T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRESEL SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan
Esra AKÇADIRCI

Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Serpil ÖZKILIÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2006
KAYSERİ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın gerçekleşmesinde değerli bilgileriyle beni yönlendiren, her türlü yardımını ve yakın ilgisini gördüğüm, danışmanım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Serpil ÖZKILIÇ olmak üzere,tecrübelerinden faydalandığım ve büyük desteklerini gördüğüm Yrd. Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya , sıcak tel anemometresinin kullanımında bana yardımcı olan arkadaşım Arş. Gör. Sibel GÜNEŞ'e ve çalışmamda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

DAİRESEL SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Esra AKÇADIRCI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2006
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Serpil ÖZKILIÇ

ÖZET

Uygulamada, hava akımına maruz kalan cisim ya da yapıların, büyük bir çoğunluğu akım doğrultusuna göre oldukça geniş bir kesit alanı olan küt cisim olarak da isimlendirilen sistemlerdir. Bir akış alanı içerisinde bulunan herhangi bir yapı, aerodinamik kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu kuvvetler genel olarak, aerodinamik teori ve deneyleri sonucunda belirlenebilir.

Bu çalışmada, dairesel bir silindir etrafındaki akım parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen hız dağılımı ve türbülans şiddeti dağılımları sıcak tel anemometresi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sıcak telin kalibrasyonu, akış ünitesinin tam merkezinde, farklı hız ve sıcaklıklarda yapılmıştır. Daha sonra sıcak tel deney odasında, akım yönüne yerleştirilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Modelin yüzey basınç dağılımı ise, manometre kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar grafiklerle değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, iz bölgesindeki girdapların gözlenebilmesi, smoke-wire metodu ile gerçekleştirilmiştir ve çekilen fotoğraflarla model arkasındaki akış gözlenebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Küt Cisim, Küt Cisim Aerodinamiği, İz bölgesi, Girdap Kopması, Basınç Dağılımı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW PARAMETERS AROUND CIRCULAR CYLINDER

Esra AKÇADIRCI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, June 2006
Thesis Supervisor: Assist. Prof. Serpil ÖZKILIÇ

ABSTRACT

In the application, body or structures which are exposed to air flow, according to flow direction with wide sectional area, are the systems called bluff body. Whichever a structure being inside a flow area, is effected by aerodynamic forces. As general these forces, are determinated by aerodynamic theory and experimental results.

In this study, flow parameters around circular cylinder were investigated by experiments. At the result of experimental study, velocity distribution and turbulence distribution was performed with hot wire anemometry. First of all, hot wire calibration was performed at the center of the flow unit at different velocities and temperatures. After this, hot wire was aligned to the experiment room to flow direction and measurement was performed. Surface pressure distribution of cylinder was measured with manometer and results were evaluated with the graphics. At the end of the experiments, observation of vortex shedding in the wake region was aligned by smoke-wire method and flow around the circular cylinder was observed with photographies.

Keywords: Bluff Body, Aerodynamics of Bluff Body, Wake Region, Vortex Shedding, Pressure Distribution

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR..... II
ÖZET..... III
ABSTRACT..... IV
İÇİNDEKİLER..... V
ŞEKİLLER LİSTESİ..... VII
SEMBOLLER LİSTESİ..... X

BÖLÜM I.....
GİRİŞ.....
1.1 Konu ve Önemi..... 1
1.2 Amaç..... 2
1.3 Kapsam..... 3
BÖLÜM II.....
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....
2.1 Giriş..... 4
2.2 Yapılan Çalışmalar..... 4
BÖLÜM III.....
KÜT CİSİM AERODİNAMİĞİ.....
3.1 Giriş..... 18
3.2 Küt Cisim Aerodinamiği..... 19
3.3 Türbülanslı Akışın Özellikleri..... 27
3.3.1 Ortalama Hareket ve Çalkantılar..... 28
3.4 Rüzgar Tüneli Türbülansı..... 30
BÖLÜM IV.....
DENEYSEL ÇALIŞMA.....
4.1 Giriş..... 32
4.2 Rüzgar Tüneli..... 32
4.3 Test Bölgesi ve Model Detayı..... 35
4.4 Ölçüm İşlemi..... 37
4.4.1 Hız ve Girdap Kopma Frekansının Ölçülmesi.....
4.4.1.1 Sıcak Tel Anemometresi ve Kalibrasyonu..... 37

4.4.1.2 StreamWare Yazılım Programı……... 42
4.4.2 Basınç Ölçümü……...
4.4.2.1 Basınç Ölçer ve Kalibrasyonu……. 43
4.4.3 Akış Görüntüleme Metodu…… 44
4.5 Bulgular…….
4.5.1 Tünel Karakteristikleri……... 47
4.5.2.Dairesel Silindir Etrafındaki Akım Karakteristikleri…….
4.5.2.1 Dairesel Silindir Etrafındaki Anlık Hız-Zaman Değişimleri…….. 51
4.5.2.2 Dairesel Silindir Etrafındaki Girdap Oluşum Karakteristikleri……... 53
4.5.2.3 Dairesel Silindirin İz Bölgesindeki Hız Karakteristikleri……... 60
4.5.2.4 Dairesel Kesitli Model Yüzeyinde Ölçülen Yüzey Basınç Dağılımları…….. 64
4.5.2.5 Dairesel Kesitli Silindirik Modeli Etkileyen Sürükleme ve Kaldırma Kuvvet Katsayıları……... 67
4.7.2.6 Dairesel Kesitli Silindirik Model Etrafındaki Akış Görünürlüğü..... 70
BÖLÜM V……
İRDELEME VE SONUÇLAR……
5.1 İrdeleme..... 73
5.2 Sonuçlar..... 77
KAYNAKLAR..... 79
ÖZGEÇMİŞ..... 83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Arka Plaka Geometrisinin ve Deney Modelinin Şematik Görünümü.....	7
Şekil 2.2.	Kullanılan Silindir Konfigürasyonları.....	10
Şekil 2.3	Küt Tabanlı Cismin Şematik Görünümü.....	10
Şekil 2.4.	Deneysel Düzeneğin Şematik Görünümü.....	14
Şekil 2.5.	Pürüzlülük Elemanlarıyla Birlikte Dairesel Silindirin Şematik..... Görünümü.....	15
Şekil 2.6.	x/d=4.25 Konumunda Hız Alanında İncelenen Akım Çizgileri a) Orjinal Alan b) WAG methodu c) Spektral Filtreleme c) Dalga Engelli Filtreleme.....	16
Şekil 3.1.	Dairesel Bir Silindir Etrafındaki Ayrılmasız Akış Rejimi (Re<5).....	19
Şekil 3.2.	Dairesel Bir Silindir Etrafındaki Dönen Girdaplar Halindeki Akış Ayrılması.	20
Şekil 3.3.	Dairesel Silindir Etrafındaki Akımın Re Sayısı Göre Değişimi…….....	21
Şekil 3.4.	Dairesel Silindir Etrafındaki Sınır Tabaka Ayrılmaları.....	23
Şekil 3.5.	a) Laminer Ayrılma b) Türbülanslı Ayrılma c) Teorik ve Gerçek, Yüzey Basınç Dağılımı.....	27
Şekil 3.6.	Cismin Geometrisine Bağlı Akım Ayrılması a)C_D=0.76 b)C_D=0.46.....	27
Şekil 3.7.	Daimi Türbülanslı Akışta Bir Noktada Ölçülen Hızın Ortalama, Anlık ve Çalkantı Değerleri.....	28
Şekil 4.1.	Rüzgar Tünelinin Şematik Görünümü.....	33
Şekil 4.2.	Rüzgar Tünelinin Genel Görünümü.....	34
Şekil 4.3.	Deney Odasının Genel Görünümü.....	34
Şekil 4.4.	400mm x 400mm Kesit Alanlı Test Bölgesi.....	35
Şekil 4.5.	Üç Parçalı Dairesel Modelin Şematik Görünüşü.....	36
Şekil 4.6.	Model Ve Uç Plakaların Tünel İçindeki Şematik Görünümü.....	36
Şekil 4.7.	Sıcak Tel Probu.....	38
Şekil 4.8.	Bir Sabit Sıcaklık Anemometresinin Blok Diyagramı.....	39
Şekil 4.9.	Sabit Sıcaklık Anemometresinin Ölçüm Zinciri.....	40
Şekil 4.10.	Sabit Sıcaklık Anemometre Sistemi.....	40
Şekil 4.11.	Travers Sistemi.....	41

Şekil 4.12. Kalibrasyon Eğrisi..... 42
Şekil 4.13. ManoAir 500 Serisi Basınç Ölçer..... 43
Şekil 4.14. Model ve Döndürme Mekanizmasının Birlikte Görünümü..... 44
Şekil 4.15. Modelin Test bölgesine Yerleştirilişi ve Manometreyle Bağlantısı..... 44
Şekil 4.16 Akımı Görüntülemek için Kullanılan Düzeneğin Şematik Görünümü..... 46
Şekil 4.17. Kurulan Düzeneğin Güç Kaynağı ile Bağlantısı..... 46
Şekil 4.18. x=250 mm y=0 Konumunda Düşey Düzlemdeki Hız Dağılımları..... 48
Şekil 4.19. x=250 mm y=0 Konumunda Düşey Düzlemdeki Türbülans Şiddeti Dağılımları..... 48
Şekil 4.20. x=250 mm z=0 Konumunda Yatay Düzlemdeki Hız Dağılımları..... 50
Şekil 4.21. x=250 mm z=0 Konumunda Yatay Düzlemdeki Türbülans Şiddeti Dağılımları..... 50
Şekil 4.22. Rüzgar Tünelinde Model Yokken,x=250 mm ve y=0 z=0 Konumundaki Türbülans Şiddeti Dağılımları..... 51
Şekil 4.23. x/D=2 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Hız-Zaman Değişimleri.. 52
Şekil 4.24. Modelden 250 mm Uzakta a)10 m/s'de z/D=0.8 b)20 m/s'de z/D=1.6 c)30 m/s'de z/D=2.4 Konumundaki Hız-Zaman Değişimi..... 53
Şekil 4.25. x/D=4 İstasyonunda Değişik z/D Konumlarında ve Farklı Hızlardaki Hız-Zaman Değişimleri..... 53
Şekil 4.26. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=2 z/D=0.8 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri..... 55
Şekil 4.27. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=2 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri..... 55
Şekil 4.28. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=4 z/D=0.8 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri..... 56
Şekil 4.29. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=4 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri..... 56
Şekil 4.30. Model Arkasında Re=14500 ve x/D=2 Konumunda Spektral Yoğunluğun Frekans ve z/D'ye Göre Değişimi..... 57
Şekil 4.31. a)Model Arkasında Farklı x İstasyonlarında St Sayısının Re ile Değişimi b)Model Arkasında z/D=1.6 'da Farklı x/D İstasyonlarındaki St Sayısı..... 58

Şekil 4.32. Model Arkasında z/D=1.6 Konumunda Elde Edilen St Sayılarının Re Sayısı İle Değişimi..... 59
Şekil 4.33. Model Arkasında Tünel Kesiti Boyunca Elde Edilen St Sayıları..... 59
Şekil 4.34. Model Arkasındax/D=2,4,6 ve 8 Konumlarında Düşey Eksendeki Ortalama Hız Dağılımları..... 61
Şekil 4.35. Model arkasındax/D=2,4,6 ve 8 Konumlarında Düşey Eksendeki Ortalama Türbülans Şiddeti Dağılımları..... 62
Şekil 4.36. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Boyutsuz Hız Dağılımları (Re=23200)..... 63
Şekil 4.37. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Türbülans Dağılımları (Re=23200)..... 63
Şekil 4.38. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Türbülans Şiddeti Dağılımları..... 64
Şekil 4.39. Model Etrafındaki Çevresel Basınç Dağılımı..... 65
Şekil 4.40. Re Sayısıyla Basınç Katsayısının Değişimi..... 66
Şekil 4.41. θ Açısının Re Sayısına Göre Değişimi..... 66
Şekil 4.42. Çevresel Basınç Katsayısının θ ile Değişimi..... 67
Şekil 4.43. Modelin Basınç Katsayısı Dağılımından Sürükleme Kuvvet Katsayısının Bulunması..... 68
Şekil 4.44. Modelin Basınç Katsayısı Dağılımından Kaldırma Kuvvet Katsayısının Bulunması..... 69
Şekil 4.45. Sürükleme Kuvvet Katsayısının Re Sayısı ile Değişimi..... 69
Şekil 4.46. Model Etrafındaki Akış Görüntüsünün Farklı Zamanlarda Çekilmiş Fotoğrafları (Re=7 x 10^3)..... 71
Şekil 4.47. Model Etrafındaki Akış Görüntüsünün Farklı Zamanlarda Çekilmiş Fotoğrafları (Re=8 x 10^3)..... 72

SEMBOLLER LİSTESİ

A, B : Kalibrasyon sabitleri

AR : Cismin boyunun çapına olan oranı (W/D)

C_D : Sürükleme kuvvet katsayısı $C_D = \dfrac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty{}^2 d}$

$C_{Dbasınç}$: Basınç direnç katsayısı

$C_{Dsürt.}$: Sürtünme direnç katsayısı

C_L : Kaldırma kuvvet katsayısı $C_L = \dfrac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty{}^2 d}$

C_p : Yüzey basınç katsayısı, $C_p = \dfrac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$

d : Kontrol disk çapı [m]

D : Dairesel silindirin çapı [m]

E : Gerilim [Volt]

f : Frekans [Hz]

f_s : Girdap kopma frekansı [Hz]

F_D : Sürükleme kuvveti [N]

F_L : Kaldırma kuvveti [N]

G/B : Aralık oranı

H : Rüzgar tüneli test bölgesi yüksekliği [m]

n : Kalibrasyon üs sabiti

P : Küt cisim yüzey basıncı [N/m^2]

PSD : Spektral yoğunluk

P_∞ : Serbest akışın statik basıncı [N/m^2]

Re : Reynolds sayısı, $Re = \dfrac{U_\infty D}{\nu}$

s : Etkili sürükleme rejimi

$s_{No\text{-}Hi}$: Etkisiz sürükleme rejimi

$s_{Hi\text{-}Lo}$: Yüksek sürükleme rejimi

$s_{Lo\text{-}T}$: Düşük sürükleme rejimi

s_T : Seri sürükleme rejimi

St : Strouhal sayısı, $St = \frac{f_s D}{U_\infty}$

t : Zaman [s]

T_o : Kızgın tel kalibrasyonu sırasındaki ortam sıcaklığı [°C]

Tu : Türbülans şiddeti, $Tu = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}}$

u : Serbest akış yönündeki anlık hız [m/s], $u = \bar{u} + u'$

$\bar{u}$: Serbest akış yönündeki ortalama hız [m/s]

U_N : Kızgın tele dik olan hız bileşeni [m/s]

U_T : Kızgın tele teğet olan hız bileşeni [m/s]

U_B : Kızgın tele paralel olan hız bileşeni [m/s]

U_∞ : Serbest akış hızı [m/s]

U_o : Rüzgar tüneli kesitindeki ortalama hız [m/s]

u′ : Serbest akış yönündeki çalkantı hızı [m/s]

$\overline{u'^2}$: Çalkantı hızının karesinin ortalaması (u-normal gerilmesi) [m^2/s^2]

$\overline{u'v'}$: u ve v hızlarının çarpımının ortalaması (uv-kayma gerilmesi) [m^2/s^2]

τ_{xy}, τ_{xz} : Re gerilme bileşenleri

W : Rüzgar tüneli test bölgesi genişliği [m]

x : Rüzgar tüneli test bölgesindeki radyal mesafe [mm]

y : Rüzgar tüneli test bölgesindeki yatay düzlem [mm]

z : Rüzgar tüneli test bölgesindeki eksenel mesafe [mm]

θ : Dairesel modelin önünden saat ibresi yönünde değişen açı [°]

ν : Kinematik viskozite [m^2/s]

ρ : Yoğunluk [kg/m^3]

δ : Sınır tabaka kalınlığı [mm]

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Konu ve Önemi

Küt cisimlerin, atmosferik türbülansdaki akım parametreleri oldukça karmaşık olup; birçok mühendislik problemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Küt cisim aerodinamiği üzerinde hala yapılan akademik ve pratik görüşler nedeniyle; son yıllarda, laboratuar çalışmalarında da belirgin bir artış vardır. Fiziksel olayların açıklanması, deneysel çalışmalardan elde edilmektedir. Ayrıca teorinin ve hesaplama metotlarının geliştirilmesi, yapılacak çalışmalara ışık tutması ve desteklemesi açısından da deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

Küt cisim; akış doğrultusuna göre oldukça büyük bir dik kesit alana sahip ve akışkanı yüzeyden ayırmaya zorlayan, yani sınır tabaka teorisini gerçekleştiren cisimler olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle; bir cisim etrafındaki akışta; akış çizgileri cismin yüzeyini takip etmiyor ve ayrıca akışın yüzeyden ayrılmasına ve cismin arkasında geniş bir iz bölgesi oluşmasına neden oluyorsa, bu cisim aerodinamik açıdan küt cisim olarak ifade edilir. Dairesel veya dikdörtgen kesitli silindir, küre, büyük hücum açılı düzlem plaka örnek olarak verilebilir [1].

Akış doğrultusundaki küt cisimler, geometrileri ve akışa direnç göstermeleri nedeniyle periyodik olarak girdap oluştururlar. Girdap sonucu oluşan dinamik kuvvetler, cisimler üzerinde titreşime neden olabilmektedir. Akış ile cismin etkileşimi sonucu meydana gelen dinamik yükler ve gürültü bu sistemlerde önemli derecede hasarlar meydana getirebilirler. Bu çeşit etkileşim, türbin ve helikopter kanatlarının hücum kenarlarında, yüksek binalar etrafında, petrol platformları ayaklarında, ısı değiştirgeçlerinin tüp demetleri etrafında meydana gelebilir. Bu yüzden girdap kopmasının araştırılması, son derece önemlidir.

Deneysel ve teorik çalışmaların araştırma konusu olan bu girdap kopmalarına sebep ise, sınır tabakanın yüzeyden ayrılmasıdır. Cisim üzerinde oluşan sınır tabaka, cismin arkasında bir iz bölgesi oluşturacak şekilde devam etmektedir. Sınır tabaka içerisinde akışkan molekülleri cidarı takip ederken, sürtünmeler nedeniyle kinetik enerjilerinin büyük bir kısmını kaybederler.

Enerji korunumunun önemi nedeniyle, son zamanlarda küt cisim akışları konusu üzerinde önemle durulmaktadır. Büyük yapılar, rüzgar kaynaklı büyük genlikli titreşimlerden sakınılacak şekilde dizayn edilmiş olmalıdır. Küt cisimler ve yapılar etrafındaki rüzgar akımı, bu cisimler etrafında bir basınç dağılımı meydana getirmektedir. Bu basınçlar, cisme zarar verebilen veya rahatsız edici bir şekilde titreşebilen kuvvetler üretecek şekilde, cismin yüzeyi boyunca etkilerini sürdürürler. Sınır tabakanın yüzeyden ayrılmasıyla oluşan bu basınç kuvvetleri, küt bir cisimde serbest akış yönündeki sürükleme kuvvetini de belirlerler. Ayrıca düz bir yüzey üzerinde bulunan küt cisimler etrafındaki türbülanslı akış içerisinde, bir kayma tabakasının oluşması da kaçınılmazdır. Bunun en önemli nedeni cismin üzerinde bulunduğu yüzeydir.

İşte küt cisim aerodinamiğini etkileyen, bu akım karakteristikleri, araştırılması gereken önemli bir konudur. Bu yüzden yapılan birçok çalışmada model olarak aynı geometri kullanılmasına rağmen, her seferinde ortaya çıkan sonuçlar literatüre faydalı birer kaynak olmuştur.

1.2 Amaç

Küt cisim hidrodinamiği veya aerodinamiği oldukça kompleks olup, şu ana kadar birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmasına rağmen, bu konuda hala araştırmalar sürdürülmektedir.

Rüzgar etkisinde bulunan küt cisimler veya günlük hayatta kullandığımız sabit sistemler (binalar, soğutma kuleleri, köprüler, elektrik direkleri vb.) üzerine etki eden aerodinamik kuvvetlerin, basınç dağılımlarının ve akım alanının özellikleri ve türbülans kararsızlığından kaynaklanan girdap olayının, deneysel olarak belirlenmesi gerekir. Bu gibi olaylara kaynak olması düşünülen bu tez çalışmasının amacı, dairesel bir silindir

etrafındaki akım alanı, basınç dağılımı ve türbülans kararsızlığına etkili parametrelerin deneysel olarak belirlenmesidir.

Ayrıca bu çalışma, gelecekte rüzgar tüneli ve sıcak tel anemometresiyle yapılacak araştırmalara ön hazırlık amacıyla yapılmıştır.

1.3 Kapsam

Deneyler Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu laboratuarında mevcut açık devreli rüzgar tünelinde yapılmıştır. Bu çalışmada, dairesel silindir etrafındaki akım parametreleri ve türbülans kararsızlık karakteristikleri anemometre yardımıyla, yüzey basınç dağılımı ise manometreyle ölçülmüştür.

Değişik istasyonlarda yapılan farklı ölçümler, küt cisim etrafındaki akış karakteristikleri hakkında bilgi vermiştir. Kalibrasyon ve deney sırasında elde edilen veriler, sıcak tel sistemine ait StreamWare adlı bir paket program kullanılarak sağlanmıştır. Elde edilen veriler grafikler üzerinde gösterilmiş ve sonuçta, cisim arkasındaki iz genişliğinin farklı x/D noktalarında değiştiği, türbülans şiddetinin ise hız arttıkça azaldığı ve yine konuma göre değişiklikler gösterdiği gözlenmiştir. Tünel orta kesitinde bulunan model yüzeyindeki basınç ise, Mano Air 500 serisi, ±200 kPa basınç aralığında bulunan basınç ölçer kullanılarak elde edilmiştir. 10^{o} aralıklarla, 0^{o}~360^{o} arasında ölçülen basınç dağılımları ile, basınç katsayısı (Cp) ve yüzeyden ayrılma noktası yaklaşık olarak tespit edilmiştir.Ayrıca küt cisim etrafındaki akımın, dumanla görüntüleme yöntemiyle gözlenmesi sağlanmış ve elde edilen görüntüler bir kamera vasıtasıyla kaydedilmiştir.

Tez, kapsam itibarıyla beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de, çalışmanın konusu ve önemi genel olarak sunulmuş olup, tez çalışmasının amacı ve kapsamı kısaca anlatılmıştır. Bölüm 2'de, literatür araştırması yapılmıştır. Bölüm 3'de, deneysel çalışmada kullanılan model küt cisim olduğu için, bu cisimlerin aerodinamiği ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm 4'de yapılan deneysel çalışma ve elde edilen bulgular verilmiştir. Bölüm 5'de ise, irdeleme ve sonuçlar sunulmuştur.

BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Son yıllarda artan deneysel çalışmalara rağmen, hala küt cisimler etrafındaki akım karakteristikleri tam olarak çözülememiştir. Özellikle rüzgar ve inşaat mühendisliğini de ilgilendiren, bu konuyla ilgili ilk çalışmalar 16.yy'a dayanmaktadır.

Yapılan bu ilk çalışmalar; belirli Re sayılarında dairesel bir silindir üzerindeki itme ölçümlerinin saptanması ve türbülans karışımının araştırılmasıyla ilgili olmuştur. İlerleyen yıllarda ölçme tekniklerinin ve bilgisayarın gelişmesine bağlı olarak; aerodinamik kuvvetler, yapısal titreşim ve girdap formasyonunun, araştırılmasıyla ilgili çalışmalar başlamıştır.

Literatürde yer alan çalışmalarda, küt cisim olarak genellikle yüzeyden ayrılma noktasının tam olarak saptanamadığı ve akım parametrelerinin daha karmaşık bir hal aldığı, dairesel silindirlerden bahsedilmiştir.

2.2 Yapılan Çalışmalar

Akış analizindeki temel veriler ilk olarak Leonarda da Vinci tarafından incelenmiştir. Leonarda da Vinci (1452-1519) bir boyutlu daimi akış için kütlenin korunumu denklemini türetmiştir. Çalışmaları arasında dalgaların, jetlerin, hidrolik sıçramanın, girdap oluşumunun ve düşük direnç veren profil ve paraşüt gibi, yüksek direnç veren tasarımların tasvirleri de yer almaktadır. Daha sonra; aerodinamikte, hızı ve nitelikleri bilinen bir hava akışının bir cisim üzerindeki etkisini incelemek üzere, Fransız Edme Mariotte (1620-1684) ilk rüzgar tünelini inşa etmiş ve içinde model deneyleri yapmıştır. Dairesel bir silindir etrafındaki akım alanı ile ilgili ölçüm çalışmaları ise, 1960 yılından itibaren değişik kaynaklarda yer almıştır.

1966 yılında Gerrard [2], küt cisim etrafındaki girdap hareketinin oluşumunu incelemiş ve kopma olayına önemli derecede ışık tutacak makaleler yayınlamıştır. Bu çalışmadan iki boyutlu bir cismin iki boyutlu bir dalga hareketini meydana getirmediği sonucu çıkarılmıştır.

Laneville, Gartshore ve Parkinson [3], küt cisim aerodinamiğine türbülansın etkilerini araştırmışlardır. Gölge tekniği kullanılarak yüzeyden ayrılma olayının meydana geldiği durumdaki sınır tabaka kalınlığını ve yüzeyden ayrılma noktasının yerini incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda türbülanslı akımda sınır tabakanın daha kalın olduğu ve eğer hücum açısı artırılırsa veya cisim daha uzun alınırsa, daha önce bir tekrar temas olayının meydana geldiğini bulmuşlardır.

Özkılıç [4] tarafından yapılan çalışmada; küt cisim aerodinamiğinde kullanılan nümerik metotlar ve bu alandaki sınırlamalar incelenmiştir. Türbülanslı bir sınır tabaka içerisine yerleştirilen küt cismin akım alanına ve sınır tabaka karakteristiklerine etkileri ve modele etki eden direnç kuvvet katsayıları incelenmiştir.

