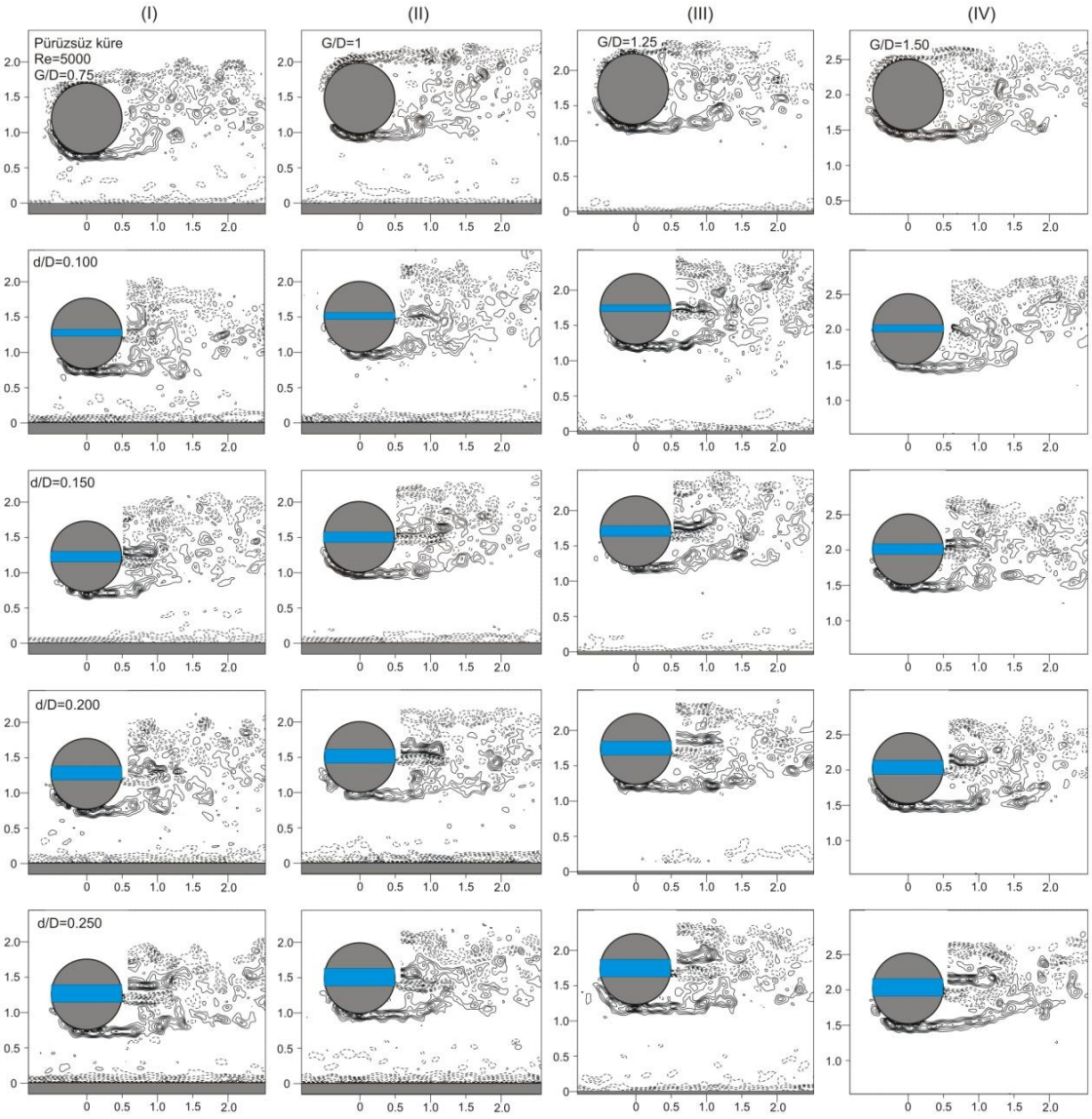
G/D=1.50 açıklık oranında delik çapı arttıkça ortalama girdap eş düzey eğrilerinde (Şekil 4.54) a ve b ile gösterilen girdaplı bölgelerin kapladığı alanın ve şiddetinin arttığı, jet akışın akım yönündeki hızının <u*> arttığı (Şekil 4.56), art izindeki akım yönündeki hız bileşenlerinin <u*> negatif olanların kapladığı alanın ve şiddetinin azaldığı görülmüştür. Küre deliğinden art izine boşalan jet akış kullanılan deliğin çapına bağlı olarak art izi yapısını önemli miktarda değiştirmiştir. Özellikle d/D=0.20 ve 0.25 çapındaki deliklerden geçen jet akışın küre üst kayma tabakasından gelen akışla alt kayma tabasından gelen akışın etkileşimini engellemesi kayda değer bir değişimdir. Çünkü bu iki akış bölgesinin etkileşimi cisim üzerinde dinamik yüklemelere neden olan KGC oluşumunda temel bir nedendir.



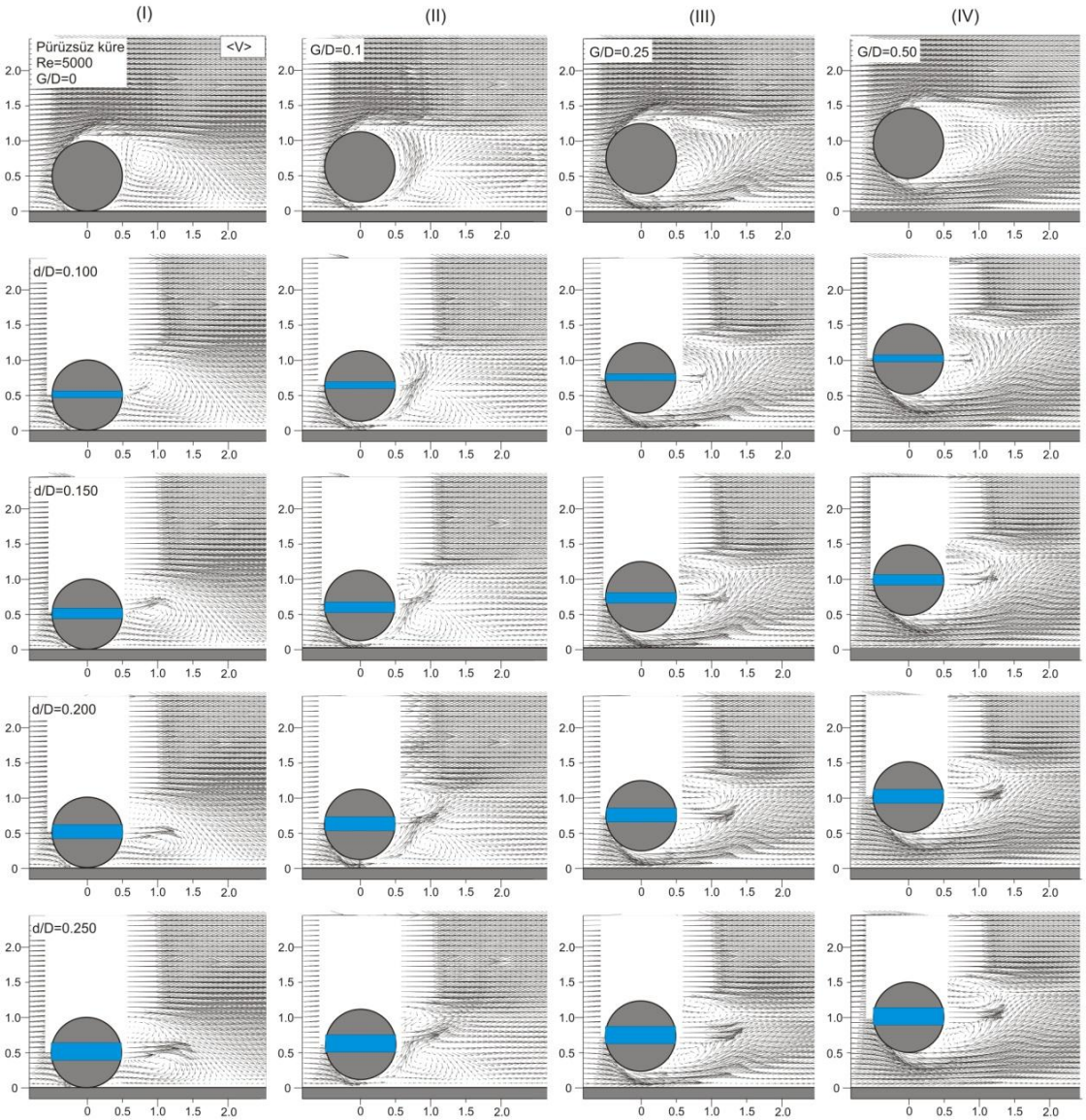
Şekil 4.46. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının boya deneyi sonuçlarının d/D=0.1, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürelerle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤1.50 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



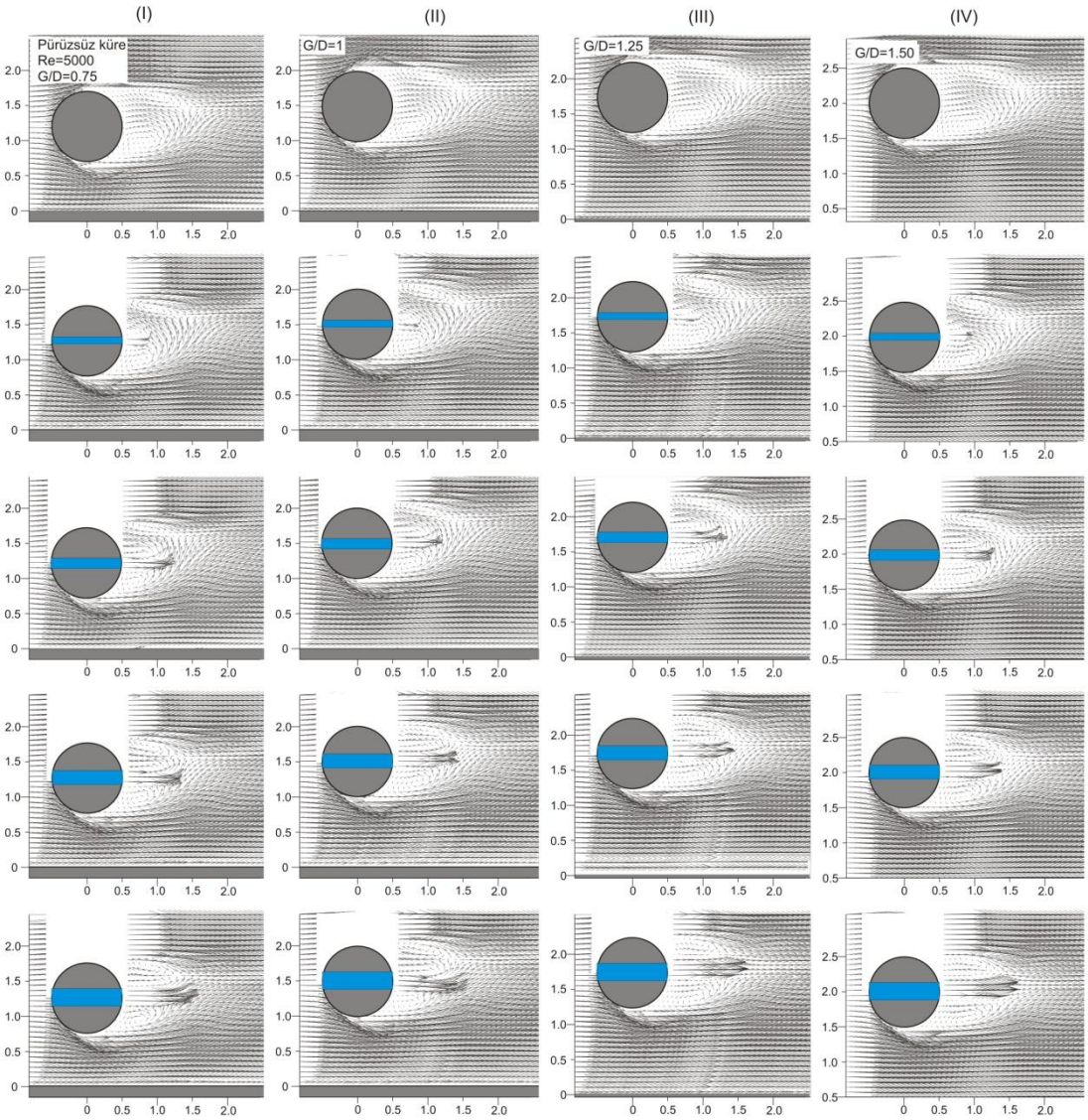
Şekil 4.47. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.1, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\omega^*|_{min} = |\Delta\omega^*|_{min} = 2$'dir .



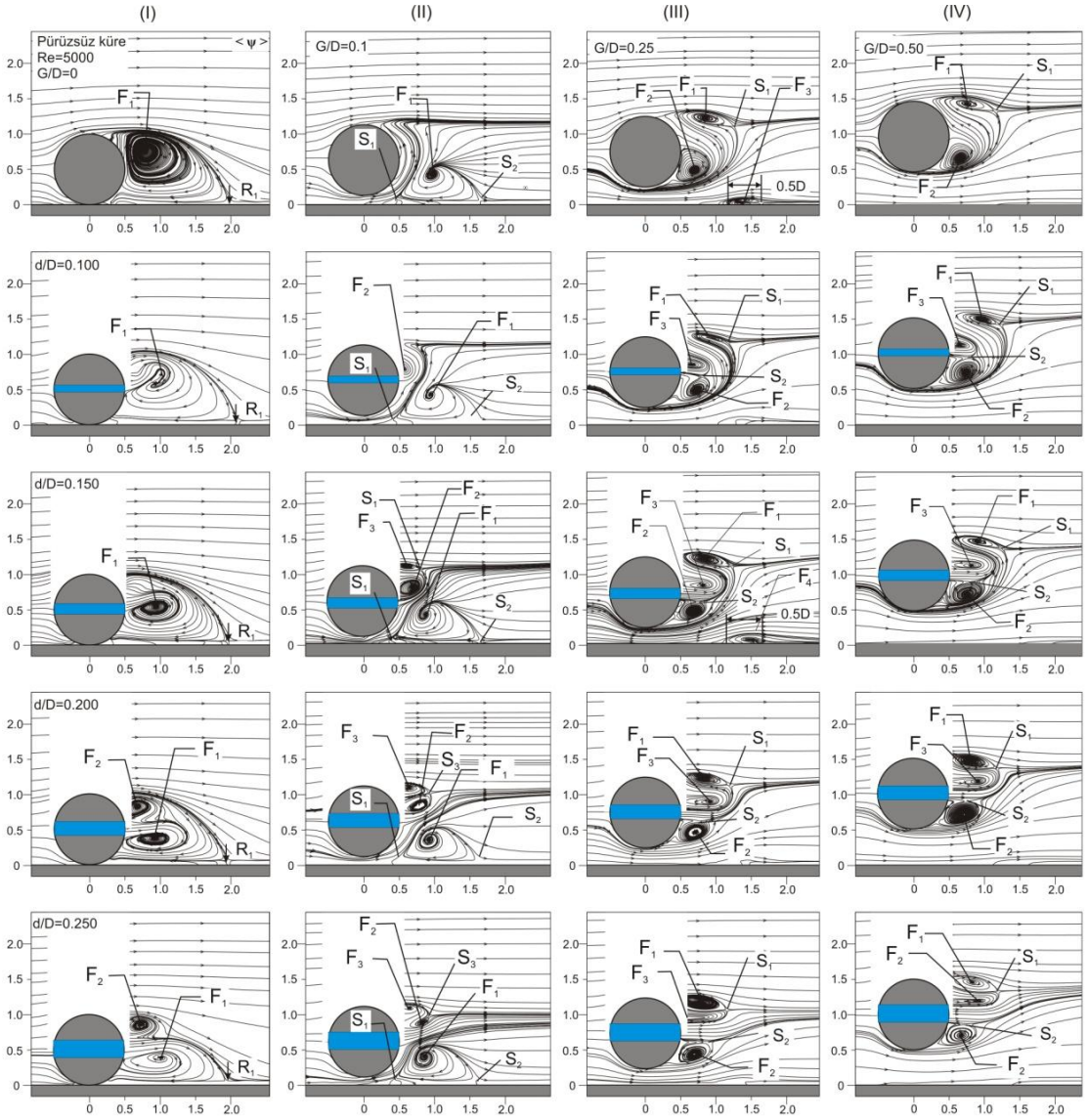
Şekil 4.48. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının anlık girdap ω* eş düzey eğrilerinin pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve arasındaki artım $|\omega^*|_{min} = |\Delta\omega^*|_{min} = 2$'dir .



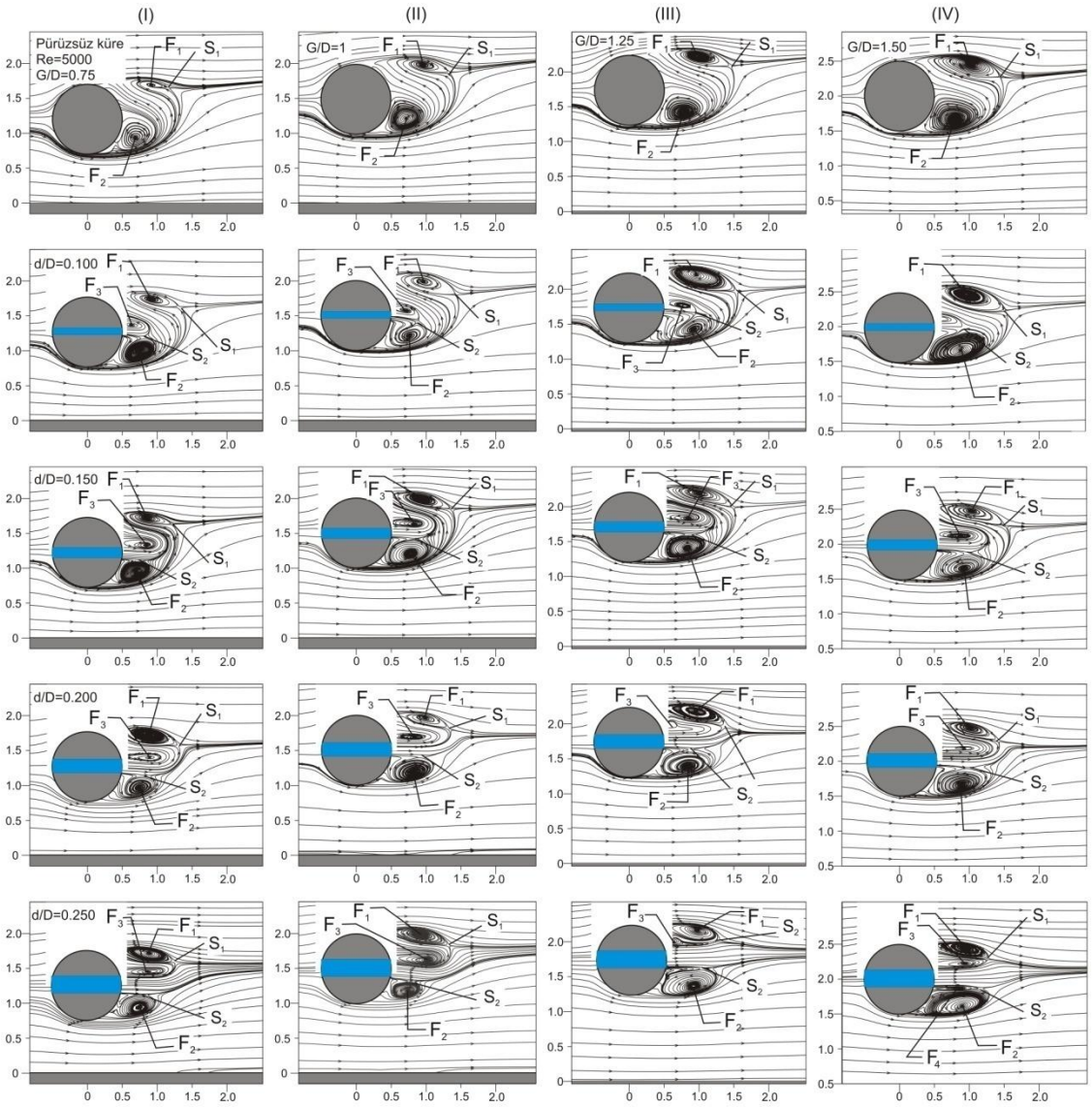
Şekil 4.49. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama vektör alanı <V>' nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması.



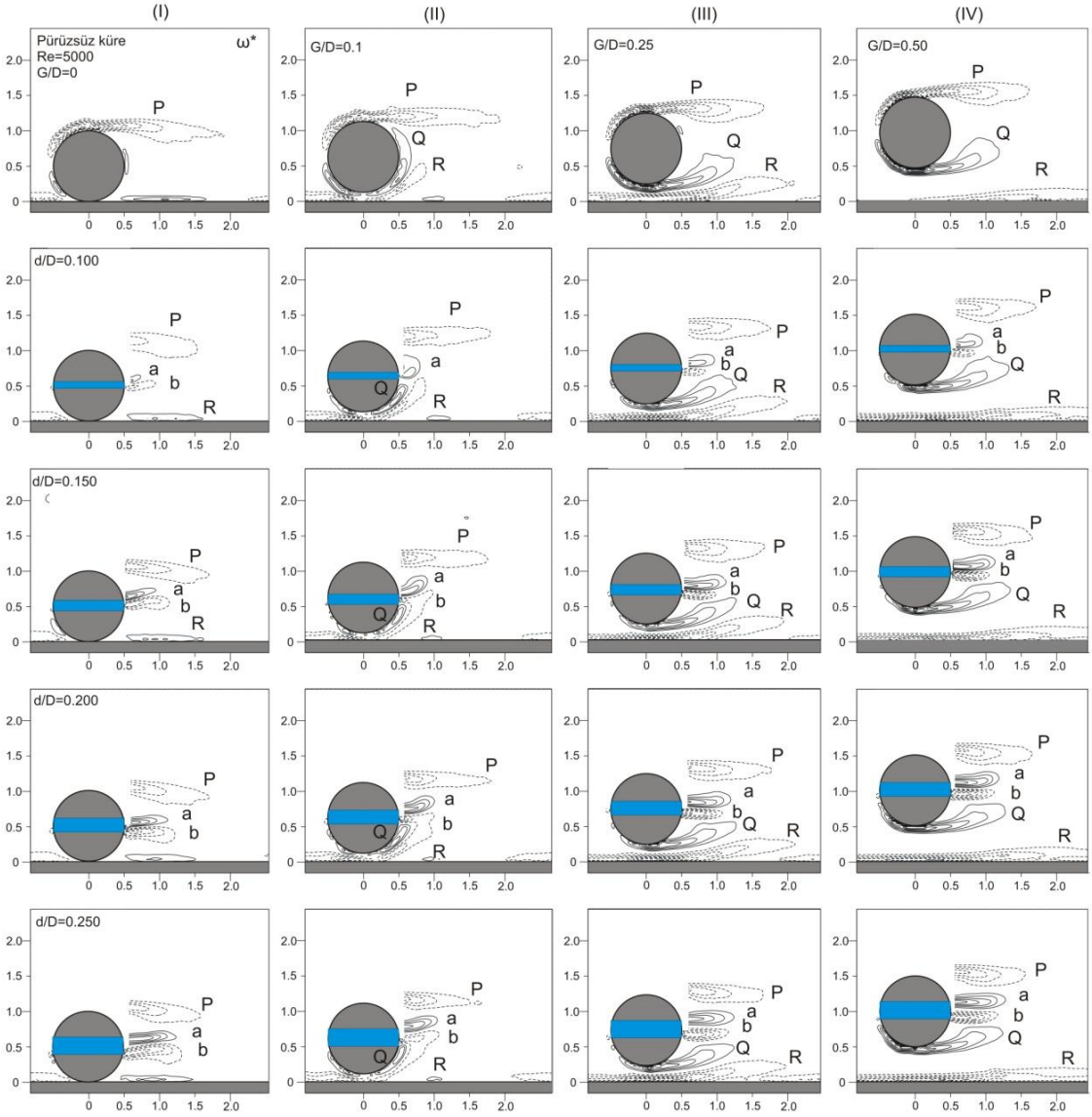
Şekil 4.50. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama vektör alanının <V>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması.



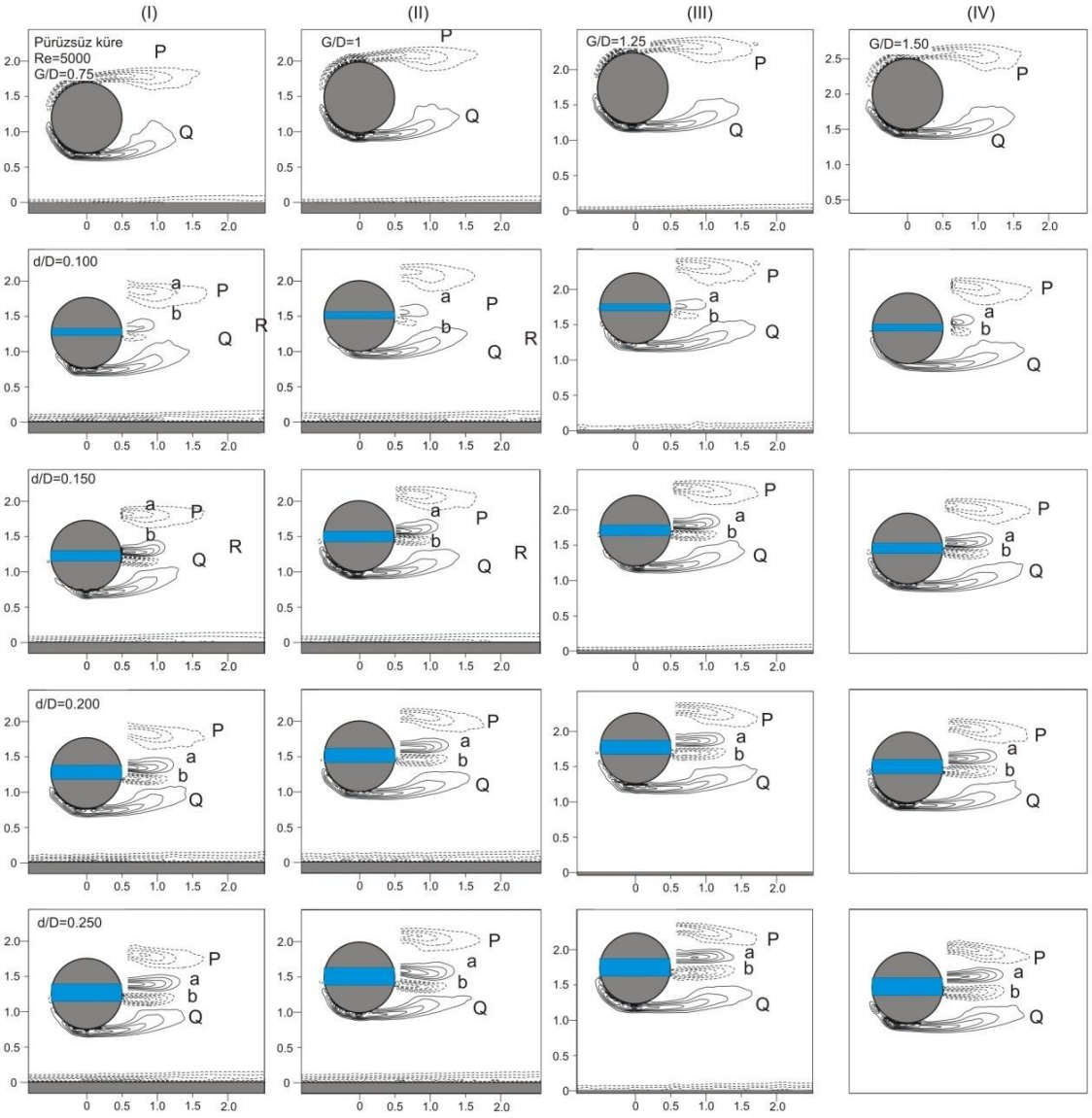
Şekil 4.51. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama akım çizgisinin <ψ>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması.



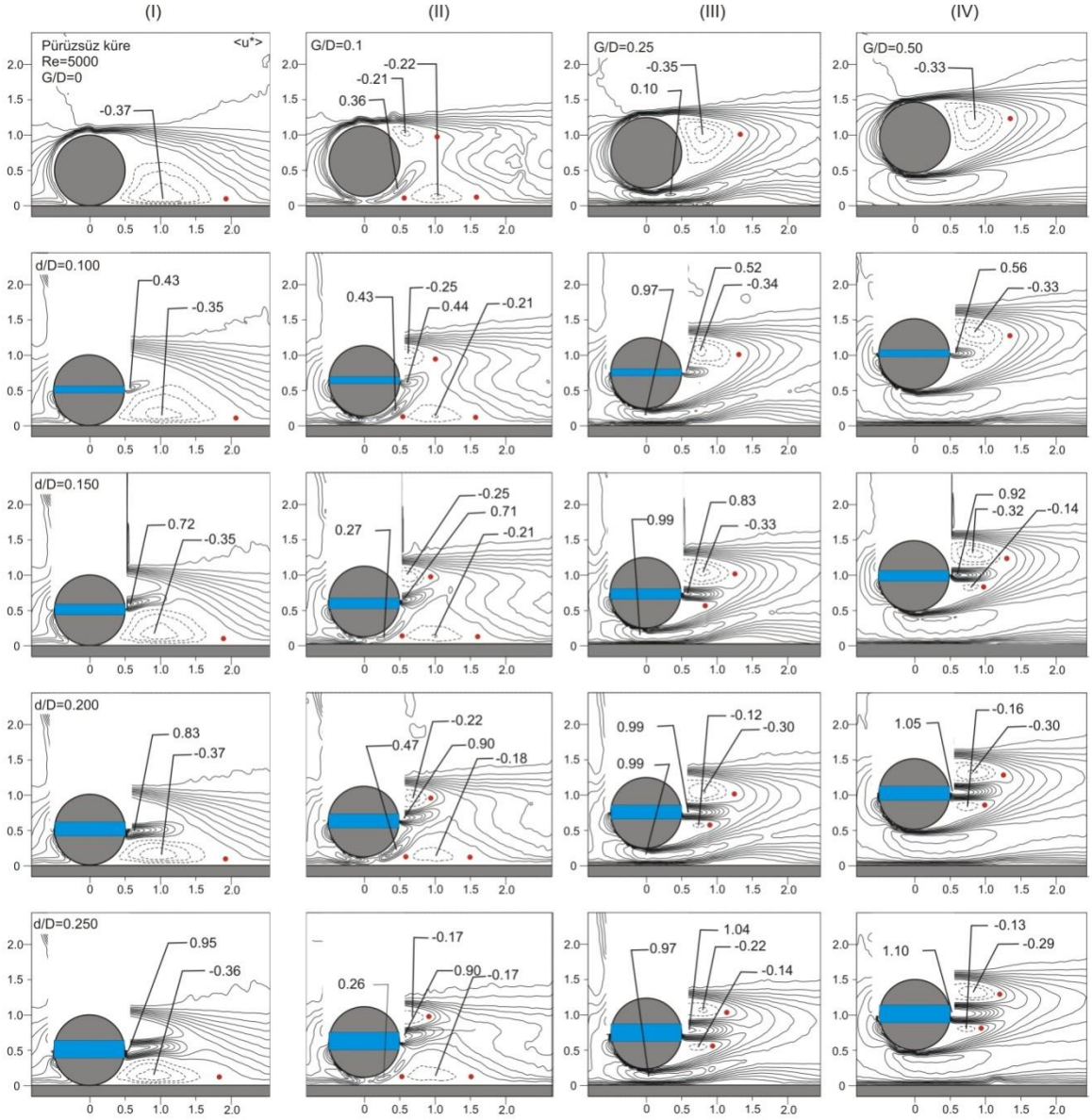
Şekil 4.52. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama akım çizgisi <ψ>' nin, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması.



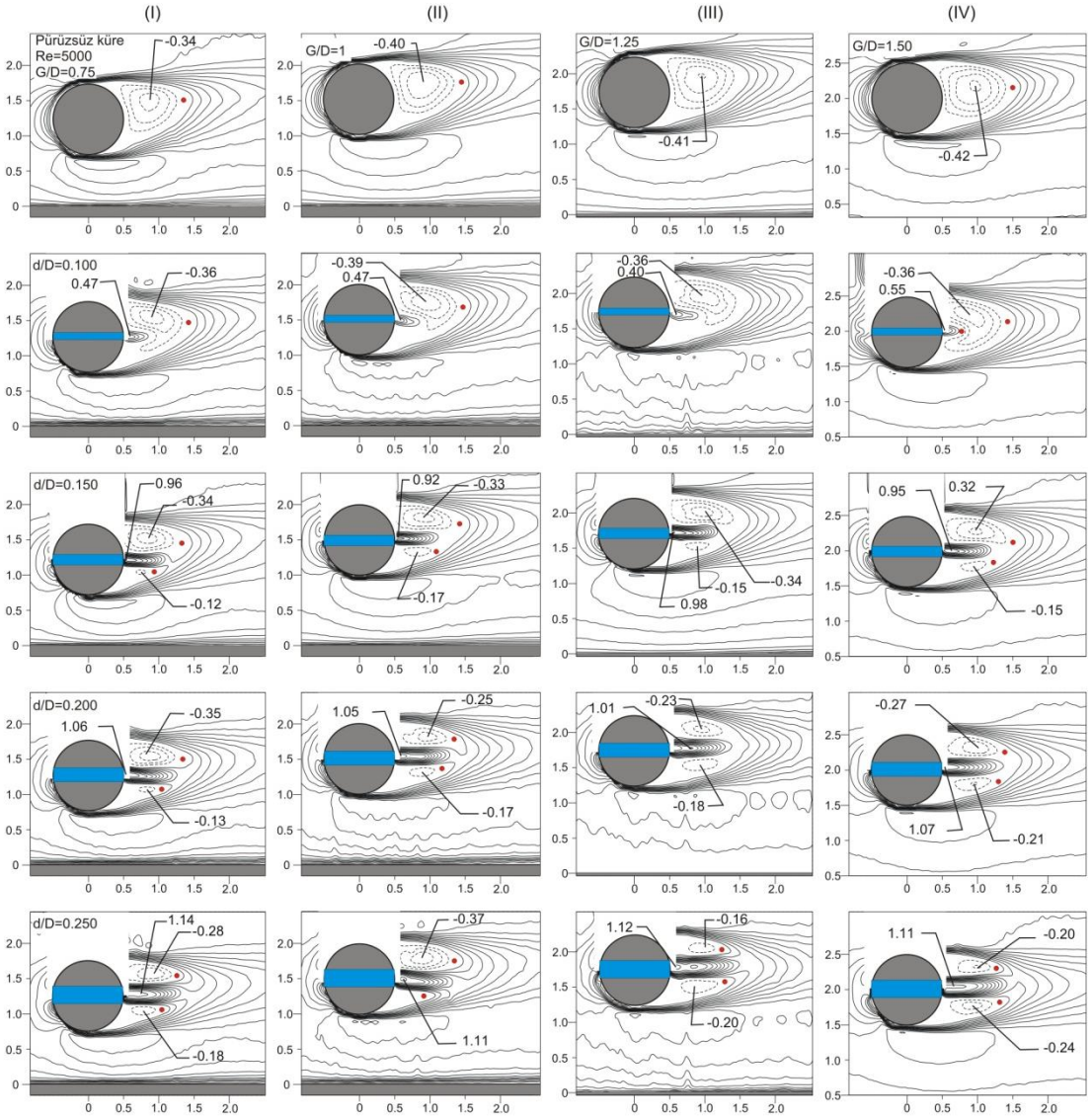
Şekil 4.53. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama girdap$< \omega^* >$ eş düzey eğrilerinin, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|< \omega^* >|_{min} = |< \Delta\omega^* >|_{min} = 2$'dir



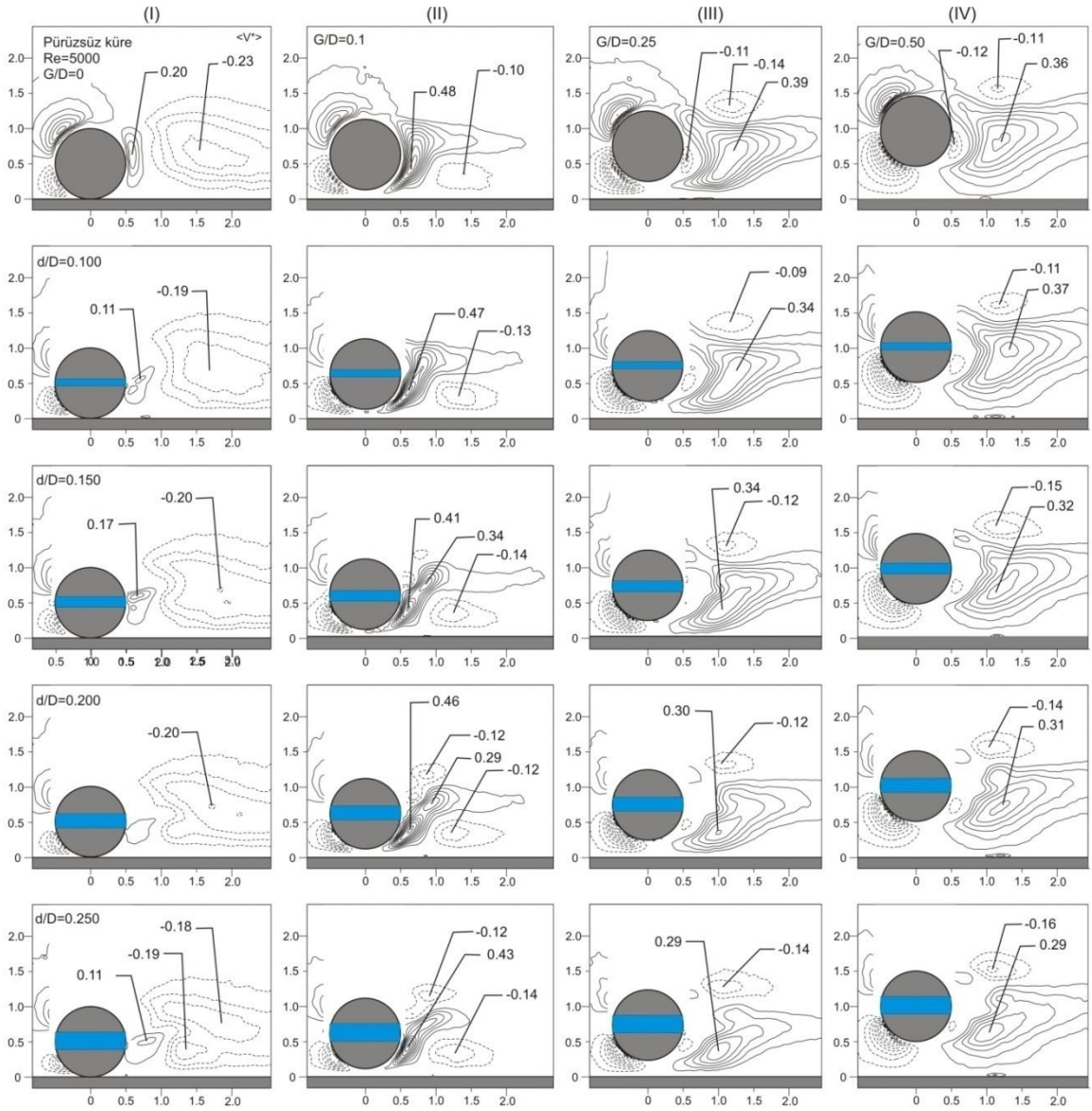
Şekil 4.54. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama girdap$< \omega^* >$ eş düzey eğrilerinin, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. . Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| < \omega^* > \right|_{min} = \left| < \Delta\omega^* > \right|_{min} =$ 2'dir.



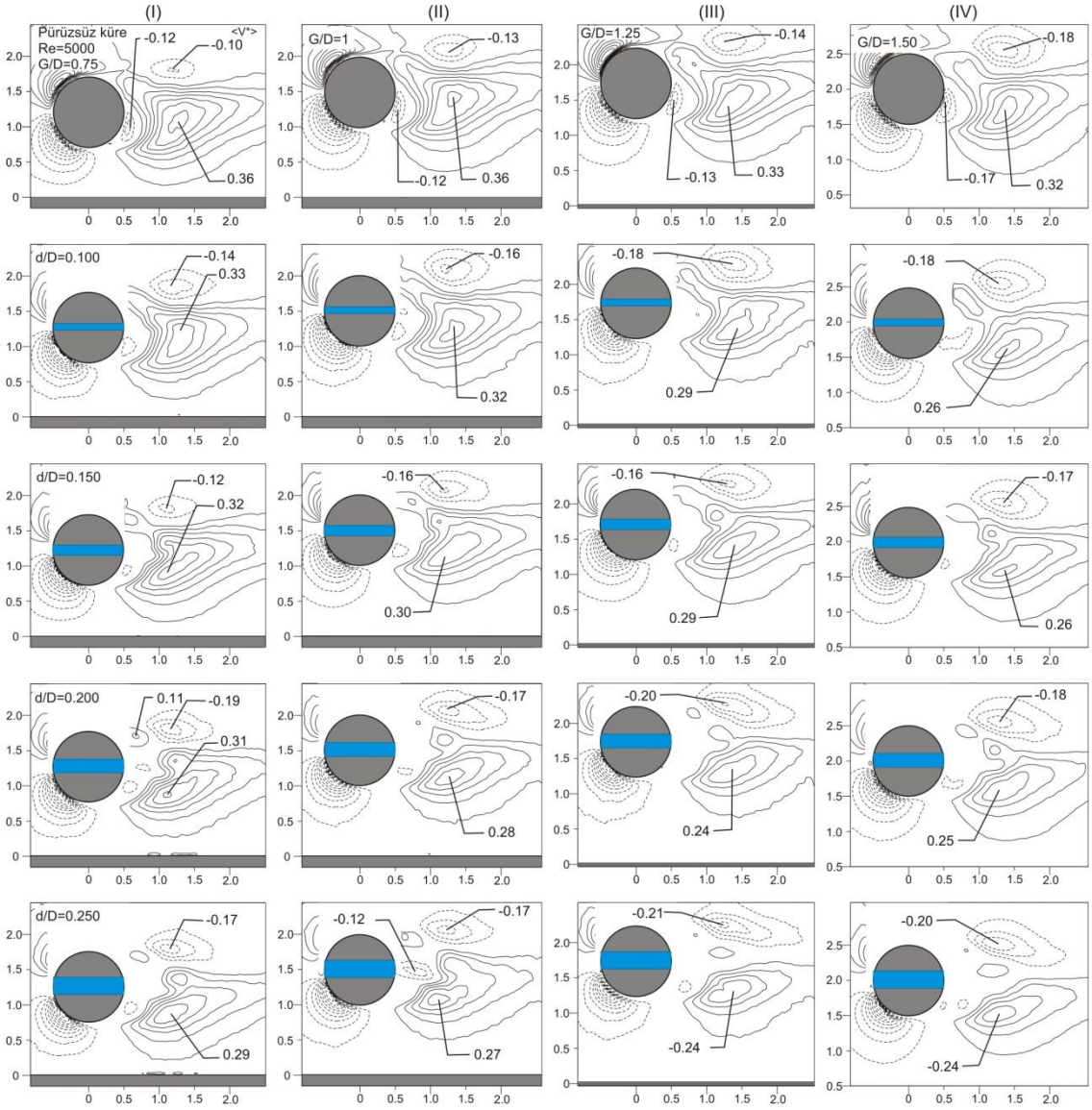
Şekil 4.55. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <u*>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrileriin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<u^*>|_{min} = |<\Delta u^*>|_{min} = 0$.'dir.



Şekil 4.56. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <u*>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. .Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<u^*>|_{min}=|<\Delta u^*>|_{min}=0.1$'dir



Şekil 4.57. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akıma dik yöndeki ortalama hız eş düzey eğrileriının <v*>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrileriın minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\langle v\rangle|_{min}=|\langle \Delta v\rangle|_{min}=0.05$'tir.



Şekil 4. 58. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akıma dik yöndeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <v*>, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\langle v \rangle|_{min} = |\langle \Delta v \rangle|_{min} = 0.05$'tir

Açıklık oranı G/D=0 için akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^*_{rms}>$ (Şekil 4.59) ve TKE şiddetleri (Şekil 4.65) art izindeki yavaş akış bölgesi ile serbest akım hızı arasındaki küre üst kayma tabakasında ve deliklerden gelen jet akış içinde tepe değerlerini almıştır. Küre üst kayma tabakasında oluşan $<u^*_{rms}>$ hız çalkantı değerleri jet akışın etkisi ile azalmıştır. Jet akıştaki $<u^*_{rms}>$ değerlerinde ise delik çap oranı d/D=0.10'dan d/D=0.15'e artırıldığında büyük bir artış olmuş daha yüksek delik çaplarında ise kayda değer bir değişim gerçekleşmemiştir. Küre üst kayma tabakasındaki ortalama TKE eş düzey eğrilerinin (Şekil 4.65) en yüksek tepe değerleri, pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla 0.033, 0.029, 0.034 ve 0.029'dur. Görüldüğü gibi değerler arasında çok az fark vardır. Jet akışın TKE eş düzey eğrilerindeki en yüksek tepe değerler ise pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla 0.028, 0.048, 0.051 ve 0.051'dir. Artan delik çapı ile birlikte TKE değerlerinin en yüksek değeri dolayısıyla jet akış içindeki TKE dağılımının şiddeti de artmıştır. Pürüzsüz kürede TKE dağılımı iki noktada tepe değer almıştır. Bunlardan bir tanesi 0.033 değerinde ve küre üst kayma tabakasında, diğeri ise küre simetri ekseninin hizasında ve küre merkezinden yaklaşık 2D (85 mm) aşağı akım yönünde oluşmuştur. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ şiddetleri (Şekil 4.61) delik çapının artması ile azalmıştır. Delik çapı d/D=0.25 olduğunda akım yönüne dik hız bileşeni çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ en yüksek tepe değeri pürüzsüz küreye göre %16 oranında azalırken oluştuğu yer küre sırtına doğru yukarı akım yönünde yaklaşmıştır. Ortalama Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ ise (Şekil 4.63..) art izi bölgesinde pürüzsüz küre durumunda negatif değerlerde oluşurken, delikli kürelerde delik içindeki jetin etkisiyle pozitif değerlerde de oluşmuştur. Artan delik çapıyla da pozitif işaretli Reynolds gerilme şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri artış göstermiştir. Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ pürüzsüz küre durumunda biri -0.021 diğeri -0.017 değerinde iki adet tepe değeri noktası oluşturmuştur. Küre üst kayma tabakasında oluşan Reynolds gerilmelerinin en yüksek tepe değerlerinde artan delik çapına göre önemli bir değişim olmamıştır. Delik çapının d/D=0.10 oranında küre deliğinden gerçekleşen jet akış art izinde belirgin bir Reynolds gerilmesi alanı oluşturmamıştır. Delik çapı oranı d/D=0.15'e artırıldığında jet çıkışında en yüksek tepe değeri 0.011 olan pozitif değerde Reynolds gerilmesi alanı oluşmuştur. Delik çapı oranı d/D=0.20 olan kürede ise jet çıkışında en yüksek tepe değeri -0.015 olan negatif hız Reynolds gerilmesi alanı da oluşmuştur. Delik çapı oranı d/D=0.25'e

artırıldığında jet çıkışındaki pozitif Reynolds gerilmelerinin en yüksek değeri 0.026'ya yükselirken negatif gerilmelerin değerinde önemli bir değişim olmamıştır.

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.10'a artırıldığında küre üst kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerleri (Şekil 4.59) pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranında deliğe sahip küreler için sırasıyla %22, %42, %29, %43 ve %15 oranlarında artmıştır. Delik içerisinden küre art izine boşalan jet akışın akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerleri, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında a deliğe sahip küreler için sırasıyla %7, %27, %19 ve %21 oranlarında azalmıştır. Küre üst kayma tabakasındaki TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %79, %117, %65, %103 ve %44 oranlarında artmıştır. Bu açıklık değerinde (G/D=0.10) TKE şiddetlerinin ve akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerinin en küçük olduğu durum d/D=0.25 oranında delik çapına sahip küre durumudur. Küre ile levha arasındaki boşluktan geçen jet akış, kürenin ön kısmı ve arka kısmında akım yönündeki hız bileşenlerinde çalkantılar oluşturmaktadır. En yüksek tepe değerleri Şekil 4.59'da görülen bu hız çalkantılarının küre cismi ve levha üzerinde mekanik aşınmaya neden olacak etkileri vardır.

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0'dan G/D=0.10'a artırılırken en yüksek tepe değerleri küre üst kayma tabakasında oluşan negatif değerdeki Reynolds gerilmelerinin de şiddeti önemli miktarda artmıştır (Şekil 4.63). Bu artış (Reynolds gerilmelerinin eş düzey eğrilerinde okunan en yüksek tepe değerlerindeki) pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %71, %124, %80, %117 ve %42'dir. Pürüzsüz küre ve delikli kürelerde art izi bölgesinde pozitif değerdeki Reynolds gerilmeleri daha büyük bir alana yayılmıştır. Pozitif değerdeki gerilmelerin art izi bölgesi içindeki dağılımları delik çap oranı d/D=0.10'dan d/D=0.25'e artırıldıkça azalmıştır. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantıları $<V^*_{rms}>$ (Şekil 4.61), G/D=0.10 açıklık oranında bütün küre durumları için üç noktada belirgin bir şekilde tepe değerleri almıştır. Akım yönüne dik hız bileşenlerinin $<V^*>$ ortalama değerleri de küre art izinde üç farklı noktada tepe değerler almaktadır (Şekil 4.57). Akım yönüne dik hız bileşeninin çalkantı $<V^*_{rms}>$ değerlerinin tepe değerleri aldığı noktalarla akım yönüne dik ortalama hız değerlerinin $<V^*>$ tepe değer aldığı noktalar aynı yerlerde oluşmuştur. Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.25 değerine

çıkarıldığında ise akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni $<v^*_{rms}>$ çalkantıları tek bir noktada tepe değer almıştır.

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.10'dan, G/D=0.25'e artırıldığında sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilinde daha yüksek hız bölgesine maruz kalan kürede, küre üst kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ şiddeti artmaya devam etmiştir. Bu bölgedeki (küre üst kayma tabakasında) $<u^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek tepe değerleri, pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %27, %12, %16, %6 ve %17 oranlarında artış göstermiştir. TKE değerleri de genellikle $<u^*_{rms}>$ çalkantılarının tepe değer aldığı yerlerde tepe değerlere ulaşmıştır. Çalkantı değerlerindeki artış akışın TKE seviyesini artırmıştır. Küre üst kayma tabakasındaki TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerindeki artış pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %42, %8, %23 ve %22'dir. Delik çapı oranı d/D=0.20 olan kürede $<u^*_{rms}>$ değerlerinde yükselme olurken, TKE şiddeti değerlerinde çok az bir düşüş olmuştur. Bunun nedeni küre deliğinden gelen jet akışın küre alt bölgesinden gelen jet akışı etkilemesidir. d/D=0.20 delik çap oranına sahip kürede, küre üst kayma tabakasındaki akım yönüne dik hız çalkantıları $<v^*_{rms}>$ şiddetlerinin (Şekil 4.61) değerleri açıklık oranı G/D=0.10'dan G/D=0.25'e yükseltildiğinde düşmüştür. TKE şiddeti, akım yönündeki ve akım yönüne dik yöndeki hız çalkantılarının birlikte etkilediği bir büyüklük olduğu için azalma göstermiştir. Reynolds gerilmeleri de (Şekil 4.63) akım yönündeki ve akım yönüne dik yöndeki hız çalkantılarının birlikte etkilediği bir büyüklüktür ve G/D=0.10'dan 0.25'e yükseltildiğinde benzer değişimler olmuştur. Küre üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmesi $< u'v'/U_\infty^2 >$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerindeki artış pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %36, %18, %8 ve %26'dır.

G/D=0.25 açıklık oranında küre üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmeleri küre delik çapı arttıkça azalmıştır. Pürüzsüz kürede küre üst kayma tabaksındaki Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ (Şekil 4.63) en yüksek tepe değeri -0.049'dan yaklaşık %30'luk düşüşle d/D=0.25 delik çapına sahip kürede -0.034 değerine düşmüştür. Alt kayma tabakalarında ise kayda değer bir değişim olmamıştır. En yüksek tepe değerleri küre deliğinin çap oranı d/D=0.20 değerine kadar azalmış d/D=0.25 oranında artmıştır. Ancak, en küçük değerlerini yine küre delik çap oranlarının d/D=0.20 ve 0.25 değerlerinde almıştır. Pürüzsüz küre art izinde 0.281 en yüksek

değerini alan $<v^*_{rms}>$ değerleri delik çap oranının d/D=0.20 değerinde %19'luk bir azalmayla 0.229 değerine düşmüştür. Küre üst kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşeni çalkantı değerleri $<u^*_{rms}>$ küre delik çapı arttıkça azalmıştır. Pürüzsüz kürede, küre üst kayma tabaksında $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetinin en yüksek tepe değeri 0.321 iken bu değer delik çap oranı d/D=0.25 olan kürede %21 azalmayla 0.254 değerine düşmüştür. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantıları ise delikten geçen jet akışın etkisi ile artış göstermiş, en büyük değeri ise delik çap oranı d/D=0.25 olan kürede almıştır. Küre üst kayma tabakasındaki ayrılmış akış bölgesinin TKE şiddetleri (Şekil 4.65) artan küre çapı ile birlikte azalış göstermiştir. Pürüzsüz kürede, küre üst kayma tabakasındaTKE şiddetinin en yüksek tepe değeri 0.084 iken bu değer delik çap oranı d/D=0.25 olan kürede %33.3 azalmayla 0.056 değerine düşmüştür. Küre alt kayma tabaksında ise TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerinin en düşük olanı d/D=0.15 çap oranına sahip küre art izinde oluşmuştur.

Küre levhadan G/D=0.50 açıklık oranına kadar kaldırıldığında küre ile levha arasındaki boşluğun yeterince artmasından dolayı küre ile levha arasındaki jet akışın etkinliği azalmıştır. Levha üzerindeki sınır tabaka akışının küre ile levha arasındaki jet akışın etkisi ile ayrılmasından dolayı akım yönündeki hızlarda oluşan çalkantı şiddetlerinde önemli miktarda düşüşler meydana gelmiştir. Aynı şekilde levha üzerindeki sınır tabaka akışının, ayrılmış bölgesindeki TKE seviyeleri de düşmüştür. Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.25'ten G/D=0.50'ye artırıldığında levha üzerindeki sınır tabaka akışında, ayrılmanın olduğu bölgedeki akım yönündeki hız çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerlerindeki düşüş, pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranında deliğe sahip küreler için sırasıyla %28, %19, %36, %19 ve %18'dir. Aynı durum için TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerindeki düşüş ise pürüzsüz küre, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %52, %37, %40, %36 ve %37'dir.

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.75'e çıkartıldığında küre art izi ve levhanın üst kısmındaki levhaya yakın bölgelerde küre art izi-levha etkileşiminin etkisi kalmamıştır. Ancak daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilinin etkisi devam etmektedir. Küre üst kayma tabakasındaki akım yönündeki hız bileşenlerinin $<u^*_{rms}>$ çalkantı şiddetleri artan küre çapıyla birlikte azalmıştır. Küre art izinde üst kayma tabakasındaki çalkantı değerleri alt kayma tabakasındakine göre daha küçük çıkmıştır. Bunun nedeni, sınır tabaka akışının üniform

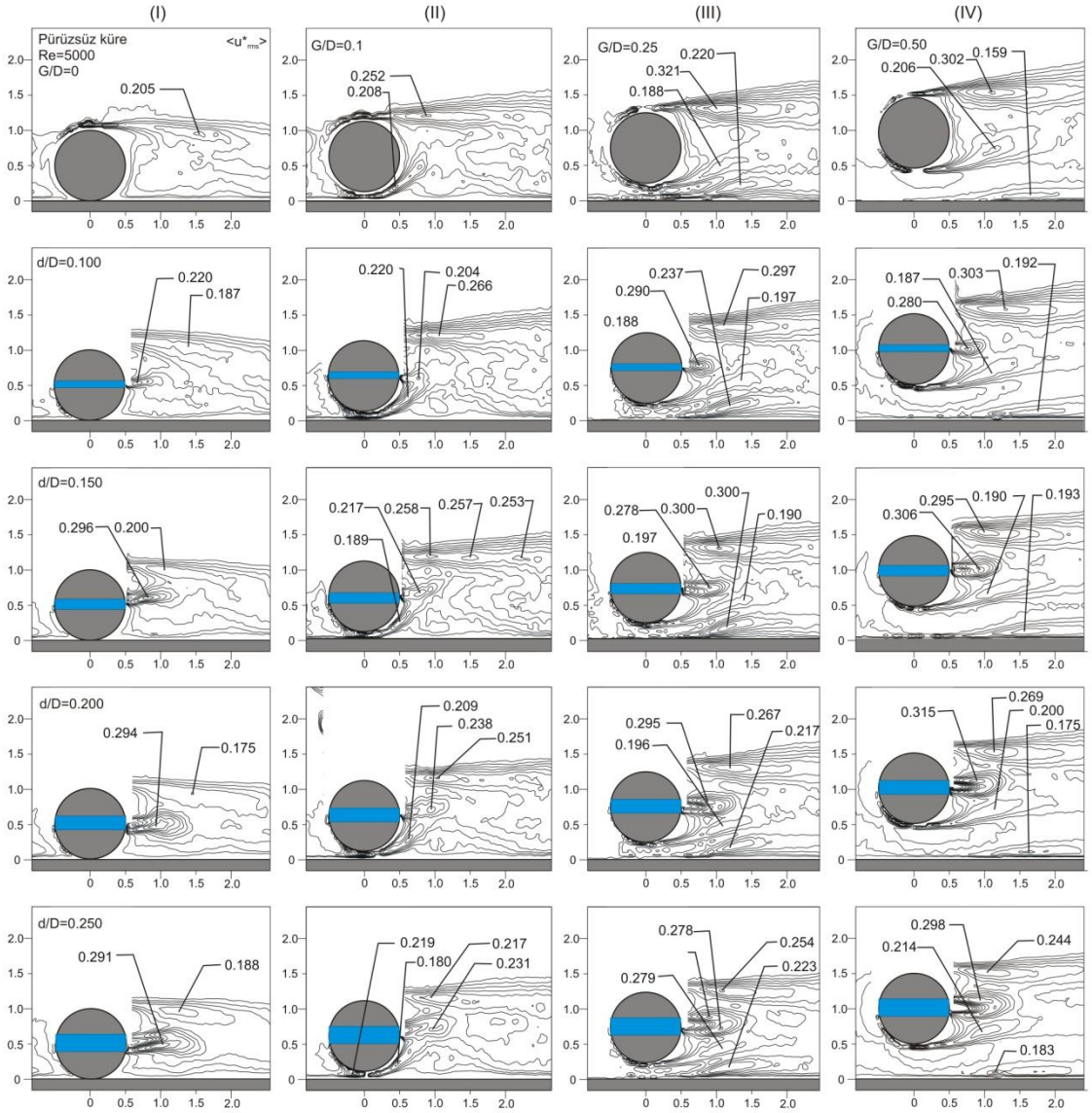
olmayan hız profilinden dolayı küre üst kayma tabakasındaki girdap kopmalarının daha şiddetli ve hızlı olmasıdır. Kürenin alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ hız çalkantı şiddetlerinde ise küre delik çapına bağlı bir azalma gerçekleşmemiştir. TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerinde (Şekil 4.60) küre art izinin üst kısmındaki kayma tabakasında, küre deliğinden geçen jet akışla azalma olmuştur. En çok azalma d/D=0.25 oranında deliğe sahip kürede olmuştur ve pürüzsüz küreye göre karşılaştırıldığında %25 mertebesindedir. Küre deliğinden art izine boşalan jet akışın TKE şiddeti genel olarak delik çapının artması ile artış göstermiştir. Delik çapı arttıkça TKE eş düzey eğrilerinin en yüksek tepe değerlerini aldığı yerler küreden aşağı akım yönünde uzaklaşmıştır. Kürelerin alt kayma tabakalarındaki TKE şiddetleri de delikten geçen jet etkisi ile azalmıştır ancak, en küçük değer d/D=0.15 oranında deliğe sahip kürede çıkmıştır. Akım yönüne dik yöndeki hız bileşenlerinin çalkantı şiddetleri $<v^*_{rms}>$ küre deliğinden geçen jet akışın etkisi ile azalmıştır ve bu azalma delik çapının bir fonksiyonu olarak gerçekleşmiş, delik çapı arttıkça $<v^*_{rms}>$ şiddetleri azalmıştır. Reynolds gerilmelerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ eş düzey eğrileri incelendiğinde TKE ve $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin küre art izi bölgesindeki dağılımında olduğu gibi küre üst kayma tabakasında alt kayma tabakasındakine göre yüksek çıkmıştır. Jet akışın geçtiği delik çapının artması ile birlikte de üst kayma tabakasındaki negatif Reynolds gerilmelerinin şiddeti azalmıştır. Bununla birlikte küre deliğinin çapı artırıldıkça delikten geçen jet akışın küre art izinde neden olduğu pozitif ve negatif değerdeki Reynolds gerilmesi kümelerinin şiddeti ve yayıldığı alan artmıştır. Küre delik çapının en yüksek olduğu durumda (d/D=0.25) jet akışın neden olduğu Reynolds gerilmesi değerleri küre alt kayma tabakasındaki ayrılmış akış bölgesinin Reynolds gerilme değerlerini geçmiştir.

En yüksek açıklık oranı G/D=1.5 için pürüzsüz küre ve delik kürelerin akış yapısı incelendiğinde küre deliğinden geçen jet akışın etkisi daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü bu açıklık miktarında küre art izi-levha etkileşimi hiç olmamakta, sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinden ise kısmen uzaklaşılmıştır. Bu şekilde kürenin art izi bölgesindeki akış yapısında baskın olan etmen küre deliğinden gerçekleşen jet akıştır. Delikli küre durumlarında küre üst kayma tabakasındaki ayrılmış akış bölgesindeki akım yönündeki hız bileşeni çalkantılarının $<u^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerlerindeki (Şekil 4.60) pürüzsüz küreye göre düşüş d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranında deliğe sahip küreler için sırasıyla %20, %18, %26 ve %37'dir. Delikli küre durumlarında küre alt kayma tabakasındaki ayrılmış akış bölgesindeki akım yönündeki hız bileşeni

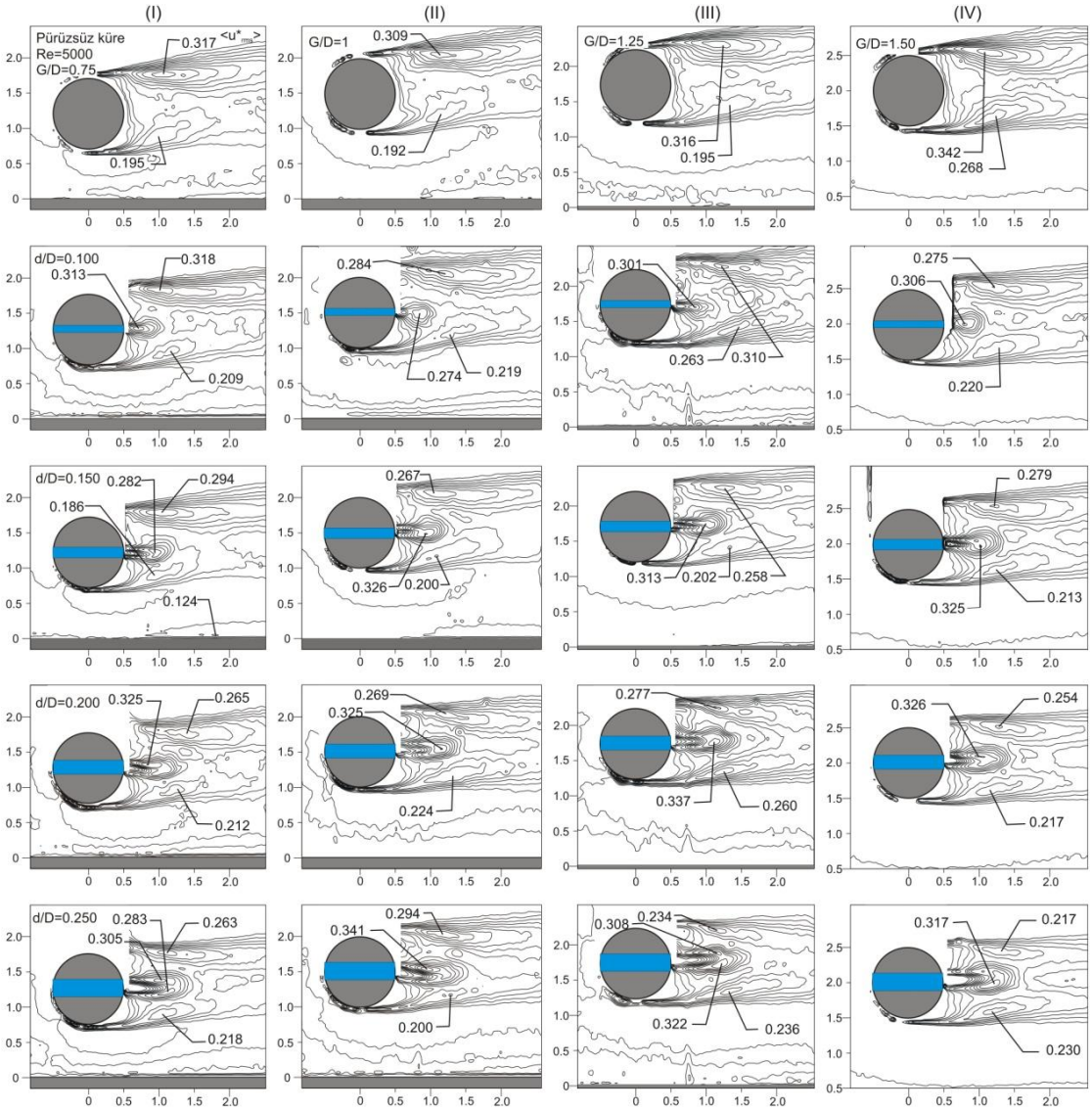
çalkantılarının$<u^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerlerindeki pürüzsüz küreye göre düşüş, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla %18, %21, %19 ve %14'tür. Delikten gerçekleşen jet akışın neden olduğu $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında deliğe sahip küreler için sırasıyla 0.306, 0.325, 0.326 ve 0.317'dir. Delik çapı d/D=0.25 oranında olduğunda jet akışın delik çıkışındaki başlangıç bölgesinde $<u^*_{rms}>$ çalkantıları çok küçük değerler alırken jet akışın uç kısımlarına doğru çalkantı şiddetleri artmış ve en yüksek değerini almıştır. Jet akış serbest akıma karıştıktan sonra $<u^*_{rms}>$ şiddetleri tekrar azalmaya başlamıştır. Akım yönüne dik hız bileşeni çalkantıları da $<v^*_{rms}>$ art izine boşalan jet akışın etkisi ile önemli miktarda azalmıştır (Şekil 4.62). Akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ en yüksek tepe değerlerindeki pürüzsüz küreye göre düşüş, d/D=0.10, 0.15 ve 0.20 oranında deliğe sahip küreler için sırasıyla %21, %24 ve %32'dir. Delik çap oranı d/D=0.25 olan kürede ise $<v^*_{rms}>$ değerleri iki noktada tepe değerleri almıştır. Üniform akış şartlarına maruz bırakılmış pürüzsüz akış kontrolü uygulanmamış bir kürede akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni çalkantıları $<v^*_{rms}>$ küre simetri ekseninin hizasında en yüksek tepe değerini alır. Ancak, d/D=0.25 oranında delik çapına sahip küreden gerçekleşen jet akış kürenin üst kayma tabakasından ayrılan akışla alt kayma tabakasından ayrılan akışın bir biri ile birleşmesini engellemekte, aralarında hareketli bir sınır bölgesi oluşturmaktadır. Bu durum ortalama akım çizgilerinden anlaşılabilmektedir (Şekil 4.51) Tepe değerlerin oluştuğu yerlerden biri normal şartlarda oluşması gereken yerin üstünde diğeri de altında çıkmıştır. Her iki noktanın aldığı değer de pürüzsüz kürenin $<v^*_{rms}>$ çalkantı şiddeti değerinden küçüktür. Daimi olmayan kararsız akış yapısından dolayı küre art izinde türbülanslı bir akış yapısı oluşmaktadır. Türbülans seviyesi akışın kararsızlığının bir ölçüsüdür. Akış kontrolü uygulanmamış pürüzsüz küre art izindeki TKE seviyeleri, küre ekvatoruna açılan delikle uygulanan pasif jet akışı ile düşürülmüştür (Şekil 4.66). Jet akış küre art izi bölgesinde üst ve alt kayma tabakalarındaki TKE seviyelerini düşürürken küre art izi bölgesinin merkezinde şiddeti delik çapına bağlı olan bir kayma tabakası oluşturmuş ve bu bölgedeki TKE seviyesini yükseltmiştir. Pürüzsüz küre üst kayma tabakasındaki TKE şiddetlerinin ulaştığı en yüksek değer 0.088 düzeyindedir. Jet akışın küre art izinde meydana getirdiği ikincil kararsızlıklar, jet akışın art izine sağladığı enerji-kütle transferi ve jet akışın küre çevresindeki ayrılmış akışların etkileşimini engellemesi (d/D=0.20 ve d/D=0.25 durumlarında) TKE şiddetlerinin azalmasına neden olmuştur.