Sonuçta; iki boyutlu küt bir cisim için girdap kopma olayı incelenerek; sürünme kuvvetindeki titreşim frekansının, kaldırma kuvvetindeki osilasyon frekansının hemen hemen iki katı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak sürtünme kuvvetinin her titreşiminde kaldırma kuvveti işaret değiştirmektedir. Üç boyutlu küt bir cisim için ise, dalga bölgesinde akımın oldukça kompleks olduğu ve her bölgenin birçok rotasyonel akım ihtiva ettiği görülmüştür. Cismin ön yüzeyindeki basınç direkt olarak hız profilini karakterize etmektedir. Ancak tabana yakın kısımda deneysel verilerle bir farklılık olduğu gözlenmiştir. Bu da gerçekte ön yüzeyde tabana yakın bir sınır tabakanın oluştuğunu belgelemektedir. Ve böylelikle, girdap metodu ile yarım küresel küt bir cisim etrafındaki akım alanı ve oluşumunun iyi bir yaklaşımla teorik olarak analiz edilebileceği gösterilmiştir.

Chang ve Sa [5], dairesel silindir arkasındaki kaldırma kuvvetinin girdap kopmalarına etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada; girdap formasyonun etkileri, ısıtılan veya soğutulan dairesel kesitli silindir etrafında nümerik olarak incelenmiştir. Tabii ve zorlanmış konveksiyon karışımı, akım özellikleri kullanılmıştır. Kaldırma kuvveti sonucu oluşan girdap kopma frekansları, itme kuvvet katsayısı ve kuvvetlerin ısı

transfer davranışları incelenmiştir. Çalışma sonunda girdap kopma frekansının sınır tabaka kalınlığına, girdap dalgalarının takip ettiği yolun ise girdap tabakasının şiddetine bağlı olduğu görülmüştür.

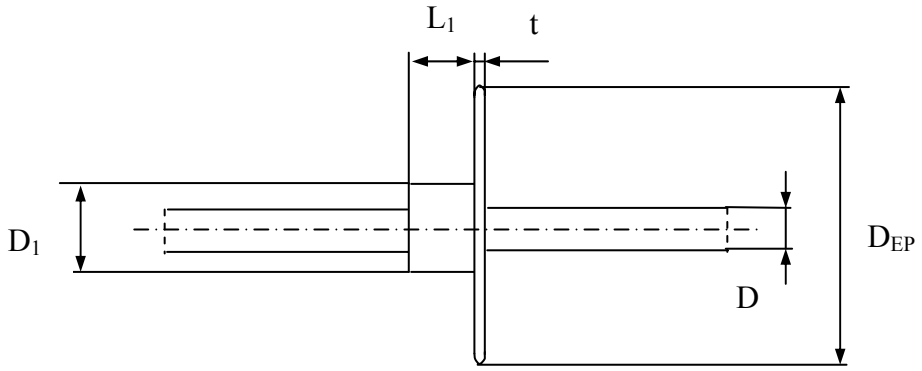
Neish ve Smith [6] tarafından 1992'de yapılan bir çalışmada; laminer ve türbülanslı akım arasındaki değişiklikler; tam türbülanslı rejim için laminer akımdaki bütünlüğü artıran türbülans faktörü yardımıyla incelenmiştir. Türbülans faktöründeki küçük bir artış, dairesel bir silindir etrafındaki akım için, sürüklenen kenar veya arka durma noktasına doğru ayrılmayı artırmak için kullanılmıştır. Başlangıç noktasındaki ayrılmış akım ise, ayrılma noktası için benzer davranışlar üretmekte kullanılmıştır. Sonuçta şu yaklaşımlara ulaşılmıştır: Laminer bir akımda yanyana iki değişik renge boyanmış akışkan kütleleri zaman içinde birbirlerine karışırlar ve uzun bir süre sonra renkler ayırt edilemez olur. Bu durum değişik renkteki akışkan parçacıklarının, diğer renkteki bölgelere taşındığını gösterir. Burada kütle taşınımı vardır. Aynı deneyin türbülanslı akımda tekrarlanması karışmanın çok daha kısa zamanda gerçekleştiğini gösterir. Kütle taşınması için görülen bu durum momentum, ısı taşıma, sürtünme için de geçerlidir ve türbülanslı akımlarda karışma işlemi laminer akımlara göre çok daha hızlıdır.

Popiel ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada; akım yönünde, eksenel bir yarık ve konkav arka çentiğe sahip bir silindiri incelemişlerdir. Sudaki akım görünürlüğünü kullanarak ve rüzgar tünelindeki deneysel çalışmalardan, eksenel yarıklı silindirin, yarık kısmı akım yönüne gelmek suretiyle basınç dalgalanmalarını incelemişlerdir. Silindirin üst ve alt yüzeyi arasındaki dalgalanmalar girdap kopmasının şiddetlenmesine neden olmuştur. Re=1200'de iken girdap kopması tamamen türbülanslıdır. Silindir geometrisini değiştirmenin sonuçları, girdap kopmasının periyodikliğinin ve izdeki karışık özelliklerin değişimi olarak tespit edilmiştir.

Roussopoulos [8], düşük Re sayılarında, dairesel silindir etrafındaki girdap kopmasının dalga kararsızlığını dengede tutmak için geri besleme kontrolü yapmıştır. Deneyler, rüzgar tüneli ve bir açık su kanalında, boyutları farklı üç silindir kullanılarak, yapılmıştır. Hız ölçümleri; sıcak tel probu ve sabit sıcaklık anemometresiyle yapılmıştır. Sıcak tel probu, tünel içerisine biri yukarı, biri de aşağıya yerleştirilmek suretiyle dalganın ters köşesine konulmuştur. Bu sıcak tellerden biri kontrol çevrimi için kumanda gibi kullanılmış, diğeri ise farklı pozisyonlarda dalgayı incelemek için

kullanılmıştır. Deneyler; girdap kopmasının başlangıcındaki Re sayılarında; geri beslemeyle, uzun aralığın bir noktasında, dalga kararsızlığının bastırılabilir olduğunu göstermektedir. Geri besleme kontrolünün, dalga kararsızlığını geciktirebileceği ve diğerlerinden %20 daha yüksek Re sayısında, dalgayı kararlı hale çevirebileceği bulunmuştur.

Norberg [9] çalışmasında; Re sayısının 50 ila $4x10^4$ değerleri civarında, en/boy oranının etkilerini, düşük blokaj oranlarında, silindir çapının arka plaka çapına olan farklı oranlarını incelemiştir. Araştırmada, St sayısı ve ortalama temel emme katsayısı üzerinde durulmuştur. Ayrıca, arka plaka dizaynının en/boy oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamıştır. Çalışmalar; düşük hızlı, kapalı devre bir rüzgar tünelinde, şekil 2.1'de gösterilen, dairesel silindir ve arkasına yerleştirilen bir arka plaka kullanılarak incelenmiştir. Basınç ölçümleri statik pitot tüpüyle, St frekansı ise sıcak telle ölçülmüştür.



Şekil 2.1. Arka Plaka Geometrisinin ve Deney Modelinin Şematik Görünümü

Sonuçta; en/boy oranının 100'den büyük olması halinde, ölçülen St sayısı en/boy oranından bağımsızdır. Üniform akımda ve çok büyük en/boy oranlarında, arka plaka kullanılarak, laminer kopma rejiminin her yerinde paralel kopma üretmek mümkün değildir. Bununla birlikte, orta-uzunluk çevresindeki paralel kopma; silindirin arkasına doğru, serbest akım hızında, az fakat, simetrik bir yükselme olduğunda, bu rejim boyunca gözlenir. Yüksek Re'da farklı en/boy oranlarındaki sonuçlar, yarı sonsuz silindirle karşılaştırılmıştır.

Yamazaki,Bisako ve Inoue [10], silindir etrafındaki dalga akımının oluşmasına, periyodik kuvvetlerin etkisini incelemek için iki boyutlu Navier-Stokes denklemlerini kullanmışlardır. Periyodik kuvvet, üniform akım hızını etkileyerek yada silindir yüzeyinde bir emme veya üfleme etkisiyle oluşturulur. Oluşturulan kuvvetle, girdap formasyonu ve dalga özellikleri kontrol edilebilmiştir. Sonuç olarak; Karman girdap frekansı ile periyodik kuvvet frekansı karşılaştırılmıştır. Eğer oluşturulan periyodik kuvvet büyükse; cisim arasındaki yakın iz bölgesinde oluşan dalga akımı kontrol edilebilirdir. Eğer kuvvet küçükse; uzak iz bölgesindeki dalga akımının kontrol edilebildiği sonucu bulunmuştur.

Chio [11]; dairesel bir silindir, küre ve bir taşıt modeli etrafındaki akımın, aktif kontrolleriyle ilgili geniş bir çalışma yapmıştır. Re sayısı; dairesel silindir etrafındaki akım için 40~3900, küre etrafındaki akım için 425~10^5, taşıt modeli için ise 4200 olarak ölçülmüştür. Serbest akım hızı; silindir veya küre çapına ve cisim yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir.

Aktif kontrol metotları;
1) Girdap kopma frekansı yakınlarında alçak bir frekansla kontrol
2) Girdap kopma frekansından çok daha büyük yüksek bir frekansla kontrol
3) Karışık kontrol olarak incelenmiştir.

Tablo 2.1. Aktif Kontrol Metotlarıyla İlgili Kuvvet Durumları

	Silindir	**Küre**	**Taşıt Modeli**
Alçak frekansla kontrol	Re = 100 & 3900 (nümerik)	Re = 3700 (nümerik)	
Yüksek frekansla kontrol	Re = 100 & 3900 (nümerik)	Re = 3700(nümerik) & 10^5 (deneysel)	
Karışık kontrol	Re = 40~140 & 3900 (nümerik)	Re = 425 (nümerik)	Re = 4200 (nümerik)

Bu kontrol metotlarıyla birlikte, sürükleme ve kaldırma dalgalanmaları azalır ve girdaplı yapılar önemli ölçüde değişikliğe uğrar. Sonuçta kontrol metotları, sürükleme ve kaldırma dalgalanmalarını, dairesel silindir ve küre için yüksek Re sayılarında azaltır;

dolayısıyla bu çalışmada yapılan deneylerin Re sayısına önemli ölçüde bağlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Literatür çalışmalarında; küt cisim etrafındaki akım alanının incelenmesi için çeşitli deney cihazları kullanılmıştır. Bunlar rüzgar tüneli, sıcak tel anemometresi ve lazer dopler anemometresidir. Bu cihazların kullanıldığı çalışmalar ise şöyledir:

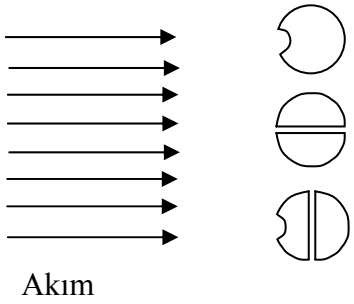
Paranthoen ve arkadaşları [12], dairesel bir silindir ve düz bir şerit etrafında iki boyutlu sabit ve iki boyutlu periyodik iz bölgesinde çalışmalar yapmışlardır. Sıcak tel ve lazer dopler anemometreleriyle yapılan hız ölçümleri karşılaştırılmıştır. İzotermal durumlarda, havada takribi iz de hız alanının detaylı ölçümleri gösterilmiştir. Bu ölçümler ayrıca, başlangıçtaki kararsızlığın, kesme tabakalarının mukavemet özellikleriyle ve devir daimli bölge sonundaki kesme tabaka aralıklarıyla ilgili olduğunu göstermektedir.

Sonuçta LDA sisteminin yakın iz bölgesindeki hız ölçümleri için kullanılması, sıcak telin ise sadece frekans ve küt cisimden belirli uzaklıktaki dalga boylarını ölçmek için kullanılması tercih edilmiştir.

Akins, Hottle ve Reinhold [13] tarafından yapılan bir çalışmada; küt cisimler etrafındaki akım alanlarının detaylarının anlaşılması ve bu akımlarla ayrılmış bölgelerin birleşmesi konusu üzerinde durulmuştur. Ayrılmış kesme tabakalarının yapısının incelenmesi ve ayrılmış akım bölgelerinin birleşmesi için ölçümler, lazer dopler hız ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçta termal anemometreye göre LDA sisteminin, zıt akımların ve bu nedenle oluşan yüksek lokal türbülans şiddetinin ölçümlerinde yetenekli olduğu ispatlanmıştır.

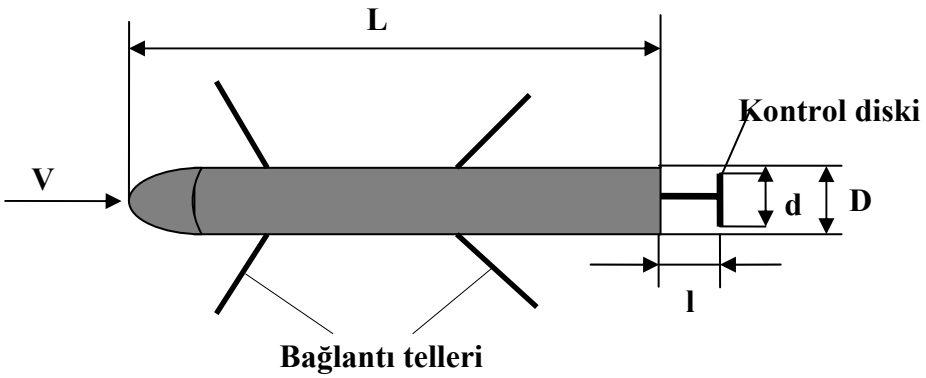
Olsen ve Rajagopalan [14], Şekil 2.2'de görülen, biri eksenel yarıklı, biri konkav çentikli, biri hem eksenel yarıklı hem de konkav çentikli, diğeri ise normal dört farklı dairesel silindir kullanmışlardır. Rüzgar tünelinde gerçekleştirilen deneysel çalışma, öncelikle St sayısıyla birlikte Re sayısının değişiminin ölçümünü, ikinci olarak sürükleme katsayısından tahmin edilen ortalama hız dağılımlarının ölçümünü ve son olarak da bazı silindirler için x/D=5 istasyonunda, sıcak tel izlerinin incelenmesini içermektedir. Sonuçta değiştirilmemiş dairesel silindirle, değiştirilmiş silindirler

karşılaştırılmış ve 1993'de Popiel ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla mukayese edilmiştir.



Şekil 2.2**.** Kullanılan Silindir Konfigürasyonları

Weickgenannt ve Monkewitz [15] tarafından yapılan araştırmada, küt tabanlı cisim arkasına monte edilen diskin sürükleme üzerindeki etkisi ve Re_D =1,47 x 10^5 sayısındaki esas basıncın etkisi incelenmiştir. Re sayısı silindirin çapı ve serbest akım hızına bağlıdır. Silindir ve kontrol diskinin çapları arasındaki oran d/D=0,8 kabul edilmiştir. (Şekil 2.3) Deneyler, açık çevrimli rüzgar tünelinde, 300 mm x 445 mm dikdörtgen kesitli test bölgesinde yapılmıştır. Tünel hassas deneyler için kullanılmıştır, bu yüzden türbülans %0,15 olarak seçilmiştir. Sonuçta gözlenen dört farklı rejim, s'in(s=l/D) değişimine göre elde edilmiştir. Etkili rejim yok: $0 \le s < s_{No-Hi}$ toplam sürükleme ve izdeki esas eksenel hız profilleri değişmeyip aynı durumda kalmıştır. Yüksek sürükleme rejimi: $s_{No-Hi} < s < s_{Hi-Lo}$ toplam sürükleme yükselmiştir ve iz profilleri 'W' şeklini almıştır.



Şekil 2.3. Küt Tabanlı Cismin Şematik Görünümü

Düşük sürükleme rejimi: $s_{Hİ\text{-}Lo}<s< s_{Lo\text{-}T}$ kontrol diskinin net sürükleme indirimine sebep olmaktadır. Aynı zamanda iz profilleri standart şekillerini alırlar, fakat etkisiz rejimden biraz daha küçük genişliklerle eski hallerine dönerler. Seri rejim: Büyük ayrılıklar için $s>s_T$ dir. Toplam sürükleme yine yükselir, silindir ve disk iki ayrı küt cisim gibi hareket etmeye başlar.

Ohya [16] açık alanda yaptığı deneyde, 4 adet 9m'lik direk üzerine ölçüm çerçevesiyle birlikte, silindirleri yatay biçimde plakalar yardımıyla yerleştirerek, atmosferik türbülansda silindirlerin sürüklenmesini incelemiştir. Ölçüm çerçevesi kendi ekseni etrafında dönerek, silindirlerin daima rüzgar yönüne doğru olmasını sağlamaktadır. Silindirlerin sonuna yerleştirilen iki yükleme hücresi silindirler üzerindeki sürüklenmeyi ölçer. Ölçüm çerçevesi altına ve üstüne yerleştirilen anemometrelerlede rüzgar hızı ölçülmektedir. Ayrıca bir rüzgar tünelinde yapılan deneyle de elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Rüzgar tüneli 2m yükseklik, 4m genişlik ve 6m uzunlukta bir dikdörtgen test kesitine sahiptir. Tünel türbülansı yaklaşık % 0.12 şiddetindedir. Ölçümler iki adet üç kulplu anemometreler yardımıyla yapılmıştır. Deneyin sonunda; atmosferik ortamda yapılan ölçümlerin, rüzgar tünelinde düzgün akımla yapılan ölçümlerle hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir.

Sarıoğlu, Akansu ve Yavuz [17], yüzeyine plaka yerleştirilmiş dairesel bir silindir etrafındaki akışı, Re sayısının $2x10^4$ değerinde rüzgar tünelinde deneysel olarak incelemişlerdir. Plaka, 0^0-180^0 aralığında döndürülmek suretiyle, plaka açısının basınç dağılımı ve girdap kopması olayına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma, açık çevrimli bir rüzgar tünelinde, 35 mm çapında dairesel bir silindir ve silindirin ön tarafına dik olarak yerleştirilen 35 mm genişliğinde bir plaka kullanılarak yapılmıştır. Silindir üzerine yerleştirilen bu plakanın, basınç dağılımına, sürükleme ve kaldırma katsayılarına ve girdap kopması olayına etkisi incelenmiştir.

Sonuçta;1) Değişik plaka açılarında, dairesel silindir yüzeyinde beş farklı basınç dağılımı elde edilmiştir. 2) Plaka açısının 6^o ve 162^o değerlerinde St sayısı iki maksimum değere sahipken, 45^o-120^o aralığında minimum bir seviyede neredeyse sabit kalmaktadır. St sayısının $\theta=180^o$'deki değeri, plakasız durumdaki dairesel silindirinkinden yaklaşık %22 daha az olmaktadır. 3) Dairesel silindire etki eden

sürükleme kuvveti $\theta=15^o$'de en küçük değerini alırken, yaklaşık 90^o civarında maksimum olmaktadır.

Muhammed O.Iqbal [18] tarafından 2004 yılında yapılan çalışmada; çapraz akımdaki klasik bir küt cisim olan dairesel silindirin etrafındaki akım alanı incelenmiştir. Deneyin amaçları 1) silindir üzerindeki basınç dağılımını ölçmek ve bunu kaldırma ve sürükleme katsayılarının hesaplanması için kullanmak 2) Momentum denklemini sürüklemeye neden olan iz hız profillerinin ölçümü için kullanmak 3) Re sayısına bağlı olarak oluşan girdap kopma frekansının deneysel ölçümüdür.

Deney, düşük hızlı bir rüzgar tünelinde yapılmıştır. Tünel hızı, test kesitinin girişinde bulunan pitot tüpü yardımıyla ölçülmüştür. Pitot tüpü iki portdan oluşmuştur;toplam basınç portu ve statik basınç portu'dur. Pitot tüpünün, toplam basınç portu manometrenin pozitif yönüne, statik basınç portu ise referans yönüne bağlanır. Silindirin dış çapı 1,65 inch'dir ve üzerinde 5 basınç tıkacı akım yönünde bulunmaktadır. Boru hatları basınç tıkaçlarını manometreye bağlamak için kullanılmıştır. Manometrenin pozitif yönü, silindirin yüzey basınç tıkacından gelen tüplere bağlanmıştır, referans yönü ise P_∞'a bağlanmıştır.

Silindirin arkasındaki girdap kopmasını belirlemek için sıcak tel kullanılmıştır. Çok ince, elektriksel ısıtılan tel, akımın içine yerleştirildiğinde soğumaya başlar. Soğuk etki voltaj olarak hissedilir, daha sonra bu hıza dönüştürülebilir. Burada sıcak tel sadece voltaj-süre serilerini kaydetmek için kullanılmıştır.

Sonuçta; farklı dönme açıları için yüzeydeki basınç dağılımı ölçülmüş, iz profilleri ve farklı Re sayılarındaki hız kusurları incelenmiş, basınç dağılımının grafiği çizilip girdapsız akışla karşılaştırılmıştır.

Singh ve Mittal [19] tarafından, dairesel bir silindir etrafındaki iki boyutlu akım, Re sayısısnın, 100 ila 10^7 değerleri için değiştirilemez sonlu elemanlar formülasyonu kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç; sürükleme ve ayrılmış kesme tabakasının kararsızlığı arasındaki ilişkiyi incelemektir. Re sayısı yükselirken, kesme tabakasının geçiş noktası akıntı yönünde hareket eder. Kritik Re sayılarında geçiş noktası, akım ayrılma noktasının çok yakınında bulunur. Sonuç olarak, kesme tabaka girdabı, sınır tabakada akım karmaşasına sebep olur. Akım ayrılmasındaki gecikme;

dalganın daralması, silindir arkasındaki kayma gerilmesinin yükselmesi, sürüklemedeki önemli bir azalma ve temel emme katsayısıyla bağlantılıdır. Hesaplamalar; kesme tabaka kararsızlığında çalışmak için çeşitli Re sayılarında gerçekleşmiştir. Re sayısıyla, kesme tabaka girdabının frekans değişiklikleri, deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Geçmişteki ve bugünkü yapılan çalışmaların sonuçları incelenmiştir. Bugünkü hesaplamalarda, kritik Re sayılarında, sürükleme katsayısında önemli bir düşüş olmuştur. Sonuçlar, kesme tabaka girdabının, laminerden türbülanslı hale geçen sınır tabakada büyük bir rol oynadığını göstermiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar genellikle laminer akım ortamlarında gerçekleştirilmiş olup, türbülanslı akım ortamında çok az çalışma yapılmıştır. Model önüne veya yüzeyine pürüzlülük elemanları koymak suretiyle oluşturulan türbülanslı ortamlarla ilgili deneysel çalışmalar aşağıda sunulmuştur ve bölüm 4'te bu çalışmaların sonuçları ile yaptığımız çalışmanın sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

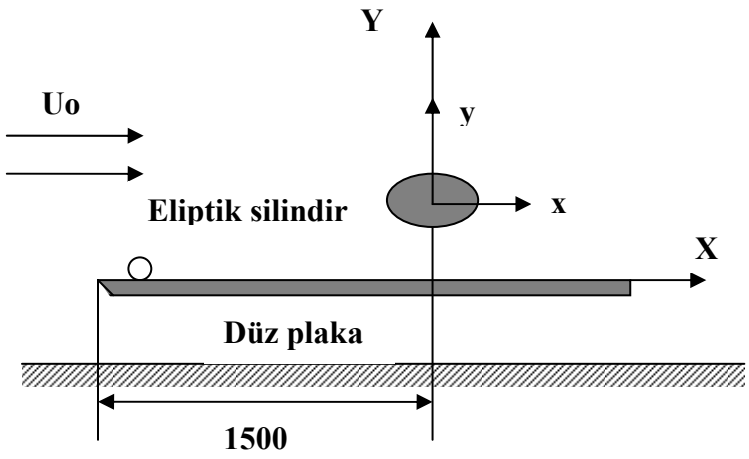
Tsutsui ve Igarashi [20] tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada, hava akımı içerisinde, dairesel bir silindir etrafındaki akımın kontrolü için, model önüne akıntıya karşı bir çubuk yerleştirilmiştir. Çubuğun kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlara göre, iki farklı akım modeli incelenmiştir. Çubuk arkasında oluşan girdap kopmalarının dairesel silindire olan etkisi, çubuk çapına, pozisyona ve Re sayısına göre değişmektedir.

Dairesel silindir önündeki çubuk nedeniyle, model arkasında oluşan hız ve türbülans dağılımı sıcak tel anemometresiyle, basınç dağılımı manometreyle ve basınç dalgalanmalarının çalkantı değerleri ise yarı iletken basınç sensörüyle ölçülmüştür. Sonuçta sürüklenmenin azaltılması için en iyi şartların, d/D=0,25 ve L/D=1,75~2 olduğu durumlarda sağlandığı, yine bu şartlarda, çubuk arkasında girdap kopma olayının olmadığı ve çubuk tarafından oluşan, kesme tabakasının silindirin ön yüzeyine bağlandığı tespit edilmiştir (d:çubuk çapı, D:model çapı, L: model ve çubuk arasındaki mesafe).

Choi ve Lee [21] tarafından yapılan çalışmada, eliptik ve dairesel silindirler incelenmiştir. Düz bir plaka ve model önüne konulan telle türbülanslı bir sınır tabaka oluşturulmuştur. Özellikle aralık oranının (G/B) kritik değerlerine göre incelemeler

yapılmıştır. Buradaki aralık oranı, silindirle düz plaka arasındaki mesafenin, silindir yüksekliğine oranı olarak ifade edilmiştir.

Deneyler kapalı çevrim rüzgar tünelinde 10 m/s sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Tünel boşken türbülans şiddeti % 0,08 olarak tespit edilirken, model ve önüne yerleştirilen elemanlarla türbülans oldukça artmıştır.

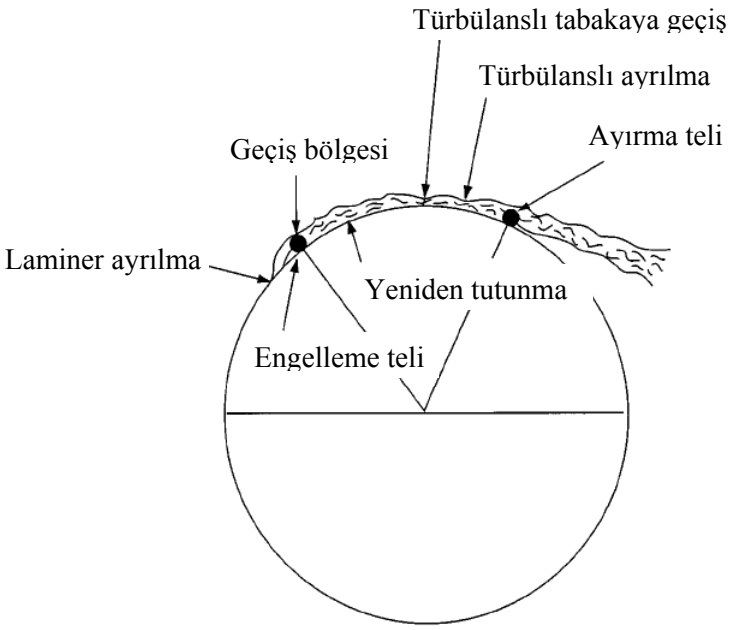


Şekil 2.4. Deneysel Düzeneğin Şematik Görünümü

İz bölgesindeki girdaplar aralık oranının kritik değerine kadar düzgün bir şekilde devam etmekte ve aralık oranı arttıkça, silindirin sürükleme katsayısı artmakta, kaldırma katsayısı ise azalmaktadır. AR=1 olduğu durumda, silindirin altında ve üstünde incelenen St sayısının, aralık oranıyla değişimi yavaş bir biçimde artmaktadır. St sayısındaki maksimum fark %6 civarındadır. St sayısı, aralık oranı için neredeyse sabittir ve sınır tabaka kalınlığından bağımsızdır. AR=2 olduğu durumda ise, yine silindir alt ve üst tarafında ölçülen St sayısı, aralık oranı arttıkça artmaktadır. Aralık oranıyla St sayısındaki değişim %20 civarında yükselmiştir. Bu sonuç, eliptik silindir etrafındaki girdap kopmasının, yerin etkisiyle bastırılmaya çalışıldığını göstermektedir.