Küre üst kayma tabakasında TKE şiddetlerinin ulaştığı en yüksek değerlerindeki azalmalar delik çapı oranları d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 olan küreler için sırasıyla %31, %27, %39 ve %43'tür. Görüldüğü gibi en çok azalma d/D=0.25 delik çapı oranındaki jet akışın etkisi ile gerçekleşmiştir. Küre alt kayma tabakasında TKE şiddetlerinin ulaştığı en yüksek tepe değerlerindeki azalmalar ise, delik çapı oranları d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 olan küreler için sırasıyla %21, %24, %26 ve %16'dır. Alt kayma tabakalarındaki TKE seviyelerindeki en çok azalma d/D=0.20 delik çap oranına sahip kürede gerçekleşmiştir. d/D=0.25 delik çapına sahip küre art izi bölgesinde simetrik bir akış yapısı oluştuğundan alt ve üst kayma tabakalarındaki TKE seviyeleri eşitlenmiştir. Delik çapı arttıkça küre üst ve alt kayma tabakalarındaki TKE seviyelerinin azaldığı görülmüştür. Ancak, artan delik çapı ile birlikte art izi bölgesi içinde küre deliğinden gelen jet akışın neden olduğu türbülanslı akış bölgesinde TKE şiddetleri artmaktadır. Üstelik jet akış etkisi ile oluşan türbülanslı akış bölgesinin TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri d/D=0.20 ve 0.25 delik çapı oranlarına sahip kürelerde küre alt ve üst kayma tabakalarındaki akış ayrılmalarından kaynaklı TKE şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerini geçmiştir. Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ eş düzey eğrileri (Şekil 4.64, Sütun IV) dağılım olarak pürüzsüz küre etrafında simetriğe yakın bir görüntü oluştursa da negatif ve pozitif değerdeki Reynolds gerilmelerinin en yüksek tepedeğerlerine bakıldığında üst kayma tabakasındaki negatif değerdeki Reynolds gerilme şiddeti daha fazla çıkmıştır. Bu durum akış kontrolü uygulanmış d/D=0.10, 0.15, 0.20 oranlarında delik çapına sahip kürelerde de aynen devam ederken d/D=0.25 delik çapına sahip kürede üst ve alt kayma tabakalarındaki pozitif ve negatif Reynolds gerilme şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri eşitlenmiştir. Küre deliğinden geçen jet akışın Reynolds gerilmelerine delik çapına bağlı olarak etkisini daha net görebilmek için pürüzsüz küre referans alınarak Reynolds gerilme şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerindeki azalmalar yüzde azalma cinsinden şu şekildedir: Üst kayma tabakasında delik çapı oranları, d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 olan küreler için sırasıyla %30, %30, %39 ve %45'tir. Alt kayma tabakasında delik çapı oranları d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 olan küreler için sırasıyla %17,%23, %27 ve %9'dur. Üst kayma tabakasında ortalama Reynolds gerilmesi şiddetlerinin en yüksek tepe değerlerinde en çok azalma d/D=0.25 oranında çapa sahip kürede gerçekleşirken, alt kayma tabakasında d/D=0.20 oranında çapa sahip kürede gerçekleşmiştir. Pürüzsüz küre durumunda küre art izi bölgesinde küre sırtına yakın yerlerde Reynolds gerilmesi eş düzey eğrilerinin

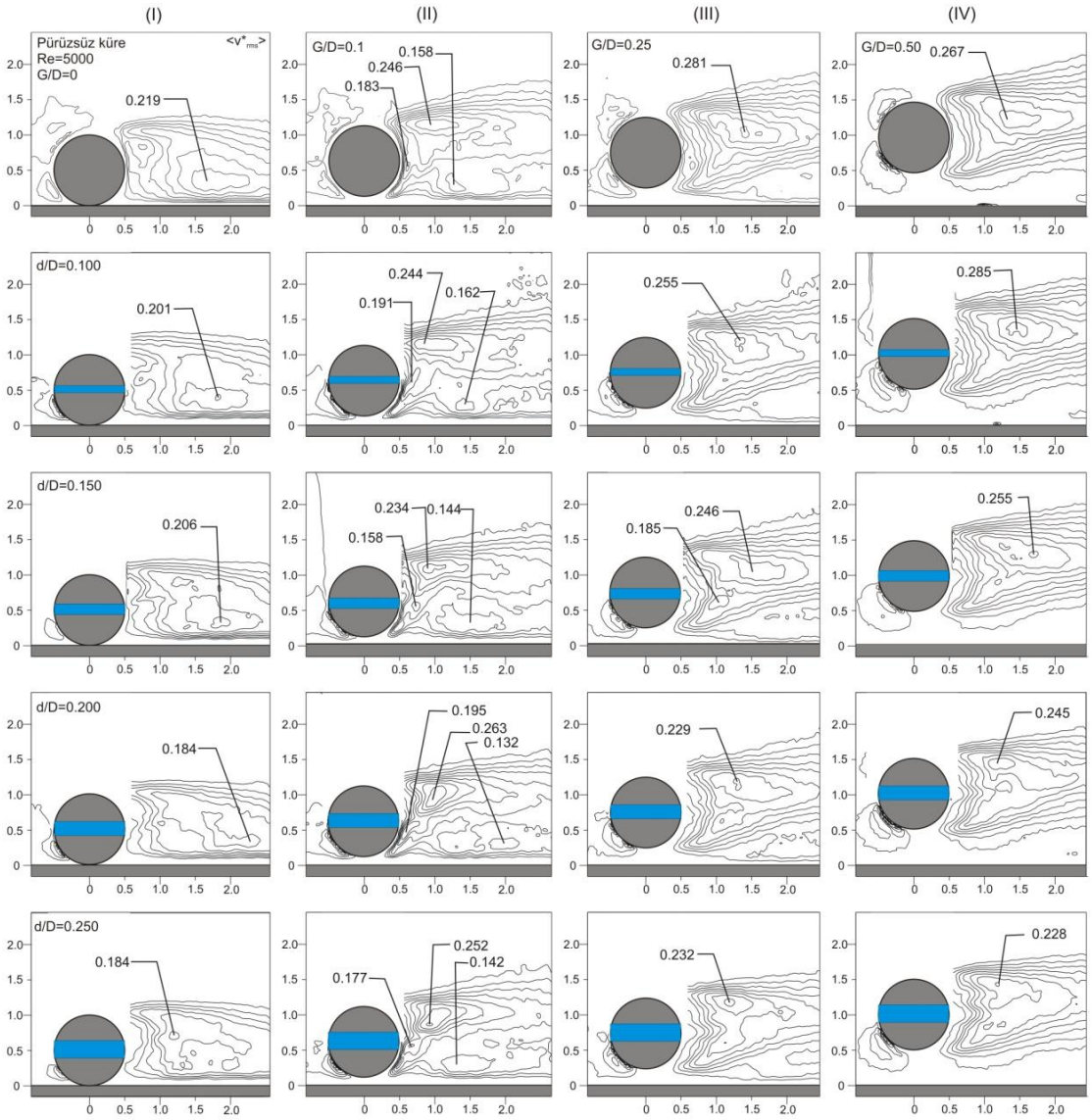
oluşmadığı görülmektedir. Bu bölgede pozitif ve negatif değerdeki Reynolds gerilmeleri birbirlerini yok etmektedir. Jet akışla pasif kontrol uygulandığında bu bölgede pozitif ve negatif değerde Reynolds gerilmesi eş düzey eğrileri kümeleri oluşmaktadır. Delik çapı d/D=0.10'dan d/D=0.25'e artırıldıkça bu bölgedeki Reynolds gerilmesi şiddetleri artmakta ve daha fazla bir alana yayılmaktadır. Delik çap oranlarının d/D=0.20 ve 0.25 olduğu durumlarda jet akışın üst kısmındaki pozitif değerdeki Reynolds gerilmeleri, üst kayma tabakasındaki negatif değerdeki Reynolds gerilmesi bölgesinin, jet akışın alt kısmında bulunan negatif değerdeki Reynolds gerilmeleri de küre alt kayma tabakasındaki pozitif değerdeki Reynolds gerilmesi bölgesinin bir kısmını işgal etmiştir. Küre delik çapı d/D=0.25 oranında olduğunda küre üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmesi şiddetleri ile alt kayma tabakasındaki Reynolds gerilmesi şiddetleri büyüklük olarak yaklaşık aynı mertebede çıkarken, jet akış bölgesindeki pozitif ve negatif değerdeki Reynolds gerilmesi şiddetleri de büyüklük olarak bir birlerine çok yaklaşmıştır.



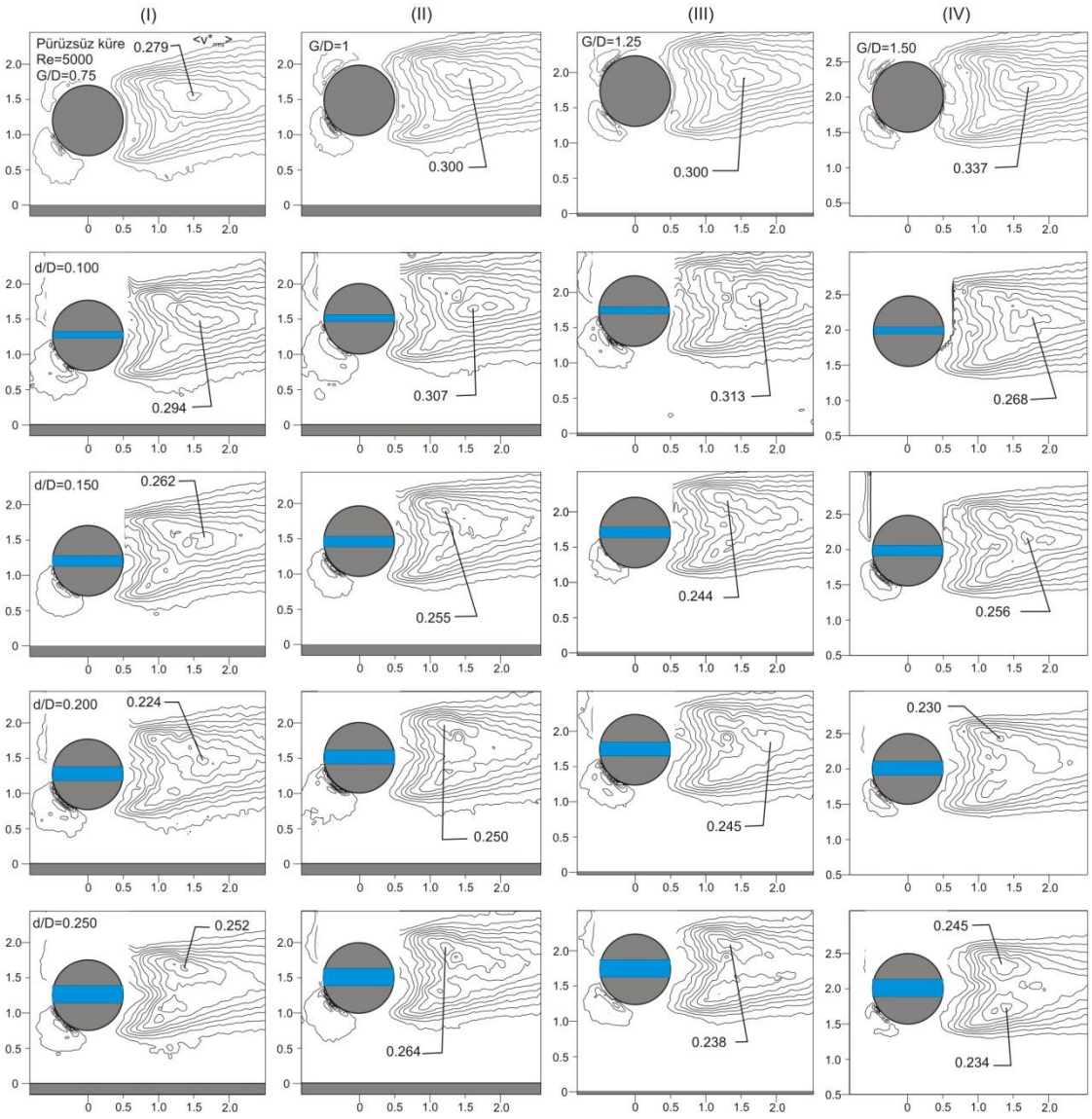
Şekil 4.59. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akım yönündeki hız çalkantıları $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin, küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.075$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta u^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$'tir.



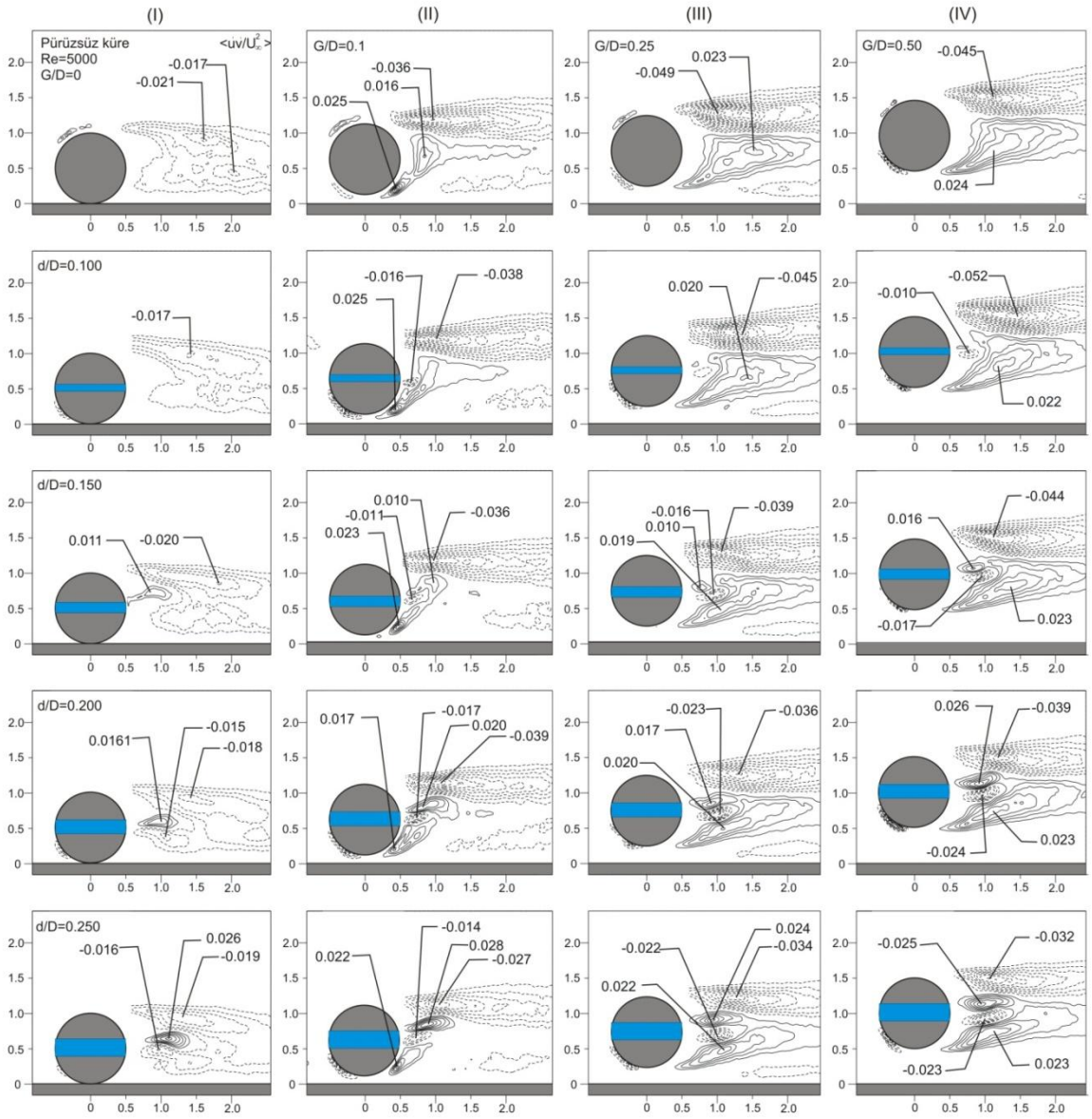
Şekil 4.60. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akım yönündeki ortalama hız çalkantıları eş düzey eğrilerinin $\langle u^*_{rms} \rangle$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.075$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta u^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$' tir.



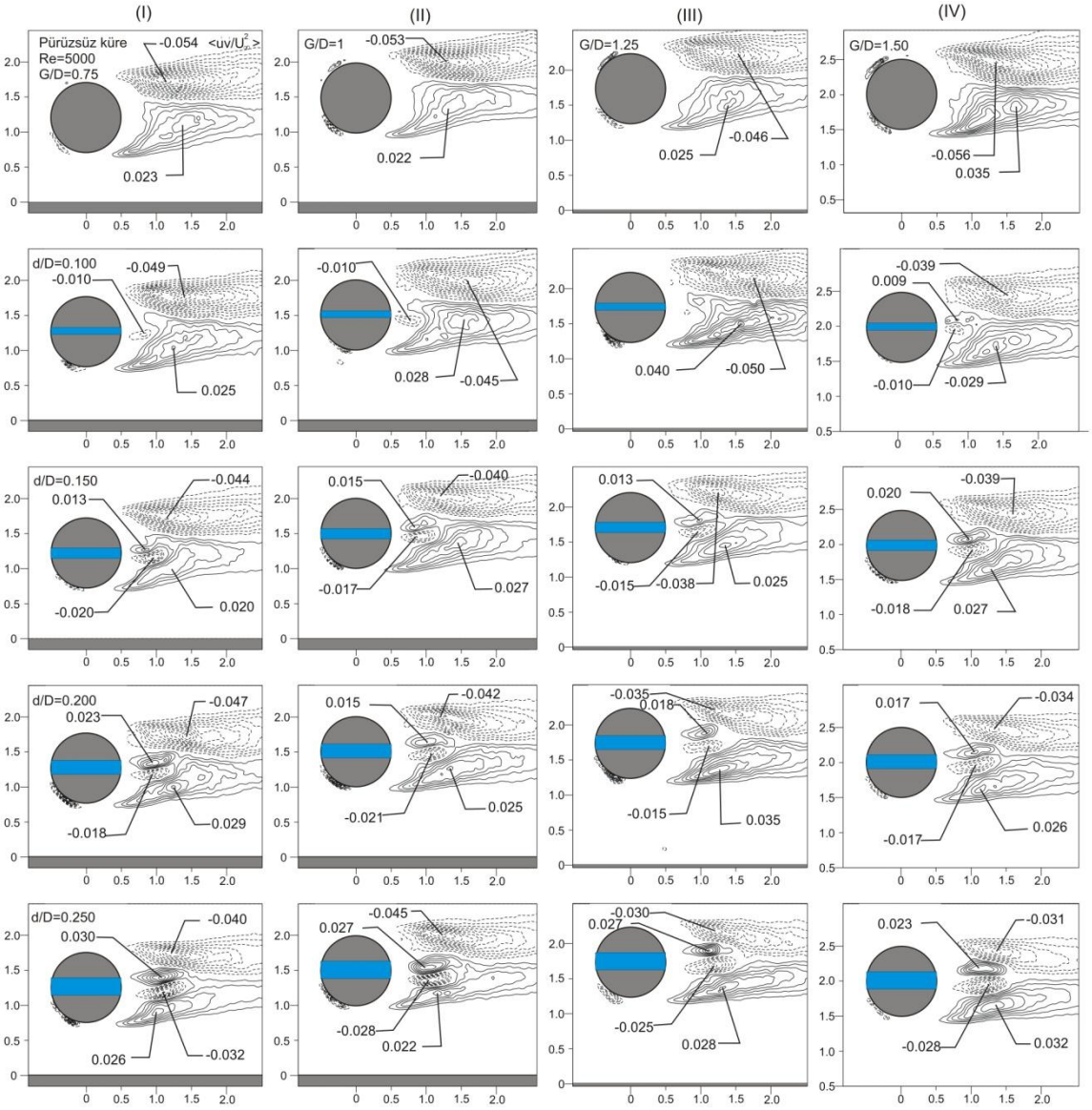
Şekil 4.61. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akım yönüne dik yönündeki ortalama hız çalkantıları eş düzey eğrilerinin $\langle v^*_{rms} \rangle$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \le G/D \le 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. .Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$' tir.



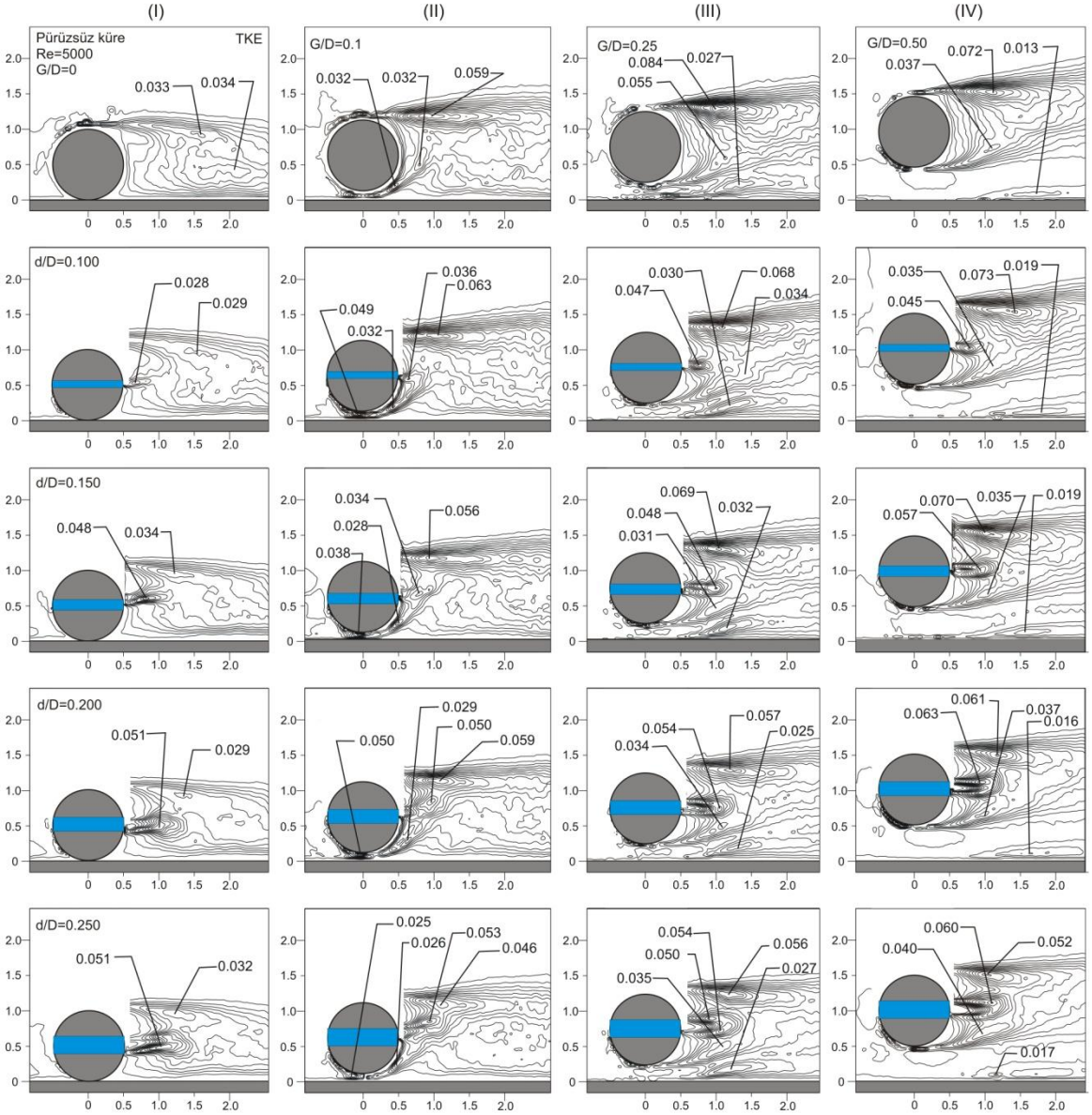
Şekil 4.62. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının akıma dik yönündeki ortalama hız çalkantıları eş düzey eğrilerinin $\langle v^*_{rms} \rangle$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.025$'tir.



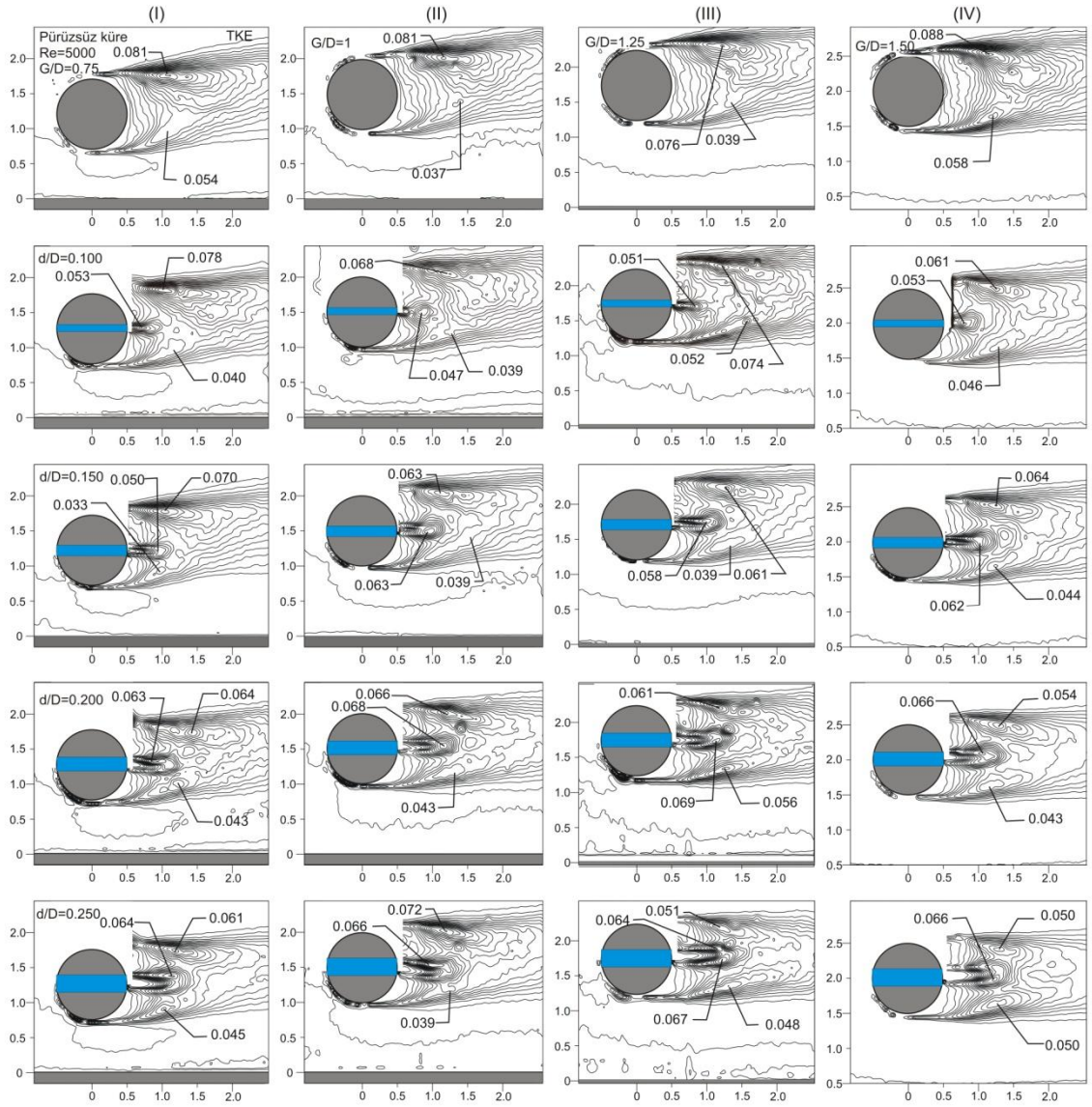
Şekil 4. 63. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrileriinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \le G/D \le 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrileriin minimum değeri $| < u'v'/U_\infty^2 > |_{min}=0.004$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $| <\Delta u'v'/U_\infty^2 > |_{min}=0.004$'tür.



Şekil 4.64. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $| < u'v'/U_\infty^2 > |_{min}$ =0.004 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $| <\Delta u'v'/U_\infty^2 > |_{min}$ =0.004'tür.



Şekil 4. 65. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama Türbülans kinetik enerjisi (TKE) eş düzey eğrilerinin küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. TKE eş düzey eğrileriın minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım 0.004'tür.



Şekil 4.66. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre ve eksenine d/D=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında delik açılmış kürenin etrafındaki akış yapısının ortalama Türbülans kinetik enerjisi (TKE), eş düzey eğrileriının küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. TKE eş düzey eğrileriın minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım 0.004'tür.

4.4. Pürüzsüz ve Pasif Kontrol Uygulanan Kürelerin Sınır Tabakayla Etkileşimiyle Oluşan Akış Yapılarının Karşılaştırılması

Pürüzsüz küre ve farklı şekillerde pasif akış kontrolü uygulanan kürenin sınır tabaka ile etkileşimi sonucu oluşan akış yapısı bu bölümde incelenmiştir. Pasif akış kontrolleri için küre yüzeyine pürüz yapıları işlenmiş, o-ring takılmış ve küre ekvatoruna delik açılmıştır. Toplam 410 adet 3 mm çaplı silindirik pürüzlülük elemanı küre yüzeyine yaklaşık eşkenar üçgen olarak oluşturulmuştur. Burada incelenen aralıkta en iyi sonucu veren o-ringli küre için 2 mm çapındaki o-ringin küre yüzeyine ön durma noktasından 55^{o}'ye yerleştirilmesi ve delikli küre durumunda küre merkezine küre çapının %15'i çapında delik açılan delikli küre durumundaki akış yapıları karşılaştırılmıştır.