1998 yılında Kareem ve Cheng [22] tarafından yapılan çalışmada, silindir yüzeyinde farklı noktalara yerleştirilen pürüzlülük elemanlarıyla, silindir etrafındaki akım seyri değiştirilmeye çalışılmıştır. Bu durum özellikle kritik Re sayılarında ölçülen basınç alanında etkili olmuştur. Modeller, 3 x 30 inch'lik pürüzsüz bir silindir ve yine 3 x 30 inch 'lik, 0,02 inch ve 0,06 inch çaplı tellerin daire etrafında farklı açılara

yerleştirilmesiyle incelenen ikinci bir silindirden oluşmuştur (Şekil 2.5). Bu çalışma Re sayısının 2,54 x 10^4 ve 2,75 x 10^4 değerleri arasında, sınır tabaka I ve sınır tabaka II şeklinde iki farklı akım alanında incelenmiştir.



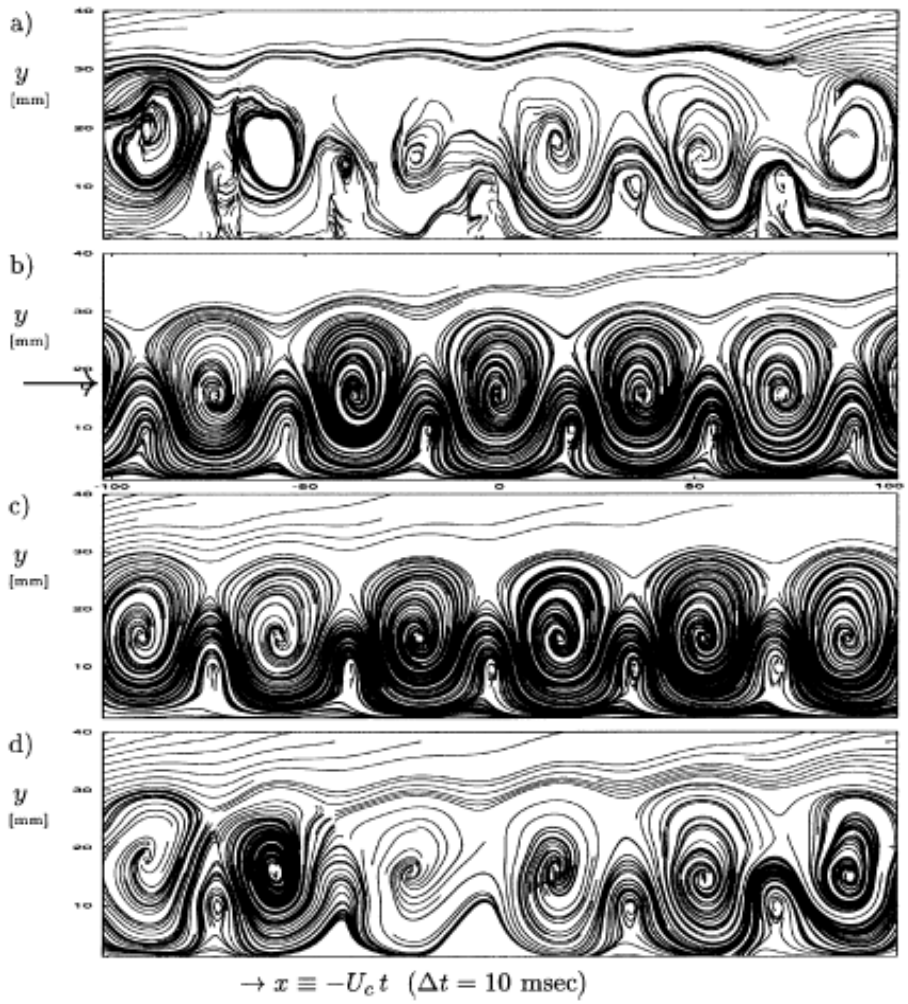
Şekil 2.5. Pürüzlülük Elemanlarıyla Birlikte Dairesel Silindirin Şematik Görünümü

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülük elemanlarıyla, akımın yüksek Re sayılarında silindir etrafında gösterdiği özelliklere, benzer bir ortam yaratılmıştır. İz bölgesi üç boyutlu bir hal almıştır. Tel önündeki iz bölgesinde düşük frekanslı osilasyonlar oluşmuştur ve türbülansın, St frekansında ve spektral tepelerde önemli bir etki yapmadığı gözlenmiştir. Sonuçta; bu çalışmayla pürüzlülük elemanlarının, kuvvet katsayıları ve spektraya tesir eden, düşük frekanslı dağılımlar oluşturduğu doğrulanmıştır. Pürüzlülük elemanlarının bu etkilerini yok etmenin en iyi yolunun, deneylerin yüksek Re sayılarında yapılmasını ve bu elemanların boyutlarının küçük seçilmesini sağlamak olduğu saptanmıştır..

Souaza ve arkadaşlarının [23] yaptığı çalışmada ise, akım yönüne dik ve duvarlara paralel yerleştirilen dairesel silindirin, iz bölgesinin türbülanslı sınır tabakadan etkilenmesi incelenmiştir.

Deneyler, kapalı çevrimli, subsonik ve kare test bölgesine sahip bir rüzgar tünelinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan dairesel modelin çapı 8mm olup, silindir önüne

yerleştirilen, 2 mm çaplı telle, oluşturulan türbülanslı sınır tabakanın etkisi incelenmiştir. Türbülanslı sınır tabaka kalınlığı δ=25.5 mm, silindir ve tünel duvarı arasındaki mesafe ise c=8mm'dir.Hız ölçümlerinde pitot tüpü, tek ve çapraz telli sıcak tel, yüzey sürtünmesinin ölçümlerinde ise, Preston tüpü kullanılmıştır. Silindir arkasındaki iz bölgesi ve türbülanslı sınır tabaka üç farklı methodla incelenmiştir. Bunlar; WAG metodu, spektral filtre etme ve anlık frekansla oluşan dalgaların, dalga engeli filtreleme işlemidir. WAG metodu, sıcak telle her bir noktada sinyaller arasındaki ortalama değerlerin alınması olarak ifade edilebilir. Diğer filtreleme işlemleri ise, türbülanslı sınır tabakada, spektral tepelerin ve anlık frekansların değerlendirilmesi şeklinde ifade edilir. Şekil 2.6'da x/D=4.25 konumunda, hız alanında incelenen akım çizgileri görülmektedir.



Şekil 2.6. x/d=4.25 Konumunda Hız Alanında İncelenen Akım Çizgileri a) Orjinal Alan b) WAG methodu c) Spektral Filtreleme c) Dalga Engelli Filtreleme

Şekil 2.6 (a)'da model arkasında, 34 mm uzaklıkta orijinal alanda gözlenen girdaplar verilmiştir. Burada diğer metodlarla incelenen durumlara göre girdap dağılımı daha düzensiz bir hal almıştır. WAG metodu ve spektral filtreleme işlemleriyle incelenen alanlarda ise, oluşan girdapların hemen hemen aynı ve daha sık oluştuğu gözlenmiştir. Dolayısıyla sonuçta, model arkasındaki iz bölgesinde oluşan girdapların, daha düzenli bir hal alması için, çeşitli yöntemler kullanılabileceği kanısına varılmıştır.

BÖLÜM III

KÜT CİSİM AERODİNAMİĞİ

3.1 Giriş

Günümüzde hava akımına maruz kalan tasarımların, uygun bir şekilde projelendirilip yapılmasında, hava akışı ile ilgili kapsamlı bilgilere gereksinim vardır. Bu yüzden küt cisim aerodinamiğinin gittikçe artan pratik önemi dolayısıyla; son yıllarda, laboratuar benzeşimlerinin yapılmasında, tam ölçekli ölçümlerde ve özellikle sayısal çalışmalarda belirgin bir artış vardır. Yapılan çalışmalarda model olarak kullanılan küt cisimler, gerçeğe yakın şartlarda, problem fiziğinin anlaşılması için incelenerek, yapılacak tasarımlara kaynak olmuşlardır.

Herhangi bir cisim hava içerisinde hareket ettirildiğinde hareketine tesir eden değişik kuvvetler ortaya çıkar. İşte bu kuvvetlere aerodinamik kuvvet ve planladığımız şekilde hareketini hava içerisinde devam ettirebilen cismin şekline de aerodinamik şekil adı verilir. Akışkan hareketiyle küt cisim üzerinde oluşan basınç dağılımı, sürükleme kuvveti ve iz bölgesindeki girdap kopmaları, cismin aerodinamik özellikleridir.

Üniform akımda rüzgar tüneli testleri, küt cisim aerodinamiğini değerlendirmek için yol gösterir. Yapılan çalışmalarda üniform ve türbülanslı akım arasındaki farklar incelenmiş ve küt cisim arkasındaki izlerin iki temel akım olayı tarafından etkilendiği anlaşılmıştır. Bunlar sınır tabaka ayrılması ve girdap kopma (vorteks shedding) olayıdır [16].

Sınır tabaka, akımın Re sayısı ne kadar büyük olursa olsun, viskozite etkisinin önemli olduğu ince bir tabakadır. Başka bir ifade ile, içerisindeki akışkan hızının sınırda (katı bölgeye göre) istenilen sıfır değerinden, viskozitesiz bir akışkana uygun gelen sonlu bir değere geçiş yaptığı tabakadır. Sınır tabaka laminer ve türbülanslı sınır tabaka olmak üzere iki kısımda incelenir. Ancak uygulamada laminer sınır tabakadan çok genellikle türbülanslı sınır tabaka akımı gerçekleşir. Basınç gradyantlı bir akım ortamında,

türbülanslı sınır tabaka akımı uygulamada son derece önemlidir. Uçak kanatları etrafındaki akım, çoğu akım makinesi etrafındaki akım, difüzör ve roket lülerindeki akım türbülanslı sınır tabaka akımıdır. Sınır tabaka ayrılması olayı ise, istenmeyen bir olaydır. Çünkü akım ortamında düzensizlik ve akım makinalarında verim düşüşüne sebep olur. Ancak bazı hallerde basınç dağılımının istenilen değerlere getirilmesi için, akım ortamında yüzeyden ayrılma, pürüz elemanları kullanılarak sağlanabilir. Örneğin uçakların kalkış ve inişleri durumda kanatlar üzerinde bu olay gerçekleştirilir.

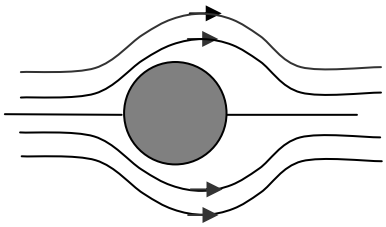
3.2 Küt Cisim Aerodinamiği

Geometrisi basit gibi gözüken, dairesel kesitli bir silindir, akış ortamına maruz kaldığında oldukça karmaşık bir akış davranışı sergilemektedir. Bu tür küt cisimler etrafındaki akım Re sayısına bağlı olarak değişmektedir. Re sayısı akışkanın üzerine etki eden atalet kuvvetinin viskoz kuvvete oranının bir ölçüsüdür.

$$Re=U.D/\nu=\rho.U.D/\mu \qquad (3\text{-}1)$$

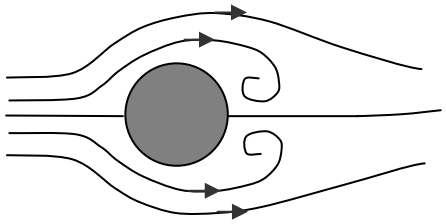
şeklinde tanımlanan Re sayısının, küçük olduğu akımlarda viskoz kuvvetler en önemli kuvvetlerdir ve akışkan hareketini belirlerler. Re sayısının yüksek olduğu akımlarda ise viskoz kuvvetlerin önemi azdır, bu nedenle bu tür akımlarda viskozite ihmal edilebilir [24].

Dairesel kesitli küt cisim etrafındaki dalga karakteristikleri akımın Re sayısına ve dolayısıyla akışkanın hızına bağlıdır. Eğer akışkan 5'den daha küçük bir Re sayısına sahip ise, silindir etrafındaki basınç değişiklikleri çok küçüktür, akış tamamıyla laminerdir ve silindir yüzeyine tutulu kalmaktadır. Bu tür bir akış, Şekil 3.1'deki gibidir [25].



Şekil 3.1. Dairesel Bir Silindir Etrafındaki Ayrılmasız Akış Rejimi (Re<5)

Eğer Re sayısı 5 ila 40 arasında ise, sınır tabaka silindirin her iki etrafında da simetrik olarak ayrılır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, bu ayrılma noktalarının sonu silindire bağlı kalmaktadır. Akış ayrılması silindir arkasında sürekli olarak dönen girdaplar şeklinde olmaktadır. Re sayısı daha fazla arttıkça bu girdaplar akış yönünde gerilerek uzarlar. Bunların uzunluğu akışın kararsız hale geldiği Re≅40 değerine kadar Re sayısı ile doğrusal olarak artmaktadır [25].



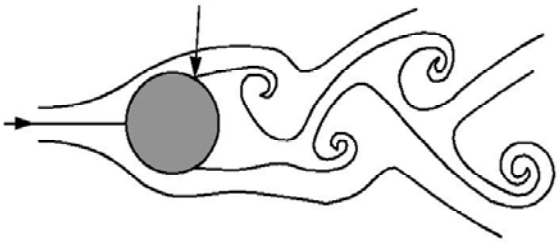
Şekil 3.2. Dairesel Bir Silindir Etrafındaki Dönen Girdaplar Halindeki Akış Ayrılması (5<Re<40)

Re sayısının 40'dan büyük olması halinde, ayrılma noktalarının sonu kıvrılarak cisimden uzaklaşır ve girdap hareketi başlar. Burada girdaplar birbirinin peşi sıra silindirin her iki yanından artan Re sayısı ve artan bir periyodik oranla, koparak cisimden uzaklaşırlar [25].

Şekil3.3'de görüldüğü gibi cismin dalga ekseninin her iki yanında biri saat ibreleri yönünde, diğeri saat ibrelerinin tersi yönünde hareket eden Von Karman girdap akımı meydana gelir. İlk olarak Theodore Von Karman tarafından analiz edilen bu hareket Karman girdap caddesi olarak da bilinir. Bu akım olayı, Re sayısının 150 civarındaki değerine kadar neredeyse sabit dalga boyuyla devam eder. Re sayısının 150 ila 300 civarındaki değerlerinde, cisimden belirli uzaklıkta cadde girdabı üzerinde ikincil kararsızlık oluşur ve frekans düzensiz hale gelir [26].

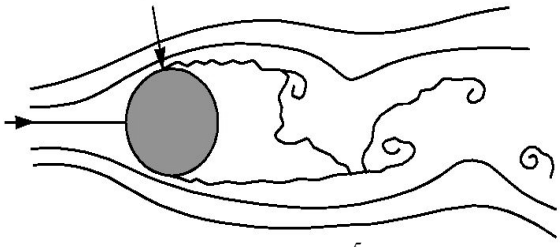
Dairesel kesitli silindirik bir küt cisim etrafındaki akım seyri, Re sayısının $150<Re<10^5$ değerleri arasında oluşan akıma göre, kritik altı akım olarak adlandırılır ve cismin arkasında meydana gelen dalga veya iz bölgesi oldukça geniş olup, girdap kopmaları düzenli bir karakter gösterir. $10^5<Re<3.5x10^6$ değerleri arasındaki akım ortamına, geçiş akımı rejimi denir ve bu akım ortamında akışın yüzeyden ayrılma noktasının yeri düzensizlik gösterir ve bunun sonucunda dalga akımı veya iz bölgesinde dağılımları

rasgele, düzensiz bir karakter gösterir. Re>3.5x10^6 değerinde, akım ortamına kritik üstü akım ortamı denir ve bu akım ortamında sınır tabaka akımı türbülanslı olup, dalga veya iz bölgesi oldukça dardır ve girdap kopmaları tekrar düzenli hale gelmektedir. Bu yüzden Re sayısına göre değişen akım ortamlarının ve cisimler etrafındaki akım karakteristiklerinin anlaşılması için incelenmesi gerekmektedir. 1992 yılında Buresti ve Lanciotti [27], Re sayısının 0,86-2,77x10^5 aralığında, çapraz akışa maruz dairesel bir silindir etrafında kuvvet ölçümleri yapmışlardır. Bu çalışmanın sonunda, sınır tabaka kalınlığından bağımsız, kritik altı Re sayılarında, düzenli girdap formasyonu sonucu oluşan kaldırma kuvvetlerinin var olduğu ispatlanmıştır.



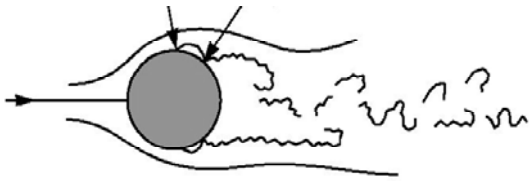
40<Re<150

a) Laminer Girdap Caddesinin Oluşumu



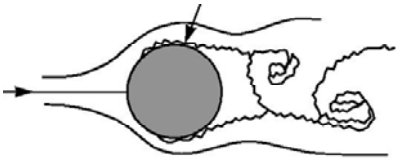
150<Re<10^5

b) Tam Türbülanslı Girdap Caddesinin Oluşumu



10^5<Re<3.5x10^6

b) Laminer Sınır Tabakadan Türbülanslı Sınır Tabakaya Geçiş



Re>3.5x10^6

d) Türbülanslı Sınır Tabakanın Tekrar Oluşması

Şekil 3.3. Dairesel Silindir Etrafındaki Akımın Re Sayısına Göre Değişimi

Daimi olduğunu tahmin ettiğimiz bazı akışlar, Re sayısına bağlı olarak, aslında titreşimli bir yapıya sahiptirler. U hızındaki daimi bir akım içerisindeki küt cismin arkasındaki periyodik girdap oluşumu böyle yapıya bir örnektir.

Girdapların, kopma frekansının, cismin doğal frekansına yakın olması durumunda rezonans oluşabilir. 1940 yılında, rüzgar kaynaklı girdap kopmalarının, köprünün doğal

burulma titreşimleri ile rezonansa yol açması, Tacoma Narrows köprüsünün yıkılması olayına çarpıcı bir örnektir.

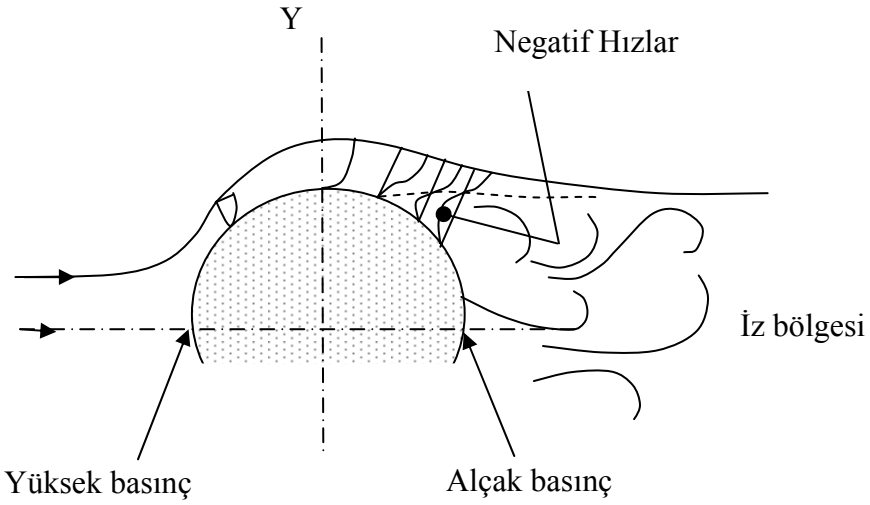
Dairesel bir silindirin arkasında, belli bir Re sayısından sonra gelişen Karman cadde girdabıyla önem kazanan Strouhal sayısı, kararsız akımlarda karşımıza çıkar.

$$St=fsD/U \tag{3-2}$$

şeklinde ifade edilen St sayısı akımın kararsızlığından, yani zaman içinde değişmesinden, gelen yerel ivme kuvvetlerinin, akışkan kütlesinin bir noktadan başka bir noktaya hareketi sırasında hızının değişmesinden gelen konvektif ivme kuvvetlerine oranını ölçer [24]. Burada fs cismin bir kenarından kopan girdapların kopma frekansını, D model çapını ve U ise ortalama hızı göstermektedir. Genel olarak St sayısı 0.1 ile 0.4 arasında olup cismin kesit şekline ve Reynolds sayısına bağlıdır İki boyutlu dairesel bir silindirde St sayısı, alt-kritik Re sayılarında yaklaşık 0.2 değerindedir. Küt cismin her iki kenarından birbiri ardına girdapların kopması sürükleme kuvvetine dik yan çalkantı kuvvetlerine neden olur. Bu ise cisim üzerindeki basınç dağılımlarında önemli değişime yol açar [28].

Son yıllarda, küt cisimler arkasındaki girdap kopma izleri, çoğu deneysel çalışmada odak haline gelmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen St ve Re sayıları arasındaki ilişkinin farklı sonuçlar vermesi, bu konunun hala yeteri kadar anlaşılmadığını göstermektedir. 1997'de Igarashi'nin [29] yaptığı çalışmada, akıma maruz silindirdeki basınç dalgalanmalarını artırmak için, silindir boyunca uzunluğuna eksenel bir yarık açmış ve bunun sonucunda değişikliğe uğramış silindirler için, St/Re oranının normal bir dairesel silindirinkinden farklı olduğu, yine değiştirilmiş silindirdeki girdap kopma olayının, değişikliğe uğramamış bir silindire göre daha güçlü ve daha kararlı olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 3.4'e baktığımızda, merkezden silindirin etrafına doğru, akışkanın hızlanmasıyla ayrılmalar meydana gelmektedir. Hız, basınç düşse dahi Y' de maksimuma ulaşır. Eğer akışkan yeteri kadar hızlıysa, Y' de maksimuma ulaştığı yerden aşağıya doğru oluşan ters basınç eğimi sınır tabaka ayrılmalarına sebep olacaktır [25].



Şekil 3.4. Dairesel Silindir Etrafındaki Sınır Tabaka Ayrılmaları

Sınır tabaka teorisi ayrılma noktasını tahmin edebilir, ama ayrılma bölgesi üzerindeki (genellikle düşük) basınç dağılımını doğru olarak belirleyemez. Ön taraftaki durma bölgesindeki yüksek basınç ve arkadaki ayrılma bölgesindeki düşük basınç arasındaki fark, basınç direnci denen büyük bir direnç katkısına neden olur. Bu basınç direnci, kayma gerilmesinin cisim üzerinde integre edilmiş değerine ya da sürtünme direncine eklenir. 1981 yılında Castro'nun [30] yaptığı bir çalışmada; küt cisimler etrafındaki akışta ortaya çıkan kayma tabakası içerisinde ölçümler yapmıştır. Ölçümlerde kullanılan küt cisimlerin boyutları ile periyodik bir girdap hareketi oluşumu arasında ampirik bir bağıntı çıkarılmıştır. Bu bağıntıya göre H/L < 2,5 + W/L koşulunun sağlanması durumunda küt cisim arkasında periyodik bir akışın oluşmadığı, yani basınç ve sürtünme direncinin ihmal edilemeyeceği sonucuna varılmıştır (H=Rüzgar tüneli yüksekliği, W=Rüzgar tüneli genişliği).

$$C_D = C_{Dbasınç} + C_{Dsürt} \tag{3-3}$$

ifadesi ile tanımlanan sürükleme katsayısı; akış ortamı içerisinde bulunan cismin sahip olduğu geometriye bağlı olarak değişen basınç ve sürtünme direnç katsayılarına bağlıdır. 1999 yılında White [31], bir düzlem levha üzerindeki akışta ortaya çıkan direncin tamamının sürtünme direncinden kaynaklandığını, küt bir cisim için sürtünme direncinin toplam direnç içerisindeki payının %3'e kadar düştüğünü ispatlamıştır. Sürtünme ve basınç direncinin bağıl katkısı cismin şekline, özellikle kalınlığına bağlıdır.

Cisme etki eden kaldırma kuvvetinin akışkanın dinamik kuvvetine oranı kaldırma kuvveti katsayısıdır ve;

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty{}^2 d} \tag{3-4}$$

şeklinde tanımlanır. Burada F_L kaldırma kuvveti olup, cisim yüzeyine etki eden basınç bileşeni cinsinden;

$dF_L = -P.\sin\theta.r.d\theta$

$$F_L = \int_0^{2\pi} dF_L = \int_0^{2\pi} -P.\sin\theta.r.d\theta \tag{3-5}$$

olarak ifade edilir. Kaldırma kuvveti katsayısını basınç katsayısı cinsinden yazarsak;

$$C_L = -\int_0^{2\pi} \frac{P.r.\sin\theta.d\theta}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)2r} = -\int_0^{2\pi} \frac{[C_P.(\frac{1}{2}\rho U^2) + P_\infty].r.\sin\theta.d\theta}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)2r}$$

$$C_L = -\frac{1}{2}\int_0^{2\pi} C_P.\sin\theta.d\theta - \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} \frac{P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2}.\sin\theta.d\theta \tag{3-6}$$

şeklinde ifade ederiz. Silindir çevresi boyunca sabit bir değerin integrali sıfırdır. Dolayısıyla kaldırma kuvveti katsayısı;

$$C_L = -\frac{1}{2}\int_0^{2\pi} C_P.\sin\theta.d\theta \tag{3-7}$$

olarak ifade edilir. Aynı işlemler sürükleme kuvveti katsayısı içinde yapılırsa;

$$C_D = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} C_P.\cos\theta.d\theta = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty{}^2 d} \tag{3-8}$$

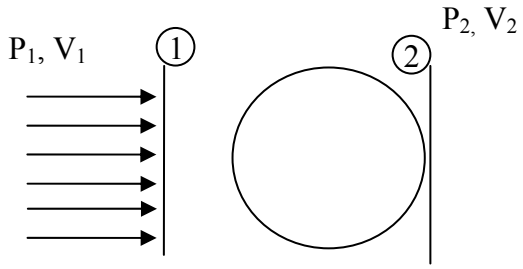
şeklinde tanımlanır. Sürükleme katsayısını göz önüne alarak, Igarashi ve Terachi [32] yaptıkları çalışmada, düzlem plaka önüne yerleştirilen kontrol çubuğu ile akımın nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda toplam sürükleme katsayısının, çubuksuz durumdaki sürükleme katsayısı ile mukayese edildiğinde, önemli derecede azaldığı ortaya konmuştur. Başka bir çalışmada Igarashi ve Tsutsui [20], dairesel silindir önüne yerleştirilen dairesel çubukla, sürükleme katsayısının %20~30 oranında azaldığını ve kaldırma katsayısının C_L=1,0 olarak bulunduğunu tespit etmişlerdir. Prasad ve Williamson ise[33], açık tip rüzgar tünelinde gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, dairesel silindir önüne yerleştirilen düzlem plakaların, sürükleme katsayısını %62 oranında azalttığı kanısına varmışlardır.

Basınç dağılımını incelemek için ise, basınç katsayısının hesaplanması gerekir. Bunun için öncelikle;

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^{\,2} - V_1^{\,2}}{2g} + \left(z_2 - z_1\right) = 0$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^{\,2}}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^{\,2}}{2g} + z_2 = sabit \qquad (3\text{-}9)$$

olarak tanımlanan Bernoulli denkleminden faydalanılır. Bu denklem serbest akım bölgesindeki bir nokta ile silindir üzerindeki bir nokta arasında uygulanırsa;



$P_1 = P\infty$ $\quad V_1 = U$

$P_2 = P$ $\quad V_2 = V$

$z_1 = z_2$

$$\frac{P_\infty}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \qquad (3\text{-}10)$$

buradan basınç katsayısı,

$$\frac{P-P_\infty}{\gamma}=\frac{U^2}{2g}-\frac{V^2}{2g}=\frac{1}{2g}(U^2-V^2)$$

$$=\frac{1}{2g}(U^2-4U^2\sin^2\theta)$$

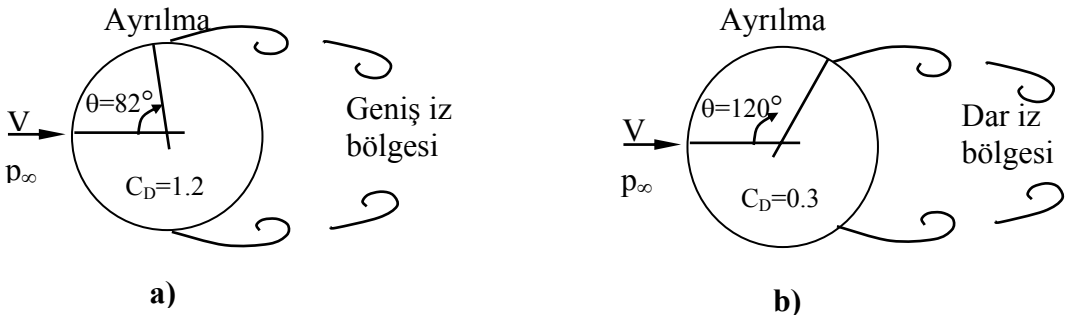
$$=\frac{P-P_\infty}{\rho g}=\frac{U^2}{2g}(1-4\sin^2\theta)$$

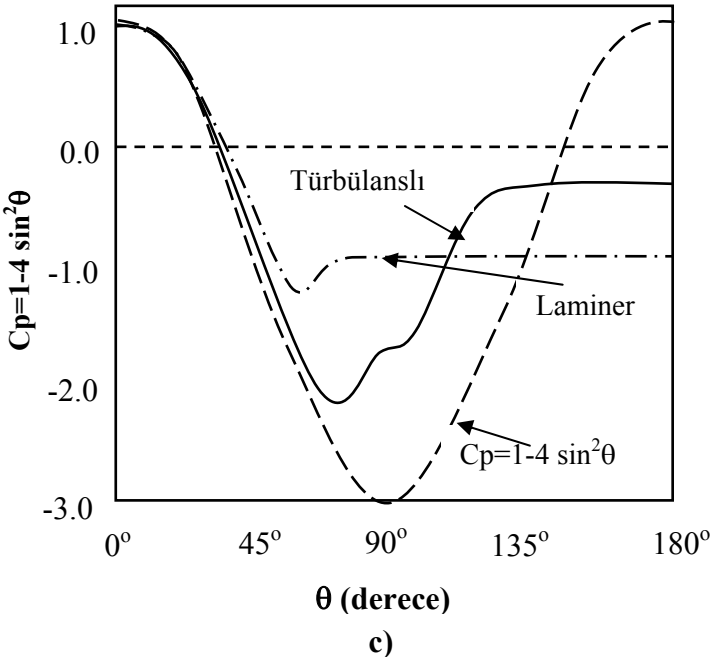
$$C_P=\frac{P-P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2}=1-4\sin^2\theta \qquad (3\text{-}11)$$

şeklinde ifade edilir. Burada P_∞ ve U sırasıyla serbest akımdaki basınç ve hızdır.

Şekil 3.5 ayrılmış akışın etkilerini ve bunun sonucu sınır tabaka teorisinin başarısızlığını göstermektedir. Bir dairesel silindir üzerinde teorik sürtünmesiz basınç dağılımı Şekil 3.5 c'de kesikli çizgi olarak gösterilmektedir. Şekil 3.5c'deki gerçek laminer ve türbülanslı sınır tabaka basınç dağılımları teori ile tahmin edilebilenden şaşırtıcı bir şekilde farklıdır. Şekil3.5a'da görüldüğü gibi laminer akış, silindirin arkasındaki ters basınç gradyenine karşı çok duyarlıdır ve $\theta=82^0$'de sürtünmesiz teori ile kesinlikle tahmin edilemeyen akış ayrılması meydana gelir. Geniş art iz ve laminer ayrılma bölgesindeki çok düşük basınç büyük bir dirence, C_D=1.2, neden olur [31].

Şekil 3.5.b'deki türbülanslı sınır tabaka daha dayanıklıdır, cidardan tam ayrılma $\theta=120^0$'ye kadar gecikir, bunun sonucunda daha küçük bir art iz alanı, geride daha yüksek bir basınç ve %75 daha düşük bir direnç oluşur, C_D=0,3 [31].





c)

Şekil 3.5. a) Laminer Ayrılma b) Türbülanslı Ayrılma c) Teorik ve Gerçek, Yüzey Basınç Katsayısının Değişimi Grafiği

Genelde yaklaşık 100'ün üzerindeki Re sayılarında direnci azaltmak için cismin formunun akım şekline uygun hale getirilmesinin önemi inkar edilemez. Düz bir buruna açısal bir şekil verildiğinde, ön taraftaki keskin köşeler etrafındaki akım, yan duvarlar boyunca basınç yükselmelerini takip ederek yüksek emmeye neden olurlar. Bu, ayrılmanın tamamlanmasına ve cisim arkasında geniş iz oluşumuna yol gösterir. Şekil 3.6'da ilk aracın direnç katsayısı C_D=0,76 değerindedir. Ön tarafın yakınlarındaki yüksek emme ve yan duvarlar boyunca oluşan ayrılma, ikinci araçta gösterildiği gibi, burnun yuvarlatılmasıyla yok edilir ve direnç katsayısı azalarak C_D=0,42 değerini alır [34].



Şekil 3.6. Cismin Geometrisine Bağlı Akım Ayrılması

3.3 Türbülanslı Akışın Özellikleri

Türbülanslı akışta ortaya çıkan çalkantı hareketi son derece karmaşık ve matematiksel inceleme yapabilmek için gerekli olan düzenden yoksundur. Ancak karışım hareketi de sonuçta bir denge içerisinde oluşmaktadır. Türbülansta ortaya çıkan karışım

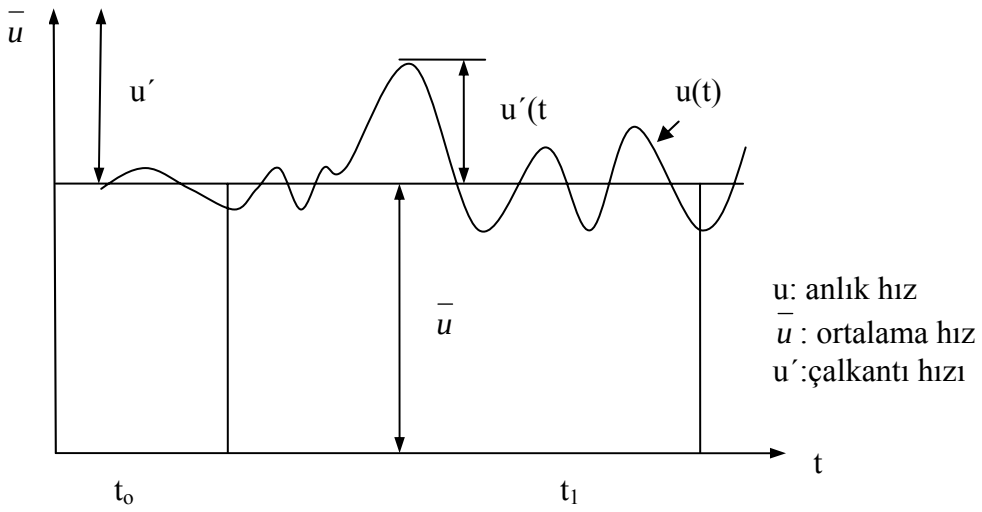
hareketinde, akışkana viskozitesinin binlerce katı kadarlık bir faktörün neden olduğu kuvvetler etkili olur. Yüksek Re sayılarında sürekli olarak ortalama akıştan büyük girdaplara doğru olan bir enerji geçişi söz konusudur. Ancak bu enerji; içerisinde daha etkili ve güçlü durumda bulunan daha küçük girdaplar tarafından yutulur.

3.3.1 Ortalama Hareket ve Çalkantılar

Türbülanslı akış yakından incelenirse; bunun en bariz özelliğinin, akış içindeki sabit bir noktada, hız ve basıncın sabit olmadığı, yüksek frekanslı düzensiz çalkantılar oluştuğu gözlenir. Türbülanslı akışın deneysel çözümlenmesinde ve sayısal olarak ele alınmasında, hareketi, bir ortalama hareket ve bunun üzerine eklenecek bir sapma hareketi şeklinde iki kısımda düşünmek büyük kolaylıklar getirmektedir. Hız bileşenlerinden birinin, örneğin x-doğrultusundaki u bileşeninin ortalama değeri $\bar{u}$ ve çalkantı hareketi nedeniyle oluşan sapma u´ ile gösterilirse, benzer şekilde diğer bileşenler ve basınç için;

$$u=\bar{u}+u' \qquad v=\bar{v}+v' \qquad w=\bar{w}+w' \qquad p=\bar{p}+p' \qquad (3\text{-}12)$$

yazılır. Şekil 3.7'de bu bağıntının grafiksel ifadesi görülmektedir.



Şekil 3.7. Daimi Türbülanslı Akışta Bir Noktada Ölçülen Hızın Ortalama, Anlık ve Çalkantı Değerleri

Türbülanslı akıştaki herhangi bir büyüklüğün anlık değerinin belirli bir zaman dilimi içerisindeki zaman ortalaması;

$$F_T(x) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} f(x_1 t).dt \tag{3-13}$$

olarak yazılır. Bu ifadede yer alan t_1-t_0 zaman dilimi, ortalama hareketi zamandan bağımsız kılacak kadar geniş olmalıdır. u hız bileşeni için zaman ortalaması;

$$\bar{u} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} u.dt \tag{3-14}$$

şeklinde ifade edilir. Ortalama hareketin, zamandan bağımsız olacak şekilde geniş olması, çalkantı bileşenlerinin ortalama değerinin sıfır olduğu sonucunu doğurur.

$$\overline{u'} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} (u - \bar{u}) dt = \bar{u} - \bar{u} = 0 \tag{3-15}$$

Çalkantılar; akış üzerinde, akışkan viskozitesinin artması gibi bir etki yaparlar. Bu viskozite etkisi, türbülanslı hareketin kurumsal olarak incelenebilmesinde yararlanılan temel hareket noktasıdır.

Çalkantı bileşeninin ortalama değerinin sıfır olmasına karşılık, karesinin ortalaması sıfır değildir ve bu türbülans şiddetinin bir ölçüsüdür.

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} u'^2 dt \neq 0 \tag{3-16}$$

Türbülanslı hareketin oluşup gelişmesinde önemli temel olgu, sapma hareketleri u′, v′, w′ nin ortalama hareketin gelişmesini etkileme şeklidir. Bu sapmalar, hareket miktarı teoremiyle kolayca hesaplanabilen ek gerilmelere sahip olurlar. x eksenine dik bir yüzey elemanına etkiyen gerilme bileşenleri;

$$\sigma_x' = -\rho\overline{u'^2} \quad ; \quad \tau'_{xy} = -\rho\overline{u'v'} \quad ; \quad \tau'_{xz} = -\rho\overline{u'w'} \tag{3-17}$$

şeklindedir. Diğer y ve z eksenlerine dik yüzey elemanlarına etkiyen gerilme bileşenleri de benzer şekilde yazılarak zahiri türbülans tensörü elde edilir. Türbülanslı akıştaki bu eşitlikler Reynolds gerilmeleri olarak adlandırılır.

Bu gerilme bileşenlerinden $\tau'_{xy} = \tau'_{yx} = -\rho\overline{u'v'}$, x doğrultusundaki hareket miktarının y eksenine dik bir yüzeyden geçişi veya taşınması şeklinde yorumlanabilir. Hız sapmalarının karışık çarpımlarının ortalama değerinin, örneğin $\overline{u'v'}$ nin sıfırdan farklı bir değere sahip olabileceği bu yolla açıklanabilir.

3.4 Rüzgar Tüneli Türbülansı

Rüzgar tünelinde yapılan ölçme sonuçlarının modelden orijinale aktarılabilmesinde ve çeşitli tünellerde yapılan ölçümlerin kendi aralarında karşılaştırılabilmesinde, tünel içinde mevcut türbülans sapma hızlarının büyüklüğü önemli rol oynar. Rüzgar tünellerinde türbülans sapma hızlarının büyüklükleri, tünel içine yerleştirilmiş filtre ve süzgeçlerin gözenek büyüklükleri ile belirlenmektedir.

Rüzgar tüneli ölçümlerinde boylamasına ve enlemesine hız çalkantılarının göreceli değerleri oldukça önemli birer değişkendirler. Bu değişkenlerin, bir model için ölçülen değerlerinin tam ölçekli durumlar ve diğer tünel ölçümleri ile kıyaslanabilir olması gerekmektedir. Ancak bu sayede ölçümü yapılan akış alanı hakkında esaslı bilgiler elde edilebilir. Akış alanının her noktasında istatistik büyüklükler aynı değerde kaldığı zaman akış alanı için homojendir denir. Homojen türbülansta akış alanında; $\overline{u'^2} = sbt$, $\overline{v'^2} = sbt$, $\overline{w'^2} = sbt$ 'tir.

İstatistik büyüklükler koordinat eksenlerinin keyfi dönmesi ve hareket etmesinden bağımsız olduğu zaman akış alanı için izotropiktir denir ve izotropik türbülans akış alanında; $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$ 'dir.

Perde, ızgara ve külahlar kullanılarak rüzgar tünelinde istenilen düzeye çekilebilen akış alanı izotropik bir yapıya kavuşturulabilir. Türbülansın şiddeti (Tu);

$$Tu = \frac{1}{U_\infty}\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \qquad (3\text{-}18)$$

bağıntısı ile tanımlanmıştır.

İzotropik türbülans durumu için;

$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_\infty} \tag{3-19}$$

olmaktadır. Yukarıda bahsedilen elemanlardan yeterince kullanılması durumunda türbülans şiddetini %1 değerine kadar indirmek mümkündür.

Türbülans oluşumunu ve dolayısıyla deney sonuçlarını etkileyebilecek bir diğer etken ise türbülans faktörüdür. Aynı Re sayısında fakat farklı tünellerde yapılan bir deneyin sonuçları ile rüzgar tünellerinde ve doğal atmosferde yapılan aynı deneyin sonuçları arasında uyuşmazlık görülür. Bunun nedeni rüzgar tünellerinde pervane, yönlendirici kanatlar ve tünel duvarlarının titreşmesinden ortaya çıkan türbülanstır. Bundan dolayı her rüzgar tüneli kendi dizaynına bağlı olarak, farklı türbülans şiddetine sahip bir hava akımı üretir. Türbülanslı akıma sahip bir rüzgar tünelinde bir deney sırasında oluşturulan akım alanının benzeri, açık havada daha yüksek Re sayısında gerçekleşir. Bu düşünceler doğrultusunda, türbülans faktörü ile ilgili bağıntıyı şöyle ifade edebiliriz:

$$Re = T.F.x\ Re_t \tag{3-20}$$

Burada Re_t; deney sırasında tayin edilen Re sayısını, Re; aynı olayın atmosferde meydana gelmesi halindeki Re sayısını, T.F ise türbülans faktörünü ifade etmektedir. Bahsedilen türbülans faktörünün 1'den büyük olması durumunda, deney sırasında tespit edilen Re sayısının uygun olduğu ve dolayısıyla deneylerin daha doğru sonuçlar verebileceği söylenebilir.

BÖLÜM IV

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulunda gerçekleştirilen bu tez çalışmasındaki deney düzeneği, rüzgar tüneli, test bölgesi, ölçümlerde kullanılan aygıtlar ve modelden oluşmuştur.

4.2 Rüzgar Tüneli

Hava içerisinde hareket eden ya da hava akımına maruz kalan araç ve yapıların bu hareket ya da akımdan dolayı üzerlerine etkiyen kuvvet ve momentlerin bulunması, akım şeklinin ve yapısının belirlenmesi tasarım açısından büyük önem taşımaktadır. Rüzgar tünelleri bu tip bilgilerin edinilebildiği, yapay hava akımının oluşturulması ile gerçek olayın benzeştirildiği yapılardır. İlk olarak yirminci asrın başlarında yapılmaya başlanan rüzgar tünelleri, değişik hız rejimlerinde ve tiplerde olmak üzere günümüze kadar yaygınlaşarak ve gelişerek gelmiştir [35].

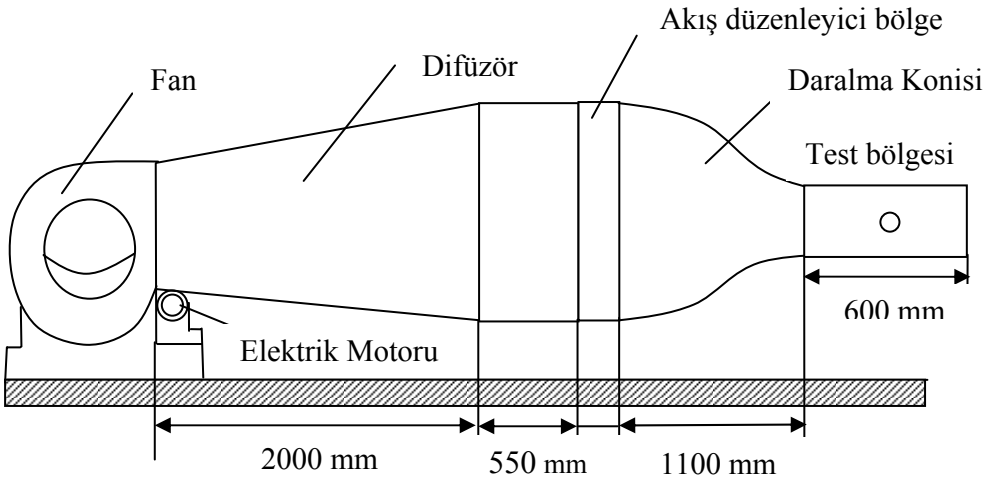
Mühendisler 19. YY boyunca, araştırmalarında rüzgarın model yüzeyi boyunca etkisini hesaba katmaya başlamışlardır. Rüzgar akışının cisim etrafında oluşturduğu basınç dağılımının, cisme zarar verebilen, titreşebilen ortalama ve yerel kuvvetleri oluşturduğu bilinmektedir. Bu yüzden rüzgar tünelleri, rüzgar yüklerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Paris'teki Eifel Kulesi rüzgar etkileri açısından inşa edildiği bilinen bir yapıdır [36].

Rüzgar tünelleri kapalı ve açık devre rüzgar tünelleri olmak üzere ikiye ayrılır. Kapalı devreli, kapalı çalışma odalı rüzgar tünellerinin başlıca avantajı, hava haricindeki akışkanların kullanılabilmesine ve akışkan içindeki toz ve benzeri yabancı maddelerin

azaltılabilme imkanlarına sahip olmasıdır. Buna karşılık devre içinde giderek sıcaklığı artan akışkanı soğutma problemi ortaya çıkar. Açık devreli tünellerdeki dezavantajlar ise; harici hava akımlarına maruz kalmaları, dış etkenlerden etkilenmeleri, daha düşük seviyede maksimum hıza ulaşmaları, gürültülü olmaları, daha fazla güç sarfiyatının gerektiği ve çalışma odasının çevre basıncının etkisi altında olmasıdır. Bunların yanı sıra açık devreli tünellerin tercih edilmesindeki en büyük avantajlar ise; maliyetin ucuzluğu, soğutma probleminin olmaması, gürültünün hava akımını bozmaması ve akış değişimlerinin devre boyunca taşınmamış olmasıdır.

Deneyler Şekil 4.1'de şematik görünüşü, Şekil 4.2 ve 4.3'de genel görünüşü verilen 400 mm x 400 mm kare kesitli bir test bölgesine sahip rüzgar tünelinde gerçekleştirilmiştir. Tünel beş kısımdan oluşmaktadır:

-Motor ve Hız Ayar Ünitesi
-Yayıcı (Difüzör) Kısmı
-Akış Düzenleyici Bölge
-Daralma Konisi
-Test Bölgesi



Şekil 4.1. Rüzgar Tünelinin Şematik Görünümü

Burada, devir sayısı kontrol edilen elektrik motoru, kayış-kasnak sistemi ile rüzgar tünelinin fanını tahrik etmektedir. Fan devir sayısının kontrolü, elektrik akımının frekansının kontrolü ile yapılmaktadır. Bu sayede ayarlanan bir frekansa karşılık gelen devir sayısında motorun döndürülmesi sağlanmaktadır. Fan tarafından ortamdan çekilen

hava, yayıcıya girmektedir. Buradaki rüzgar tünelinde tek kademeli düşük genişleme açılı uzun bir yayıcı kullanılmıştır.

Daha sonra akışın düzeltilmesi için akış düzenleyici bölüme geçilir. Rüzgar tünelinin en geniş kesit alanına sahip olan bu bölümünde "honeycomb" olarak adlandırılan bal peteği tipindeki akış düzenleyiciler sayesinde türbülans şiddetinin düşürülmesi sağlanır. Bu akış düzenleyicilere ek olarak sisteme, bal peteği perde önüne ve arkasına tel elek konularak türbülans şiddetinin daha da düşürülmesine imkan verilir. Bunu 7.6/1 daralma oranına sahip bir daralma konisi takip etmektedir. Test bölgesi çıkışında havanın direkt olarak ortama çıkması nedeniyle, test bölgesinde elde edilen küçük pozitif basınç sayesinde, emmeli tip ve kapalı çevrim rüzgar tünellerinde, test bölgesinde oluşan büyük negatif basınçlar nedeniyle, karşılaşılan olumsuzluklar da ortadan kalkmış olmaktadır.



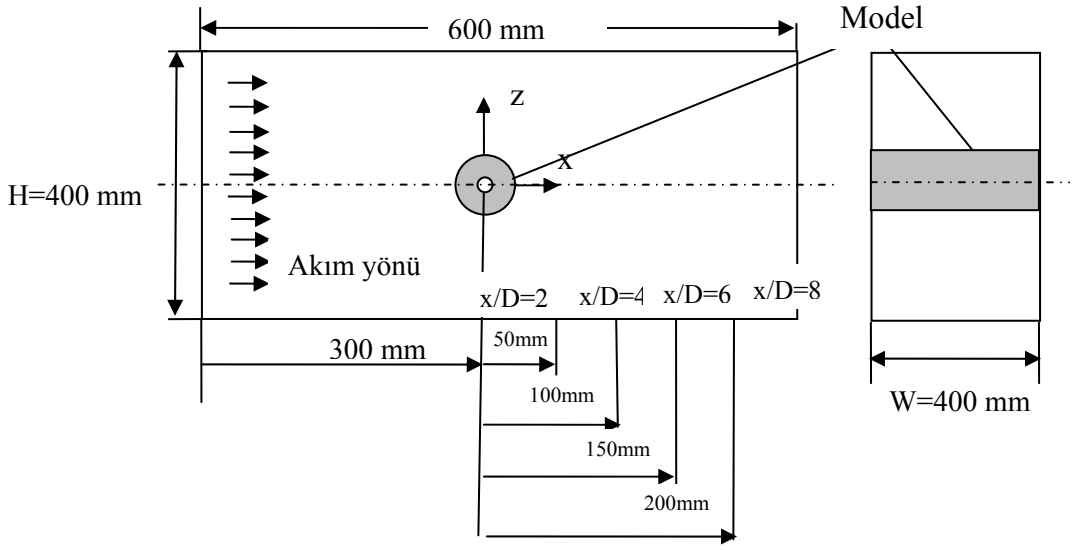
Şekil 4.2. Rüzgar Tünelinin Genel Görünümü



Şekil 4.3. Deney Odasının Genel Görünümü

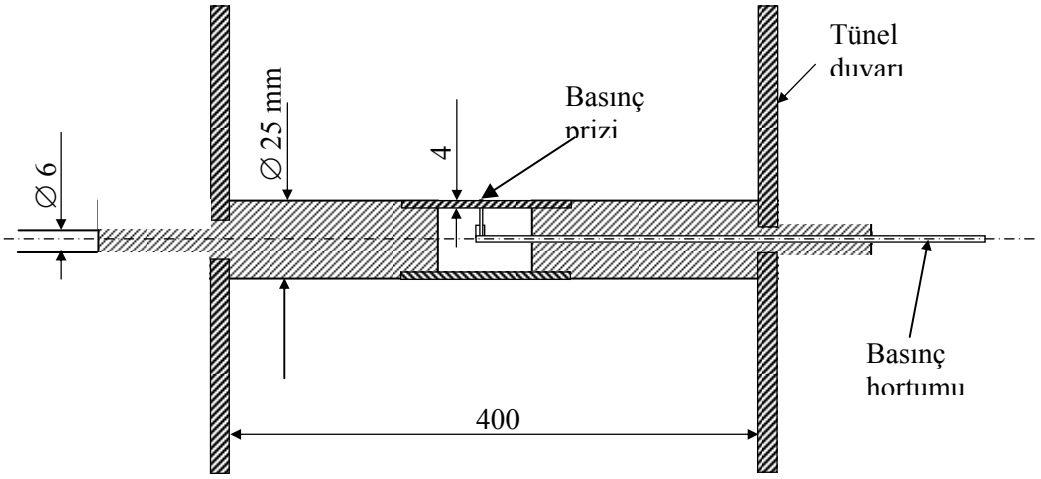
4.3 Test Bölgesi ve Model Detayı

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen rüzgar tünelinin test bölgesinde, akışın bozulmaması ve modellerin daha kolay yerleştirilebilmesi için, yan kapak yeniden düzenlenmiştir. Deney bölgesi pleksiglass malzemeden yapılmış olup,400 mm x 400 mm kesit alana ve 600 mm uzunluğa sahiptir. Deney bölgesinin her iki yan duvarına açılan 6 mm'lik delikler sayesinde, model test bölgesinin tam orta noktasına yerleştirilmiştir. Model arkasında iz bölgesinde hız ve türbülans, kızgın film probuyla tünelin ağız kısmından içeriye doğru, çeşitli x istasyonlarında ölçümler alınarak tespit edilmiştir. Şekil 4.4'de bu x istasyonlar belirtilmiş olup, test bölgesinin şematik görünümü ayrıntılı bir biçimde verilmiştir. Burada, H tünel yüksekliğini, W ise tünel genişliğini ifade etmektedir.