Uygulanan farklı şekillerdeki pasif kontrol yöntemlerinin küre-sınır tabaka etkileşimi sonucu oluşan akış yapısında meydana getirdikleri değişimleri karşılaştırmak amacıyla boya sonuçları, anlık girdap $\omega*$, ortalama girdap $<\omega*>$, ortalama vektör alanı $<V>$, ortalama akım çizgisi $<\psi>$, akım yönündeki ortalama hız $<u*>$, akım yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<u^{*}_{rms}>$, akıma dik yönündeki hız bileşeni çalkantıları $<v^{*}_{rms}>$ ve ortalama Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_{\infty}^{2} >$ karakteristikleri Reynolds sayısının Re= 5000 değerinde incelenmiştir.

Boya deney sonuçlarından farklı açıklık oranlarında küre art izi yapısında önemli değişimlerin olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.67). Girdap akış yapısının yüksek orandaki dönümlü akış hareketi art izine doğru momentumu artırmaktadır ve bu da art izi yapısında daha kararlı akış oluşması ile sonuçlanmaktadır. Sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profili küre çevresinden ayrılmış akış tabakalarının farklı şiddetlerde oluşmasıyla simetrik olmayan bir akış yapısı oluşturmaktadır. Anlık akış yapıları sınır tabakaya yakın bölgede pozitiften negatife veya tersine bir değişim sergileyerek kürede oluşan sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin değişmesine neden olmaktadır. Anlık girdap değerleri akım yönünde ilerledikçe şiddetleri azalmaktadır. Küçük ölçekli Kelvin-Helmholtz kararsızlığı ayrılmış akış tabakasının hızlı bir şekilde geçişle art izi bölgesinde çalkantılara ve bu bölgeye kütle girişine ve çıkışlarına neden olmaktadır. G/D=0 açıklık oranında kürenin yüzeyle temas etmesi akışın kürenin alt kısmından geçmesini engellemekte ve bu noktadan akış ayrılması olmamaktadır. Küre ile levha noktasal temasta bulunduğu için aslında alt kısımda akış silindirde olduğu gibi tamamen engellenmemektedir. Ancak, iki boyutlu görüntü düzlemi tam olarak küre

ekvatorundan geçtiği için alt kısımdan kısmen geçen akış görülmemektedir. Bu nedenle, sadece saat yönünde dönen girdaplar oluşmaktadır. Tam temas halinde akış kontrolü uygulanmamış pürüzsüz küre ve pasif kontrol uygulanmış diğer kürelerin etrafındaki akış yapısı benzerlik göstermektedir. Boya deneylerinde küre art izinde oluşan Kelvin-Helmholtz girdapları A, B, C, D, F ve G ile gösterilmiştir (Şekil 4.64). Anlık girdap eş düzey eğrilerinden (Şekil 4.68). Kelvin-Helmholtz girdaplarının şiddeti görülebilmektedir. Art izi içinde genellikle negatif değerdeki girdap yapıları hakimdir. Ancak delikli küre durumunda (Şekil 4.68, Sütun IV) küre deliğinden gelen akış art izi bölgesi içine pozitif değerde girdaplar taşımaktadır. Delik içerisinden art izi bölgesine boşalan akış küre art izi bölgesindeki durgun veya ters akışla etkileşerek delik üst kısımda saat yönünün tersinde dönen pozitif girdapların alt kısımda ise saat yönünde dönen negatif girdapların oluşmasına neden olmuştur.

En küçük açıklık oranı G/D=0.1'de, pürüzsüz küre, pürüzlü küre ve delikli küre durumlarında küreyle levha arasındaki boşluktan oluşan jet akış hızlıca kürenin arkası boyunca art izi bölgesi içine taşınmakta ve üst kayma tabası ile etkileşime girmektedir. Bu etkileşim girdap kopma karakteristiklerini etkilemektedir ve ısı transferi olayını iyileştirmeyle sonuçlanan iyi bir akış karışımı oluşturmaktadır. Ancak o-ringli küre durumunda bu olay gerçekleşmemektedir. O-ringin etkilediği jet akış levhaya paralel şekilde aşağı akım yönünde ilerlemiştir.

Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda boya deneylerinden (Şekil 4.68) görüldüğü gibi pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürenin art izi levhaya dik doğrultuda yukarı yönde kaymıştır. O-ringli kürede ise art izi levhaya yönelim göstermiştir. Bu durum anlık girdap eş düzey eğrilerinden de görülebilmektedir. Pürüzlü ve o-ringli küre durumunda oluşan girdaplar birbirine görünüş olarak benzemektedir. Ancak o-ring ve pürüzlülüğün etkisinden dolayı girdaplar arasındaki mesafe kısalmaktadır. Pürüzsüz küre ve pürüzlü kürede Kelvin-Helmholtz girdapları arasındaki mesafeler daha uzun olurken delikli küre ve o-ringli kürede girdaplar bir birine daha yakın mesafelerde oluşmuştur (Şekil 4.67). O-ringli kürede Kelvin-Helmholtz girdapları daha türbülanslı bir yapıda oluşurken delikli kürede daha düzgün ve laminer bir yapıda oluşmuştur.

Açıklık oranı G/D≥0.25 durumlarında anlık değerler incelendiğinde küre etrafındaki akış yapısının levha etkisinden kurtulmaya başladığı gözlemlenmiştir. O-ringli küre hariç diğer kürelerde Karman Girdap Caddelerinin kısmen oluşmaya başladığı görülmektedir.

Delikli küre durumunda yüksek basınç tarafından düşük basınç tarafına doğru delik içerisinden oluşan akış art izi bölgesinin enerjisini artırarak art izi bölgesinin genişliğini kısmen daraltmaktadır. Bu durum anlık girdap eş düzey eğrilerinden de açıkça görülmektedir. G/D=0.1 ve 0.25 açıklık oranlarında delikten gelen jet akış ve küre-duvar arasındaki boşluktan olan jet akış birleşip art izi bölgesini daraltarak kısaltmaktadır (Şekil 4.68). En düşük açıklık oranı G/D=0.1 için oluşan şiddetli jet akışın taban yüzeyinde önemli oranda aşınmalara neden olabileceği nitel ve nicel olarak gösterilmiştir. G/D=1.5 durumunda, pürüzsüz kürenin art izi bölgesinde KGC oluşmaya başladığı boya deneylerinden gözlemlenmiştir (Şekil 4.67). O-ringli küre durumunda ise bu durumun art izindeki serbest durma noktasının küreye doğru yaklaşmasından dolayı oluşumu azalmıştır.

Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'de sınır tabaka içindeki pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II),o-ringli küre (Sütun III) ve delikli (Sütun IV) için ortalama girdap eş düzey eğrileri verilmiştir. Girdap yapıları P, Q, R, a ve b harfleri ile gösterilmiştir. Burada P kürenin üst kayma tabakasından kopan girdap yapılarını, Q kürenin alt kısmından kopan girdap yapılarını, R levha yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmalarından kaynaklanan girdapları, a ve b ise delikli kürenin deliğinden art izine boşalan akışın oluşturduğu girdap yapılarını simgelemektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kürenin levhaya tam temas ettiği durumda akış sadece kürenin üst kısmından ayrılmaktadır. Bunun sonucunda da art izi bölgesinde sadece negatif değerdeki girdaplar oluşmuştur. Anlık girdap eş düzey eğrilerinde görülen art izi içindeki küçük ölçekli girdaplar ortalama değerlerde oluşmamıştır. Bunun nedeni bu girdapların daimi olmayan akış yapısı içinde zamanla yok olmasındandır. G/D=0 durumunda pürüzsüz, pürüzlü ve o-ringli küre durumları için yalnızca P girdap yapısı oluşurken delikli kürede delikten boşalan akışın etkisi ile a ve b girdapları da oluşmuştur. Pürüzsüz kürede daha uzun bir yapıda olan P girdap yapısı pürüzlü ve delikli kürede kısmen küçülmüş, o-ringli kürede ise büyük oranda küçülmüştür (Şekil 4.70).

Açıklık oranı G/D=0.1 olduğunda pürüzsüz, pürüzlü ve delikli küre durumlarında küre ile levha arasından meydana gelen jet akış küre sırtını takip ettiği için Q ile gösterilen pozitif ve R ile gösterilen negatif girdap yapıları art izi bölgesi içine doğru küre sırtı boyunca yayılmıştır. Delikli kürede pozitif Q girdabı küre deliğinden gelen negatif b girdabının bir kısmını sönümlerken negatif P girdabı b girdabı ile birleşmiştir. O-ringli küre durumunda ise bu olaylar gerçekleşmemiştir. Q ve R

girdapları levhaya paralel bir doğrultuda oluşmuştur. Ancak, bu aralıkta Q ve R girdapları bütün küre durumlarına bir birine yapışık şekilde oluşmuştur (Şekil 4.70).

Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda küre ile levha arasındaki mesafenin artması ile azalan küre art izi ile levha etkileşiminden dolayı Q ve R girdapları bir birinden ayrılmıştır. Pürüzsüz küre, pürüzlü küre ve delikli küre durumlarında R girdabı levha yüzeyinden yukarı doğru oluşmaktadır. Bu levha yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmasından kaynaklı bir durumdur. R girdabının şiddeti pürüzlü küre durumunda (pürüzsüz küreye göre) azalma göstermemekte delikli küre durumunda ise kısmen azalmıştır. Delik içinden art izi bölgesine hücum eden akış art izi bölgesinin basıncının bir miktar yükselmesini sağlamakta bu da levha yüzeyindeki sınır tabaka akışının ayrılmasını bir miktar engellemektedir. O-ringli küre durumunda ise R girdabının değeri büyük oranda düşerken yapısal olarak incelendiğinde levhaya paralel bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Küre ile levha arasındaki jet akışın oluşturduğu hız profili levhanın hemen yüzey kısmında dönümlü bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Kürenin art izi bölgesindeki düşük basınç etkisi de bu dönümlü bölgeyi yukarı yönde çekmektedir. Pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürede R girdabının yukarı yönelmesinin nedeni budur. Ancak o-ring küre çevresinden gerçekleşen akışta, akış ayrılmasını ciddi miktarda geciktirdiği için daha küçük bir art izi oluşturmaktadır ve bu da art izi basıncının yükseleceği şeklinde yorumlanabilir. Bu nedenle, R girdabı oluşmakta ancak, yukarıya doğru yönelmemektedir.

Açıklık oranı G/D=0.50 olduğunda R girdapları etkisini kaybetmiştir. Pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürede P girdapları Q girdaplarından daha büyük oluşmuştur. Bu durum daha yüksek açıklık oranlarında da bu şekilde gerçekleşmiştir. Bunun nedeni sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilidir. Üst kısımlarda daha fazla olan akış hızı daha güçlü girdap oluşumlarına neden olmaktadır. O-ringli kürede de benzer durum gerçekleşmiştir. P girdabı diğer kürelere göre ciddi oranda küçük boyutta oluşmuştur. Q girdabı ise art izine doğru yönelmiş bir biçimde oluşarak art izi bölgesinde simetrik olmayan bir yapı oluşturmuştur. Delikli küredeki a ve b girdaplarının büyüklükleri ise açıklık oranının artması ile artmıştır. Bu durum sınır tabaka hız profilinde yukarı doğru çıktıkça delikten geçen akışkan debisinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Açıklık oranı G/D≥0.75 değerlerinde (Şekil 4.71) pürüzsüz küre, pürüzlü küre ve delikli küre durumlarında P girdabı Q girdabından daha büyük şiddette oluşmuştur. O-ringli küre durumunda ise bu iki girdabın büyüklükleri eşitlenmiştir. O-ring sınır tabaka akışının küre art izi üzerindeki etkisini azaltmıştır. Örneğin, yukarda belirtildiği gibi

akış daha düşük açıklık oranlarında simetrik yapıya ulaşmıştır. Ortalama girdap eş düzey eğrileri incelendiğinde en etkili akış kontrol yönteminin o-ring olduğu görülmüştür. Akış karakteristiklerinde ortalama değerlerdeki düşüş sürüklenme katsayısında düşüşe neden olacağı şeklinde yorumlanabilir. Ancak, küt cisimlerde sürüklenme katsayısındaki düşüş kadar sürüklenme katsayısında meydana gelen çalkantıların düşmesi önemlidir. Bu yüzden türbülans istatistiklerinin de incelenmiştir.

Kürenin levha ile temas ettiği durum olan G/D=0 açıklık miktarında ortalama vektör <V> alanlarından (Şekil 4.72) her bir kürenin akışta neden olduğu bozulma görülebilmektedir. Sınır tabaka akışı küreye çarptığında küre yüzeyinden ayrılmış ve kürenin art izi bölgesi denilen arka kısmında dönümlü bir akış bölgesi oluşturmuştur. Vektörlerin yönelimi incelendiğinde akışın belirli bir mesafe sonra levha yüzeyine tekrar birleştiği görülmektedir. Şekil 4.72'de art izi bölgesindeki hız bileşenlerinin düşük olmasından dolayı art izi bölgesi açık renkte görülmektedir. O-ringli kürede ise bu açık bölge diğerlerine göre daha azdır. Delikli kürede, delik içinden art izi bölgesine boşalan akışın oluşturduğu hız vektörleri rahatlıkla görülebilmektedir. Delik içinden art izi bölgesine boşalan akış art izi bölgesinde enerjisi yüksek, hızlı bir bölge oluşturmuştur. Art izi bölgesindeki geri akışın etkisi ile delikten gelen akış serbest akıma dik doğrultuda yukarı yönde kaymıştır. Şekil 4.74'te aynı durumun ortalama vektör alanından hesaplanmış ortalama akım çizgileri $\langle\psi\rangle$verilmiştir. Ortalama akım çizgilerinden kürelerin art izi bölgelerinin boyutları hakkında daha kesin bilgilere ulaşılabilir. Ayrılan akışın levhaya birleştiği yer ile küre merkezinin uzaklığının küre çapına oranı pürüzsüz küre, pürüzlü küre, o-ringli küre ve delikli küre için sırasıyla 2.01D, 1.96D, 1.53D ve 1.96D'dir. Görüldüğü gibi art izi en çok o-ringin etkisi ile küçülmüştür. Ortalama akım çizgilerinden art izi içinde oluşan dönümlü akış bölgelerinin odak noktası F_1 görülmektedir. Delikli kürede delikten gelen akış dönümlü akış bölgesi ile birleşerek ortak bir odak noktası oluşturmuştur.

Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin $\langle u^* \rangle$ karşılaştırılması verilmiştir. G/D= 0 için verilen değerler (Şekil 4.76) art izi bölgesi içinde gerçekleşen geri akış büyüklükleri hakkında bilgi vermektedir. Art izi bölgesinde gerçekleşen geri akış art izi bölgesindeki düşük basıncın etkisinden dolayıdır. Eğer art izindeki basınç düşüşü azaltılabilirse geri akış değerleri azalacak dolayısıyla sürüklenme katsayısı da azalacaktır. Akım doğrultusundaki negatif hız bileşeninin tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla serbest akım hızının %37, %35, %19 ve %35 mertebesinde ölçülmüştür. En yüksek değer

pürüzsüz küre en düşük değer ise o-ringli küre için çıkmıştır. Pürüzlü küre ve delikli kürede ise aynı mertebelerde çıkmıştır. Ancak, delikli kürede tepe değeri serbest akım hızının %72'si olan pozitif hız bileşeninin olduğu bir bölge oluşmuştur. Akım doğrultusundaki ortalama hız bileşeni $<u^*>$ eş düzey eğrileri üzerindeki daire kesitli nokta ise hızın sıfır olduğu yerleri göstermektedir. G/D=0 için bu yer ortalama akım çizgilerinde (Şekil 4.74) gösterilen akışın levha yüzeyine tekrar birleştiği yer olan R ile aynı konumu göstermektedir.

Açıklık oranı G/D= 0.1'e yükseltildiğinde ortalama vektör <V> alanlarından (Şekil 4.72) küre ile levha arasında gerçekleşen jet akış yapısı ayrıntılı olarak görülebilmektedir. Pürüzsüz ve pürüzlü kürede, küre ile levha arasında gerçekleşen jet akış küre sırt bölgesi boyunca serbest akıma dik doğrultuda yukarı yönde (y ekseni doğrultusunda) hareket etmiş, küre üst kısmındaki kayma tabakası ile güçlü bir etkileşime girmiştir. Üst kısma ulaşan jet akış uç kısmında ikiye ayrılmış bir kısmı aşağı akım yönünde giderken bir kısmı da yukarı akım yönüne kaymıştır. Akım yönündeki ortalama hız bileşeni <u*> eş düzey eğrilerinden de (Şekil 4.76.) görüldüğü gibi jetin yukarı akım yönünde kayması ile küre arkasında negatif hız bileşenleri oluşmuştur. Delikli kürede, küre ile levha arasındaki boşluktan gelen jet akış küre sırtı boyunca y ekseni doğrultusunda yukarı doğru yönlenmektedir. Ancak, ortalama vektör alanlarından <V> (Şekil 4.72, Sütun IV) görüldüğü gibi delik içinden gelen jet akış küre alt kısmından gelen jet akışı aşağı akım yönünde itmiştir. Bu nedenle, küre altından gelen jet akışın küre üst kısmındaki ayrılma tabakası ile etkileştiği kısmı aşağı akım yönünde kaymıştır. Bu iki jet akışın ve küre üst kısmındaki serbest kayma tabakasının etkileşimi bu bölgede farklı bir akış yapısı oluşturmuştur. Ortalama akım çizgileri <ψ> (Şekil 4.74, Sütun IV) yapılarında bu yerde oluşan dönümlü akış bölgesinin yapısı görülmektedir. F_3 ve F_2 bu yerde oluşan iki adet dönümlü akış bölgesinin odak noktalarını S_3 ise durma noktasını göstermektedir. Pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürede (Şekil 4.74, Sütun I, II ve IV), küre ile levha arasından gerçekleşen jet akışın hemen aşağı akım yönünde gerçekleşen büyük bir ayrılma kabarcığının odak noktası olan F_1 oluşmuştur. Levha yüzeyinde ise S_1 ve S_2 ile gösterilen iki adet durma noktası oluşmuştur. O-ringli kürede ise ortalama akım çizgileri (Şekil 4.74, Sütun III) serbest akıma maruz kalan küre art izine benzeyen ancak simetrisi bozulmuş bir art izi bölgesi oluşmuştur. Üst kayma tabakasından ayrılan akış F_1 alt kayma tabakasından ayrılan akış ise F_2 odak noktalı dönümlü akış bölgesini oluşturmuş, ve F_2, F_1'den aşağı akım yönünde

daha ileride oluşmuştur. Akım yönündeki ortalama hız bileşeni <u*> eş düzey eğrilerinden (Şekil 4.76) her bir kürenin altında meydana gelen jet akışın serbest akım doğrultusundaki şiddeti anlaşılabilmektedir. Akım yönündeki ortalama hız bileşeninin <u*> tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla serbest akım hızının %36, %36, %52 ve %27'si mertebesindedir. O-ringli küre durumunda, jet akışın y ekseni boyunca yukarı yönde değil de x ekseni boyunca aşağı akım yönünde ilerlemiş olması <u*> hız bileşeninin tepe değerinin en büyük çıkmasına neden olmuştur.

Açıklık oranı G/D=0.25 olduğunda küre ile levha arasındaki jet akış bütün küre durumlarında benzer yapı oluşturmuştur. Bu durum kürelerin art izlerinde bir birlerine kıyasla yapısal olarak çok fazla bir değişikliğin olmaması ile sonuçlanmıştır. Ancak, art izi bölgesi büyüklüklerinde değişiklikler vardır. Ortalama hız vektörlerine<V> (Şekil 4.72) bakıldığında yine en küçük art izinin o-ringli küreye ait olduğu görülmektedir. Pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürelerin art izleri y ekseni doğrultusunda yukarı akım yönünde sapmıştır. O-ringli kürede ise art izi serbest akım doğrultusuna kısmen paralel durmaktadır. Bu durum ortalama akım çizgileri <ψ> yapıları (Şekil 4.74) incelendiğinde daha rahat görülebilir. Küre art izlerine bakıldığında pürüzsüz, pürüzlü ve o-ringli kürede odak noktaları F_1 ve F_2 olan iki adet dönümlü akış bölgesi ve bir adet durma noktası (S_1) oluşmuştur. Delikli kürede ise odak noktaları F_1, F_2 ve F_3 olan üç adet dönümlü akış bölgesi ve iki adet (S_1 ve S_2) durma noktası oluşmuştur. F_1 ve F_2 kürenin alt ve üst kısmında ayrılan akışlar nedeniyle oluşurken F_3 küre deliğinden art izine boşalan jet akışın etkisi ile oluşmuştur. S_2 durma noktası ise delikten gerçekleşen akışın küre alt kısmından ayrılan akışla etkileşiminden oluşmuştur. Küre merkezi ile durma noktası S_1 arasındaki mesafenin x ekseni üzerindeki uzunluğunun küre çapı cinsinden değeri olarak tanımlanan art izi uzunluğunun pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için değerleri sırasıyla 1.25D, 0.96D, 0.94D ve 1.22D'dir.Bu durumda en küçük art izi bölgesi pürüzlü ve o-ringli kürede çıkmıştır. Ancak, o-ringli küre hem uzunluk olarak hem de genişlik olarak en küçük art izi bölgesine sahiptir. Bu açıklık oranında (G/D=0.25) akım yönündeki ortalama hız bileşenlerine <u*> (Şekil 4.76) bakıldığında delikli kürede küre art izi bölgesinde oluşan negatif hız bölgesinin küre deliğinden gerçekleşen jet akışın etkisi ile ikiye bölündüğü görülmektedir. Jetin üst kısmındaki negatif hız bölgesinin en yüksek değeri -0.33'tür. Jetin alt kısmında ise küçük bir değer olduğu için şekillerde görülmemiştir. Yine bu değerler pürüzsüz, pürüzlü ve o-ringli küre için sırasıyla -0.35, 0.31 ve -0.24'tür. Geri akış şiddetinin en düşük olduğu durum

yine o-ringli küredir. Küre altından gerçekleşen jet akışların eş düzey eğrilerinin tepe noktalarının değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırası ile 1.00, 0.97, 1.04 ve 0.99'dur. Görüldüğü gibi sınır tabakanın bu kadar aşağı seviyelerinde levhanın hemen üst kısmında kaymama koşulundan dolayı hızların serbest akım hızından düşük çıkması gerekirken kürenin etkisi ile sıkışıp ivmelenen akış serbest akım hızlarına kadar çıkmıştır. G/D=0.25 için ortalama vektör alanlarında<V> (Şekil 4.72) pürüzsüz, pürüzlü ve delikli küre durumları için küre merkezlerinden 1D (42.5 mm) ve 2D (85 mm) uzaklıkların arasında kalan bölgede açık renkli (düşük hızlı) bir bölge görülmektedir. Bahsedilen bölgenin ortalama akım çizgileri yapıları<ψ> (Şekil 4.74) incelendiğinde de pürüzsüz küre ve pürüzlü küre durumunda odak noktası F_3 ile delikli küre durumunda ise odak noktası F_4 ile gösterilen dönümlü akış bölgesi oluşmuştur. Bu bölgelerin uzunluğu 0.5D kadardır. Bunun nedeni, levha yüzeyindeki akış ayrılmalarıdır. O-ringli küre durumunda ise bu yapılar oluşmamıştır.

G/D=0.5 olduğunda levha yüzeyindeki akış ayrılmaları artık gerçekleşmemektedir. Küre artık levhadan yeterince uzaklaşmış ve sınır tabakanın levha yüzeyine yakın kısmında bir akış ayrılması olmamaktadır. Ancak, sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profili ve küre ile levhanın arasında sıkışan akışın ivmelenmesi küre art izini etkilemektedir. Kontrol uygulanmamış pürüzsüz küre incelendiğinde ortalama akım çizgileri yapılarından (Şekil 4.74, Sütun I) de ölçülebileceği gibi art izi hala serbest akıma maruz kalan kürenin art izinden küçüktür. Bütün küre durumlarında küre art izlerindeki simetrik olmayan yapı devam etmektedir. O-ringli kürenin art izi bir önceki açıklık oranı G/D=0.25'e göre y ekseni doğrultusunda yukarı yönde kaymıştır. Akım yönündeki ortalama hız bileşeni $< u^* >$ eş düzey eğrilerinin negatif bölgesindeki tepe değeler o-ringli küre durumunda en düşük mertebede oluşmuştur. Delikli kürede, küre deliğinden gerçekleşen jet akış art izindeki negatif hız bölgesini ikiye bölmüştür. G/D=0.25 açıklık miktarında tam olarak belirgin olmayan küre deliğinden art izi bölgesine boşalan jetin alt kısmında bulunan negatif hız bölgesi belirgin hale gelmiştir.

Açıklık oranı G/D=0.75 ve 1.0 için küre levhadan yeterli uzaklığa çıktığı için sınır tabaka akışının küre ile levha arasında kalan kısmı ivmelenmemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu aralıkta sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profili etkilidir. Pürüzsüz kürenin art izi uzunluğu G/D=0.75 iken 1.15D, G/D=1.0 iken 1.35D'dir. Kürenin yukarı doğru kaldırılması ile art izindeki uzama pürüzlü ve delikli küre için de gerçekleşmiştir. Pürüzlü kürenin art izi G/D=0.75 için 1.21D ve G/D=1.0 için 1.32D olurken delikli kürede G/D=0.75 için1.21D ve G/D=1.0 için 1.39D olmuştur.

Açıklık oranının G/D=1.25 ve 1.5 değerlerinde küre üzerinde sınır tabaka akışının etkisi de azalmıştır. Açıklık oranı G/D=1.5'te pürüzsüz ve pürüzlü kürenin art izi bölgesinde meydana gelen negatif hız bölgesinin tepe değerleri bir önceki açıklık oranlarına göre en yüksek seviyeye ulaşmıştır. (Şekil 4.77, Sütun I ve II, Pürüzsüz küre için bu değer -0.42, pürüzlü küre için -0.41'dir.) Açıklık oranının en yüksek seviyesi olan G/D=1.5'te o-ringli kürenin art izi bölgesindeki negatif hız bölgesinin şiddetinin tepe değeri en düşük çıkmıştır. Bu seviyede negatif hız bölgesindeki <u*> eş düzey eğrileri -0.19 değerini göstermektedir. Başka bir ifadeyle bu bölgede serbest akım hızının %19 büyüklüğünde ve ters yönünde bir akış küreye hücum etmektedir. Pürüzsüz kürede ise bu değer %42 mertebesinde olmakla birlikte o-ringli küredekinin yaklaşık iki katıdır. Geri akışın değerlerinin azalması küre arka kısmındaki akış nedenli aşınmaları önleyeceği gibi sürükleme katsayısının düştüğüne de bir işarettir. Delikli kürede ise geri akış hızının en yüksek tepe değeri serbest akım hızının %32'si kadardır. Delikli kürede geri akış hızının azalmasının nedeni kürede bulunan delikten geçen jet akıştır. Jet akış küre art izine dolarak art izinin basınç düşüşünü azaltmakta ve aynı zamanda geri yönde akan akışkan parçacıklarını ileri yönde itmektedir. Ortalama akım çizgilerine bakıldığında (Şekil 4.75) delikli kürede üç adet dönümlü akış bölgesinin oluştuğu görülmüştür. F_1 ve F_2 kürenin üst ve alt kısmından ayrılan akışın oluşturduğu dönümlü akış bölgesinin odak noktaları iken F_3 delik içerisinden art izine boşalan jet akışın oluşturduğu dönümlü akış bölgesinin odak noktasını göstermektedir. Eğer tam simetrik bir akış yapısı elde edilmiş olsaydı delikten gelen jet akış, delik simetri ekseninin hem alt hem üst kısmında dönümlü akış bölgesi oluşturması beklenirdi. Ancak, sınır tabakanın simetrik olmayan hız profilinin de etkisi ile yalnızca üst kısımda böyle bir akış yapısı oluşmuştur.

Şekil 4.79'de akım yönündeki ortalama hız bileşenlerinin çalkantı değerleri $<u^*_{rms}>$ ve Şekil 4.80'de akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşenlerinin çalkantı değerleri $<v^*_{rms}>$ Reynolds sayısının 5000 değerinde ve küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0, 0.10, 0.25 ve 0.50 için karşılaştırılması verilmiştir. Kürenin levhaya tam temas ettiği durum incelendiğinde $<u^*_{rms}>$ hız çalkantı değerlerinin büyüklüklerinde kullanılan akış kontrol yöntemlerine göre bir değişim gerçekleşmemiştir. Ancak, çalkantı şiddetlerinin tepe değeri aldığı yerlerin küreye olan uzaklığı farklı olmuştur. O-ringli kürede tepe değerin aldığı yer küre sırtına tamamen yaklaşmıştır. Tepe değerin küre sırtına en uzak mesafede oluştuğu yer pürüzsüz kürede olmuştur. Genel bir

karşılaştırma için $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre (üst kayma tabakasında oluşan) için en yüksek tepe değerleri sırası ile 0.205, 0.209, 0.204 ve 0.200'dür. Görüldüğü gibi en düşük değer delikli küre için çıkmıştır. Ancak, delikli kürenin deliğinden art izine boşalan akışın neden olduğu çalkantı 0.296 değeri ile yüksek çıkmıştır. Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşeni çalkantılarının $\langle v^*_{rms} \rangle$ en yüksek tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla 0.219, 0.217, 0.202 ve 0.206 olarak hesaplanmıştır. Pürüzsüz ve pürüzlü kürenin $\langle v^*_{rms} \rangle$ değerleri yaklaşık aynı olurken en düşük değer o-ringli küre durumunda meydana gelmiştir. Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşenleri çalkantılarının $\langle v^*_{rms} \rangle$ şiddetleri, akım yönündeki ortalama hız bileşenleri çalkantılarının $\langle u^*_{rms} \rangle$ şiddetlerinden daha büyük çıkmıştır. Bu durumda kürenin levhaya tam temas ettiği aralıkta serbest akım doğrultusuna dik doğrultuda art izine doğru olan akış baskın akış şeklidir.

Açıklık oranı G/D=0.10 olduğunda küre ile levha arasında meydana gelen jet akış $\langle u^*_{rms} \rangle$ şiddetlerini pürüzsüz küre, pürüzlü küre ve delikli küre için önemli oranda değiştirmiştir. O-ringli kürede ise daha önce anlatılan, jet akışın bu konumdaki farklı yapısından dolayı çok değişim olmamıştır. Açıklık oranı G/D=0'dan G/D=0.10'a artırıldığında pürüzsüz, pürüzlü, ve delikli kürede üst kayma tabakasında meydana gelen çalkantı şiddetlerinin tepe değerleri sırasıyla %0.23, % 31 ve %29 oranında artış göstermiştir. Delikli kürede $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrileri üst kayma tabakasında üç noktada tepe değer almıştır. Delikten geçen akışta meydana gelen $\langle u^*_{rms} \rangle$ çalkantılarının en yüksek tepe değeri ise 0.296'dan 0.217'ye düşmüştür. Jet akışın etkisinden kaynaklanan hız çalkantılarının en yüksek tepe değerleri $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinde pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla 0.208, 0.221, 0.210 ve 0.189 olarak belirlenmiştir. Küre ile levha cidarlarının hemen yakınında oluşan bu çalkantıların akış-yapı etkileşimi sonucu aşındırıcı etkileri olmaktadır. Şekil 4.80'deki $\langle v^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrileri incelendiğinde pürüzsüz küre, pürüzlü küre ve delikli küre durumlarında $\langle v^*_{rms} \rangle$ çalkantı değerlerinin üç noktada tepe değer aldığı görülmektedir. Her üç küre de tepe değerlerini, jet akışın üst kayma tabakası ile etkileşime geçtiği yerde, küre simetri eksenin üst kısmında almıştır. Bu değerler pürüzsüz, pürüzlü ve delikli küre için sırası ile 0.246, 0.243 ve 0.234'tür. En düşük değer delikli küre durumunda çıkmıştır. Bunun nedeni küre altından gelen jet akışın küre sırtı boyunca yukarı yönde (y ekseni doğrultusunda) ilerlerken küre deliğinden geçen jet akışla etkileşime geçmesidir. Küre

deliğinden gelen jet akış alt kısımdan gelen jet akışın yukarı yönde (y ekseni doğrultusunda) ilerlemesine engel olmaktadır. Akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşenleri çalkantıları $<v^*_{rms}>$ eş düzey eğrilerinin tepe değeri aldığı diğer bir nokta ise levhanın üstü ile küre sırt bölgesinin altında kalan yerdir. Bu yer küre ile levha arasından gerçekleşen jet akışın yukarı yönde (y ekseni doğrultusunda) ilerlemeye başladığı konumdur. Burada akım yönüne dik yöndeki ortalama hız bileşenleri çalkantılarının $<v^*_{rms}>$ tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü ve delikli küre için sırasıyla 0.183, 0.130 ve 0.158'dir. Jet akışın bu kısmındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantı değerleri $<v^*_{rms}>$ değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Yani jet akış hızı serbest akım doğrultusunda daha çok çalkalanmaktadır. Diğer tepe değerlerin alındığı noktalar ise yukarı yönde (y ekseni doğrultusunda) giden jet akışın hemen aşağı akım yönünde oluşmuştur. Bu noktaların değeri ve küre merkezinden uzaklığı pürüzsüz, pürüzlü ve delikli küre için sırasıyla 0.158 ve 0.99D aşağı akım yönünde 0.160 ve 1.54D aşağı akım yönünde, 0.114 ve 1.50D aşağı akım yönündedir. O-ringli kürede ise $<v^*_{rms}>$ eş düzey eğrileri 0.217 değerinde bir yerde tepe değeri almıştır.