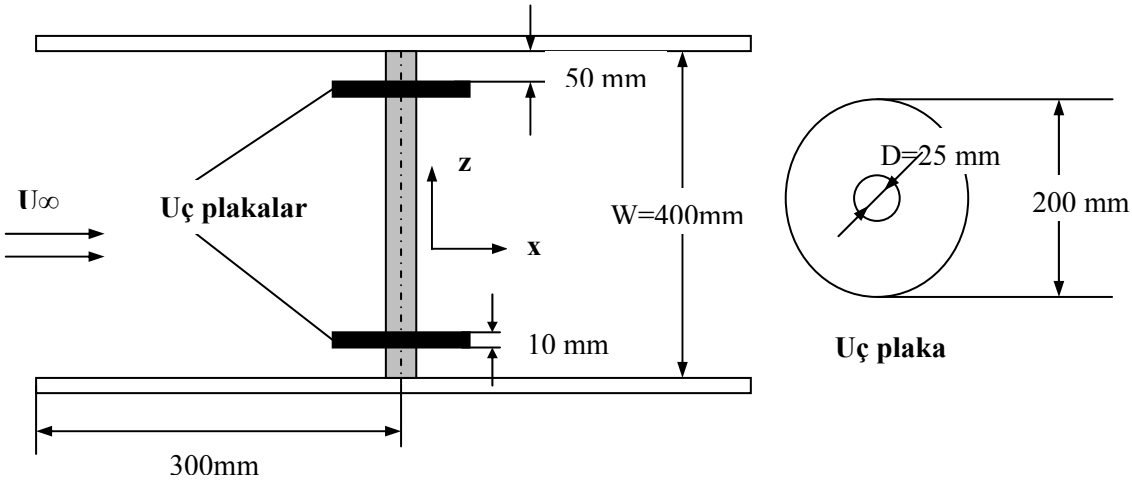
Şekil 4.4. 400mm x 400mm Kesit Alanlı Test Bölgesi

Yan duvarların akış karakteristikleri üzerindeki etkisini belirleyen , model boyutlarının test kesit boyutlarına oranını ifade eden ***blokaj oranı*** göz önüne alınarak model çapı 25 mm olarak imal edilmiştir ve dolayısıyla blokaj oranı %6 seviyesindedir. Yapılan çalışmalarda, bu oranının %6'dan küçük olması durumunda blokaj etkisinin önemsiz olduğu, %15'e kadar varan blokaj oranlarının ise, çeşitli yöntemlerle uygun bir şekilde düzeltilebileceği ifade edilmektedir. Deneylerde kullanılan model, polyamid ve pirinçten yapılmıştır. Model, basınç prizlerinin daha kolay yerleştirilmesi için, 3 parçanın birleştirilmesiyle oluşmuştur. Şekil 4.5'de model şekli ve basınç prizinin yerleştirilmesinin şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Üç Parçalı Dairesel Modelin Şematik Görünüşü

Model etrafındaki akış özelliklerini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunlar görünüş oranı ve uç etkileridir. Uç etkilerinin minimum seviyeye indirilmesi için, bu çalışmada her iki uca 8D büyüklüğünde iki plaka yerleştirilmiştir(Şekil 4.6). Bu plakalar sayesinde akış iki boyutlu hale getirilmeye, test bölgesi duvarının sınır tabaka etkisi ise en aza indirgenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.6. Model ve Uç Plakaların Tünel İçindeki Şematik Görünümü

İki boyutluluğun bir göstergesi olan ve akış özelliğini etkileyen bir diğer faktör ise "Görünüş Oranı"dır. Bu oran, cismin boyunun çapına olan oranını (AR=W/D) ifade etmektedir. Bu çalışmadaki görünüş oranı AR=16 seçilmiştir. Cismin iki boyutlu kabul edilebilmesi için bu oranının mümkün olduğunca büyük olması istenmektedir. Özellikle 3<AR<10 değerleri arasında, akım üç boyutlu iz bölgesinin etkisi altında kalmaktadır.

Bu şarta göre, yapılan çalışmalarda model çapı uygun bir şekilde tespit edilip,görünüş oranının AR>10 olması sağlanmalıdır.

4.4 Ölçüm İşlemi

Akış alanın hız ve türbülans karakteristiklerinin belirlenebilmesi için sıcak tel anemometresiyle hız ölçümleri yapılmıştır. Hız ölçümlerinde DANTEC firmasına ait 55P11 probu kullanılmıştır. Probun akış ortamında konumlandırılmasında yine DANTEC yapımı üç boyutlu travers sistemi kullanılmıştır. Elde edilen datalar, Streamware adlı bir yazılım programıyla kaydedilmiş ve buradan alınan datalarla çizilen grafikler yapılan çalışma hakkında bilgi verilmiştir.

Modelin yüzey basınç dağılımının incelenmesi için ise, ManoAir 500 tipi basınç ölçer kullanılmıştır. Ölçümler direkt olarak manometreden okunmuş ve grafiklerle değerlendirilmiştir.

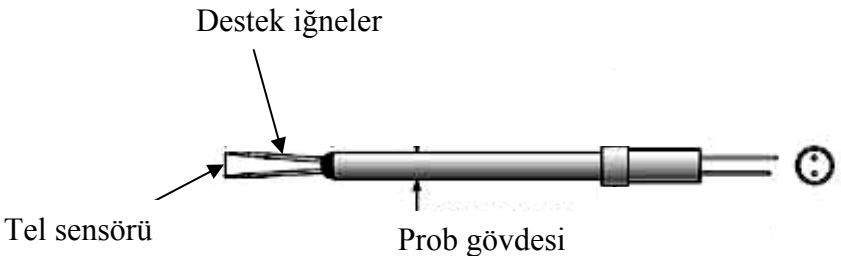
4.4.1 Hız ve Girdap Kopma Frekansının Ölçülmesi

4.4.1.1 Sıcak Tel Anemometresi ve Kalibrasyonu

Sıcak tel anemometresi esas olarak bir termal ölçü aletidir. Akışkanlar mekaniğinde akışkanın hız yapısını deneysel olarak araştırabilmek için tepki süresi çok kısa olan, yeteri kadar küçük boyutlu, hassas ve ölçülen akışa çok az etki yapacak bir eleman gerekmektedir. Bu nitelikleri sağlamak üzere, sıcak tel anemometresi geliştirilmiştir. Sıcak tel anemometresinin hava akımında kullanımının yanı sıra; taze su, tuzlu su, polimer çözeltiler, civa, gliserin, yağ ve freon gibi akışkanlarda da kullanılması mümkündür. Akışkanın hızının ölçülmesinde, türbülans ölçümlerinde, sıkıştırılabilir akış ölçümlerinde ve akışkanın sıcaklığının ölçülmesinde kullanılır [37].

Sıcak tel anemometresi türbülanslı akışlarda ortalama hız bileşenlerinin ve türbülans karakteristiklerinin çıkarılmasında, küçük ölçüm ucu, kısa cevap verme süresi ve yüksek hassasiyet nedeniyle halen kullanılan en yaygın deney sistemidir. Sıcak tel anemometresinin ölçüm ucu elektrikle ısıtılan bir telden ibarettir. Şekil 4.7'de gösterilen bu tel genellikle tungsten veya platinden yapılmış olup; yaklaşık 1 mm uzunluğunda ve

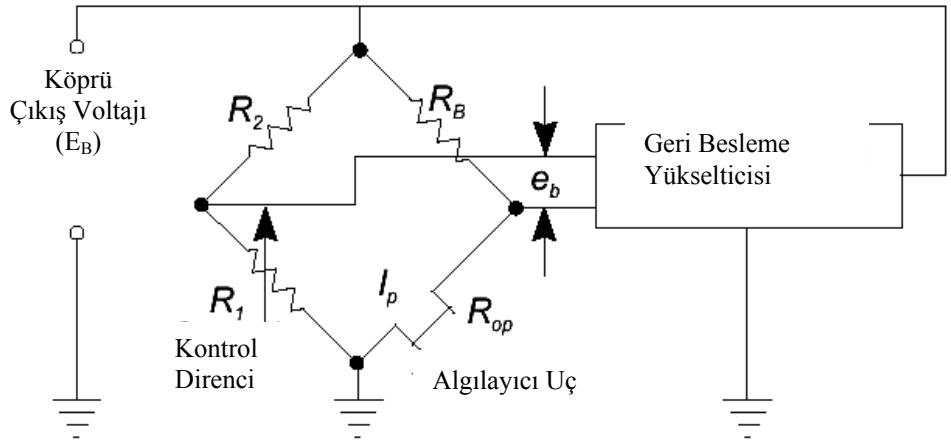
5 μm çapındadır [37]. Bu çalışmada yapılan deneyler, 5μm çapa sahip DANTEC 55P11 probu ile yapılmıştır.



Şekil 4.7. Sıcak Tel Probu

Sıcak tel anemometresi, akışkan ortamında bulunan bir sıcak tel veya film elemanı vasıtasıyla taşınım ısı transferini esas alır. Akıştaki herhangi bir değişiklik, ısı transferiyle sıcak tel tarafından anında ortaya çıkarılır. Bu sebeple sıcak tel anemometresi, akışkanın hız ve sıcaklığı, gaz karışımlarındaki yoğunlaşma değişiklikleri ve çok fazlı akışlardaki faz değişikliği ile ilgili bilgi sağlayabilmektedir [38].

Sıcak tel anemometresinin iki çalışma şekli vardır. Biri sabit akım diğeri ise sabit sıcaklık tipidir. Şekil 4.8'de sabit sıcaklık anemometresinin blok diyagramı görülmektedir. Sabit sıcaklık anemometresinin elektronik devresi, bir Wheatstone köprüsü içerir ve sıcak tel köprünün bir kolunda direnç olarak görev yapar. Ayrıca iki sabit direnç ve ayarlanabilir bir başka direnç devreyi tamamlar. Bir diferansiyel geri besleme yükselticisi köprü dengesizliğini algılar ve sensör sıcaklığını sabit tutmak için akımı ayarlar. Sistemi çalıştırmak için güç verildiği zaman, geri besleme yükselticisi sensör ısıtma akımını artırır. Bu da sensör sıcaklığının yükselmesine ve dolayısıyla köprü dengeye gelinceye kadar, sensör direncinin artmasına sebep olur. Hızdaki bir artış sensörü soğutur ve bu soğuma etkisi akışkanın hız ölçümüdür. Geri besleme yükselticisi hızlı bir şekilde cevap verdiğinden, hız değişirken sensör sıcaklığı hemen hemen sabit kalır. Köprüde meydana gelen voltaj farkı akışkan hızıyla orantılıdır. Sabit akım anemometresi de bir Wheatstone köprüsü ve bir yükselticiye sahiptir, fakat burada geri besleme tekniği kullanılmaz. Bunun yerine köprü akımı, bir sabit akım güç kaynağı ile sağlanır [39].



Şekil 4.8. Bir Sabit Sıcaklık Anemometresinin Blok Diyagramı

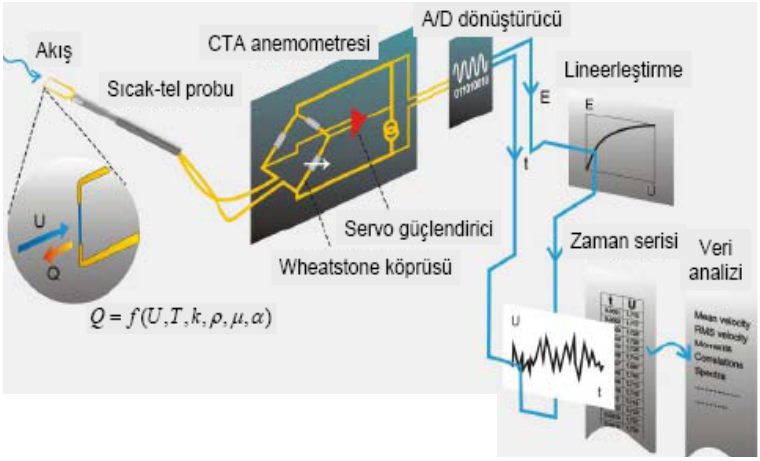
Tüneldeki ölçümler DANTEC Streamline sabit sıcaklık anemometresiyle gerçekleştirilmiştir.

StreamLine sistemi temel olarak;

- Ortam sıcaklık transdüsörü ve seri bağlantı için bir modem kablosu içeren ana ünite (Frame)
- Bir veya daha fazla CTA (Sabit sıcaklık Anemometre) modülü
- Bilgisayara kurulacak olan Streamware Application Software paketi

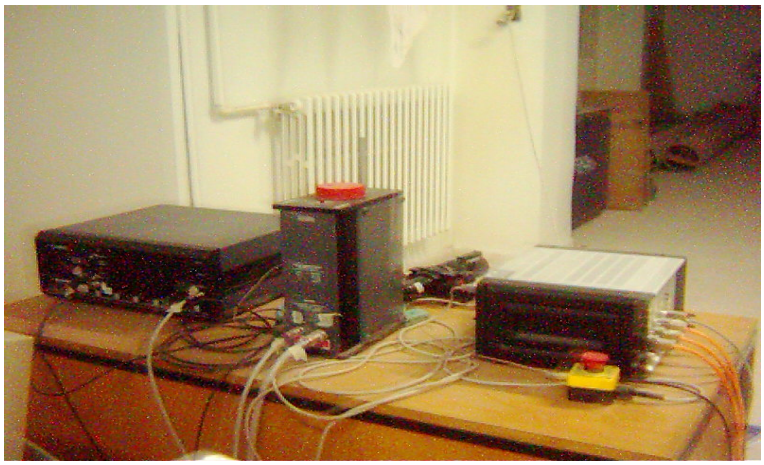
içermektedir [37].

Anemometrenin ölçüm birimi, ısıtılan ve yüksek bir sıcaklıkta kontrol edilen küçük bir dirençtir. Akışa maruz bırakılan sensörde harcanan elektrik enerjisi, akışkanın sensörü soğutmasının bir ölçüsüdür. Sensör üzerinden geçen akışkanın soğutma etkisi, akışkanın hızı, sensör ve akış arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi sabit sıcaklık anemometresinin ölçüm zinciri ve verilerin bilgisayara aktarılması işlemi görülmektedir.



Şekil 4.9. Sabit Sıcaklık Anemometresinin Ölçüm Zinciri

Bu deneysel çalışmada kullanılan sabit sıcaklık anemometre sistemi; ana ünite (Frame), modüller ve kontrol ünitesi için ayrı bir lineer kaynak içeren güç kaynağı, kalibrasyon ünitesine ait 0,02 m/s'den Mach=1 'e kadar hız elde edilebilen akış ünitesi, havanın akış ünitesine girmeden önce yağ, toz gibi parçacıklardan uzaklaştırıldığı hava filtreleme ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 4.10'da bu sistem görülmektedir.



Şekil 4.10. Sabit Sıcaklık Anemometre Sistemi

Test bölgesinde, ölçümlerin doğru tespit edilmesi probun düzgün bir şekilde yerleştirilmesine bağlıdır. Genelde deneysel çalışmalarda, prob hareketi söz konusu olduğunda bir travers sistemi kullanılmaktadır. Travers sistemi üç eksen (X, Y, Z) içermekte olup, bu eksenler üzerindeki hareket software programı vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan travers sistemi, X ve Y eksenlerinde 590 mm, Z ekseninde ise 690 mm ilerleyebilmektedir. X ve Y ekseninde ilerme hızı 40 mm/s iken, Z ekseninde 25 mm/s'dir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Travers Sistemi

Kalibrasyon sistemi, basınçlı bir hava kaynağı ile çalışır ve kalibrasyon boyunca probların yer aldığı serbest bir jet akımı oluşturur. Birçok sıcak-tel uygulamalarında seçilen anemometre eşitlikleri ve ilgili kalibrasyon metodu doğal olarak birbirine bağlıdır. Bu durum genellikle kalibrasyon birden fazla değişken içerdiği zaman ortaya çıkar.Kullanılan tek telli kızgın film probuna göre tek boyutlu ilişki;

$$E=F(U) \tag{4-1}$$

olarak tanımlanır. Burada E, sıcak tel probunun bağlı olduğu anemometre çıkışı ve U, ortalama akış yönündeki hız bileşenleridir. Hız bileşenleri cinsinden ise tepki eşitliği;

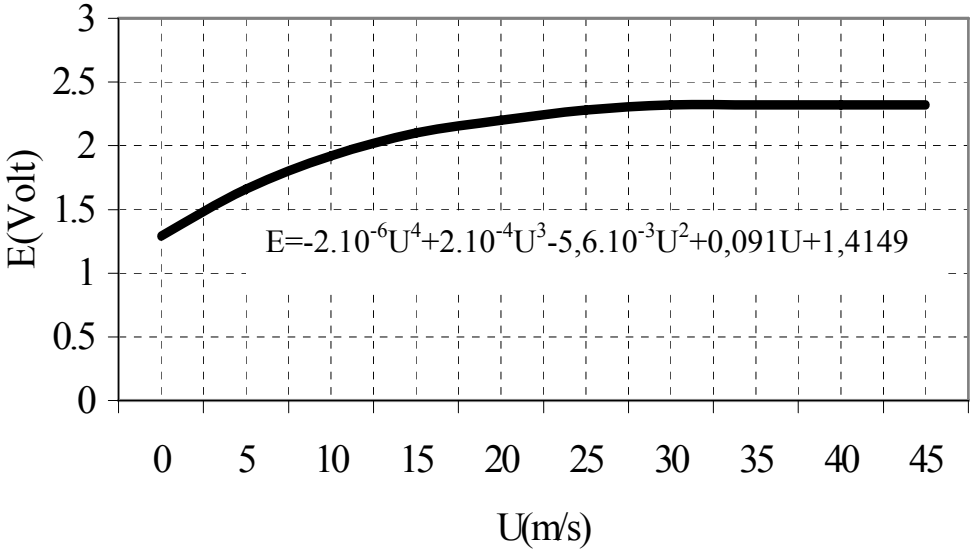
$$E^2= A+ B(U_N^2+k^2+U_T^2+h^2U_B^2)^{n/2} \tag{4-2}$$

olarak ifade edilir. U_N,U_T,U_B ifadeleri sırasıyla kızgın tele dik olan, teğet olan ve paralel olan hız bileşenlerini göstermektedir [38].

Hız ölçümlerinde en yüksek hassasiyet, akışkan ve sensör arasındaki sıcaklık farkının büyük olduğu durumda elde edilmektedir. Sabit yoğunluklu bir akış için King Kanunu olarak bilinen;

$$E^2=A+B.U^n \tag{4-3}$$

eşitliği kullanılmaktadır. Hız ve gerilime ait değer çiftlerine göre A,B ve n sabitlerinin belirlenmesi ile kalibrasyon eğrisi çıkarılmaktadır. Örneğin; A=1,899, B=0,275 ve n=0,45 değerlerinde ise kalibrasyon eğrisi Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12. Kalibrasyon Eğrisi (T=18.65 ^{o}C)

4.4.1.2 StreamWare Yazılım Programı

StreamWare, bir hardware konfigürasyonunun yapılmasına, ayrı ayrı modüllerin kurulmasına, probların kalibrasyonuna, probların travers edilmesine, data elde edilmesine ve bunların işlenmesine imkan sağlar [40].

Fiziksel konfigürasyon tanımlandığında, yapılan ölçümler daha önceden yapılmış hazır konfigürasyon ayarlarına göre olacak ve hardware üzerinde hiçbir ayarlamaya gerek kalmayacaktır. Streamware otomatik olarak hız kalibrasyonu ve prob kalibrasyonu yapmaya imkan sağlar. Problar daha önceden tanımlanmış traverse konumlarında, istenilen her noktada hareket ettirilebilir [40].

Farklı akış rejimlerine uyularak A/D dönüştürücü kartın kurulmasıyla data elde edilebilir ve data eldesi akıştaki şartlara, örneğin basınç ve sıcaklık değişimleri göz önüne alınarak zamanlanabilir. Hardware kurulumunda ve data akışındaki değişiklikler, otomatik olarak deney planında bir kez tanımlanmış deney uygulaması boyunca yerine getirilir [40].

Sonuçlar veri tabanlı yapılarda dosyalara kayıt edilir, böylelikle daha sonradan dataların kurulması ve sunulması daha kolay olur. Datalar çalışma sayfalarında sunulabilir ve grafikleri ile de gösterilebilir [40].

4.4.2 Basınç Ölçümü

4.4.2.1 Basınç Ölçer ve Kalibrasyonu

Deneylerde, dairesel kesitli silindirik modelin yüzeyindeki basınç dağılımı basınç ölçer kullanılarak incelenmiştir. Bu basınç ölçerle, modelin yüzey basıncı serbest akış bölgesindeki akışkanın statik basıncına karşı ölçülmüştür.

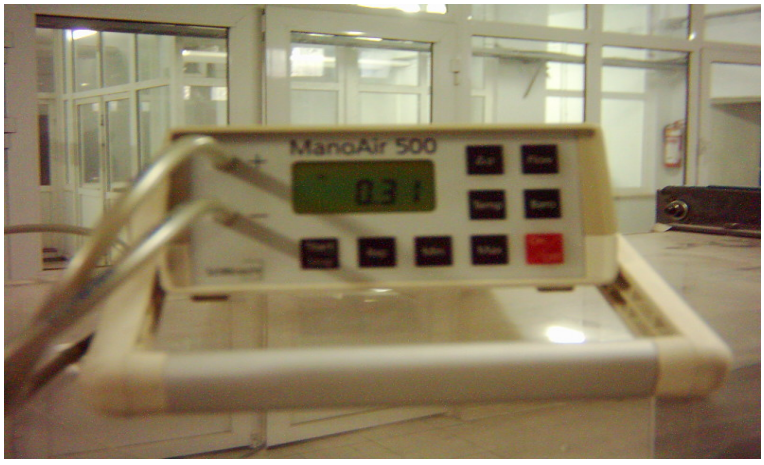
Basınç ölçmek için değişik ölçüm aletleri kullanılmaktadır. Statik yani sürekli rejimde basınç ölçümü kolaydır ve oldukça iyi bir hassasiyetle yapılmaktadır. Buna karşılık dinamik basınç ölçmek zordur ve ölçme aletinin ve akışkanın karakteristiklerine bağlıdır. Statik ölçümde ölçüme başlandığı andan ölçüm cihazının sürekli değeri gösterinceye kadar, küçük bir zaman diliminde, geçici rejim oluşmaktadır. Basınç ölçme cihazının geçici rejimdeki dinamik davranışını etkileyen parametreler:

• basıncı algılayan elemanın dinamik tepkisi,

• basıncı ileten akışkan ve boru gibi elemanların dinamik tepkisidir.

Basınç ölçümlerinde çoğu zaman basıncın ölçüldüğü yer ile basıncın algılandığı elemanın bağlantısı içinde akışkan bulunan bir boru ile sağlanır. Böyle bir durumda sistemin dinamik davranışı, algı elemanından başka iletim borusu ve içindeki akışkanın da dinamik davranışına bağlıdır.

Kullanılan, Manoair 500 serisi manometre ± 200 Pa basınç aralığındadır. Bu basınç ölçerle 9 V'luk iki pil kullanılarak, doğru akım uygulanmakta olup, 4-20 mA aralığında çıkış alınmaktadır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. ManoAir 500 Serisi Basınç Ölçer

Yüzey basıncı, modelin orta kesitinde çevresel olarak ölçülmüştür. Ayrıca ölçümü gerçekleştirmek için, modelin kendi ekseni etrafında döndürülmesini sağlayan 0°-360° arasında 1° aralıklarla işaretli bir eksenel döndürme mekanizması kullanılmıştır. Döndürme mekanizması ve modelin bağlantısı Şekil 4.14'de görülmektedir.



Şekil 4.14. Model ve Döndürme Mekanizmasının Birlikte Görünümü

Model yüzeyinde 1 mm çaplı bir delik açılarak basınç ölçüm prizi oluşturulmuştur Deliğin iç kısmına yerleştirilen kısa bir boru, plastik basınç hortumu ve buradan da manometreyle irtibatlandırılmıştır. Modelin rüzgar tüneli çalışma bölgesine yerleştirilişi ve manometreyle bağlantısı Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15.Modelin Test bölgesine Yerleştirilişi ve Manometreyle Bağlantısı

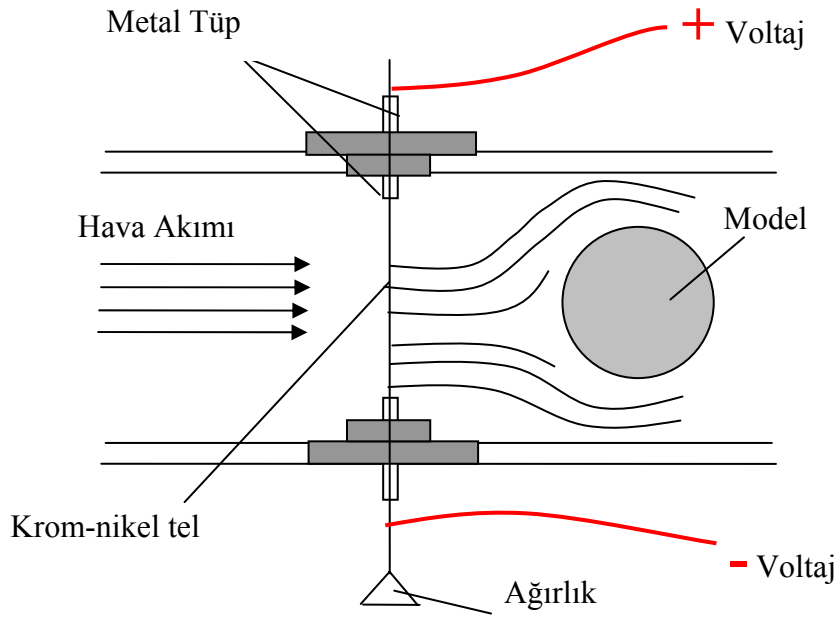
Basınç ölçerin kalibrasyonu ise, U tipi manometre kullanarak sağlanmıştır. Hava akım tezgahına bağlı olan U tipi manometreyle ölçülen basınç farkından bulunan hız değeri, daha sonra pitot tüpü ve basınç ölçer kullanarak elde edilmiştir ve her iki ölçümde de yaklaşık aynı sonuçlar alınmıştır.

4.4.3 Akış Görüntüleme Metodu

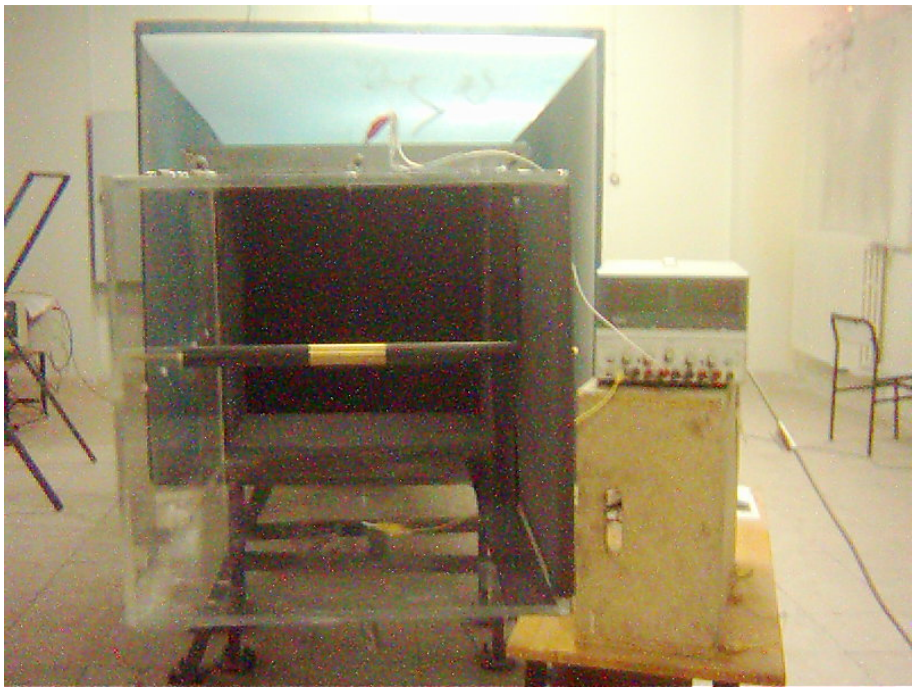
Akım yapısının karakteristiğinin anlaşılması ve sayısal modellemesinin yapılabilmesi için öncelikle akımın oluşumu ve ilerleyişinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Ancak hava ve su gibi renksiz veya homojen bir ortam içerisindeki cisim etrafında oluşan akım çizgilerinin çıplak gözle görülebilmesi imkansızdır. Bu nedenle homojen ortamdaki akım çizgilerinin çeşitli yollarla işaretlenerek gözle görülebilir hale getirilmesi şarttır ve bu nedenle değişik akım görüntüleme teknikleri geliştirilmiştir.

Bunlardan biri, “smoke-wire” olarak adlandırılan dumanla görüntüleme tekniğidir. Bu teknikle, çok ince bir tel tünel içerisine modelin yaklaşık 3D kadar önüne dikey olarak yerleştirilmiştir. Akışın engellenmemesi için, 0,25 mm kalınlığında rezistans teli kullanılmıştır. Test bölgesi içerisine, ağırlık yardımıyla gergin bir şekilde yerleştirilen bu telin, alt ve üst ucu, tele akım verebilmek için bir güç kaynağına bağlanmıştır. Akışın görüntülenebilmesi için ise sıvı olarak, 10 numaralı motor yağı kullanılmıştır.

Burada telin üst kısmından yağ bir şırınga yardımıyla damlatılmıştır. Aşağıya doğru tel üzerinden süzülerek inen yağ, tel üzerinde çok küçük noktacıklar halinde tutunmuştur. Daha sonra tele, bir güç kaynağı vasıtasıyla, 15-25V arasında DC akım verilerek, ısıtılması sağlanmıştır. Telin üst ucuna artı , alt ucuna ise eksi akım verilmiştir. Telin ısınması ile tel üzerindeki sıvılar, tünel içerisinden gelen akımla buharlaşmış, oluşan duman, hava akışının izlediği yolu izleyerek, akış yönünde akış çizgilerini oluşturmuştur. Test bölgesinin uygun şekilde aydınlatılmasıyla, dumanın cisim etrafındaki davranışı görüntülenebilmiştir. Rezistans teline yağın sürekli olarak gönderilmesi halinde cisim etrafındaki akış çizgilerindeki yoğunluk artmaktadır. Bu sağlanabildiği sürece daha net görüntü elde edilebilmektedir. Görüntüler sabit bir kamera vasıtasıyla kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. Kurulan düzeneğin şematik görünümü Şekil 4.16’da, güç kaynağıyla bağlantısı ise Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.16. Akımı Görüntülemek için Kullanılan Düzeneğin Şematik Görünümü



Şekil 4.17. Kurulan Düzeneğin Güç Kaynağı ile Bağlantısı

Yüksek hızlarda akım görünürlüğü net bir şekilde gözlenemediği için, test bölgesinde maksimum hız 3,5 m/s civarında seçilmiştir. Dolayısıyla Re sayısı $8x10^3$ olarak alınmıştır. Bu değer deneylerde incelediğimiz Re sayılarından oldukça düşüktür.

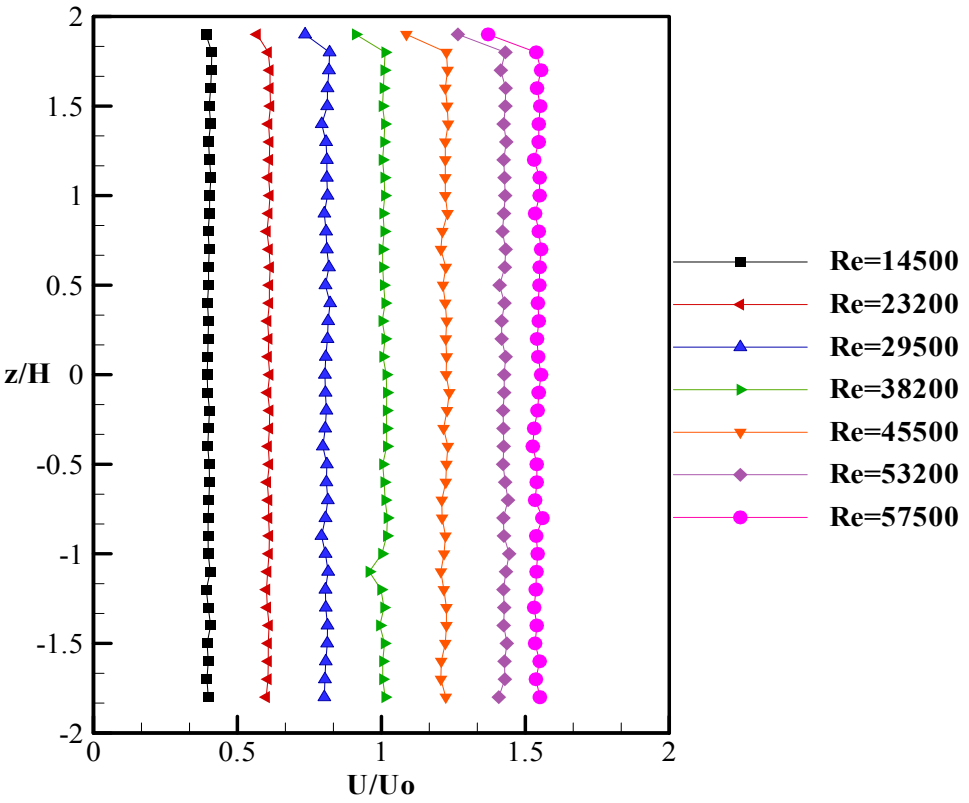
4.5 BULGULAR

4.5.1 Tünel Karakteristikleri

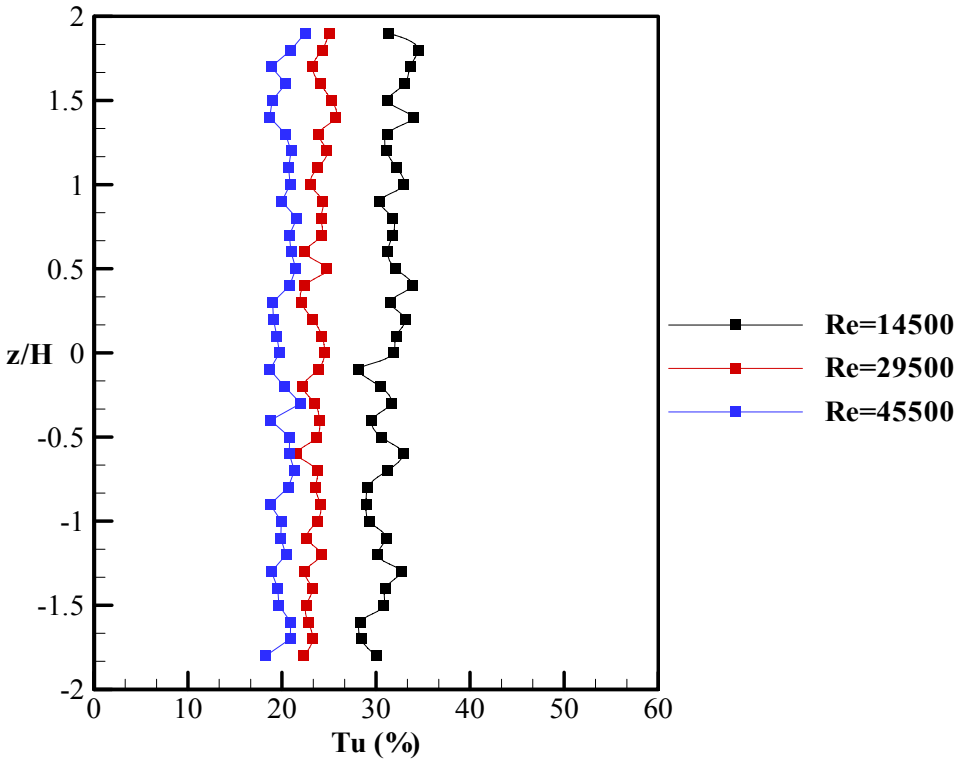
Bu çalışmada, modeller etrafındaki akış ölçümlerine geçmeden önce, rüzgar tüneli çalışma bölgesinin karakteristikleri hakkında bilgi edinmek için, ölçümler yapılmışır. Akış özeliklerinin belirlenmesi, farklı serbest akış hızlarında ve konumlarında, hız ölçümleri alınarak sağlanmıştır.

Elle kumanda edilen tünelin, çalışma prensibine göre, frekans olarak belirlenen akım karakteristiği, sıcak tel vasıtasıyla yapılan ölçümler sonucunda hız olarak okunmuştur. Buna göre yapılan çalışmada, maksimum tünel frekansı 38 Hz, tünel test kesitinde herhangi bir model olmaksızın maksimum tünel hızı ise yaklaşık 35 m/s olarak ölçülmüştür. Hızların ölçümünde, sıcak telden alınan verilerin sayısı 4096, örnekleme frekansı (Sampling frequency) ise 1000 Hz olarak seçilmiştir.Örnekleme frekansı belirlenen konum doğrultusunda, sıcak telin bir saniyede kaydettiği veri sayısını göstermektedir. Ölçüm süresi ise, veri sayısı ve ferkansa göre değişmektedir. Yani seçtiğimiz 4096 veri sayısı ve 1000 Hz'e göre, probun her bir konumda bulunma süresi, belirlenen parametrelerin birbirine oranı olarak, 4.096 s sürmüştür.

Şekil 4.18 ve 4.19'da rüzgar tünelinin test bölgesi girişinden 250 mm uzaklıkta, y=0 konumunda düşey düzlemde (z yönünde) 37 noktada ölçülen akış yönündeki ortalama hız profili ve türbülans şiddeti dağılımları görülmektedir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, hız ölçümleri; 10 ~ 38 Hz arasındaki tünel frekanslarında, Re sayısının 14500~57500 değerleri arasında yapılmış olup,hız dağılımlarının genellikle uniform bir yapıda olduğu görülmektedir. Düşey düzlemdeki ölçümler, serbest akış hızının 23.03 m/s değerinde iken, test kesitinin üst ve alt duvarlarından 5 cm kalacak şekilde yapılmıştır. Grafikten de anlaşıldığı üzere, cidara yakın bölgede hızda azalma olmuştur. Bu azalma, cidara yaklaşırken sınır tabakanın oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. x=250 mm y=0 Konumunda Düşey Düzlemdeki Hız Dağılımları

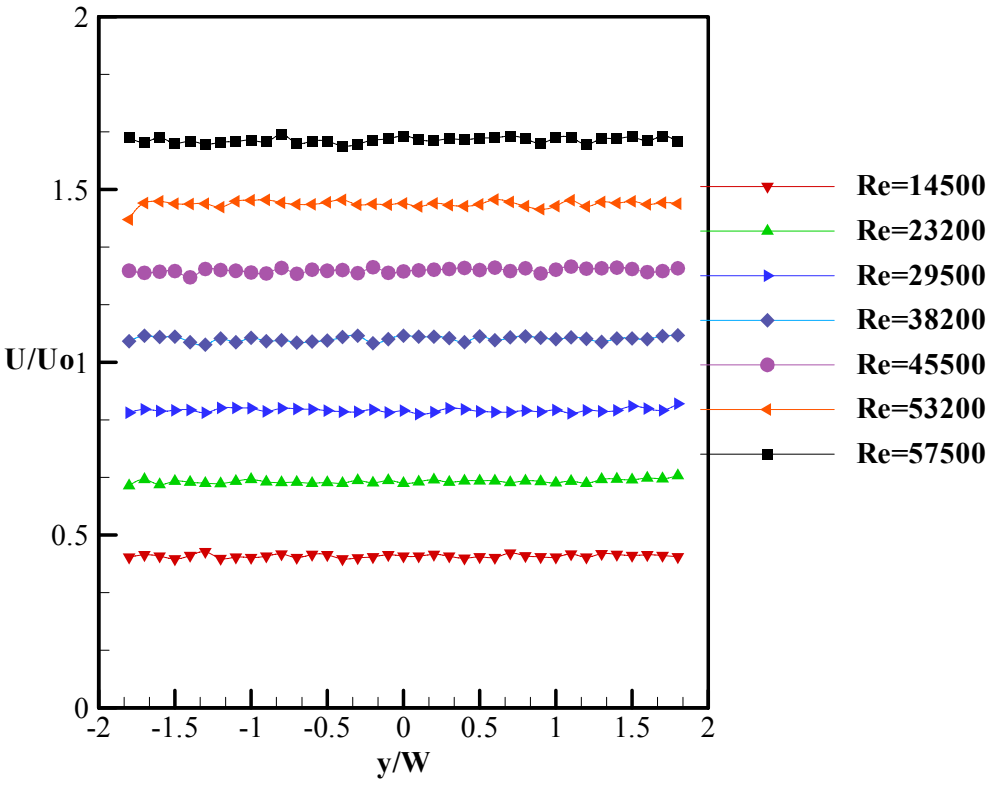


Şekil 4.19. x=250 mm y=0 Konumunda Düşey Düzlemdeki Türbülans Şiddeti Dağılımları

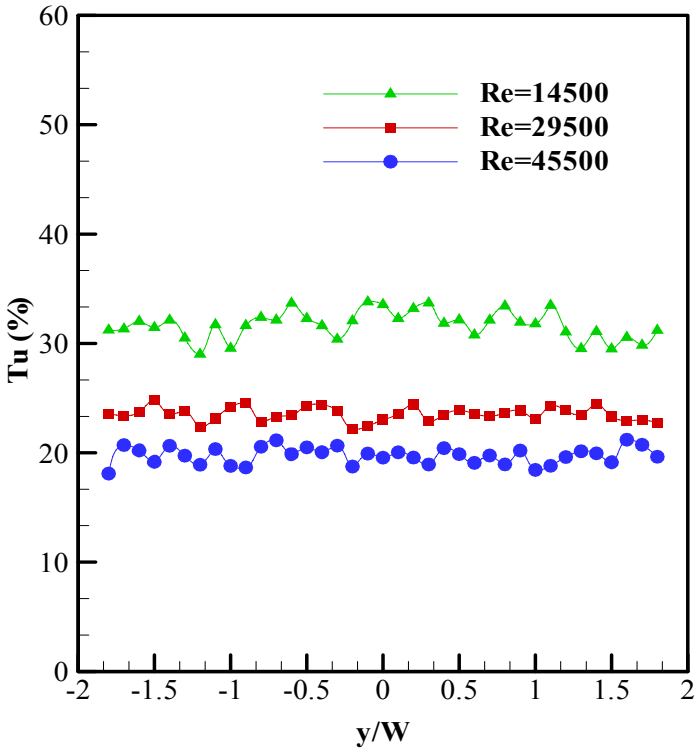
Şekil 4.19'da ise, x=250mm y=0 konumunda düşey doğrultudaki türbülans değişimleri verilmiştir. Üç farklı Re sayısında incelenen değişim, kesit boyunca üniform bir dağılım göstermemektedir. Bunun sebebi genellikle yayıcıda oluşan kararsızlıktan kaynaklanmaktadır. Üflemeli tip rüzgar tünellerinin özelliği olan bu durum, yayıcının uygun dizaynı ve yayıcı içerisine birkaç kademede yerleştirilecek tel eleklerle giderilebilir.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de ise yine aynı konumdaki yatay düzlemdeki (y yönündeki) hız dağılımları ve türbülans şiddetleri verilmiştir. Serbest akış hızının, 23,03 m/s olduğu durumda, hız dağılımları boyutsuzlaştırılarak grafiğe aktarılmıştır. Özellikle Re sayısının 23200 ve 29500 değerlerinde, diğer ölçümlere göre hızın daha üniform bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde ise, yüksek türbülans nedeniyle türbülans şiddetinin dağılımının düzgün olmadığı söylenebilir. Burada Re sayısının14500 değeri için ölçülen türbülans şiddeti %32 civarında iken, tünel düşey ekseninde aynı Re sayısında incelenen türbülans şiddeti ise %30 civarında seyretmiştir. Fakat şekil 4.19 ve 21 ayrı ayrı incelendiğinde, Re sayısının 45500 değeri için türbülans şiddeti %20 civarında ve daha üniformdur. Bu durum hız arttıkça türbülans şiddetinin azaldığını ve üniforma yakın bir özellik gösterdiğini kanıtlamıştır.

Doğal hava akımı kesinlikle tam olarak üniform ve kararlı değildir, fakat rüzgar tüneli ölçümleri açısından ortalama hız ve türbülans değerlerinin incelenerek, uygun seviyelerde tutulması gerekmektedir. Bunun için de deneysel şartları etkileyecek parametreler doğru tespit edilerek uygulanmalıdır.Örneğin; modelin yüzey pürüzlülüğü, tünelin ve deney odasının uygun imalatı, blokaj oranı gibi etkenler türbülansı etkilemekte ve dolayısıyla sonuçlarında etkilenmesini sağlamaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda; yaptığımız çalışmada, tünel içerisinde herhangi bir model olmaksızın, yatay ve düşey eksenler boyunca incelenen, dağılım grafiklerinden de görüldüğü gibi, kullandığımız rüzgar tünelinin, yüksek türbülanslı akımda yapılacak deneysel çalışmalar için uygun olduğu tespit edilmiştir.

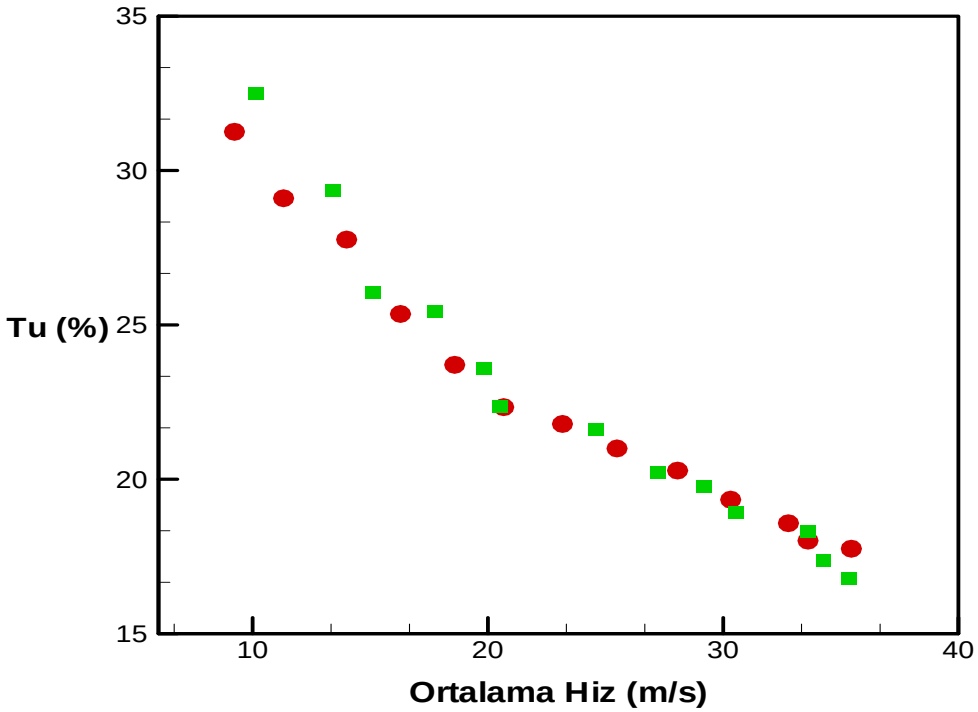


Şekil 4.20. x=250 mm z=0 Konumunda Yatay Düzlemdeki Hız Dağılımları



Şekil 4.21. x=250 mm z=0 Konumunda Yatay Düzlemdeki Türbülans Şiddeti Dağılımları

Şekil 4.22 ‘de ortalama hız ve türbülans şiddeti dağılımları görülmektedir. Burada, aynı konumda, fakat farklı kalibrasyon değerlerinde ölçümler alınmıştır. Ölçümlerin aynı konumda alınmasına rağmen, farklılık göstermesi kalibrasyon sırasında , sıcak telin çevre şartlarından etkilenmesiyle olabilmektedir. Hassas ölçümler yapılabilmesine imkan sağlayan sıcak tel anemometresinin, sıcaklığın değişmesi veya akışkan içerisindeki toz parçacıkları sayesinde kalibrasyonu bozulabilmektedir.Bilindiği üzere artan tünel hızıyla türbülans şiddeti azalmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi türbülans şiddeti, düşük hızlarda yaklaşık %32 değerinde iken, ortalama hız artarken azalmakta ve yüksek hızlarda yaklaşık %16 değerine düşmektedir.



Şekil 4.22. Rüzgar Tünelinde Model Yokken, x=250 mm ve y=0 z=0 Konumundaki Türbülans Şiddeti Dağılımları

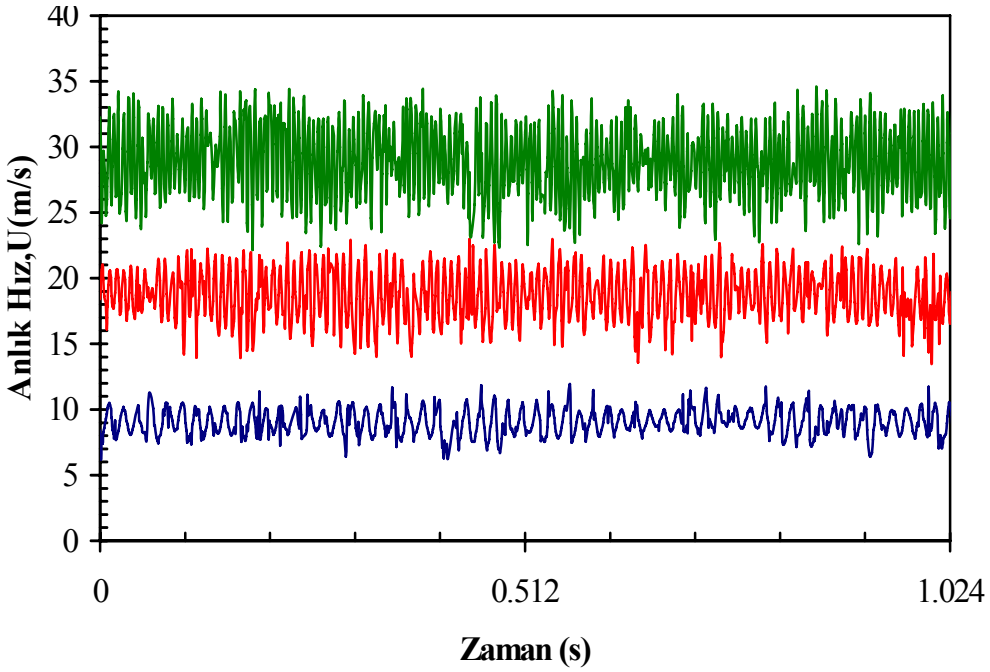
4.5.2.Dairesel Silindir Etrafındaki Akım Karakteristikleri

4.5.2.1 Dairesel Silindir Etrafındaki Anlık Hız-Zaman Değişimleri

Dairesel kesitli silindirik model arkasında değişik x istasyonlarında, kesit içerisinde z yönünde 37 noktada ve farklı tünel hızlarında ortalama hız ve türbülans ölçümleri yapılmıştır.Bu ölçümler, tek telli kızgın film probuyla gerçekleştirilmiştir.