Açıklık oranı G/D=0.25 için kürenin üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$'in tepe değerleri bir önceki açıklık oranı olan G/D=0.1'e göre önemli derecede artış göstermiştir. Sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinde üst kısımlara çıktıkça artan akış hızıyla birlikte daha güçlü akış ayrılmaları gerçekleşmekte ve çalkantı değerleri artmaktadır. Bu artış pürüzsüz küre, pürüzlü küre, o-ringli küre ve delikli küre için sırasıyla %27, %15, %7 ve %16'dır. Küre deliğinden geçen jet akışın neden olduğu $<u^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek tepe değerinde ise %28'lik artış olmuştur. Kürenin üst kayma tabakasında $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin en yüksek tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla 0.321, 0.313, 0.225 ve 0.300'dür. Bu değerlere bakarak akışı en iyi kontrol eden metodun o-ring ve daha sonra da delikten geçen jet akışın olduğu söylenebilir. Alt kayma tabakalarının $<u^*_{rms}>$çalkantılarının tepe değerleri ise pürüzsüz küre, pürüzlü küre, o-ringli küre ve delikli küre için sırasıyla 0.188, 0.187, 0.243 ve 0.190'dır. Burada en yüksek değer o-ringli küre durumunda çıkmıştır. Üst kayma tabakasında ise o-ringli küre durumunda en düşük değer oluşmuştur. G/D=0.25 açıklık oranında daha önce belirtildiği gibi levha yüzeyinde akış ayrılmaları meydana gelmektedir. Levha yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmaları levhaya dinamik yüklerin etki etmesine neden olur. Akış ayrılmalarının bir sonucu olarak da hız değerleri zamanla değişim gösterir yani çalkantılar meydana gelir. Şekil 4.78'te levha yüzeyinin üst

kısmındaki $\langle u^*_{rms} \rangle$ çalkantı değerleri bütün küre durumları için (G/D=0.25 için) gösterilmiştir. Bu çalkantıların en yüksek tepe değerleri pürüzsüz küre, pürüzlü küre , o-ringli küre ve delikli küre durumu için sırasıyla 0.220, 0.227, 0.195 ve 0.244'tür. Bu değerler o-ringli küre durumunda düşerken delikli küre durumunda %10 artış göstermiştir. G/D=0.25 açıklık değerinde $\langle v^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin oluşturduğu yapı, pürüzsüz küre ve pasif akış kontrolü uygulanmış kürelerde üniform akış şartlarına maruz kalmış kürenin art izine benzer bir yapı oluşturmaya başlamıştır. Ancak, delikli kürenin art izi bölgesindeki $\langle v^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrileri iki noktada tepe değerleri oluşturmuştur. Bu değerlerden 0.185 mertebesinde olan delik içinden meydana gelen jet akışın etkisi ile oluşmuştur. $\langle v^*_{rms} \rangle$ çalkantıları en düşük değerini o-ringli küre durumunda alırken en yüksek değerini akış kontrolü uygulanmamış pürüzsüz kürede almıştır.

Açıklık oranı G/D=0.50'ye yükseltildiğinde pürüzsüz ve pürüzlü kürenin akım yönündeki hız bileşeni çalkantı $\langle v^*_{rms} \rangle$ şiddetleri düşüş göstermiştir. Bu aralık değerine çıkıldığında y ekseni doğrultusunda küre art izi bölgesine gerçekleşen momentum transferi bir önceki açıklık oranına göre azalmaktadır. Çünkü, G/D=0.25'te jet akışın y ekseni doğrultusunda yukarı yönde yönelimi vardır. Bu durum $\langle v^*_{rms} \rangle$ çalkantı şiddetlerini artırmaktadır. Ancak, o-ringli kürede o-ringin varlığı, delikli kürede de deliğin varlığı jet akışın yapısını etkilediği için bu durum o-ringli ve delikli kürede kısmen geçerlidir. Zaten $\langle v^*_{rms} \rangle$değerlerine bakıldığında o-ringli kürenin art izinde oluşan en yüksek çalkantı değeri 0.240'tan (G/D=0.25'de) 0.274'e (G/D=0.5'te) yükselmiştir. Delikli kürede ise 0.246'dan (G/D=0.25'de) 0.255'e (G/D=0.5'te) yükselmiştir. G/D=0.50 açıklık miktarında levha üzerinde meydana gelen akım yönündeki ortalama hız bileşeni çalkantı $\langle u^*_{rms} \rangle$ şiddetlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Akım yönündeki ortalama hız bileşeni çalkantılarının $\langle u^*_{rms} \rangle$ levha yüzeyinde aldığı tepe değerleri ve yerleri Şekil 4.78'de gösterilmiştir. Kürelerin üst kayma tabakalarında oluşan $\langle u^*_{rms} \rangle$ çalkantılarının en yüksek tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırasıyla 0.302,0.347,0.264 ve 0.295'tir. Bu değerler G/D=0.25 açıklık oranına göre kıyaslandığında pürüzsüz ve delikli kürede azalış, pürüzlü ve o-ringli kürede artış şeklinde olmuştur. Delikli kürenin deliğinden art izi bölgesine boşalan akışın $\langle u^*_{rms} \rangle$ çalkantılarının en yüksek tepe değeri ise 0.306'ya yükselmiştir. Alt kayma tabakalarında ise $\langle u^*_{rms} \rangle$çalkantı değerlerinde pürüzsüz ve

pürüzlü kürede %10 artış, o-ringli kürede %32 azalış meydana gelirken delikli kürede her hangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

Şekil 4.79.'da akım yönündeki hızların ortalama çalkantı $<u^*_{rms}>$ değerleri ve Şekil 4.81'de serbest akım yönüne dik yöndeki hızların ortalama çalkantı değerleri $<v^*_{rms}>$ Reynolds sayısının 5000 değerinde ve küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.75, 1.0, 1.25 ve 1.50 için karşılaştırılması verilmiştir.

Daha yüksek açıklık oranlarında (G/D=0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5) küre jet akış etkisinden kurtulmuştur. Pürüzsüz küre $<u^*_{rms}>$eş düzey eğrilerinin küre üst bölgesi kayma tabakasındaki en yüksek değerleri artan yükseklikle birlikte artış göstererek G/D=1.5'te 0.342 değerine ulaşmıştır. Pürüzsüz kürenin alt kayma tabakasındaki çalkantı değerleri ise G/D=0.75, 1.0 ve 1.25 açıklık seviyelerinde G/D=0.5 açıklık seviyesindekine göre küçük çıkarken açıklık seviyesi G/D=1.5 olduğunda aldığı en yüksek değer olan 0.268'e ulaşmıştır. Pürüzsüz kürenin $<v^*_{rms}>$ çalkantı değerleri artan açıklık miktarı ile birlikte lineer bir artış göstermiştir. G/D=0.5 açıklık oranında $<v^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek değeri 0.267 olan pürüzsüz kürede açıklık oranı G/D=0.75,1.0, 1.25 ve 1.5' e çıkarıldığında bu değerler sırasıyla 0.279, 0.300, 0.300 ve 0.337 olmuştur.

Pürüzlü kürede (Şekil 4.78, Sütun II), açıklık oranı G/D=0.5'ten G/D=0.75'e yükseldiğinde kürenin üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek değeri 0.347'den 0.280'e düşerken daha yüksek açıklık miktarlarında artış göstermiş ve 0.320 değerine ulaşmıştır. Alt kayma tabakasındaki (pürüzlü kürenin) $<u^*_{rms}>$çalkantıları ise artan açıklık oranı ile artış göstermiştir. Açıklık oranı G/D=1.5'te $<u^*_{rms}>$çalkantılarının en yüksek değeri 0.228 mertebesine ulaşmıştır. Pürüzlü kürenin $<v^*_{rms}>$çalkantı değerleri G/D≥0.75 açıklık oranlarında küre sınır tabaka ve jet akış etkisinden uzaklaştıkça genel olarak artış göstermiştir. G/D=0.5 açıklık oranında $<v^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek değeri 0.272 olan pürüzsüz kürede açıklık oranı G/D=0.75,1.0, 1.25 ve 1.5'e çıkarıldığında bu değerler sırasıyla 0.291, 0.288, 0.300 ve 0.314 olmuştur.

O-ringli küre durumunda (Şekil 4.78, Sütun II) G/D=0.5 açıklık miktarında 0.264 olan küre üst kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$çalkantılarının en yüksek değeri G/D= 0.75 olduğunda 0.223'e düşerken, 0.163 (G/D=0.5'te) olan alt kayma tabakasının değeri 0.195'e (G/D=0.75'te) yükselmiştir. G/D=1.0 ve 1.25'te sabit kalan küre üst kayma tabakasının $<u^*_{rms}>$çalkantılarının en yüksek değerleri açıklık oranı G/D=1.5 olduğunda 0.243 değerine yükselmiştir. Alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$çalkantılarının en yüksek

değeri ise G/D=1, 1.25 ve 1.5 için sırasıyla 0.217, 0.198 ve 0.240 olarak bulunmuştur. O-ringli kürenin $<v^*_{rms}>$hız çalkantılarının artan açıklık miktarı ile değişimi $<v^*_{rms}>$ hız çalkantı değerleri eş düzey eğrilerinin en yüksek değerlerinden anlaşılabilir. Bu değerler açıklık oranları G/D=0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 için sırasıyla 0.291, 0.288, 0.300 ve 0.314 şeklindedir. Bu aralıkta $<v^*_{rms}>$çalkantı değerleri en yüksek noktasına G/D=1.5 açıklık miktarında çıkmıştır.

Delikli kürenin (Şekil 4.79, Sütun IV) üst kayma tabakasında $<u^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek değerlerinin açıklık oranı G/D=0.75, 1,1.25 ve 1.5 için dağılımı sırasıyla 0.294, 0.267, 0.258 ve 0.279 olurken alt kayma tabakasında sırasıyla 0.186, 0.200, 0.200 ve 0.213'tür. Delikli küre art izinde üst ve alt kayma tabakaları haricinde delik içinden art izine boşalan jet akışın neden olduğu kararsızlıktan dolayı oluşan hız çalkantıları vardır. Bu çalkantıların değeri ise en yüksek açıklık oranı olan G/D=1.5'te 0.325 seviyesine ulaşmıştır. Delikli kürenin art izindeki $<v^*_{rms}>$ (Şekil 4.81, Sütun IV) çalkantıları eş düzey eğrilerinin oluşturduğu yapı incelendiğinde delik içerisinden geçen jet akışın genel akış yapısından ayrı bir tepe değer noktası oluşturmadığı görülmektedir. Değerler Şekil 4.81, Sütun IV üzerinde verilmiştir.

Uygulanan farklı pasif akış kontrol yöntemlerinin etkisini ve bir birlerinden farkını genel olarak anlayabilmek için, kürelerin, küre ile levha arasından oluşan jet akışın etkisinden tamamen kurtulduğu, sınır tabakanın üniform olmayan hız profili etkisinden ise kısmen kurtulduğu açıklık oranı olan G/D=1.5'te $<u^*_{rms}>$ ve $<v^*_{rms}>$ çalkantı değerlerinin dağılımına bakılabilir. Pürüzlü küre için küre üst kayma tabakasında $<u^*_{rms}>$hız çalkantılarının en yüksek değeri %6 azalırken bu azalma o-ringli ve delikli küre için sırası ile %29 ve %18'dir. Pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için alt kayma tabakasındaki $<u^*_{rms}>$hız çalkantılarındaki azalış sırası ile %15, %10 ve %21'dir. $<v^*_{rms}>$ çalkantılarının en yüksek değerlerindeki azalış pürüzlü, o-ringli ve delikli küre için sırası ile %7, %13 ve %24'tür. Her iki çalkantı değerlerinde meydana gelen azalma en çok delikli kürede olmuştur. Zaman ortalaması alınmış akım çizgilerinde art izi en küçük o-ringli küre çıkmıştır. Ancak, türbülans istatistiklerinden olan hız çalkantı değerlerine bakıldığında delikli küre daha başarılı bir akış kontrolü sağlamıştır. Bu durum şu şekilde yorumlanabilir. O-ringli küre en küçük art izine sahiptir ve küçülen art izi artan art izi basıncıyla birlikte daha düşük bir sürüklenme katsayısına sahip olur. Delikli kürede ise art izi küçülmesinden çok çalkantı değerlerinde azalma gerçekleşmiştir. Bu durumda delikli kürenin sürüklenme katsayısında meydana gelen

dalgalanmaların/çalkantıların azalacağı söylenebilir. Başka bir ifadeyle o-ringli küre daha düşük bir sürükleme katsayısına sahipken delikli küre daha az çalkantılı bir sürükleme katsayısına sahiptir. Ancak bu yorum akış görselleştirme ve akış ölçme ile elde edilen sonuçlardan çıkarılmıştır, daha kesin bir yargıya varabilmek için dinamik kuvvetlerin de ölçülmesi gerekmektedir.

Şekil 4.83'te sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre d/D=0.15 (Sütun IV) durumunda akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması sunulmuştur. Daha önce de açıklandığı gibi küre levhaya tam temas ettiği durumda akış ayrılmaları iki boyutlu görüntü düzleminde kürenin üst kısmından gerçekleşmektedir. Akış ayrılmaları küre art izi bölgesinde türbülanslı bir akış yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Küre üst kısmından ayrılan türbülanslı akış yapısının bir sonucu olarak ortaya çıkan Reynolds gerilmeleri $< u'v'/U_\infty^2 >$ art izi bölgesinde negatif değerlerde oluşmuştur. Sadece delikli küre durumunda küre deliğinden art izine boşalan akışın neden olduğu pozitif değerdeki Reynolds gerilmeleri küçük bir küme oluşturmuştur. Delikten boşalan Reynolds gerilmelerinin oluşturduğu kümenin en yüksek değeri 0.011'dir (Şekil 4.83, Sütun IV). Delikli kürede üst kısımdaki akış ayrılmalarının neden olduğu Reynolds gerilmesi ise büyüklük olarak pozitif Reynolds gerilmesinin iki katı kadar ,-0.020 çıkmıştır. Akış kontrolü açısından incelendiğinde uygulanan pasif kontrol yöntemleri Reynolds gerilemelerinde $< u'v'/U_\infty^2 >$ dikkate değerbir değişime neden olmamıştır. Ancak o-ringli kürede Reynolds gerilmelerinin en yüksek değer aldığı konum yukarı akım yönünde küre sırtına doğru yaklaşmıştır. Bunun nedeni o-ring etkisi ile akışın küreye daha yakın bir bölgede türbülanslı yapıya geçmesidir. Yani akış ayrılmasında bir miktar türbülanslılık meydana gelmiş ve ayrılma gecikmiştir.

Açıklık oranı G/D=0.1 olduğunda pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürenin art izinde oluşan negatif değerdeki (küre üst kısmından gerçekleşen akış ayrılmasının olduğu yer) Reynolds gerilemelerinde $< u'v'/U_\infty^2 >$ sırasıyla (Değerler Şekil 4.83 üzerinde verilmiştir) %71, % 95 ve %80'lik artışlar meydana gelirken o-ringli kürede sabit kalmıştır. Pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürede, küre ile levha arasından geçen jet akış iki yerde belirgin şekilde tepe değer alırken o-ringli kürenin altından gerçekleşen jet akış tek bir noktada tepe değer almıştır. Bütün küre durumlarında art izi bölgesinde negatif

değerdeki Reynolds gerilmelerinin oluşturduğu yapı, pozitif olanlara göre daha çok yer kaplamaktadır.

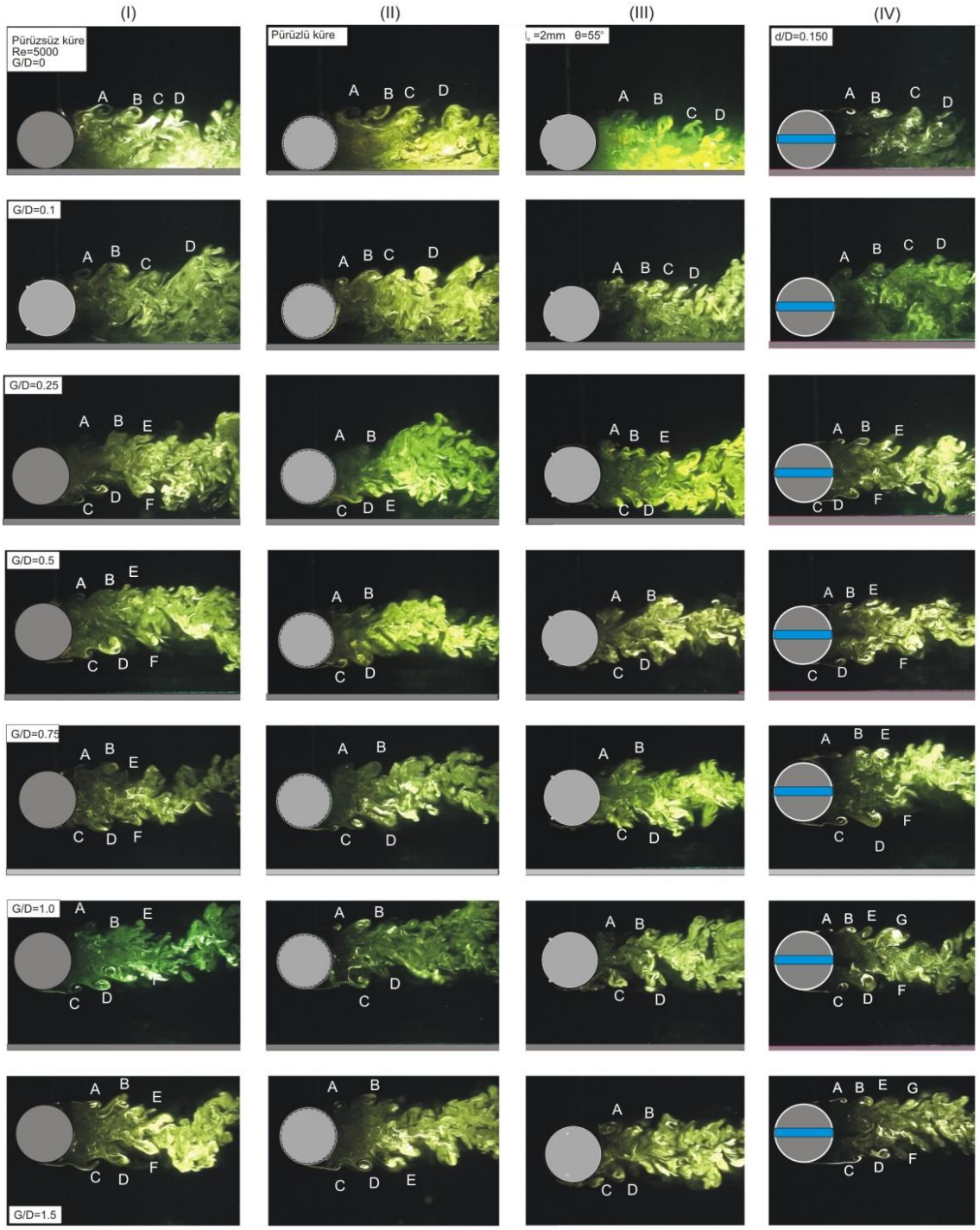
Açıklık oranı G/D=0.25'e yükseltildiğinde pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli kürenin üst kayma tabakasında meydana gelen Reynolds gerilmelerinin bir önceki açıklık oranına göre artış oranı sırasıyla %36, %28, %29 ve %8'dir. En az artış delikli kürede gerçekleşmiştir. O-ringli kürenin art izinde meydana gelen Reynolds gerilemelerinin dağılımı eş düzey eğrilerinin oluşturduğu yapı incelendiğinde gayet simetrik görünmektedir. Üstelik üst ve alt kayma tabakalarında meydana gelen Reynolds gerilmelerinin tek bir tepe değer oluşturduğu en yüksek değerleri de büyüklük olarak eşittir. Diğer küre durumlarında pozitif ve negatif Reynolds gerilemelerinin art izi alanı içerisindeki dağılım alanları eşit görünse de üst ve alt kısımda gerçekleşen gerilme değerleri büyüklük olarak farklı çıkmıştır. G/D=0.25 için delikli kürenin deliğinden art izine boşalan jet formundaki akışın oluşturduğu negatif ve pozitif değerdeki Reynolds gerilmeleri daha belirgin hale gelmiş ve şiddetleri artmıştır.

Açıklık oranı G/D=0.5 olduğunda o-ringli kürenin alt ve üst kayma tabakalarında meydana gelen Reynolds gerilmesi değerlerinde farklı değişimler meydana gelmiştir. G/D=0.25'te jet akış ve o-ringin birleşik etkisiyle simetrik bir yapıda oluşan o-ringli kürenin art izi, açıklık oranı G/D=0.5'e çıkartıldığında jet akış etkisini yitirdiği için artık yukarı yönde yönlenmektedir. Bunun sonucu olarak üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmesi değeri -0.039'a yükselirken, alt kayma tabakasındaki değer 0.019'a düşmüştür. Diğer kürelerin üst kayma tabakalarında meydana gelen değişimler incelendiğinde pürüzsüz kürenin Reynolds gerilme şiddeti -0.045' e, pürüzlü kürenin ki -0.049' a düşmüş delikli kürenin ki ise -0.044' e yükselmiştir. Alt kayma tabakalarında ise küçük de olsa artışlar gerçekleşmiştir.

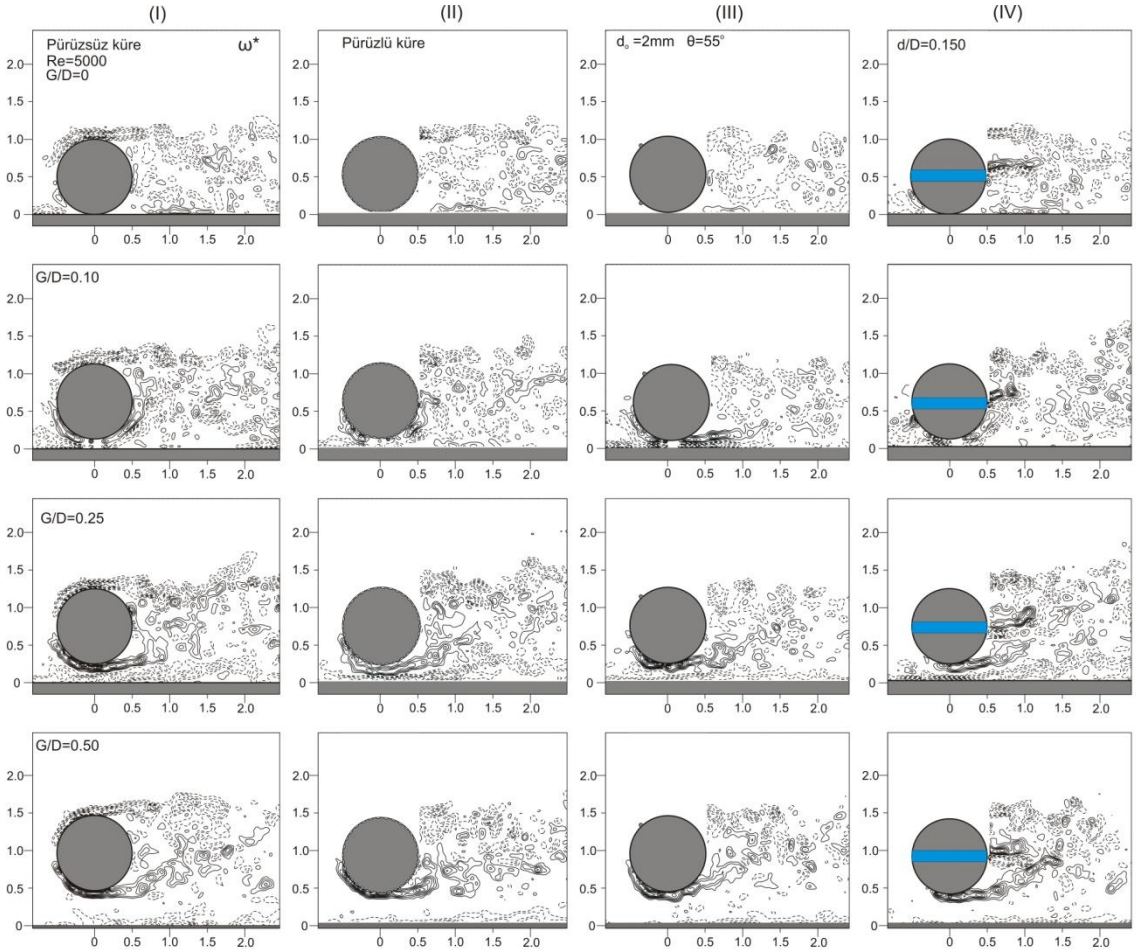
Açıklık oranı G/D=0.75 olduğunda küre üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmelerinin en yüksek değerleri incelendiğinde en düşük gerilme şiddetinin -0.034 değeri ile o-ringli kürede çıktığı görülmüştür. Alt kayma tabakasında ise en küçük gerilme şiddeti 0.020 değeri ile delikli kürede meydana gelmiştir.

Açıklık oranı G/D=1.0 olduğunda negatif değerdeki Reynolds gerilmelerinin (küre üst kayma tabakasında meydana gelen) değerinin en düşük çıktığı durum -0.038 değeri ile o-ringli küre durumudur, alt kayma tabakasında ise pürüzsüz kürede çıkmıştır. Burada belirtilmelidir ki pürüzsüz kürenin üst kayma tabaksında meydana gelen Reynolds gerilmesi diğerlerine göre büyük çıkmıştır.

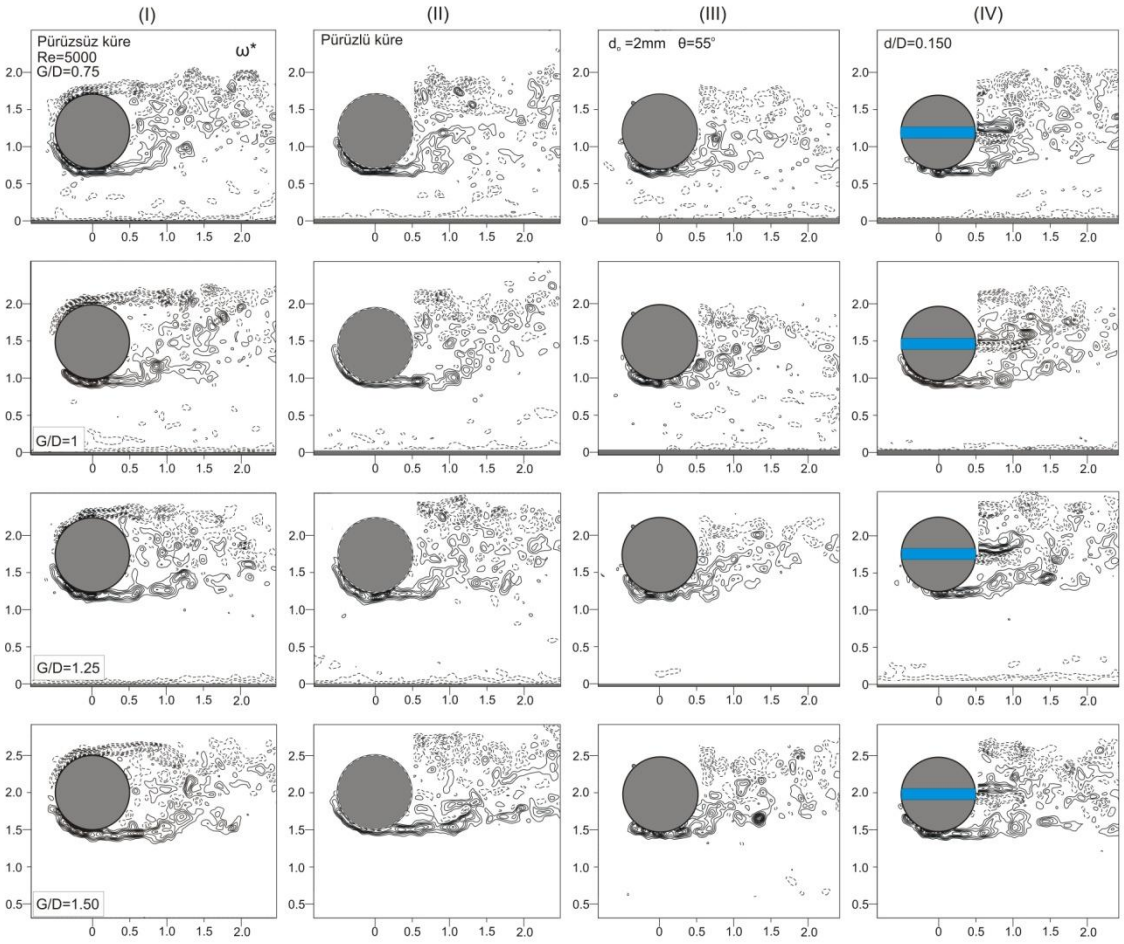
En yüksek açıklık oranı olan G/D=1.5 için değerler incelendiğinde küre üst kayma tabakasındaki Reynolds gerilmelerinin en yüksek değerleri en küçük delikli küre için çıkmıştır, üst kayma tabakasında ise o-ringli kürede meydana gelmiştir. Delikli kürenin deliğinden gerçekleşen jet akış ise 0.020 ve -0.018 değerlerinde simetrik yapıda kürenin hemen sırt kısmında iki adet Reynolds gerilmesi kümesi oluşturmuştur. Pürüzlülük etkisi Reynolds gerilemelerini düşürme noktasında çok başarılı olamamıştır. O-ringli kürenin Reynolds gerilmesi değerleri delikli küreyle karşılaştırıldığında çok farklı olmasa da, Reynolds gerilmesinin akış alanı içerisinde kapladığı alan daha dardır. Bu art izinin daha küçük olmasından kaynaklıdır. Uygulanan akış kontrol yöntemi (o-ring) ile art izi önemli miktarda küçültülebilmiş olsa da, deneylerin gerçekleştiği Reynolds sayısı düşük olduğundan Reynolds gerilmesi değerlerinde büyük değişimler elde edilememiştir. Delikli kürenin art izinde negatif ve pozitif Reynolds gerilmelerinin art arda oluşturduğu yapı küre art izindeki karışım olayını artırıcı etki yapmaktadır. Bu durum ısı transferi uygulamalarında ısı taşınım katsayısının yükselmesini sağlayıcı etki sağlar şeklinde yorumlanabilir.