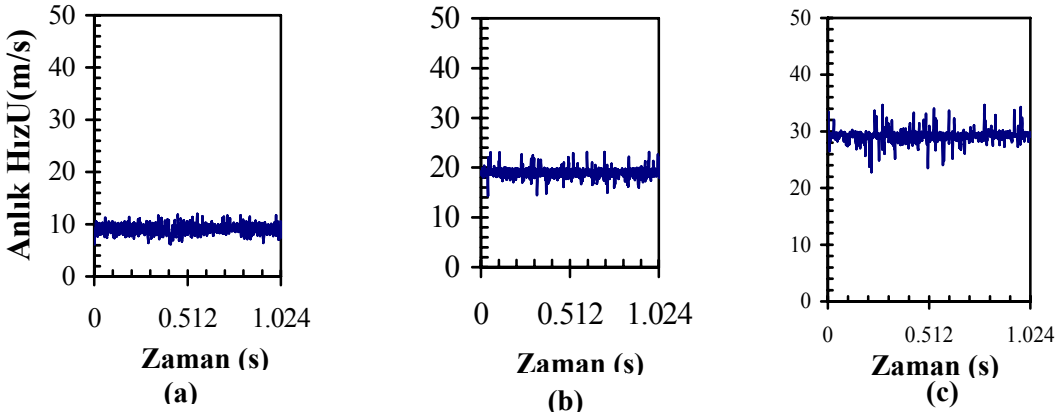
Şekil 4.23’de, model arkasında , kızgın film probunu, modelden x doğrultusunda 50mm

(x/D=2 konumunda),y doğrultusunda ise 27.5 mm(z/D=1.6 konumunda)uzağa yerleştirmek suretiyle, alınan anlık hızların zamanla değişim grafikleri (time–history) verilmiştir.Bu söz konusu anlık hızlar, her bir konum için, 4.096s'de 4096 data okunarak elde edilmiştir. Burada hızın artmasıyla, sinyallerin titreşim frekansının ve genliğinin önemli derecede arttığı gözlenmiştir.

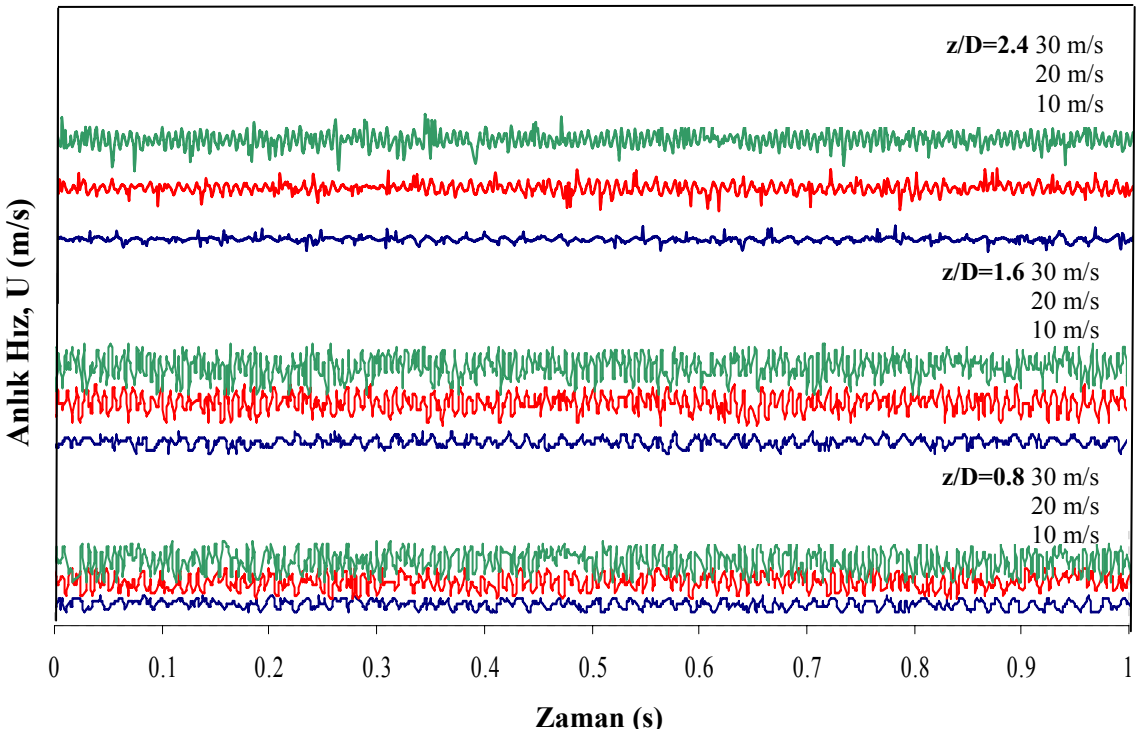


Şekil 4.23. x/D=2 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Hız-Zaman Değişimleri

Şekil 4.24 ise yine x/D=2 konumunda, farklı hızlarda ve farklı düşey pozisyonlardaki hız-zaman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, hızın artmasına karşılık modelden uzaklaşıldıkca sinyal genliklerinde büyük oranda bir azalmanın olduğu gözlenmiştir. Sinyal genliklerindeki bu azalma, girdap kopma olayının cidarlara yaklaşıldıkça azalmasından kaynaklanmaktadır. Buradaki her bir dalgalanma dairesel silindirin üst tarafından kopan girdabı ifade etmektedir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.25 birlikte incelendiğinde, akım yönünde ilerledikçe grafiklerdeki titreşim frekansı az da olsa azalırken, düşey yönde z/D arttıkça, yani z/D=0,8'den 2,4 konumuna ilerlerken, sırasıyla 10, 20 ve 30 m/s'lik tünel hızlarında, sinyallerin genliği önemli derecede azalmaktadır.



Şekil 4.24. Modelden 250 mm Uzakta **a)**10 m/s'de z/D=0.8 b)20 m/s'de z/D=1.6 c)30 m/s'de z/D=2.4 Konumundaki Hız-Zaman Değişimi



Şekil 4.25. x/D=4 İstasyonunda Değişik z/D Konumlarında ve Farklı Hızlardaki Hız-Zaman Değişimleri

4.5.2.2 Dairesel Silindir Etrafındaki Girdap Oluşum Karakteristikleri

Silindir gibi yuvarlak bir gövde üzerinde ayrılmanın oluştuğu noktanın yeri sınır tabaka içindeki akımın karakterine bağılıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü yada yaklaşan akım içindeki türbülans, ayrılma noktasının yerini belirlemede etkilidir. Ayrıca ayrılma, akışkanın viskoz direncine de hemen hemen bağlıdır. Akışkanların viskoz davranışını karakterize eden ve viskoz dirençle de ters orantılı olarak değişen Re sayısı ayrılmanın

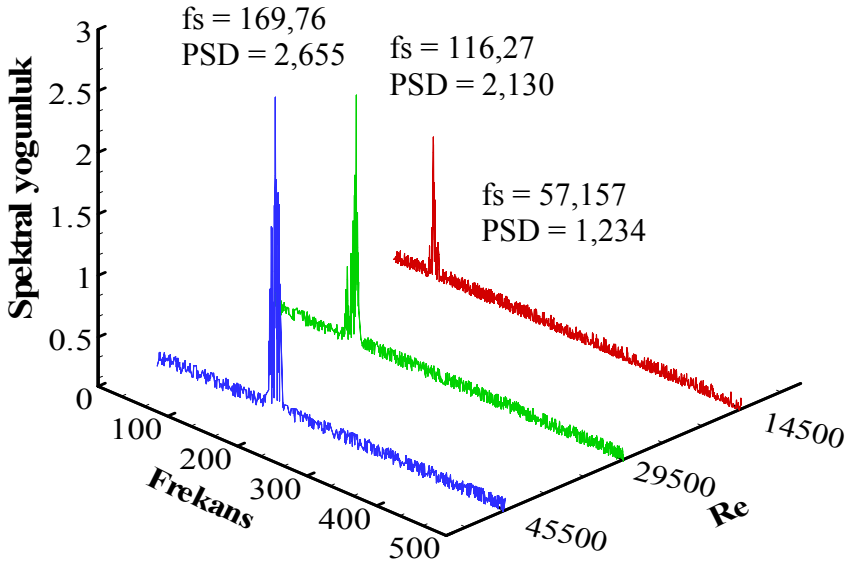
başlamasının bir göstergesidir. Ayrılmanın başlamasıyla aynı zamanda silindirin arka iz bölgesinde oluşan, simetrik girdap oluşumları gözlenecektir.

Sınır tabaka akımında spektral metotların uygulanması, sınır tabaka akım karakteristikleri ile ilgili istatistiki değerler vermesi bakımından oldukça önemlidir. Son yıllarda küt cisim etrafında meydana gelen girdap kopmaları ile ilgili araştırmalarda, spektral analiz uygulanmak suretiyle iz bölgesi hakkında gerekli istastistiki bilgiler edinilmeye çalışılmaktadır. Girdap kopması olayı spektral grafiklerden belirlenmektedir. Kopmaların meydana geldiği frekanslarda, grafiklerde belirgin şekilde bir tepe oluşmaktadır.

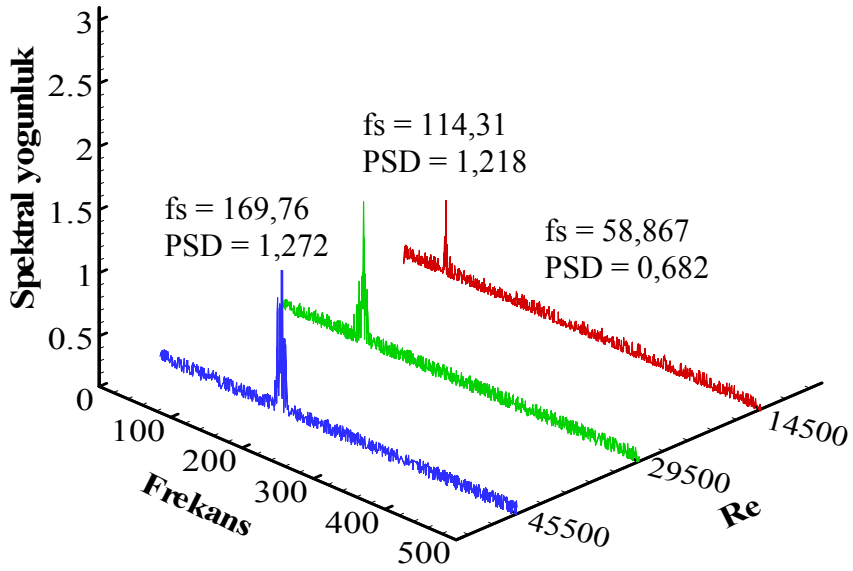
Şekil 4.23-24 ve 25'de incelenen anlık hız-zaman değişimleri, farklı hızlarda alınan dataların grafiğe aktarılmasıyla oluşturulmuştur. Elde edilen dataların, yazılım programı vasıtasıyla spektral analizleri yapılmıştır.Daha sonra grafiğe aktarılan analizler incelenerek , tekil tepenin oluştuğu frekans aralığı gözlenip ,girdap kopmasının hangi bölgede daha belirgin oluştuğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.26'dan şekil 4.29'a kadar olan grafiklerde, model arkasında x/D=2(model arkasında 50mm uzaklıkta) ve x/D=4 (model arkasında 100mm uzaklıkta) istasyonunda, z/D=0.8 (model ekseninden 20 mm yukarda) ve z/D=1.6 (model ekseninden 40mm yukarıda) konumlarında, üç farklı tünel hızında yapılan ölçümlerle ilgili spektral yoğunluk grafikleri görülmektedir. Şekil 4.26 incelendiğinde, hız artarken girdap kopma frekansı olarak adlandırılan fs değerlerininde arttığı gözlenmiştir. Herbir frekansa karşılık gelen güç spektral yoğunluk değerleri de, PSD olarak ifade edilmiştir. Hızın artmasına bağlı olarak Re sayısının artması, kopan girdapların daha yüksek enerjiye sahip olduklarını göstermektedir. x/D=2 z/D=0.8 konumunda , Re sayısı 14500'den 45500 değerine artarken, spektral tepenin şiddeti %136 oranında artmaktadır. Fakat şekil 4.27'de incelenen grafiğe göre , yine Re sayısı 14500den 45500 değerine artarken spektral tepenin şiddeti %60 oranında artmıştır. Bunun sebebi, girdap etkisinin düşey yönde, modelden uzaklaşıldıkça azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum , z/D=0.8 den 1.6'ya artarken, oluşan spektral tepenin şiddetinin, 1/2 oranında azalmasıyla açıklanabilir.

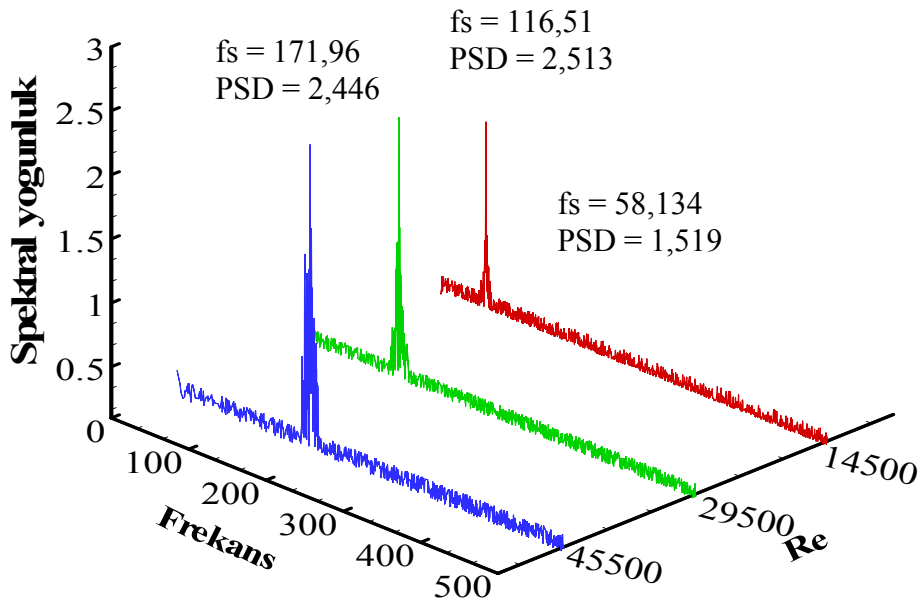
Model arkasında akım yönünde ilerledikçe (x/D=4), aynı Re sayılarında elde edilen spektral yoğunluk grafikleri Şekil 4.28 ve 29'da incelenmiştir. x/D=4 z/D=0.8 konumunda Re sayısı 14500'den 45500 değerine artarken, spektral tepenin şiddeti %93 oranında artmaktadır. Halbuki yukarıda, x/D=2 istasyonunda elde edilen tepenin şiddetinin, aynı Re sayısı aralığında % 136 arttığı ifade edilmişti. Yine burada da z/D=0.8 den 1.6'ya artarken oluşan spektral tepe 1/2 oranında azalmıştır.



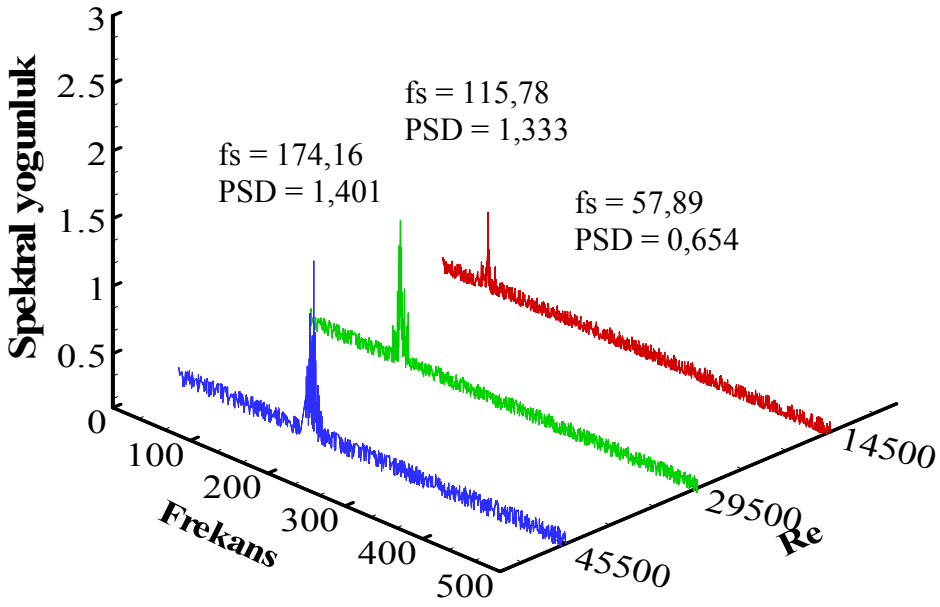
Şekil 4.26. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=2 z/D=0.8 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri



Şekil 4.27. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=2 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri

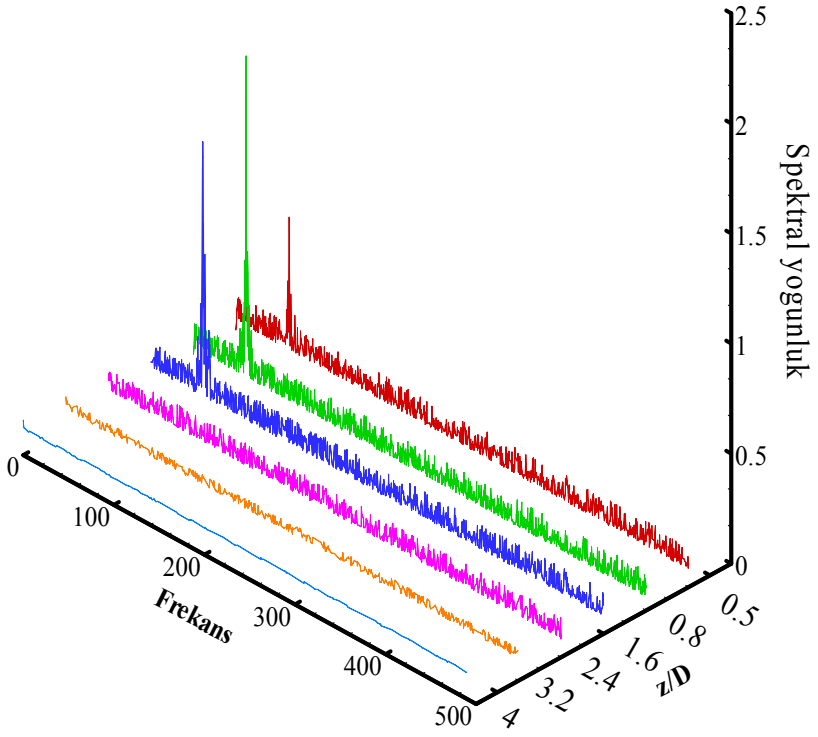


Şekil 4.28. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=4 z/D=0.8 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri



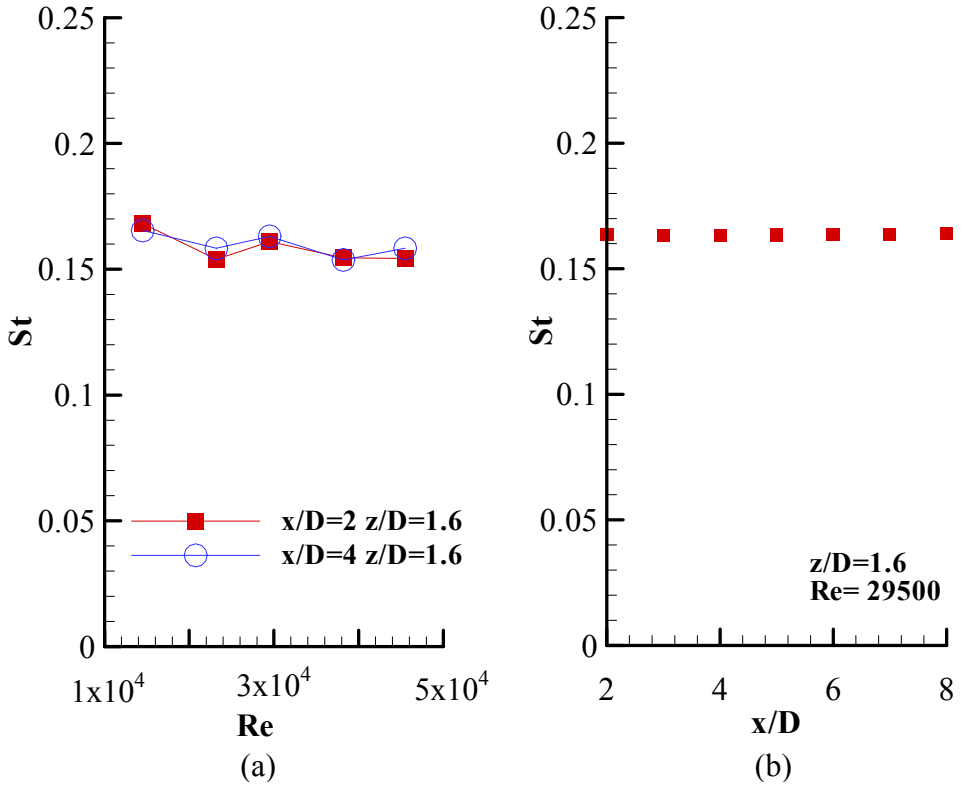
Şekil 4.29. Dairesel Kesitli Silindirik Model Arkasında x/D=4 z/D=1.6 Konumunda Farklı Hızlardaki Spektral Yoğunluk Grafikleri

Şekil 4.30'da model arkasında x/D=2 istasyonunda Re sayısının14500 değerinde spektral yoğunluğun, frekans ve z/D'ye göre değişimi üç-boyutlu olarak verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere, genel olarak en şiddetli ve tekil tepe z/D'nin 0.8 değeri civarında meydana gelmektedir. z/D'nin 1.6 değerinden sonra, artık tekil tepeler oluşmamaktadır. Bu durum yukarıda da bahsedildiği gibi, z/D=1.6 konumundan sonra girdap kopmasının oluşmamasından kaynaklanmaktadır.



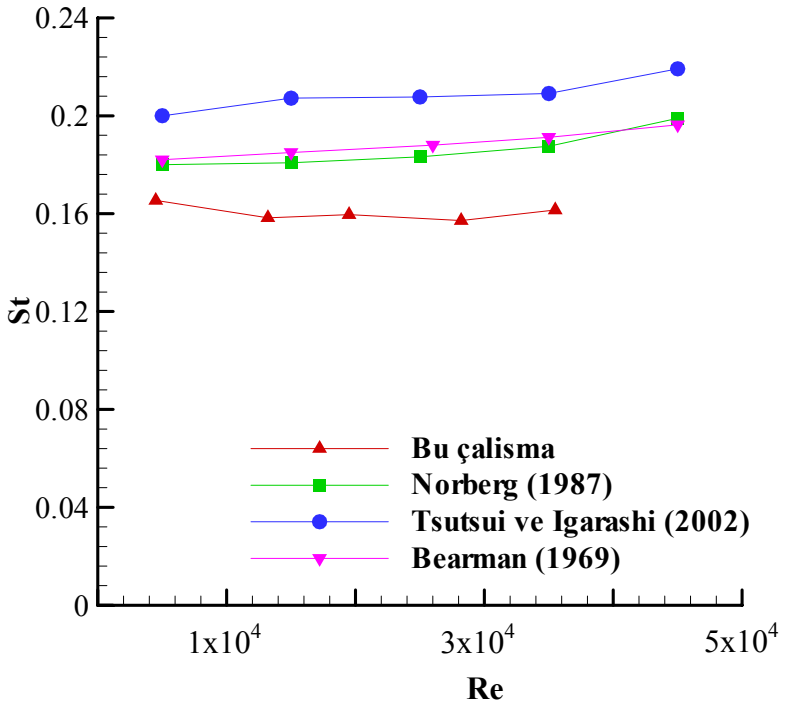
Şekil 4.30.Model Arkasında Re=14500 ve x/D=2 Konumunda Spektral Yoğunluğun Frekans ve z/D'ye Göre Değişimi

Spektral yoğunluk grafiklerinden kopma frekansı(fs) belirlenerek, St sayısı(St=fD/U) hesaplanmış ve x/D=2 ve 4 istasyonlarında z/D=1.6 konumunda, Re sayısının 14500~45500 değerleri arasında St sayısının değişimi Şekil 4.31(a)'da gösterilmiştir. Genel olarak St sayısı 0,1 ile 0,4 arasında olup cismin kesit şekline ve Re sayısına bağlıdır. Burada Re sayısı artarken ortalama St sayısı her iki konum içinde, yaklaşık 0.16 olarak bulunmuştur. Şekil 4.31(b)'de ise St sayısının akım yönünde ilerledikçe değişen dağılımı gösterilmiştir. Bu grafikte spektral tepenin en yüksek değerlerde incelendiği, z/D=0.8 konumunda, Re sayısının 29500 değerinde, alınan ölçüm sonuçları verilmiştir.