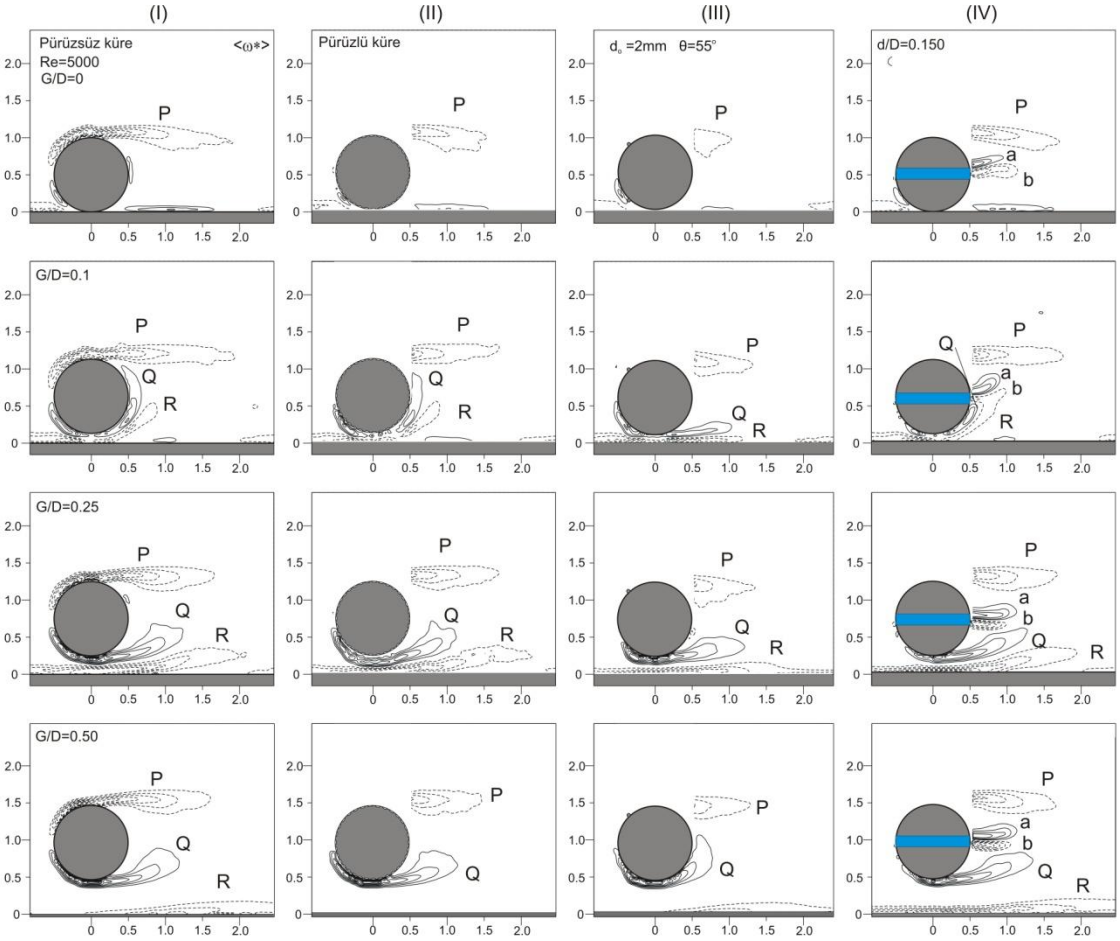
Şekil 4.67. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen küre etrafındaki akış yapısının boya deneyleri ile edilen sonuçları pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



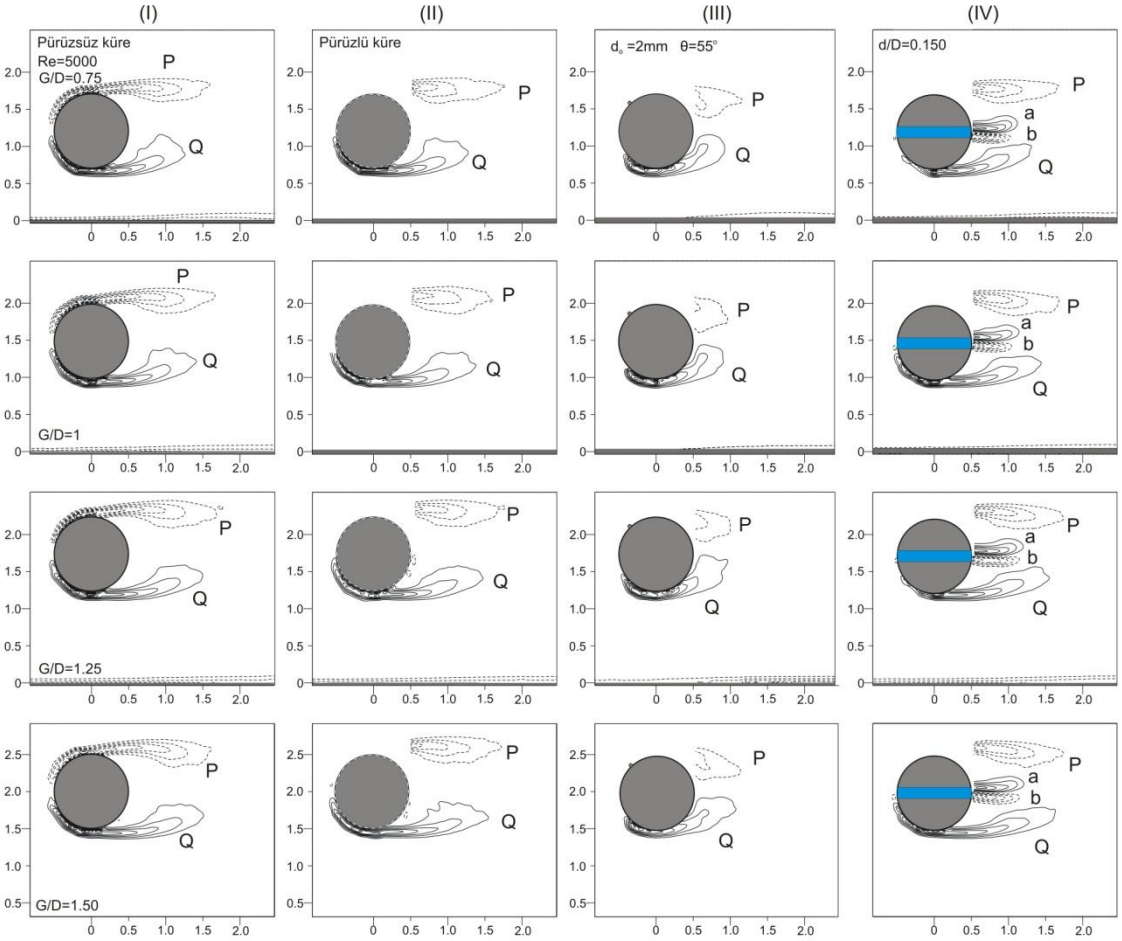
Şekil 4.68. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının anlık girdap eş düzey eğrilerinin $\omega*$ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \omega* \right|_{min} = \left| \Delta\omega* \right|_{min} = 2$'dir.



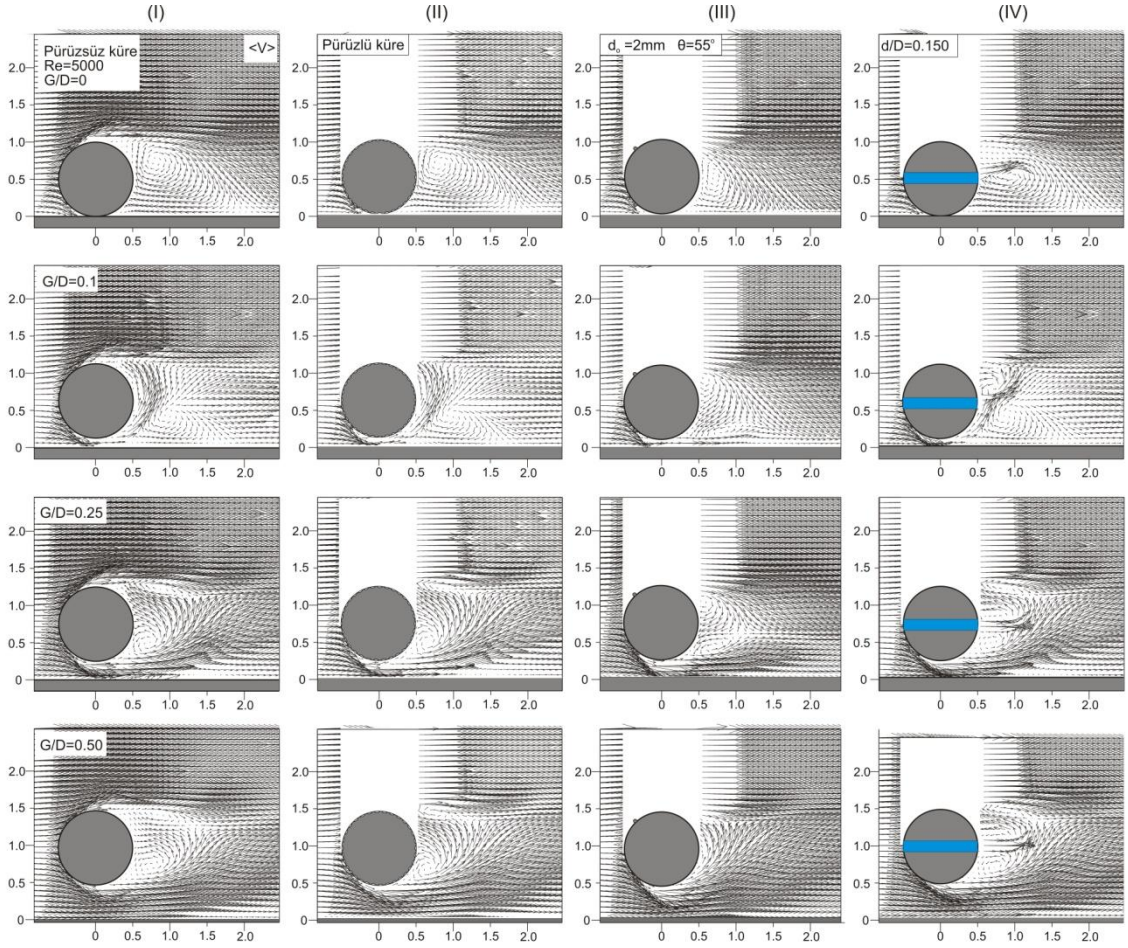
Şekil 4.69. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının anlık girdap eş düzey eğrilerinin $\omega*$ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\omega*|_{min} = |\Delta\omega*|_{min} = 2$'dir.



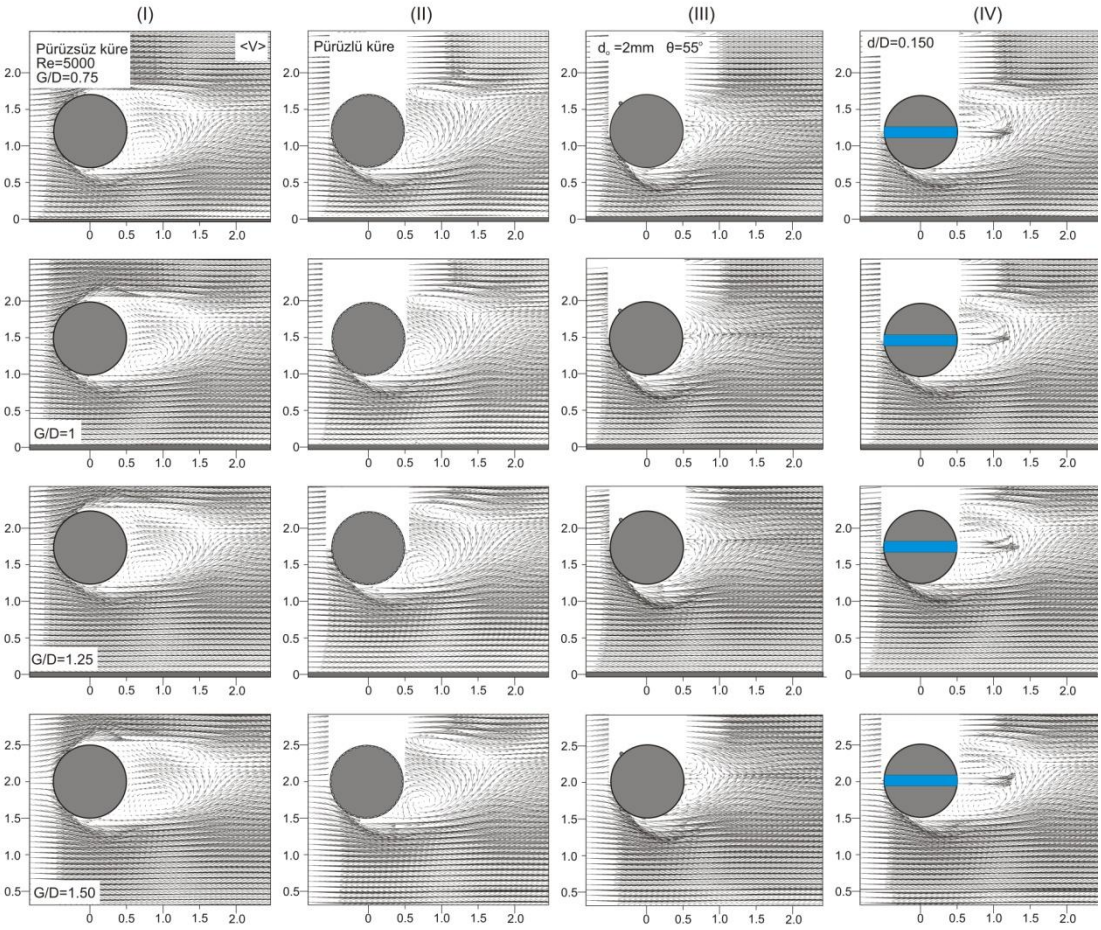
Şekil 4.70. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının anlık girdap eş düzey eğrilerinin ω* küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.5 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\omega^*|_{min} = |\Delta\omega^*|_{min} = 2$'dir.



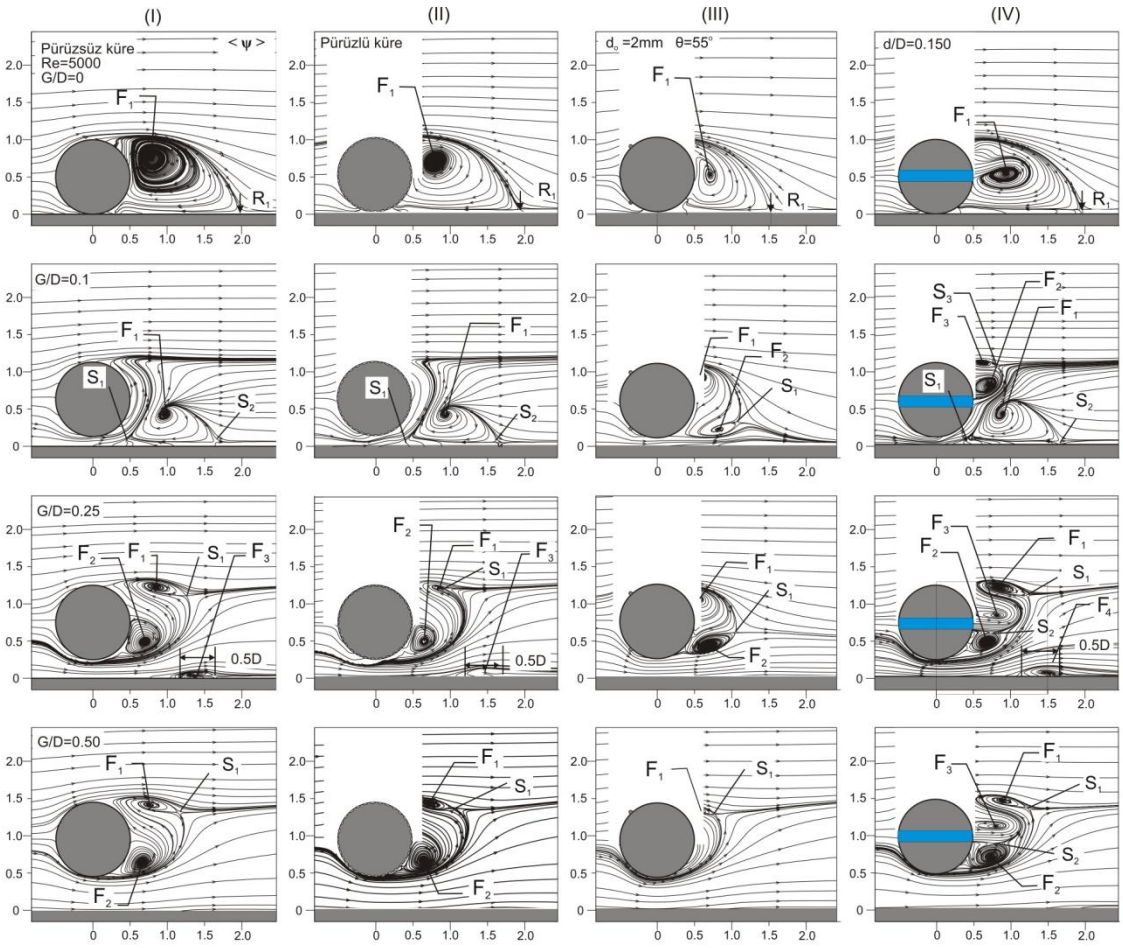
Şekil 4.71. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının anlık girdap eş düzey eğrilerinin ω∗ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.5 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|\omega^*|_{min} = |\Delta\omega^*|_{min} = 2$'dir.



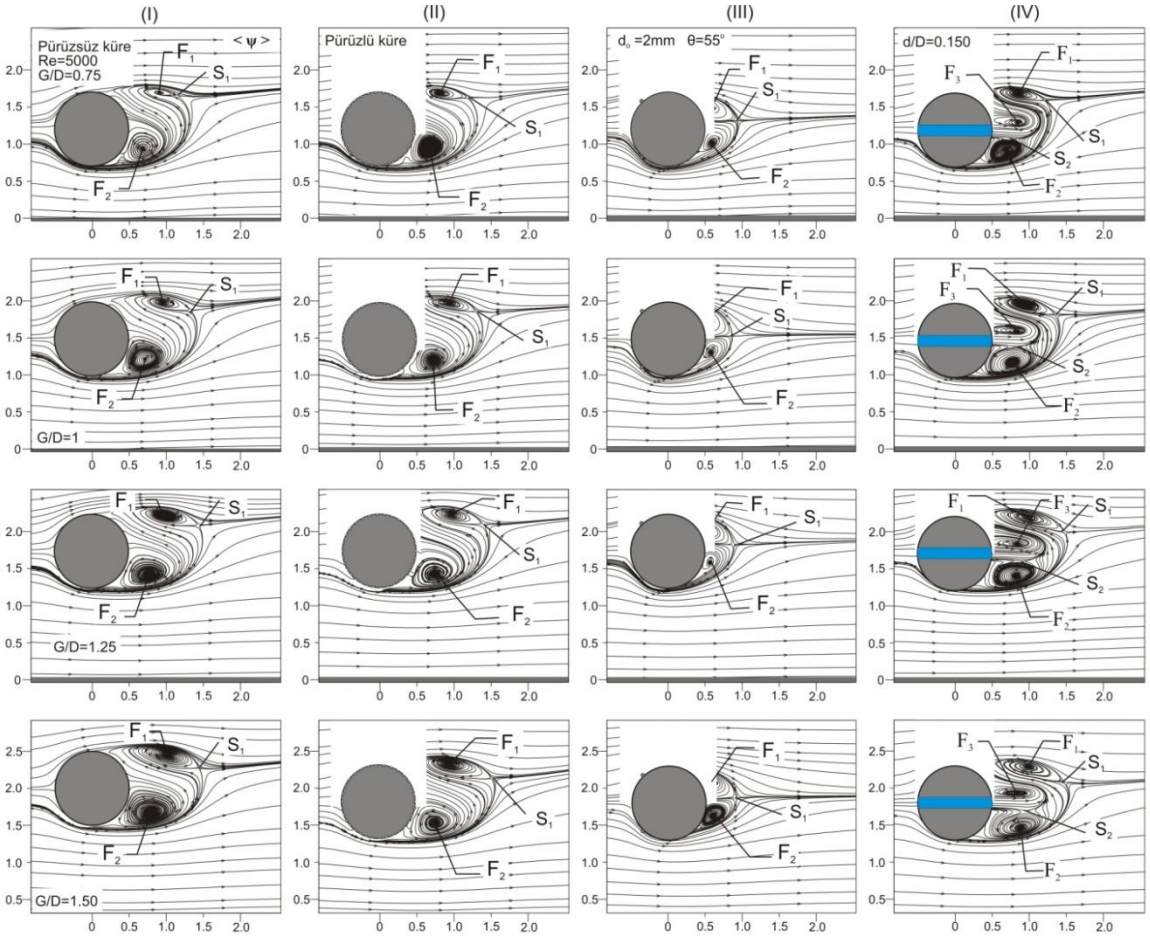
Şekil 4.72. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama vektör <V> alanının küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



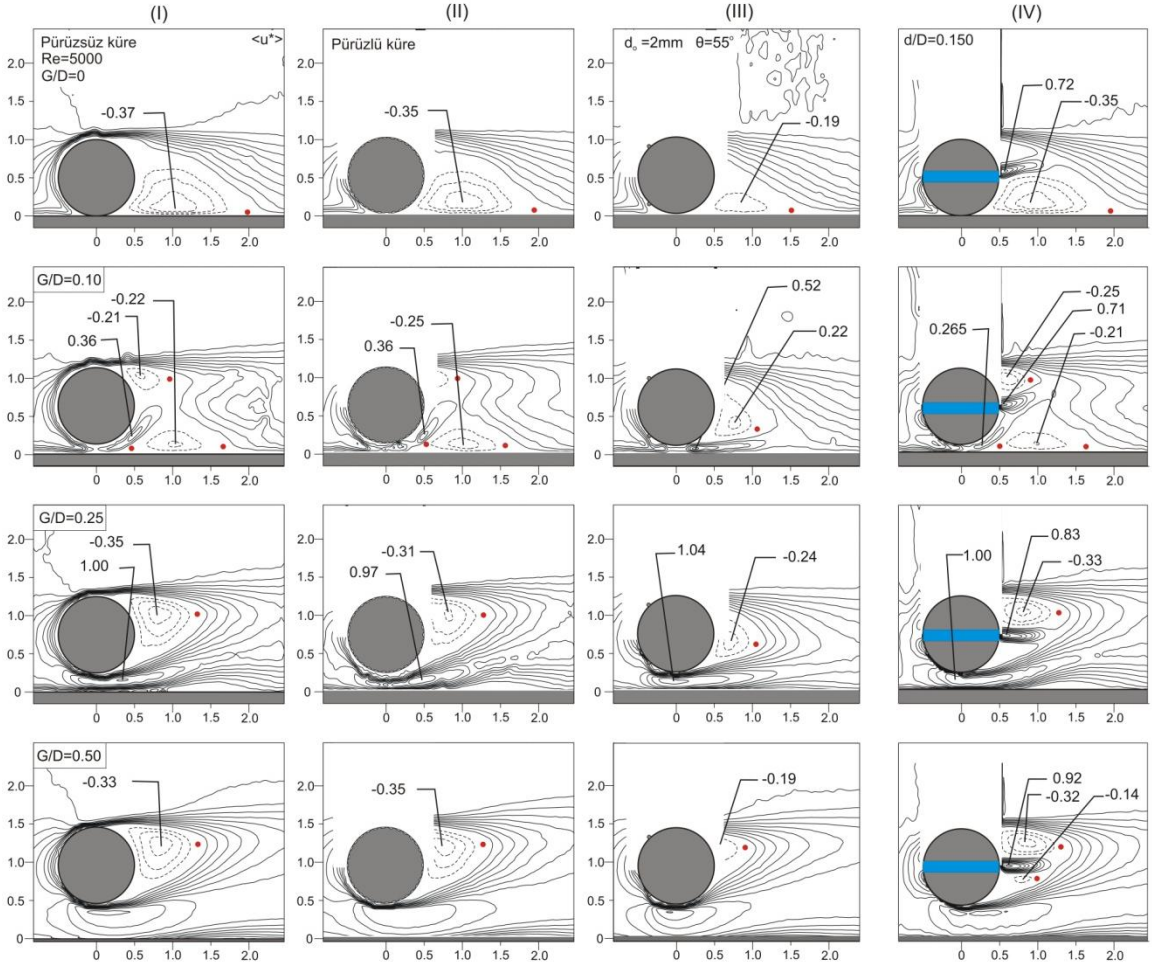
Şekil 4.73. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama vektör <V>alanının küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



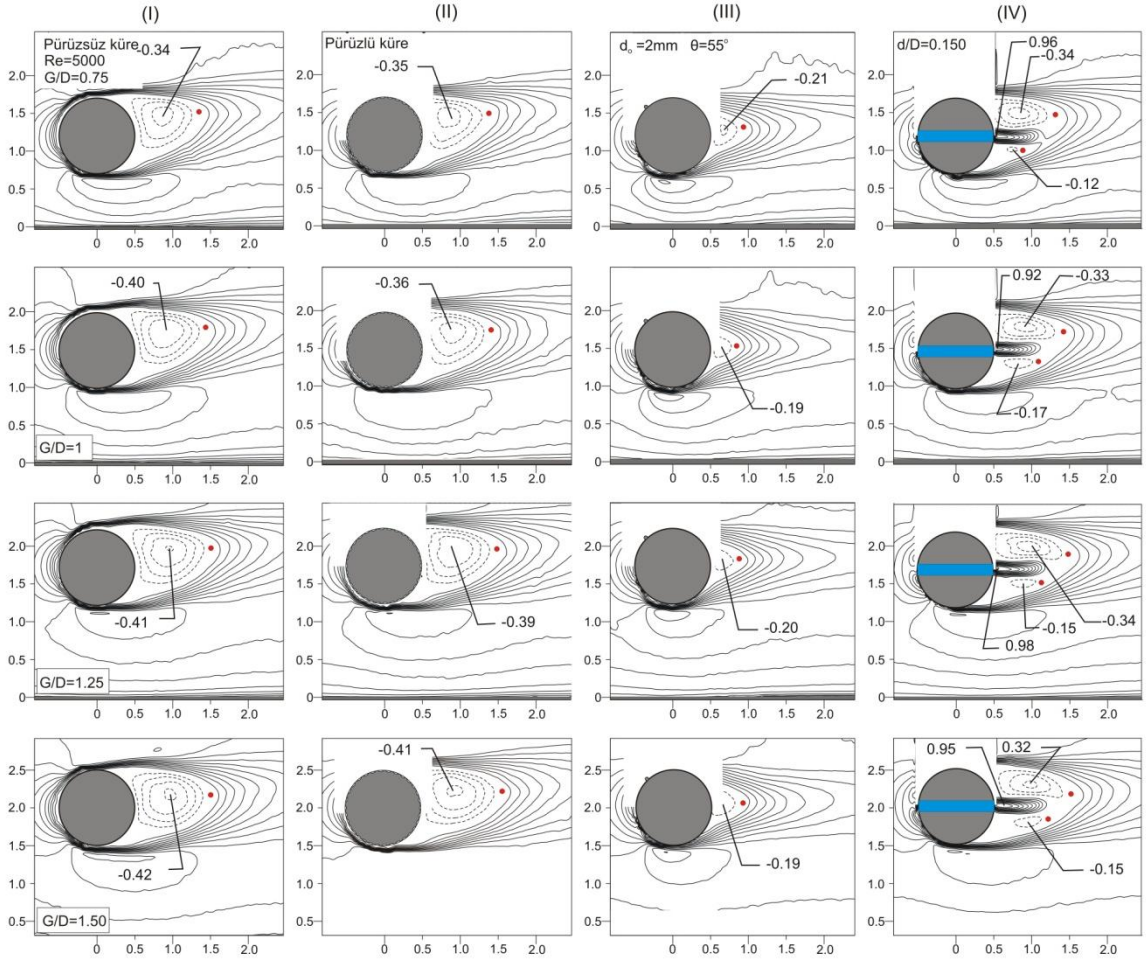
Şekil 4.74. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama akım çizgileri <ψ>'nin küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.5 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



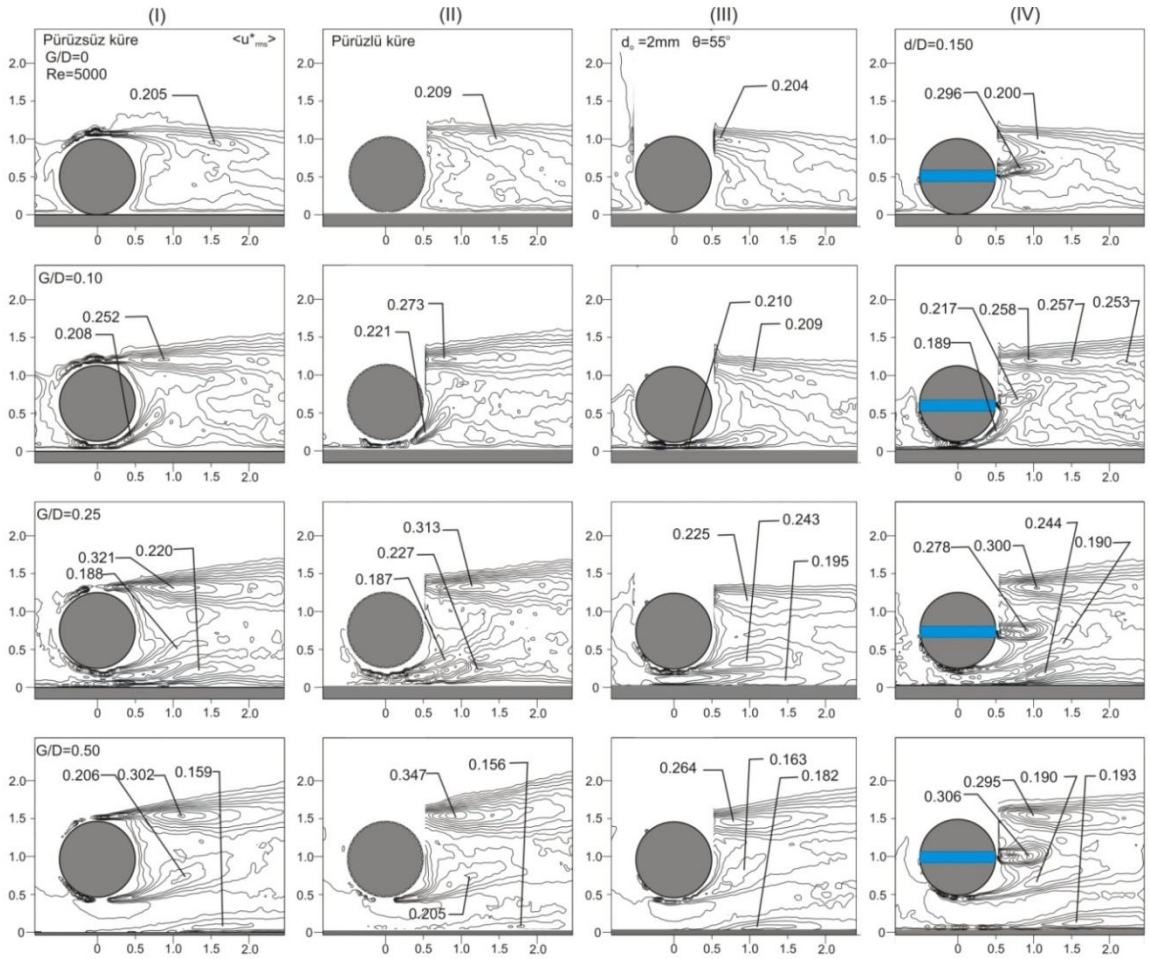
Şekil 4. 75.Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama akım çizgileri <ψ>' nin küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynoldssayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.



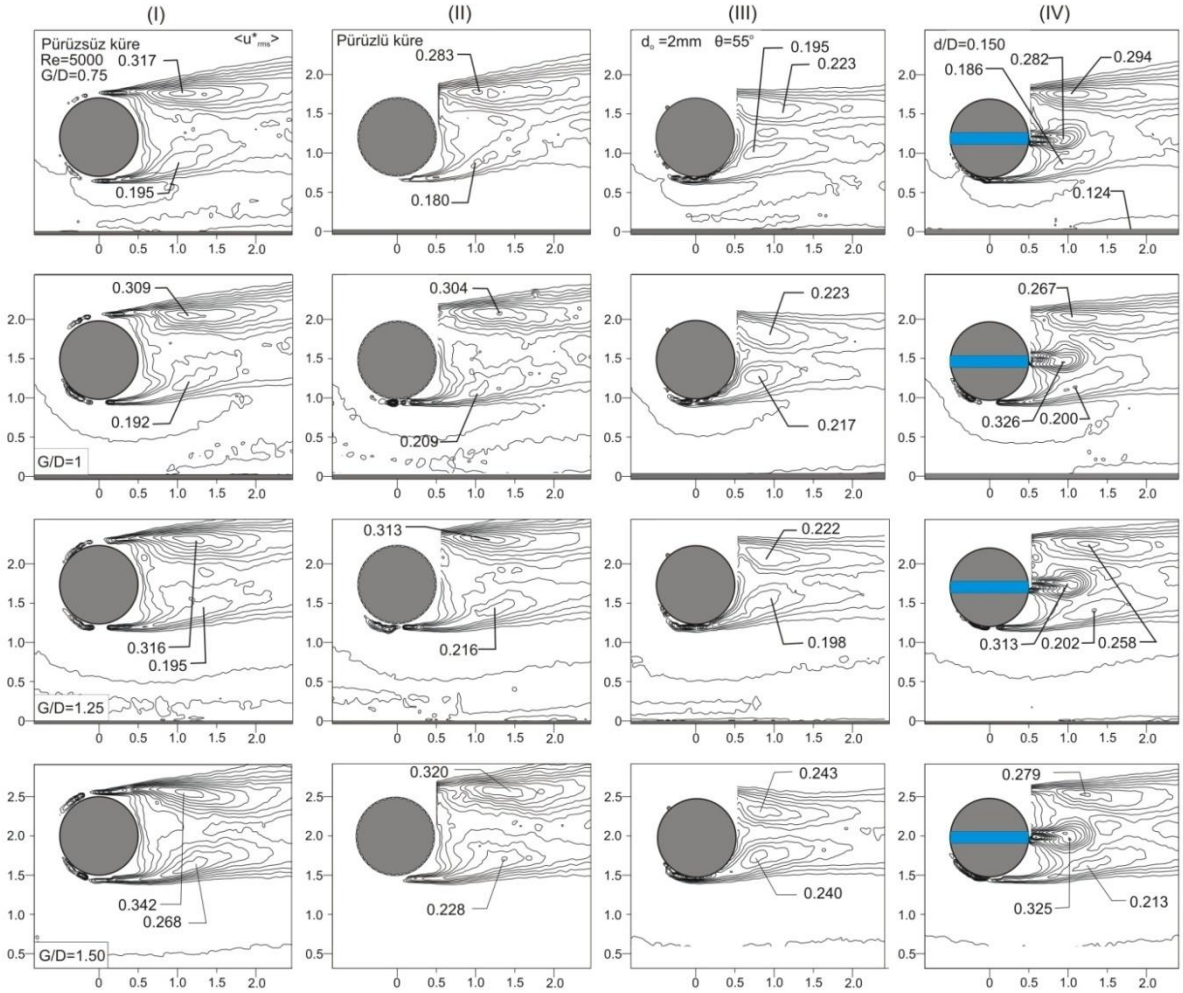
Şekil 4.76. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <u*> küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.50aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrileriın minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<u*>|_{min}=|<\Delta u*>|_{min}=0.1$'dir



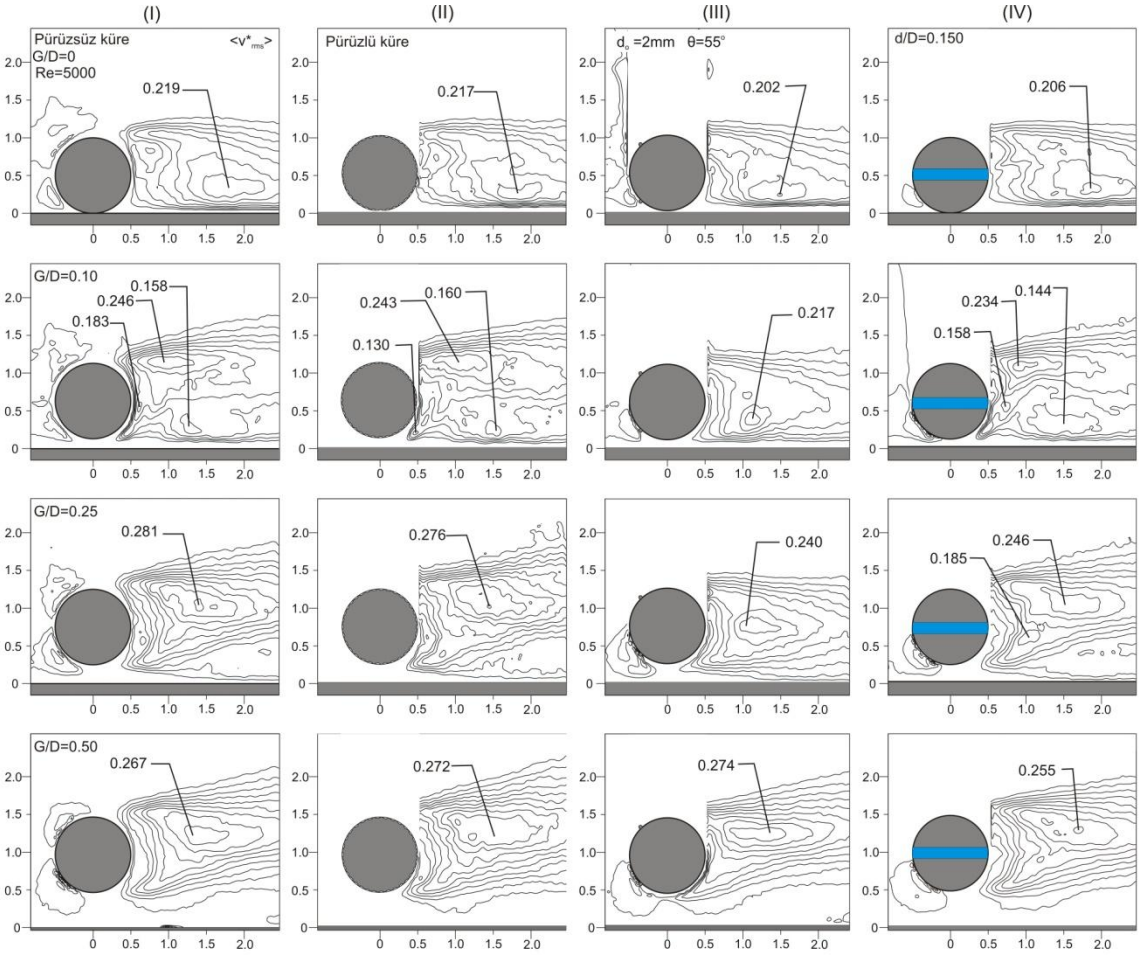
Şekil 4.77. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akım yönündeki ortalama hız eş düzey eğrilerinin <u*> küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0.75≤G/D≤1.50 aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrilerinin minimum değeri ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<u*>|_{min}=|<\Delta u*>|_{min}= 0.1$'dir.



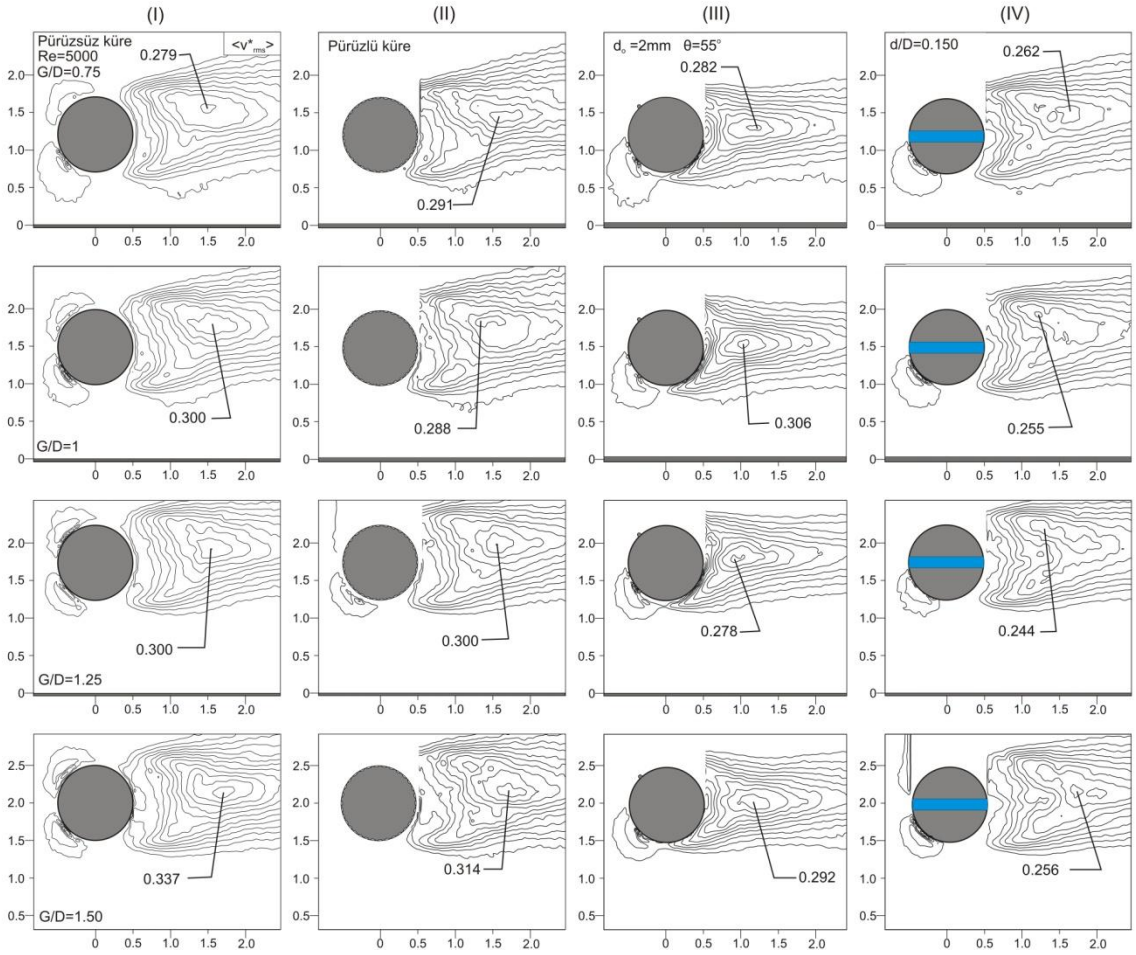
Şekil 4.78. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akım yönündeki ortalama hız çalkantısı $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.50$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*rms \rangle \right|_{min} = 0.075$ ve aralarındaki artım $\left| \langle \Delta u^*rms \rangle \right|_{min} = 0.025$' tir.



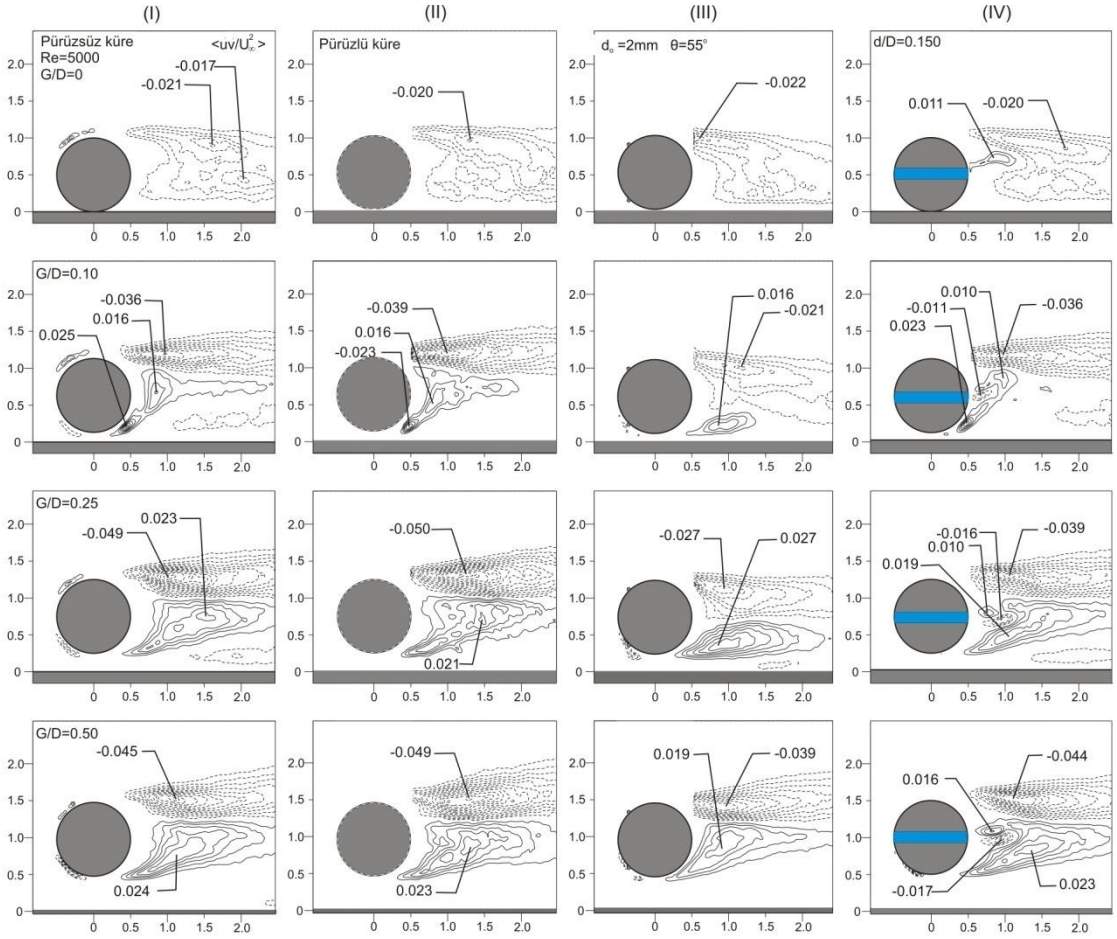
Şekil 4.79. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (SütunIII) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akım yönündeki ortalama hız çalkantısı $\langle u^*_{rms} \rangle$ eş düzey eğrilerinin küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle u^*_{rms} \rangle \right|_{min} = 0.075$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta u^*_{rms} \rangle \right|_{min} = 0.025$'tir.



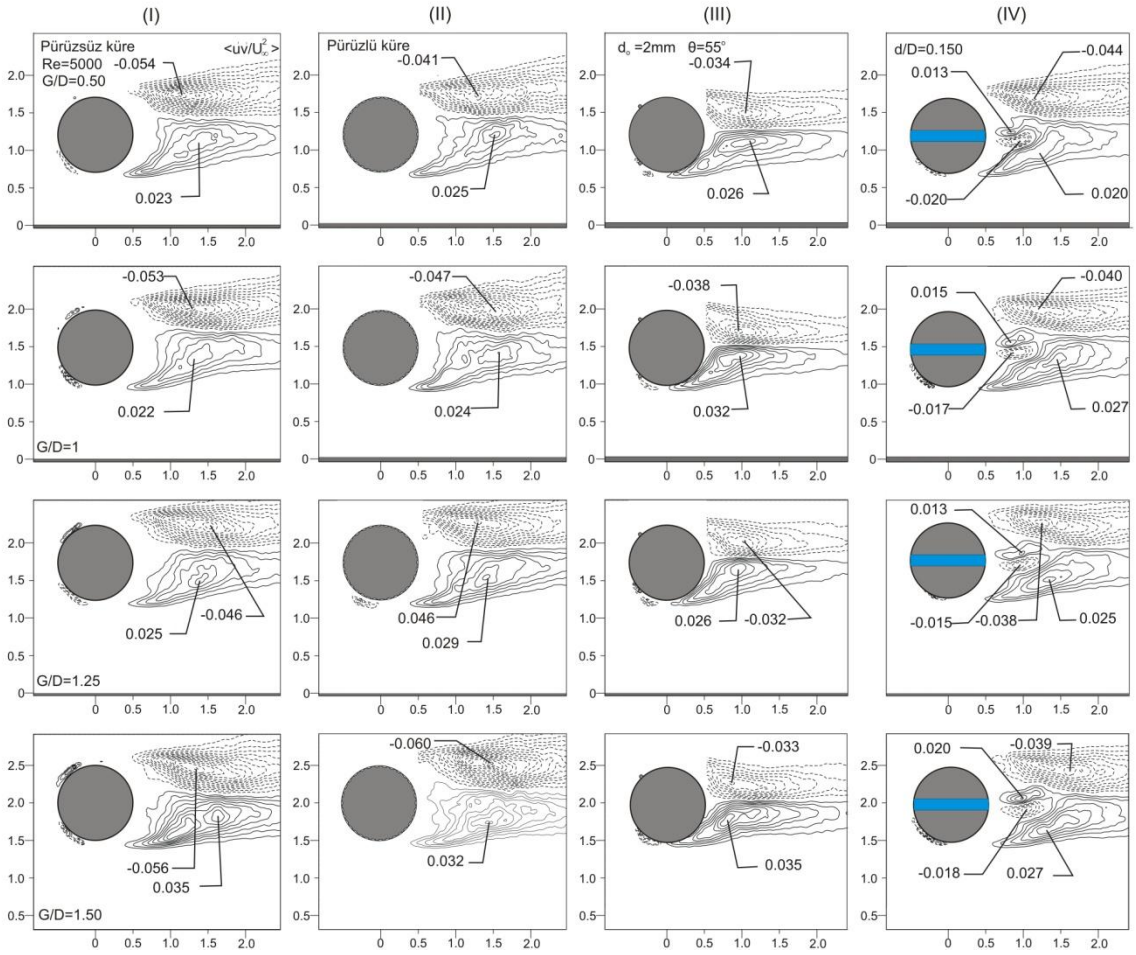
Şekil 4.80. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akıma dik yöndeki ortalama hız çalkantıları eş düzey eğrilerinin $\langle v^*_{rms} \rangle$ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0 \leq G/D \leq 0.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*rms \rangle \right|_{min}=0.025$'tir.



Şekil 4. 81. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının akıma dik yöndeki ortalama hız çalkantıları eş düzey eğrilerinin $\langle v^*_{rms} \rangle$ küreyle levha arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \leq G/D \leq 1.5$ aralığında ve Reynolds sayısının Re=5000 değeri için karşılaştırılması.Eş düzey eğrileriın minimum değeri $\left| \langle v^*_{rms} \rangle \right|_{min}=0.050$ ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| \langle \Delta v^*rms \rangle \right|_{min}=0.025$' tir.



Şekil 4.82. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin 0≤G/D≤0.5 aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerinin minimum değeri $|< u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $|<\Delta u'v'/U_\infty^2 >|_{min}$=0.004'tür.



Şekil 4.83. Sınır tabaka akışı etkisi altında olan konuma yerleştirilen pürüzsüz küre (Sütun I), pürüzlü küre (Sütun II), o-ringli küre (Sütun III) ve delikli küre (Sütun IV) durumlarında akış yapısının ortalama Reynolds gerilmeleri eş düzey eğrilerinin $< u'v'/U_\infty^2 >$ küre ile levha yüzeyi arasındaki boşluk oranı değerlerinin $0.75 \le G/D \le 1.5$ aralığında Reynolds sayısının Re=5000 değerine göre değişiminin karşılaştırılması. Eş düzey eğrilerin minimum değeri $\left| < u'v'/U_\infty^2 > \right|_{min}$=0.004 ve eş düzey eğrileri arasındaki artım $\left| <\Delta\, u'v'/U_\infty^2 > \right|_{min}$=0.004'tür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

5.1.1. Pürüzsüz küre durumundaki akış yapısı

Bu tez çalışmasında, düz bir levha üzerindeki hidrodinamik olarak gelişmiş türbülanslı sınır tabaka içine farklı konumlarda yerleştirilen pürüzsüz bir kürenin ve farklı pasif akış kontrolü uygulanmış kürelerin art izi bölgelerindeki oluşan akış özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde lazer ışını ile görünür hale gelen boya ve parçacık görüntülemeli hız ölçme (PIV) yöntemleri kullanılmıştır. Deneyler Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuarında bulunan kapalı devre açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Kürenin levha yüzeyiyle temas etmesi durumunda deneylere başlanmış ve küre alt taban yüzeyi levha yüzeyinden yaklaşık 63.75 mm(1.5D) yukarıya kadar kaldırılmıştır. Levha girişine konulan tetikleyici tel (tripwire) ile gelişmiş türbülanslı sınır tabaka, levhanın hücum kenarından 140 cm uzaklıkta oluşturulmuştur. Bu şartlar altında sınır tabaka kalınlığı 63 mm yüksekliğinde elde edilmiştir.

Deneyler iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda boya deneyleri yapılmış ve küre etrafındaki akış yapısı hakkında genel bilgiler elde edebilmek için, küre etrafındaki akışın art iz bölgesine, küre ekvator eksenindeki 0.3 mm çapındaki deliklerden çok düşük hızda boya enjekte edilmiştir. Daha sonra PIV yöntemi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve oluşan akış özellikleri anlık ve zaman ortalaması alınmış hız vektörleri, girdap yapıları, zaman ortalaması alınmış akım çizgileri yapıları, akım yönünde ve akım yönüne dik hız bileşeni çalkantıları, Reynolds gerilmeleri ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) gibi akış özellikleri ile açıklanmıştır.

İlk olarak pürüzsüz küre etrafındaki akış yapısı Reynolds sayısının 2500 $\leq$Re$\leq$10000 aralığında ve küreyle levha arasındaki açıklık oranının 0$\leq$G/D$\leq$1.50 aralığında incelenmiştir. Küre art izi bölgesindeki akış yapısına açıklık oranları G/D=0.10 ve 0.25'te Reynolds sayısı çok etkili olmuştur.

Açıklık oranı G/D=0.10 için Reynolds sayısının Re=2500, 5000 ve 7500 değerlerinde küre ile levha arasından gelen jet akış y ekseni doğrultusunda yukarı yönde ilerleyerek küre üst kayma tabakasındaki akışla etkileşime girmiştir. Bu sırada küre art izi bölgesinde ortalama akım çizgilerinden görüldüğü gibi (Şekil 4.4) büyük bir ayrılma kabarcığı oluşmuştur. Ayrılma kabarcığının oluştuğu bölgede odak noktası F_1 ile gösterilen dönümlü bir akış bölgesi meydana gelmiştir. Reynolds sayısı 2500

değerinden 7500 değerine artırıldığında dönümlü akış bölgesi gelişirken Reynolds sayısı 10000 değerinde kaybolmuştur. Küre ile levha arasındaki jet akışın üst kayma tabakası ile etkileşmesi ısı transferini iyileştirici bir sonuç olarak yorumlanabilir.

Akış-yapı etkileşimi açısından bakıldığında ise G/D=0.10 açıklık oranında jet akışın yapıya zarar verebileceği nicel ve nitel akış ölçüm sonuçlarıyla gösterilmiştir. Levha yüzeyinde oluşan sınır tabaka akışının levhaya yakın bölgelerdeki yüksek hız gradyanı nedeniyle oluşan dönümlü yapılar oluşturarak küre yüzeyinden gerçekleşen akış ayrılmasını etkilemektedir. Düşük açıklık oranlarında küre alt kayma tabakasından geçekleşen girdap kopmaları sönümlenmektedir.

Küre ile levha arasındaki açıklık oranı G/D=0.25 değerine çıkarıldığında ise küre arkasında oluşan ayrılma kabarcığı kaybolurken akış kürenin hem alt hem de üst kısmından ayrılmaya başlamıştır. Reynolds sayısının 2500 değerinde akış ayrılmalarının neden olduğu, levha yüzeyinde yaklaşık 1D (42.5 mm) uzunluğunda saat yönünde dönen dönümlü akış bölgesi oluşmuştur. Reynolds sayısı 5000 değerine çıkartıldığında dönümlü akış bölgesinin uzunluğu 0.50D'ye düşerken Reynolds sayısının 7500 ve 10000 değerlerinde bu etki kaybolmuştur. Bu durum levha yüzeyine dinamik kuvvetlerin etki edeceği ve aşındırıcı etki oluşturacağı şeklinde yorumlanmıştır. Küre art izi bölgesi y ekseni doğrultusunda yukarı yönde kaymıştır, bu durum küre üzerinde sürükleme kuvveti ile birlikte net bir kaldırma kuvvetinin de etki ettiği şeklinde yorumlanabilir.

Açıklık oranı G/D=0.50 olduğunda küre art izi akış bölgesi ile levha yüzeyinde oluşan akışın etkileşiminin azaldığı ve daha yüksek açıklık oranlarında ise kaybolduğu gözlemlenmiştir. Ancak, sınır tabaka akışının üniform olmayan hız profilinin küre art izi akış yapısı üzerinde etkili olduğu küre art izi bölgesinin simetrik olmayan akış yapısından anlaşılmıştır. Akım yönündeki hız çalkantıları, Reynolds gerilmeleri ve TKE şiddetleri eş düzey eğrileri incelendiğinde küre üst kayma tabakasındaki değerlerin alt kayma tabakasına göre daha yüksek çıktığı, bunun nedeninin de sınır tabakanın üniform olmayan hız profilinden dolayı üst kısımlarda daha şiddetli girdap kopmalarından kaynaklandığı belirlenmiştir.

5.1.2 Pasif akış kontrolü uygulanmış küreler durumlarındaki akış yapısı

Çalışmanın ikinci kısmında, pürüzsüz küre durumundaki akış karakteristikleri incelendikten sonra pasif akış kontrol yöntemleri uygulanmıştır. İlk olarak küre çevresine 2 mm ve 3 mm silindirik çapındaki o-ringler küre ön durma noktasından 45°,

50°, 55°, 60° ve 70°'ye tek tek yerleştirilmiş ve etkileri 0≤G/D≤1.50 açıklık oranında Reynolds sayısının Re=5000 değerinde incelenmiştir. Sınır tabakanın üniform olmayan hız profili, küre ile levha arasındaki oluşan jet akış küre etrafındaki daimi olmayan türbülanslı akış yapısında daha karmaşık bir yapı oluşturmuştur. Bu nedenle, farklı açıklık oranlarında farklı o-ring çapları ve yerleşim açıları daha etkili akış kontrolü sağlamıştır. Üniform akış şartlarına yaklaşıldığı ve küre ile levha arasındaki boşlukta gerçekleşen jet akışın hiç olmadığı G/D=1.50 açıklık oranının ortalama akış yapıları ve türbülans istatistikleri değerlendirildiğinde en etkili o-ringli kontrol şeklinin 55°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ringin ve 50°'ye yerleştirilmiş 3 mm çapındaki o-ringin olduğu görülmüştür. Bu iki durumda benzer sonuçlar elde edilmiştir. 2 mm çapındaki o-ring için kritik yerleşim açısı 55° olarak bulunmuş daha yüksek açılarda akışın yapısının kontrol edilmesinda incelenen Re sayısı aralığında dikkate değer bir etki oluşturmadığı sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde 3 mm çapındaki o-ring için ise kritik yerleşim açısı 50°'ye düşmüş daha yüksek açılarda akış etkili kontrol edilememiştir. Ana akış ayrılmasını geciktirmek için yerel akış ayrılması oluşturan o-ringin çapı küçülürken yerleşim açısının büyüdüğü görülmüştür. O-ringin küre üzerinde yerel akış ayrılmaları oluşturup küre yüzeyindeki sınır tabaka akışının türbülans seviyesini artırarak ana akış ayrılmasını geciktirdiği ve sürüklenme katsayısının bu şekilde düşürülebileceği belirtilmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, küre ortasına açılan deliklerden elde edilen pasif jetle akış kontrol edilmiştir. Deliklerin çapının küre çapına oranı d/D=0.10, 0.15, 0.20, 0.25 olacak şekilde dört farklı delikli küre için araştırılmıştır. Bunların her birinin etkileri küre ile levha arasındaki boşluk oranının 0≤G/D≤1.50 aralığında incelenmiştir. Düşük açıklık oranlarında (G/D=0.10, 0.25) çap oranları d/D=0.20 ve 0.25 olan kürelerde, küre deliğinden gelen jet akışın art izinde oluşturduğu momentumun, küre ile levha arasındaki jet akış üzerinde çok etkili olduğu bulunmuştur. Serbest akım şartlarına yaklaşıldığında, G/D=1.50 açıklık oranında, ortalama akım çizgilerinden görüldüğü gibi (Şekil 4.52) d/D=0.20 ve 0.25 oranındaki deliklerden gelen jet akışın küre üst kayma tabakasıyla alt kayma tabakasının etkileşimini engellediği bulunmuştur. Türbülans istatistiklerine bakıldığında küre üst kayma tabakası ve alt kayma tabakasındaki Reynolds gerilmeleri, hız çalkantıları ve türbülans kinetik enerjisi şiddetlerinin artan delik çapıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Ancak, delik çap oranları d/D=0.20 ve 0.25 olduğunda küre deliğinden gerçekleşen jet akışın oluşturduğu momentumun artmasıyla jet akışın art izi bölgesine karıştığı bölgede bu akış karakteristiklerinin şiddetlerinin

arttığı görülmüştür. Delik çapı oranının d/D=0.15 durumda ise hem kayma tabakalarındaki değerler hem de jet çıkışındaki değerler birlikte incelendiğinde optimum bir akış kontrolü sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın dördüncü aşamasında uygulanan üç farklı pasif akış kontrol yönteminin birlikte karşılaştırılması yapılmıştır. Uygulanan üçüncü pasif akış kontrol yöntemi küre üzerine işlenen pürüzlerdir. Pürüzlü küre için, toplam 410 adet 3 mm çaplı silindirik pürüzlülük elemanı özel imal ettirilen 42.5 mm çapındaki küre yüzeyine yaklaşık eşkenar üçgen olarak oluşturulmuştur. Karşılaştırma için 55°'ye yerleştirilmiş 2 mm çapındaki o-ring ve delik çap oranı d/D=0.15 olan delikli küre seçilmiştir. Pürüzlü küre durumunda küre yüzeyine açılmış pürüzlülük elamanları küre yüzeyindeki akışta yerel akış ayrılmaları oluşturmakta bu da pürüzsüz kürede oluşan akış ayrılmasını geciktirmektedir. Ancak, o-ringli küreden farklı olarak, küçük boyuttaki tetikleyiciler (pürüzlülük elamanları) kürenin bütün yüzeyine yayılmıştır. O-ring ise daha az yüzey artışı oluşturduğundan dolayı sürtünme direnci de az olacaktır. Genel bir değerlendirme yapıldığında pürüzlü kürede gerçek şartlarda oluşan kürenin ilerlemesi esnasındaki dönme hareketi şartlarında deney yapılamadığı için akış kontrol açısından o-ringli küreye göre dikkate değer sonuçlar alınamamıştır. Bunun diğer bir nedeni ise deneyler düşük Reynolds sayılarında yapıldığı için küre yüzeyindeki pürüzlülük elamanları ile küre yüzeyindeki sınır tabaka akışında ana akış ayrılmasını geciktirecek gerekli türbülans oluşmamıştır. O-ringli kürede ise uygun o-ring çapı ve yerleşim açısı ile ana akış ayrılması geciktirilebilmiştir. O-ringli küre durumlarında art izi bölgesindeki ters akış bölgesinin önemli oranda azaldığı ve bu durumda ters akış hareketliliğinin zayıfladığı görülmüştür. O-ringli küre durumunda art izi bölgesinde oluşan serbest durma noktası küre art izine daha yakın olmakta ve art izi bölgesinin boyutu küçülmektedir ve bu da akışın kontrol edildiğinin kanıtı olarak değerlendirilebilir. Küre yüzeyine yerleştirilen o-ring hız çalkantılarını, Reynolds gerilmelerini ve TKE şiddetlerini azalttığı gibi bu özelliklerin en yüksek değeri aldığı yerler küre sırtına doğru yaklaşmıştır. Bu sürüklenme katsayısını azaltan bir etki şeklinde yorumlanabilir. Bununla birlikte küre etrafındaki o-ring yapıları küre etrafından periyodik olarak kopan girdap yapılarını bozmakta ve Karman girdap Caddelerinin oluşmasını engellemektedir. Bu durum küre üzerine etkiyen dinamik kuvvetlerin azalmasını sağlamaktadır. Delik kürenin deliğinden çıkan akışın oluşturduğu art izi yapısı değişmiş ve akış yapısında küçük ölçekli bir adet girdap çifti oluşmuştur. Bu da art izi bölgesinin simetrik olmayan yapısında simetrikliğe doğru düzelmesine etki yapmaktadır.Akış fiziği yönünden

bakıldığında, Reynolds sayısı değerinin Re=5000'in kritik altı olmasına rağmen, art izi bölgesindeki Karman Girdap caddeleri ve Kelvin Helmholtz girdapları pürüzlülük etkisinden dolayı biraz azalmaktadır.

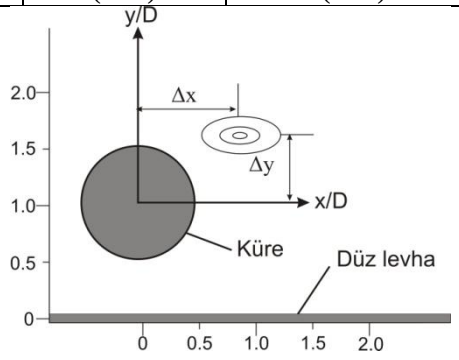
Şekil 5.1'de zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşenleri $<u^*>$ şiddetlerinin (üstte) ve akım yönündeki hız çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin küre art izi bölgesinde farklı mesafelerdeki değişimi verilmiştir. K çizgisinde pürüzsüz küre ve pürüzlü küre durumlarında benzer bir akış yapısı oluşmuştur. Her iki durumda da negatif hız bölgesi gerçekleşmiştir. O-ringli kürede de benzer durum oluşmuştur ancak, negatif hız bölgesinin büyüklüğü daha dardır. Bununla birlikte ortalama hız şiddetlerinin negatif bölgedeki tepe değerleri pürüzsüz, pürüzlü ve o-ringli kürede yaklaşık olarak aynı değeri almıştır. Delikli kürede ise delikten art izine gelen akış, hız büyüklüğünü belirli bir aralıkta serbest akım hızının büyüklüğüne çıkarmıştır. K çizgisi boyunca akım yönüne paralel hız çalkantıları $<u^*_{rms}>$ şiddetlerinin değerleri delikli küre için diğer küre durumlarına göre daha küçük çıkmıştır. Ancak, delik çıkışındaki jet akışın etkisi ile küre ekseni hizasında (y/D=0'da) delikli kürenin art izinde hız çalkantı şiddetlerinde artış olmuştur. Küre art izinde aşağı akım yönünde 0.5D daha ilerleyince (L çizgisinde) pürüzsüz, pürüzlü ve delikli kürenin negatif hız bileşeni büyüklüklerinde kayda değer bir değişim olmazken, o-ringli kürede hız büyüklüğü L çizgisi boyunca pozitif değerler almıştır. Delikli küredeki jet akışın hız değerleri ise bu mesafede azalmıştır. Akım yönündeki hız bileşenleri şiddetleri üst ve alt kayma tabakalarında bütün küre durumlarında en yüksek tepe değerlerini almıştır. Hız çalkantı değerlerinin grafik üzerindeki dağılımı incelendiğinde en küçük çalkantı şiddetlerinin o-ringli kürede olduğu tespit edilmiştir. L çizgisi boyunca delikli küredeki jet akışın akım yönündeki hız büyüklükleri azalırken hız çalkantı büyüklükleri artmıştır. M çizgisine gelindiğinde bütün küre durumlarında akım yönündeki hız büyüklükleri pozitif değerler almıştır. Art izi bölgesindeki en büyük hız değerleri o-ringli kürede meydana gelmiştir. O-ringli kürede akış ayrılmasının geciktirilmesi ile art izi bölgesindeki hız büyüklüklerinin artması küre üst ve alt kayma tabakalarındaki hız gradyanlarının düşük çıkmasına neden olmuştur. Kayma tabakalarındaki hız gradyanlarının azalması hız çalkantılarının da azalması ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle, küre art izinde akım yönündeki hız şiddetlerinin değeri en büyük o-ringli kürede çıkarken akım yönündeki hız çalkantılarının şiddetleri ise o-ringli kürede en küçük değerde çıkmıştır. N çizgisinde küre art izi bölgesinde aşağı akım yönünde küre merkezinden 2D (85 mm) mesafeye

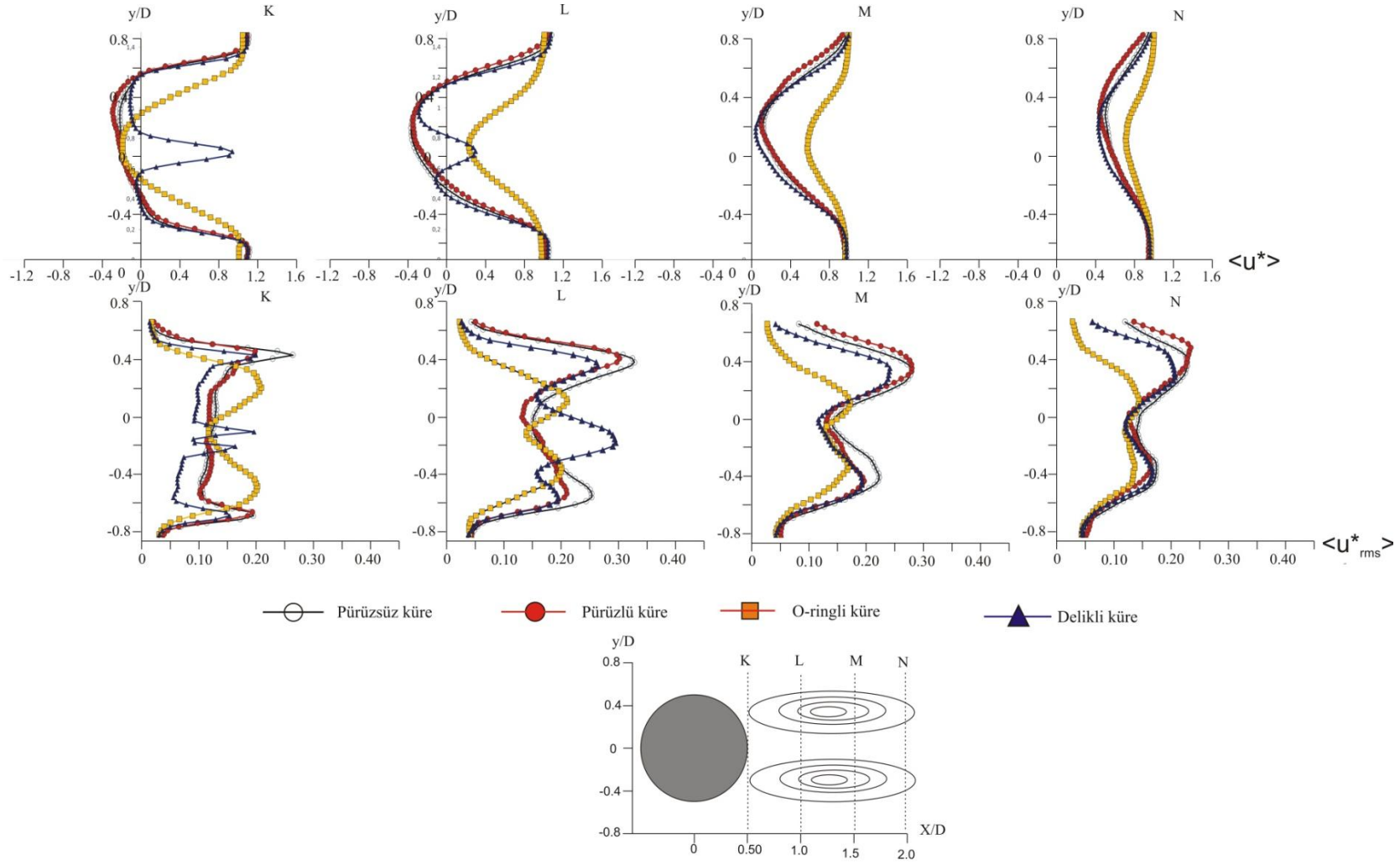
ulaşılmıştır. Bu bölgede art izi bölgesindeki akım yönündeki hız şiddetlerinin büyüklüğü serbest akım hızına yaklaşmaya başlamaktadır. Geciktirilmiş akış ayrılması ile birlikte küçülen art izinde geri akışların az oluşmasından dolayı en yüksek hız şiddeti o-ringli kürede çıkmıştır. Artık bu mesafede bütün küre durumlarında akım yönündeki hız bileşeni çalkantı şiddetleri de azalmaya başlamıştır. Art izi bölgesinde hız çalkantı değerleri en yüksek değerlerini küre üst ve alt kayma bölgelerinde almıştır, çünkü bu bölgelerde akım yönündeki hız bileşenlerinin gradyanı daha fazladır.

Burada verilen noktsal değişim sonuçları sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ve doğrulanmasında ve mühendislik tasarımlarında faydalı olabilecektir. Çizelge 5.1'de pürüzsüz, pürüzlü, o-ringli ve delikli küre durumlarında ortalama akım çizgilerinden ölçülen akışın levha yüzeyine tekrar birleşme uzunluğu ve art izi uzunluğu verilmiştir.

Çizelge 5.1. Pürüzsüz küre, pürüzlü küre, o-ringli küre ve delik küre etrafındaki akış yapısındadurma noktalarının ve levha yüzeyine tekrar birleşme noktalarının karşılaştırılması

Boşluk oranı	Pürüzsüz küre <Ψ> (Δx/D)	Pürüzlü küre <Ψ> (Δx/D)	o-ringli küre $\theta = 55^{\circ}$,d_o=2mm <Ψ> (Δx/D)	Delikli küre d/D=0.15 <Ψ> (Δx/D)
G/D=0	R_1 (2.01)	R_1 (1.96)	R_1 (1.53)	R_1 (2.0)
G/D=0.1	S_2 (1.69)	S_2 (1.67)	S_1 (1.07)	S_2 (1.69)
G/D=0.25	S_1 (1.25)	S_1 (1.0)	S_1 (1.05)	S_1 (1.22)
G/D=0.50	S_1 (1.16)	S_1 (1.08)	S1 (0.79)	S1 (1.27)
G/D=1	S_1 (1.35)	S_1 (1.32)	S_1 (0.86)	S_1 (1.36)
G/D=1.50	S_1 (1.45)	S_1 (1.52)	S_1 (0.90)	S_1 (1.46)





Şekil 5.1. Zaman ortalaması alınmış akım yönündeki hız bileşenleri <u*> şiddetlerinin (üstte) ve akım yönündeki hız çalkantıları <u*rms> şiddetlerinin (altta) K, L, M ve N çizgileri boyunca Reynolds sayısı Re=5000 ve açıklık oranı G/D=1.50 için değişimi. K, L, M ve N dik çizgileri sırasıyla, küre merkezinden 0.5D, 1D, 1.5D ve 2D mesafelerindedir.

5.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışması sonucunda küre-sınır tabaka akışı etkileşimi ve uygulanan farklı pasif akış kontrol yöntemleri ile ilgili akış yapısında önemli deneysel veriler elde edilmiştir. PIV yöntemiyle belirli bir akış alanında aynı anda bir çok noktada akışı bozmadan hız ölçümü yapılabilmesi deneysel sonuçların hem daha güvenilir olmasını hem de akış alanı ile ilgili daha fazla ayrıntının elde edilebilmesini sağlamıştır. Örneğin, noktasal ölçüm yapan sistemlerde akım çizgileri oluşturulamaz. Ancak, PIV yöntemiyle akış alanında eş zamanlı olarak bir çok noktada hız değerlerinin vektörel olarak belirlenebilmesi akım çizgilerinin elde edilebilmesini sağlamaktadır. Üstelik, PIV yönteminde belirli bir süre boyunca ölçüm yapılabildiğinden daimi olmayan akışın türbülans istatistikleri ile ilgili veriler de elde edilebilmektedir. Tez kapsamında elde edilen deney sonuçları akış yapısı hakkında bu şekilde ayrıntılı veriler sunabildiği için hem mühendislik tasarımlarında hem de HAD sonuçlarının değerlendirilmesinde çok yararlı olacaktır. Mevcut ya da geliştirilmeye çalışılan türbülans modelleri tez kapsamında gerçekleştirilen deney şartlarında çalıştırılıp, elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılarak başarısı ölçülebilir ve gerekli değişikliklerin ve geliştirmelerin yapılması sağlanabilir. Bu sayede doğrulanan ve geliştirilen HAD çalışmalarıyla akış alanı hakkında, kayma gerilmeleri, basınç dağılımı gibi deneysel olarak ölçülmesi zor olan fiziksel büyüklükler elde edilebilir.

Mevcut çalışmada akış alanı hakkında ayrıntılı veriler elde edilmiş olsa da sürükleme ve kaldırma katsayısını belirleyecek dinamik kuvvet ve basınç ölçümleri yapılmamıştır. Daha sonraki çalışmalarda kuvvet ve basınç ölçümleri de yapılarak akış alanın kinematik yapısı ile dinamik yapısı arasında bir ilişki kurulabilir. Pasif jet kontrolü için küre ekvatoruna farklı kesit ve geometrilerde delikler delinerek etkisi incelenebilir. Küre yüzeyindeki pürüzlülük farklı derinlik ve çaplarda oluşturulabilir, pürüzlülük elemanlarının geometrisi, küre yüzeyine dizilimi ve sayısı değiştirilerek etkileri incelenebilir. Küre düz bir levha üzerinde küre ile levha arasındaki farklı açıklıklarda, çekme tankında çekilerek hareket ettirilip sınır tabaka etkisi olmadan yalnızca küre ile levha arasındaki jet akışın küre art izi bölgesindeki etkisi incelenebilir. Küre sınır tabaka içinde kendi ekseninde farklı yönlerde dönerken meydana gelen Magnus etkisi altındaki akış yapısı araştırılabilir.

Meyve ve sebzelerin kurutma işlemlerinde, meyve ve sebzeler genellikle bir levha üzerine konur ve içlerindeki gerekli nemi almak için sıcak hava üflenir. Kurutma için gerekli olan hava debisi ve sıcaklığı meyve ya da sebzenin geometrisine, dizilim

şekline ve sıklığına göre değişir. Bir veya daha fazla kürenin levha üzerindeki sınır tabaka akışına maruz kaldığı ve akışkanla cisim arasında ısı transferinin de olduğu, hız alanının ve ısı transferinin eş zamanlı olarak ölçüldüğü bir deneysel çalışma yapılabilir. Bu sayede kurutma işlemlerinde gerekli olan ısı taşınım katsayıları yaklaşık olarak belirlenebilir, akış yapısı hakkında ayrıntılı veriler elde edilir ve tasarımlardaki iyileştirmelerle enerji tasarrufu sağlanabilir ve daha sağlıklı kurutma işlemleri gerçekleştirilebilir.

Kürenin sınır tabaka içerisinde serbest hareket edecek bir düzenekle kürenin akıştan kaynaklanan titreşimli harekete maruz bırakılarak incelemesi yapılabilir.

Kürenin sınır tabaka akış içerisinde hareketli ve hareketsiz akışkan şartlarında serbest düşmeye maruz kalması şartlarında akış yapısı incelenebilir.

Bu tez çalışması kapsamında akış yapısı çok kararsız olduğu için girdap kopma frekanslarının FFT analizi gerçekleştirilememiştir. Daha yüksek sayı ve frekansta veri alınması ile FFT ve detaylı spektrum analizi yapılabilir.

Oluşan türbülanslı akış yapısının benzeşimi için yapay sinir ağları uygulamaları yapılabilir.

Küçük girdapların karakteristiklerinin model analizi için dalgacık (wavelet) analiz uygulamalarının denenmesi de literatüre önemli kazanımlar sağlayabilir.

Büyük yapıdaki küreler için sentetik jet gibi üfleme ve yüzeyden emme yöntemlerinin denenmesi de rüzgar tünellerinde ilerde çalışılabilecek konular arasında sayılabilir.

KAYNAKLAR

Achenbach, E., 1972, Experiment on the Flow Past Spheres at Very High Reynolds Numbers,*Journal Of Fluid Mechanics*, 3, 565-575.

Achenbach, E., 1974,Vortex shedding from sphere, *Journal of Fluid Mechanics*,62 (2), 209-221.

Adrian, R. J., 1991, Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics,*Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.

Aköz, M.S., Sahin B. ve Akilli, H., 2010, Flow characteristic of the horizontal cylinder placed on the plane boundary, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, 476–487.

Alammar, K.N., 2004, Turbulent flow over a sphere with suction and blowing holes and a golf ball*:* a numerical study, *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, Providence*, Rhode Island, 16 - 19.

Alassar, R.S., ve Badr, H.M., 1997, Oscillating Viscous Flow Over A Sphere, *Computers&Fluids*, 26 (7), 661-682.

Aoki, K., Kinoshita, Y., Nagase, J. ve Nakayama, Y., 2003b, Dependence of Aerodynamic Characteristics and Flow Pattern on Surface Structure of a Baseball, *Journal of Visualization*, 6 (2), 185-193.

Aoki, K., Ohike, A., Yamaguchi, K. ve Nakayama, Y., 2003a, Flying Characteristics and Flow Pattern of A Sphere With Dimples, *Journal of Visualization*, 67-76.

Barker, J.M., Gardner, S.M. ve Liburdy, J.A., 1997, Low Reynolds number near wake flow of a sphere, *ASME, FED Fluid Measurement and Instrumentation*, 211, 45-50.

Bearman, P.W.veHarvey, J.K., 1976,*Golf ball aerodynamics,* Aeronaut. Q., 27, 112.

Cheng, M., Tsuei, H. E. veChow, K.L., 1994, Experimental Study on FlowInterferences Phenomena of Cylinder/Cylinder and Cylinder/Plane Arrangements. *In Flow-Induced VibrationsASMEH*, 273, 173-184.

Choi, H., Jeon, W. veKim, J., 2008, Control of Flow Over a Bluff Body, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, 113–39.

Choi, J., Jeon, W. veChoi, H., 2006, Mechanismof drag reduction by dimples on a sphere, *Physics of Fluids*, 18, 041702.

Constantinescu, G. S. ve Squires, K. D., 2003, LES and DES Investigation of Turbulent Flow Over A Sphere at Re = 10,000, *Flow Turbulence Combust.*, 70, 267–298.

Çengel, Y. A., ve Cimbala, J. M., 2007, Akışanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Çeviri Editörü: Tahsin Engin, Halil Rıdvan Öz, Hasan Küçük, Şevki Çeşmeci, *Güven yayınevi.*

Gad-el-Hak M., 1996, Modern Developments in Flow Control, Applied Mechanics Review, 49, 365-379.

Giwoong, Y., Dongjoo, K. ve Haecheon, C.,2006, Vortical Structures Behind A Sphere at Subcritical Reynolds Numbers,*Phys. Fluids,* 18 (1), 1-14.

Grass, A. J., Raven, P. W. J., Stuart, R. J. veBray, J. A., 1984, The Influence Of Boundary Layer Velocity Gradients and Bed Proximity On Vortex Shedding From Free Spanning Pipelines, J*ournal of Energy Resources Technology*, 106, 70-78.

Hatipoğlu F., veAvcı, I., 2003, Flow Around a Partly Buried Cylinder in a Steady Current, *Ocean Engineering,* 30, 239-249.

Hassanzadeh, R., Şahin, B. ve Özgören, M., 2011, Numerical Investigation of flow structures around a sphere, International *Journal of Computational Fluid Dynamics* 25 (10) 535–545.

Jang, II Y. ve Lee S. J., 2008, PIV analysis of near-wake behind a sphere at a subcritical Reynolds number, *Experiments in Fluids*, 44 (6), 905-914.

Jared, A. T., Mark V. F., Nicholas J. L. ve Graham M. H., 2005, 3-D particle image velocimetry of the flow field around a sphere sedimenting near a wall Part 2. Effects of distance from the wall, *J. Non-Newtonian Fluid Mech*., 95–106.

Jeon, J., Choi, J., Woo-Pyung Jeon, Haecheon C., ve Jinil P., 2004, Active control of flow over a sphere for Drag Reduction at a Subcritical Reynolds number,*J. Fluid Mech.,*517, 113–129.

Johnson, T. A. ve Patel, V. C., 1999,Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300,*J. Fluid Mech.*,378, 9-70.

Kim, H.J. ve Durbin, P. A., 1988, Observations of the Frequencies in A Sphere Wake And of Drag Increase By Acoustic Excitation, *Phys. Fluids*,31(11), 3260–3265.

Kim, I., ve Pearlstein, A. J., 1990, Stability of the Flow Past A Sphere, *Journal of Fluid Mechanics*, 211, 73-93.

Kiya, M., Ishikawa, H. ve Sakamoto, H., 2001, Near-wake instabilities and vortex structures of three-dimen-sional bluff bodies: a review, *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 89, 1219–1232.

Kumar, R.A., Sohn, C.H. ve Gowda, B.H.L., 2008, Passive Control of Vortex-Induced Vibrations,An Overview, *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 1 (1-11).

Lee, K. C., 1979, Aerodynamic Interaction Between two Spheres at Reynolds Numbers Around 10^4, *Aeronautical Quarterl* ,30, 371-385.

Lei, C., Cheng, L., ve Kavanagh, K., 1999, Re-Examination of The Effect of a Plane Boundary on Force and Vortex Shedding of a Circular Cylinder,*Journal of Wind Engineering, and Industrial Aerodynamics,* 80, 263-286.

Leweke, T., Provansal, M. ve Ormie`res, D., 1999, Lebescond R Vortex Dynamics in the Wake of a Sphere,*Phys Fluid,*11(9), 12.

Liang, S. C., Hong, T., & Fan, L.-S., 1996, Effects of particle arrangements on the drag force of a particle in the intermediate flow regime, *International J. of Multiphase Flow,* 22, 285-306.

Mattner, T.W., Joubert P. N. ve Chong, M. S., 2003, Vortical Flow. Part 2. Flow Past A Sphere in A Constant-Diameter Pipe, *J. Fluid Mech.,* 481, 1–36.

Maxworthy, T., 1969, Experiments on the flow around a sphere at high Reynolds numbers, *J. Appl. Mech.,* 36, 598.

Mehta, D., 1985, Aerodaynamic of Sport Balls,*Ann. Rev., Fluid Mechs.,*17, 151-89.

Nakamura,I., 1976, Steady Wake Behind A Sphere,*Phys Fluids,*19(1), 5–8.

Nunez, J. ve Voigt, V., 1999, LIF And 3D-PIV Measurements Applied on the Wake Behind A Sphere, *Euromech 406 Image Processing Methods in Applied Mechanics,* Warsaw, Poland.

Okamoto, S., 1980, Turbulent shear flow behind a sphere placed on a plane boundary, *Turbulent Shear Flow,* 2, 246–256.

Özgören M, Okbaz A, Doğan S, Şahin B. ve Akıllı, H, 2013, Investigation of Flow Characteristics around a Sphere Placed in a Boundary Layer over a Flat Plate, Experimental, *Thermal and Fluid Science,* 62-74, DOI information: 10.1016/j.expthermflusci.2012.05.014

Özgören M., Okbaz, A., Doğan, S., Şahin B. ve Akıllı, H., 2012a, Comparison of Flow Structure Behaviors around a Sphere and its Passive Control in a Boundary Layer Flow, *International Journal of Arts & Sciences Conference (IJAS),* Piazza della Calza, Florence.

Özgören M., Doğan, S., Okbaz, A., Aksoy M. H**.,** Sahin, B., ve Akıllı, H., 2012b, Comparison of Flow Characteristics of Different Sphere Geometries Under the Free Surface Effect, *Experimental Fluid Mechanics 2012 (EFM2012),* Hradec Králové, EPJ Web of Conferences, Czech Republic, 536-545.

Özgören, M., Okbaz, A., Doğan S., Şahin B. ve Akıllı, H., 2012c, Effect of Passive Jet on the Turbulent Wake of a Sphere Exposed to a Boundary Layer Flow over a Flat Plate , *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition,* İzmir, Türkiye, 640-652

Özgören, M., Okbaz, A., Doğan, S., Kahraman, A., Hassanzadeh, R., Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011a, Turbulent Shear Flow Downstream of A Sphere With And Without An O-Ring Located Over A Plane Boundary, *Experimental Fluid Mechanics*, Jičín, Czech Republic, 25(01066) DOI information: 10.1051/epjconf/20122501066

Özgören M., Doğan, S., Okbaz,A., Şahin, B. ve Akıllı, H., , 2011b, Comparison of Flow-Sructure around A Smooth and Roughened Sphere in a Turbulent Boundary Layer, *International Scientific Conference*, Gabrova, Republic of Bulgaria 193-200.

Özgören, M., Pınar, E., Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011c, Comparison of flow structures in the downstream region of a cylinder and sphere, *International Journal of Heat Fluid Flow* 32 (6), 1138–1146.

Özgören, M., Okbaz**,** A., Doğan, S., Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011d, Küre Sınır Tabaka Etkileşiminin PIV Yöntemiyle Araştırılması, *18. Ulusal Isı Bilimi Kongresi, Eylül 7-10*, Zonguldak, Türkiye, 133-140

.

Özgören, M., Kahraman, A., Okbaz, A., Şahin, B, ve Akıllı,H., 2010, Quantitative Flow Structures around a Sphere Placed in the Boundary Layer on and over flat Plate, *Euromech Fluid Mechanics Conference –8, (EFMC-8),* Institute of Aerodynamics and the Institute for Computational Mechanics of Technische Universitaet Muenchen, Altes Koenigliches Kurhaus, Bad Reichenhall, Germany, 3, Shear Flows, 3-35.

Özgören, M., Şahin B., Akilli H., Karakuş C., Yayla S., Öztürk A., ve Akar A.,2006,Küre Etrafındaki Akış Yapısının Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Yöntemiyle İncelenmesi, *UHUK*,ODTÜ-Ankara, 6-28.

Patnaik, P.C., Vittal, N., ve Pande, P.K., 1992, Drag coefficient of a stationary sphere in gradient flow, *Journal of Hyraulic Reseacrh*, 30 (3), 389-402.

Ryu, K.W., ve Lee, D. J., 1997, Interaction between a Vortex Ring and a Rigid Sphere.*European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 16 (5), 645-664.

Sakamoto, H. ve Haniu, H., 1990, A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow. *J Fluids Eng.*,112, 386–392.

Sakamoto, H. ve Haniu, H., 1995, The formation mechanism and shedding of vortices from a sphere in a uniform shear flow, *J. Fluid Mech.*,287, 151-171.

Sakamoto, H., Haniu, H. ve Nakamura, T., 1989, Study on Vortex Shedding from Spheres in A Uniform Flow, *Transactions of the Jap an Society of Mechanical Engineers, Part B*, 55 (515), 1889-1895

Schouveiler, L. ve Provansal, M., 2002, Self-Sustained Oscillations in the Wake of a Sphere, *Physics of Fluids*, 14 (11), 3846-3854.

Shirayama, S., 1992, Flow Past A Sphere: Topological Transitions of the Vorticity Field,*AIAA J.*, 30, 349–358.

Smits, A. J., 2000, A Physical Introduction to Fluid Mechanics, *Jhon and Wiley*.

Son, K., Choi, J., Jeon, W. ve Choi, H., 2010, Effect of free-stream turbulence on the flow over a sphere, *Physics of Fluids*, 22, 045101.

Sungsu, L., ve James, M. W., 2000, The Effects of Shear Flow on the Unsteady Wakes Behind A Sphere at Moderate Reynolds Numbers, *Fluid Dynamics Research*, 27, 1-22.

Suryanarayana, G.K. ve Prabhu A., 2000, Effect of natural ventilation on the boundary layer separation and near-wake vortex shedding characteristics of a sphere, *Exp. Fluids,* 29 (7), 582–591.

Şahin B., Akıllı H., Öztürk A. N., Karakuş C., Kahraman A., Akar A., Yanıktepe B., Özalp C. ve Gürlek C., 2003, Akışkanlar Mekaniği Uygulamalarında Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV), *Ç.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,* Özel Sayı. 18, 103-111..

Taneda, S., 1956, Experimental Investigation of the Wake behind a Sphere At Low Reynolds Number, *J. Phys Soc Japan*, 11(10), 1104–1108.

Taneda, S., 1965, Experimental Investigation of Vortex Streets, *Journal of Physical Society of Japan.*, 20, 1714-1721.

Taneda, S., 1978, Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 104 and 106, *Journal of Fluid Mechanics*,85, 187-192.

Taniguchi, S. ve Miyokoshi, K., 1990, Fluctuating Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and Interference with a Plane Wall, *Experiments in Fluids*, 9, 197-204.

Thompson, M. C., Leweke, T. ve Provansal, M., 2001, Kinematics and dynamics of sphere wake transition, *Journal of Fluids and Structures*, 15, 575-585

Tomboulides, A.G. ve Orszag, S.A., 2000, Numerical İnvestigation of Transitional and Weak Turbulent Flow Past a Sphere, *J. Fluid Mech.*, 416, 45-73.

Tsutsui, T., 2008, Flow aroud a sphere in a plane turbulent boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 779-792.

Vukman, B., 2004, Experimental investigation of a flow around a sphere,*Thermal Science*, 8 (1), 63 – 81.

Wei, Q., Lin, R. ve Liu, Z.,1988, Vortex-induced Dynamic Loads on a Non-spinning Volleyball,*Fluid Dynamics Research*, 3 (1-4), 231-237.

Werle, H. O., 1980, Pohotograph in: An Album of Fluid Motion (assembled by Dyke V), *Parabolic Press*, Stanford, 32–35.

Westerweel, J., 1993, Digital Particle Image Velocimetry, Theory And Application, *Delft University Press*.

Williamson, C. H. K., ve Govardhan, R., 1997, Dynamics and Forcing of a Tethered Sphere in A Fluid Flow, *Journal of Fluids and Structures*, 11, 293–305.

Wu, J.-S. ve Faeth, G.M., 1993, Sphere wakes in still surroundings at intermediate Reynolds numbers Source, *AIAA Journal*, 31 (8), 1448-1455.

Wu, J.S. ve Faeth, 1994, Sphere Wakes at Moderate Reynolds Numbers in Turbulent Environment, *AIAA Jounal*, 32 (3), 535-54.

Young II, J., and Lee, S.J., 2008, PIV analysis of near-wake behind a sphere at a subcritical Reynolds number, *Experiments in Fluids*, 44 (6), 905-914.

Yun G., Kim D. ve Choi H., 2006, Vortical structures behind a sphere at subcritical Reynolds numbers. Phys Fluids, 18 (1), 015102.

Yutaka, T., Yoshinobu, M., ve Kozo, T., 1982, Fluid-Dynamic İnteraction Between Two Spheres, *International Journal of Multiphase Flow*, 8 (1), 71-82.

Zdravkovich, M. M., 1980, Intermittent Flow Separation From Flat Plate Induced by a Nearby Circular Cylinder, *2nd International Symposium on Flow Visualization*, Bochum, West Germany, 265-270.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Abdulkerim OKBAZ
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	ANAMUR / 16.03.1987
Telefon	**:**	0538 6328494
e-mail	**:**	abdulkerim_okbaz@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Anamur Anadolu Lisesi, Anamur, Mersin**	**2005**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Selçuklu, Konya**	**2009**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D. Selçuklu, Konya**	**2009 devam ediyor**

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2010-2012	Selçuk Üniversitesi (KONYA)	Proje Asistanı-TÜBİTAK Bursiyeri
2012-.devam ediyor...	Nevşehir Üniversitesi Makine Mühendisliği	Araştırma Görevlisi (ÖYP)

UZMANLIK ALANI

Akışkanlar Mekaniği uygulamaları, Akış kontrol yöntemleri, Akış Görüntüleme ve Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği, Enerji Sistemleri ve Uygulamaları

YABANCI DİLLER

İngilizce
(ÜDS Fen Bilimleri :87.5, KPDS :85, TOEFL IBT: 70

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Sertifikalar

1)Ekserji ve Uygulamalari Yaz Kursu Katılım Sertifikası, Osmaniye 2012

2)ISO 9001, 14000, 18000 Eğitim Sertifikaları, 2009

3)İç Tetkikçi Eğitimi Sertifikası, 2009

4) Girişimcilik Eğitimi Sertifikası, 2009

5) Avrupa Birliği Proje Hazırlama Eğitimi Sertifikası, 2009

6) Uluslar Arası Teknik Öğrenci Değişim Programı (IAESTE) Katılım Sertifikası, 2008

YAYINLAR

Popüler Bilim Makaleleri

Okbaz, A.,Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinde Yeni bir Yöntem: VIVACE, *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, Aralık 2011, 64-69, Türkiye

International Science Citation (SCI) Index'ce Taranan Dergilerde Yayınlanmış Makaleleri

Özgören M, **Okbaz A**, Doğan S, Şahin B, Akilli H, 2013, Investigation of Flow Characteristics around a Sphere Placed in a Boundary Layer over a Flat Plate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 62-74, DOI information: 10.1016/j.expthermflusci.2012.05.014 (Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır**).**

Uluslararası Konferans Makaleleri

Özgören M., Doğan, S., **Okbaz, A**., Şahin, B. veAkıllı, H., 2012, Investigation of Roughness Effect on The Flow Structure around a Sphere Placed Different Locations Beneath the Free Surface of Water Flow, *International Journal of Arts & Sciences Conference (IJAS)*, Gottenheim,Germany.

Özgören, M.,Doğan, S., **Okbaz, A.,** Aksoy,M. H., Şahin,B. veAkıllı, H., 2012, Comparison of Flow Characteristics of Different Sphere Geometries Under the Free Surface Effect, *Experimental Fluid Mechanics (EFM2012), EPJ Web of Conferences*, Czech Republic, Hradec Králové, 536-545.

Canlı, E.,**Okbaz, A.**, Özgoren, M. ve Örs, İ.,2012, Investigation of Flow Structure Behind A Modelled Vehicle With and Without SpoilerVia Particle Image Velocimetry Method,*International Journal of Arts & Sciences Conference* ,Germany, France & Switzerland.

Özgören, M.,**Okbaz, A.**, Doğan, S., Şahin, B. ve Akıllı, H., Effect of Passive Jet on the Turbulent Wake of a Sphere Exposed to a Boundary Layer Flow over a Flat plate,*6th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, İzmir, Türkiye, 640-652 (Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır).

Özgören, M., Doğan, S., **Okbaz, A.**, Şahin, B. veAkıllı, H., 2012, Free Surface and An O-Ring Effects in the Downstream of A Sphere, 6th International Ege Energy Symposium and Exhibition İzmir, Türkiye, 788-798.

Özgören, M., Doğan, S., **Okbaz, A.,**Şahin, B., Akıllı, 2011, H., Passive Control of Flow Structure Interaction between a Sphere and Free-Surface, *Experimental Fluid Mechanics,EPJ Web of Conferences*,Jičín, Czech Republic, 25(01065) DOI information: 10.1051/epjconf/20122501065

Özgören, M., **Okbaz, A**., Doğan, S., Kahraman, A., Hassanzadeh, R., Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011a, Turbulent Shear Flow Downstream of A Sphere With And Without An O-Ring Located Over A Plane Boundary, Experimental Fluid

Mechanics, Jičín, Czech Republic, 25(01066) DOI information: 10.1051/epjconf/20122501066 (Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır).

Özgören, M.,Doğan, S., **Okbaz, A.**, Şahin, B. veAkıllı, H., 2011, Comparison of Flow-Structure Around A Smooth and Roughened Sphere In A Turbulent Boundary Layer, *International Scientific Conference*, Gabrovo, Bulgaria,193-200 (Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır).

Özgören, M., Doğan, S., **Okbaz, A.**, Şahin, B. ve H.Akıllı, 2011, Investigation of Surface Roughness Effect on the Flow Structure around A Sphere, *6. Ankara International Aerospace Conference*,METU, Ankara, Türkiye.

Özgören, M., **Okbaz, A.**, Kahraman, A., Hassanzadeh, R., Şahin, B., Akıllı, H. ve Doğan, S., 2011, Experimental Investigation of the Flow Structure around a Sphere and Its Control with Jet Flow via PIV, *The sixth International Advanced Technologies Symposium*, Fırat University, Elazıg, Türkiye, 272-277.

Özgören, M., **Okbaz, A.**, Doğan, S., Kahraman, A., Hassanzadeh, R., Şahin, B. veAkıllı, H., 2011, Passive Control of Vortical Flow Structure around a Sphere by an O-ring, The sixth International Advanced Technologies Symposium, Fırat University, Elazıg, Türkiye, 287-292

Özgören,M.,Kahraman, A.**, Okbaz, A.**, Şahin, B. ve Akıllı, H., Quantitative Flow Structures around a Sphere Placed in the Boundary Layer on and over a flat Plate, *Euromech Fluid Mechanics Conference – 8, (EFMC-8),* Institute of Aerodynamics and the Institute for Computational Mechanics of Technische Universitaet Muenchen, Altes Koenigliches Kurhaus, Bad Reichenhall, Germany, S3: Shear Flows, 3-35 (Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır).

Ulusal Konferans Makaleleri

Özgören, M., **Okbaz, A**., Doğan, S., Hassanzadeh, R., Fırat, E.,Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011, Visualization of Turbulent Flow Structure around a Sphere and its Passive Control at Moderate Reynolds Numbers, *Kullanıcı Konferansı*, İstanbul Ex-en Mühendislik Test Simülasyon

Özgören, M., Doğan, S., **Okbaz, A.**, Şahin, B., Akıllı, H.,2011, Küre Serbest Yüzey Etkileşimiyle Oluşan Türbülanslı Akış Yapısının Deneysel Araştırılması, *18. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, Zonguldak, Türkiye, 141-146

Özgören.M.,**Okbaz, A.**, Doğan, S., Şahin, B., Akıllı, H.,2011, Küre Sınır Tabaka Etkileşiminin PIV Yöntemiyle Araştırılması, *18. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, Eylül 7-10, Zonguldak, Türkiye(Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır), 133-140