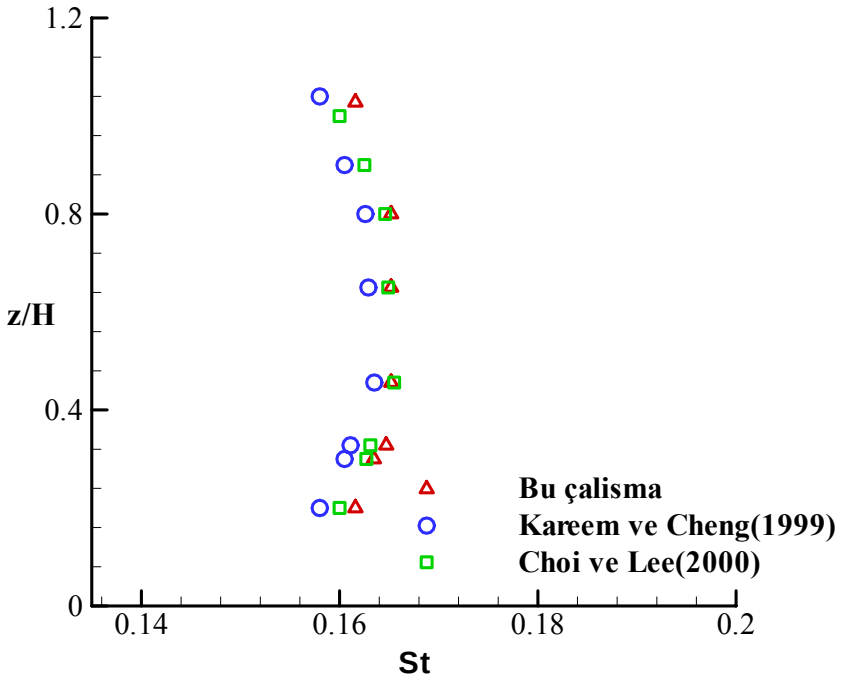


Şekil 4.31.a)Model Arkasında Farklı x İstasyonlarında St Sayısının Re ile Değişimi
b)Model Arkasında z/D=1.6 'da Farklı x/D İstasyonlarındaki St Sayısı

Kopma frekansı, ayrılma noktasına bağlı, kayma tabakaları arasındaki genişliğe göre de değişir. Yüksek Re sayılarında, kayma tabakaları arasındaki mesafe azalır, tabakalar arasındaki hız düşer ve buna bağlı olarak St sayısı artar. Ayrılan kayma tabakalarındaki hızın artmasıyla da, akış katmanlarındaki kayma oranı artmakta, bu ise daha büyük türbülansın üretilmesine yol açarak iz bölgesinin değişmesine neden olmaktadır. Şekil 4.32'de literatürle karşılaştırılan bu çalışmada, elde edilen deney sonuçlarından, St sayısının eğrisel olarak bir uyum içerisinde olduğu, fakat daha düşük değerlerde çıktığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, girdap kopmasının modelin hemen arkasında gerçekleşmesiyle, kopma frekansının diğer çalışmalara göre daha erken elde edilmesinden ve blokaj oranlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, Kareem ve Cheng [22] tarafından yapılan çalışmada; dairesel silindirik model yüzeyine yerleştirilen tellerle oluşturulan, türbülanslı ortamda, elde edilen deney sonuçlarıyla; Choi ve Lee'nin [21] dairesel silindirik model önüne pürüzlülük elemanı koyarak, model arkasında elde edilen St sayıları; yaptığımız çalışmadaki tünel düşey ekseni (z/H) boyunca elde edilen değerlerle uyum içerisindedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.32. Model Arkasında z/D=1.6 Konumunda Elde Edilen St Sayılarının Re Sayısı İle Değişimi



Şekil 4.33. Model Arkasında Tünel Kesiti Boyunca Elde Edilen St Sayıları

4.5.2.3 Dairesel Silindirin İz Bölgesindeki Hız Karakteristikleri

Şekil 4.34'de silindirik model arkasında 4 farklı x istasyonunda ve 5 değişik Reynolds sayısında ölçülmüş, ortalama hız dağılımları verilmektedir. Ölçümler tünel düşey ekseni boyunca, akışa paralel yerleştirilen kızgın film probuyla gerçekleştirilmiştir. Bu hız dağılımlarından görüldüğü gibi, z/H=0 civarında, yani modelin tam arka bölgesinde hızların değerleri önemli derecede azalmaktadır. Pozitif ve negatif z/H değerlerinde, elde edilen hız ölçümlerinin, hemen hemen aynı olmasından dolayı, iz bölgesinin eksen çizgisine göre simetrik olduğu söylenebilir, dolayısıyla girdap oluşumunun da eksen çizgisine göre simetrik olduğu ortaya çıkmıştır. Re sayısı 14500'den 45500 değerine artarken, ortalama hız değeride 9 m/s'den 27 m/s'ye artmaktadır.

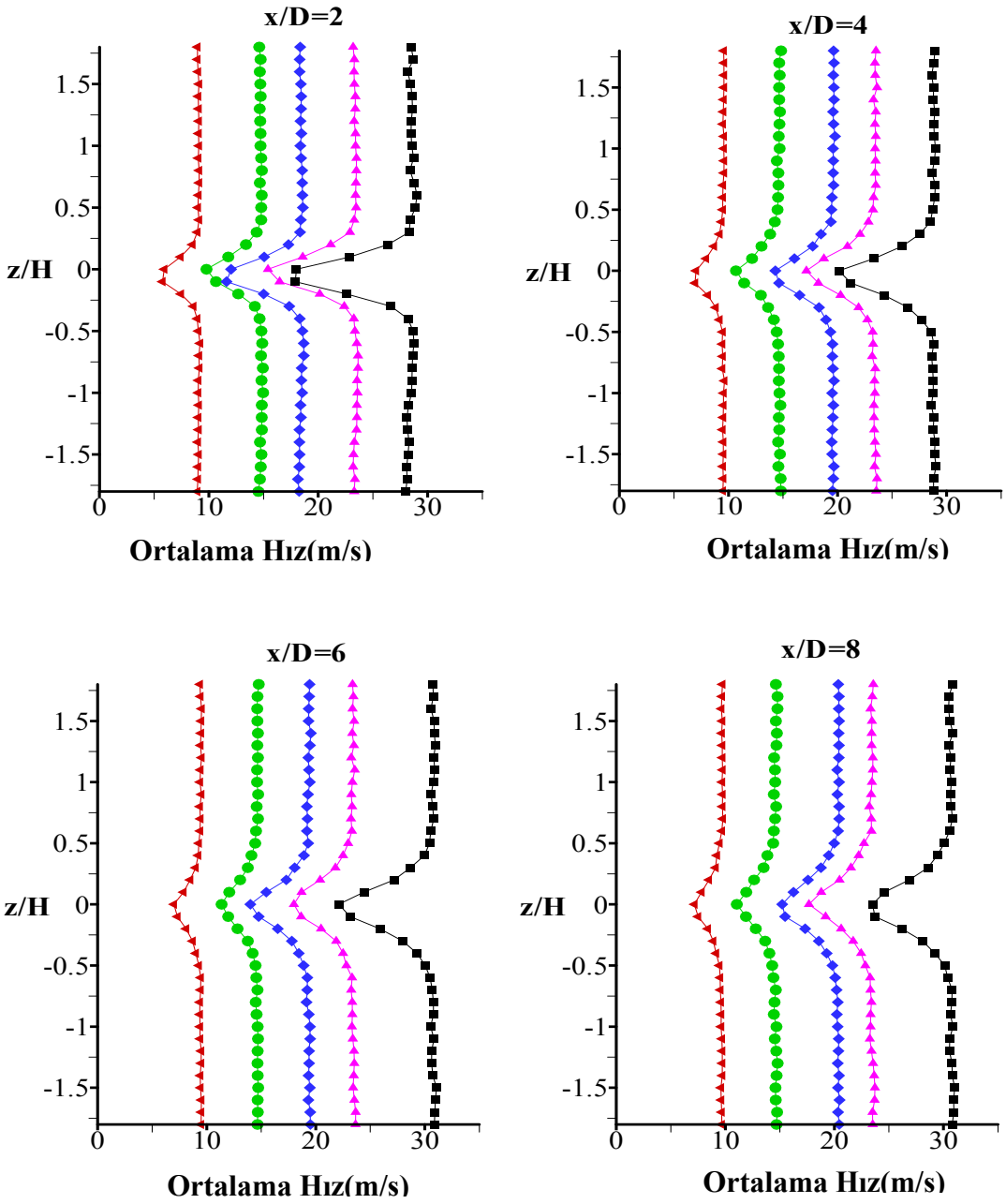
Silindir arkasındaki iz genişliği ise, akım yönünde ilerledikçe azalmaktadır. Yani, x/D=2 istasyonunda Re sayısının 45500 değerinde, iz genişliği %10 civarlarında iken, x/D=8 istasyonunda yine aynı Re sayısında , iz genişliği %7 civarındadır. Bu durum, modelden uzaklaşıldıkça, model etkisinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.35'de ise, aynı konumlarda eksenel doğrultudaki türbülans şiddeti dağılımları verilmiştir. 5 farklı Re sayısında ölçülen türbülans şiddeti dağılımlarında, türbülans şiddetinin en yüksek olduğu bölge z/H=0 civarındaki bölge olup, x/D artarken türbülans şiddeti azalmaktadır. x/D değeri 2'den 8 değerine artarken, z/H=0 noktasındaki türbülans şiddeti , Re=23200 için %17 değerinden %11 değerine azalmıştır.

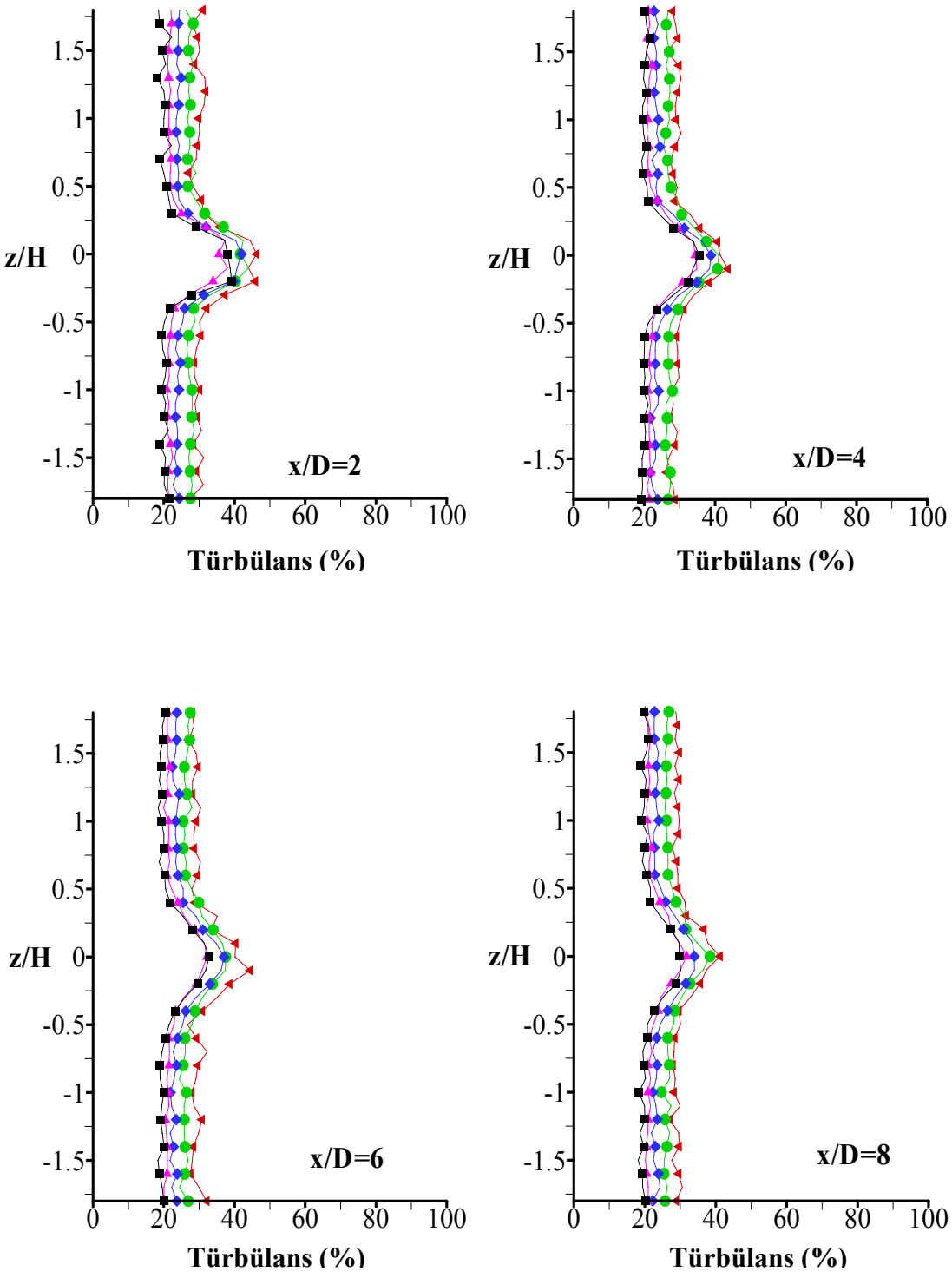
Grafiklerden görüldüğü gibi, artan Re sayısıyla türbülans şiddeti azalmaktadır.Re sayısının 14500 değerinde türbülans şiddeti ortalama %30 civarında iken, Re sayısının 45500 değerine artmasıyla türbülans ortalama %20 civarına düşmüştür. Düşük hızlardaki türbülans şiddetinin yüksek çıkmasına sebep olan bu duruma, en büyük etken ise, tünelin üflemeli tipte olması nedeniyle sabit basınç yayıcısında oluşan kararsızlıktır.

Şekil 4.36 ve 37'de, model arkasında x/D=2, 4 ve 8 konumlarında serbest akış yönündeki boyutsuz hız dağılımları ve yine aynı konumda eksenel doğrultudaki türbülans şiddeti profilleri verilmiştir. Yukarıdaki grafiklere göre, Re sayısının 23200 değerinde hız dağılımlarında, ölçüm istasyonunun cisme en yakın olduğu x/D=2 istasyonunda, cismin arkasındaki bölgede hızdaki azalmanın en fazla olduğu ve daha uzaktaki istasyonlarda ise iz bölgesinin genişlemesiyle birlikte bu bölgede hızın serbest

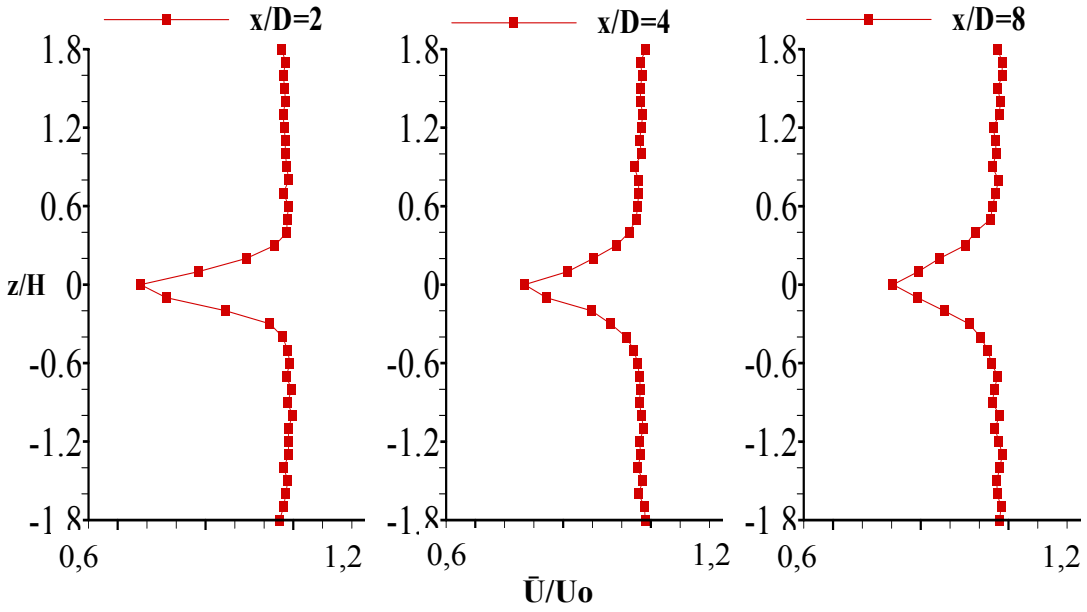
akış hızına doğru yaklaştığı daha açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca x/D=2 konumunda türbülans şiddeti cismin merkez ekseni hizasında (z/H=0 civarında) bir miktar azalmakta ve türbülans şiddetinde W şeklinde iki tepelilik oluşabilmektedir. Bu durum tam bu bölgede oluşan ters akışın bir ifadesidir. Artan x/D ile özellikle girdap oluşum bölgesinin dışarısına çıkılmasıyla, iki tepelilik ortadan kalkmakta ve hız arttıkça oluşan dağılım daha düzgün bir şekilde elde edilmektedir.



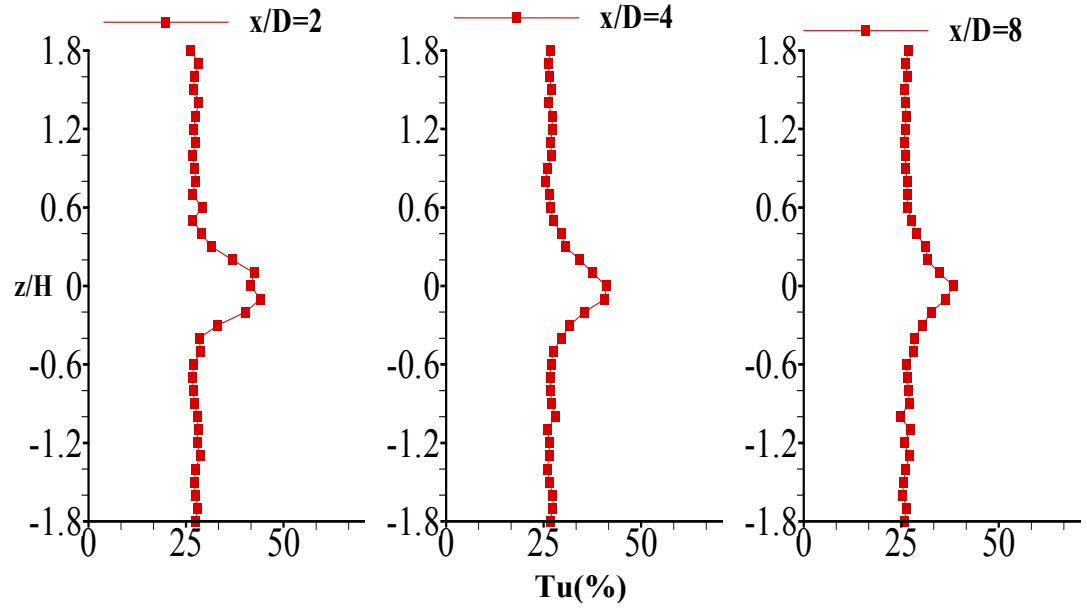
Şekil 4.34. Model Arkasındax/D=2,4,6 ve 8 Konumlarında Düşey Eksendeki Ortalama Hız Dağılımları (◄ Re=14500, ● Re=23200, ◆ Re=29500, ▲ Re=38200, ■ Re=45500)



Şekil 4.35. Model arkasındax/D=2,4,6 ve 8 Konumlarında Düşey Eksendeki Ortalama Türbülans Şiddeti Dağılımları(◄ Re=14500,● Re=23200,◆ Re=29500, ▲ Re=38200,■ Re=45500)

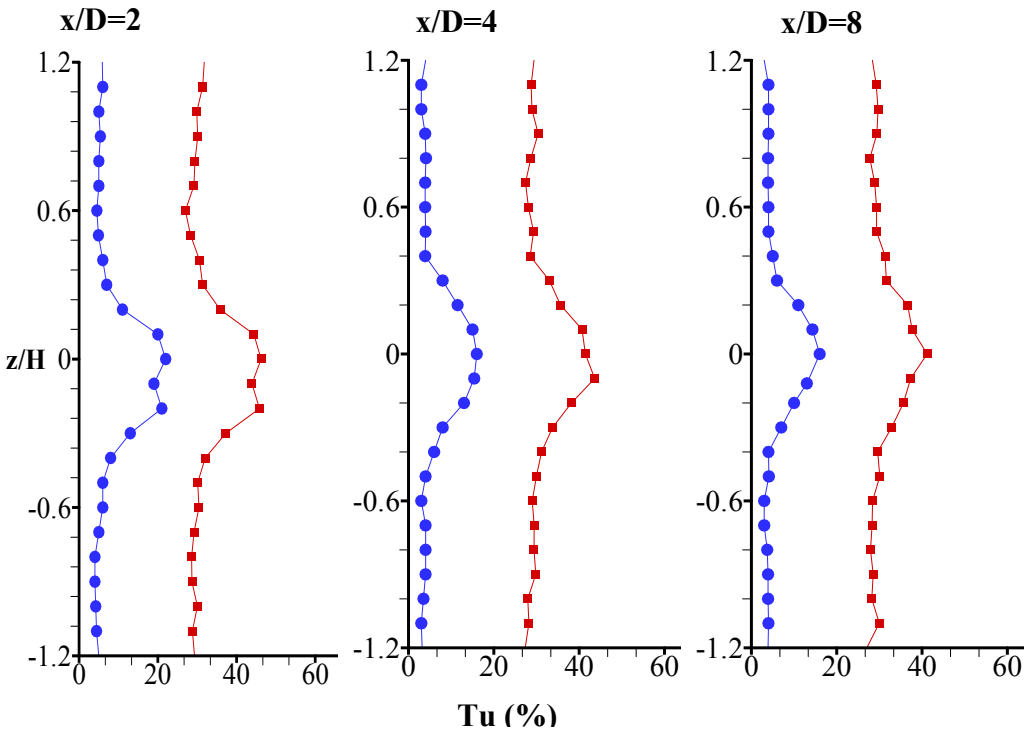


Şekil 4.36. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Boyutsuz Hız Dağılımları (Re=23200)



Şekil 4.37. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Türbülans Dağılımları (Re=23200)

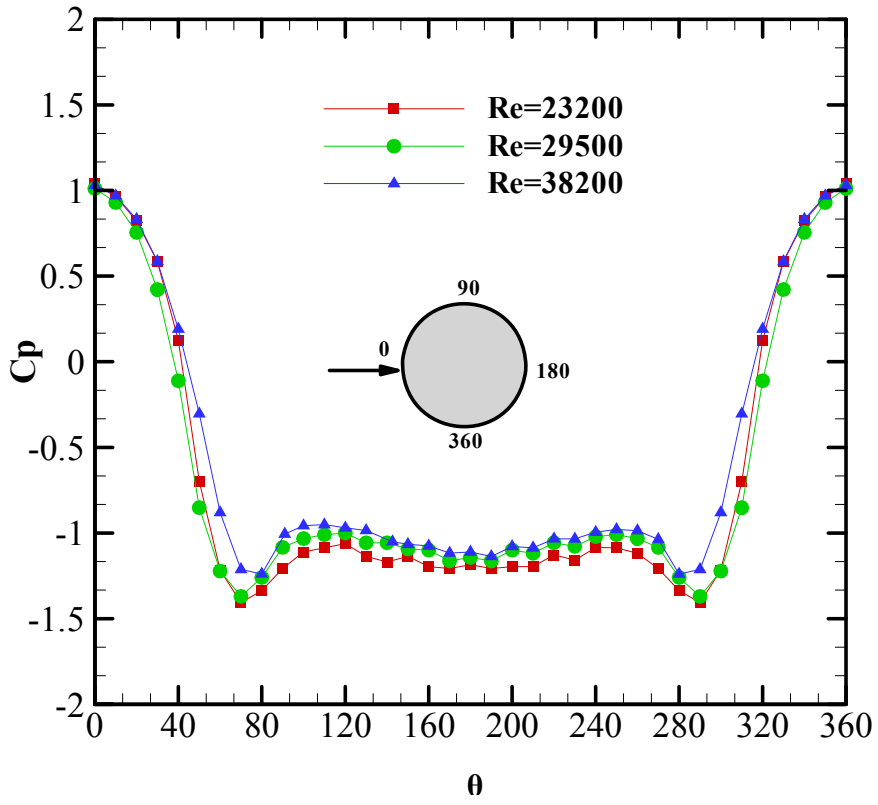
Şekil 4.38'de Re sayısının 14500 değeri ve x/D=2,4 ve 8 istasyonlarında incelenen türbülans şiddeti dağılımlarında hız artarken, grafikten de görüldüğü gibi türbülans profili azalma eğilimi göstermiştir. Burada Choi ve Lee'nin [21] Re sayısının 14000 değerinde ve farklı x noktalarında yaptıkları deneyde, daha önce de bahsettiğimiz, cisme yakın bölgede iki tepelilik oluşmuş ve modelden uzaklaşıldıkça W görünümü kaybolmuştur. Bu durum bakımından Choi ve Lee'nin bulduğu sonuçlar, yaptığımız çalışmayla uyum içerisindedir.



Şekil 4.38. Model Arkasında Farklı x İstasyonlarındaki Türbülans Şiddeti Dağılımları (● Choi ve Lee'nin yaptığı çalışma, ■ Bu çalışma)

4.5.2.4 Dairesel Kesitli Model Yüzeyinde Ölçülen Yüzey Basınç Dağılımları

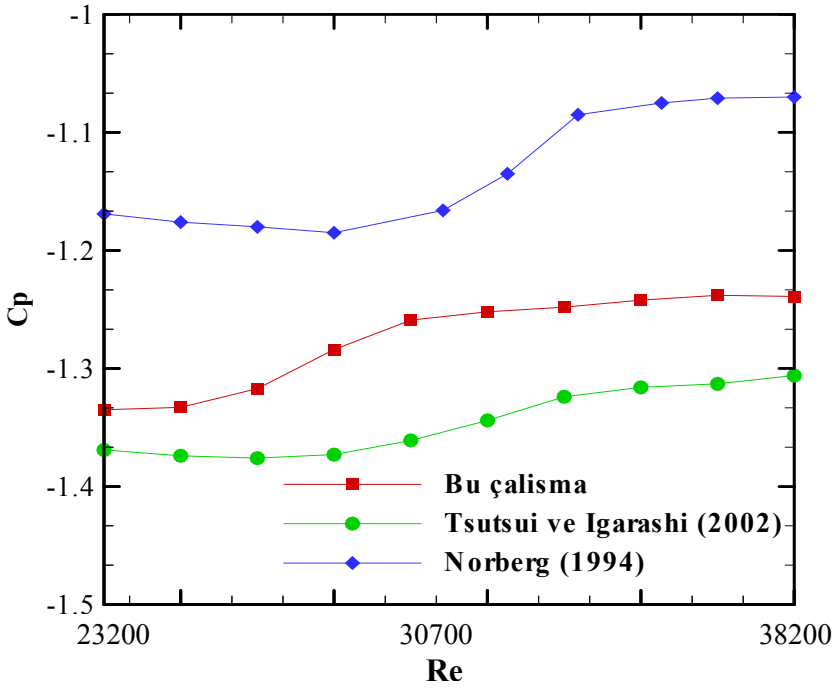
Dairesel kesitli silindirik model yüzeyinde, tam orta kesitte (x=y=z=0) çevresel olarak değişik θ açılarında ve farklı Reynolds sayılarında basınç ölçümleri yapılmıştır. Reynolds sayısının 23200, 29500 ve 38200 değerlerinde açısal pozisyonun bir fonksiyonu olarak ölçülen, tipik basınç dağılımları Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39.Model Etrafındaki Çevresel Basınç Katsayısının Değişimi

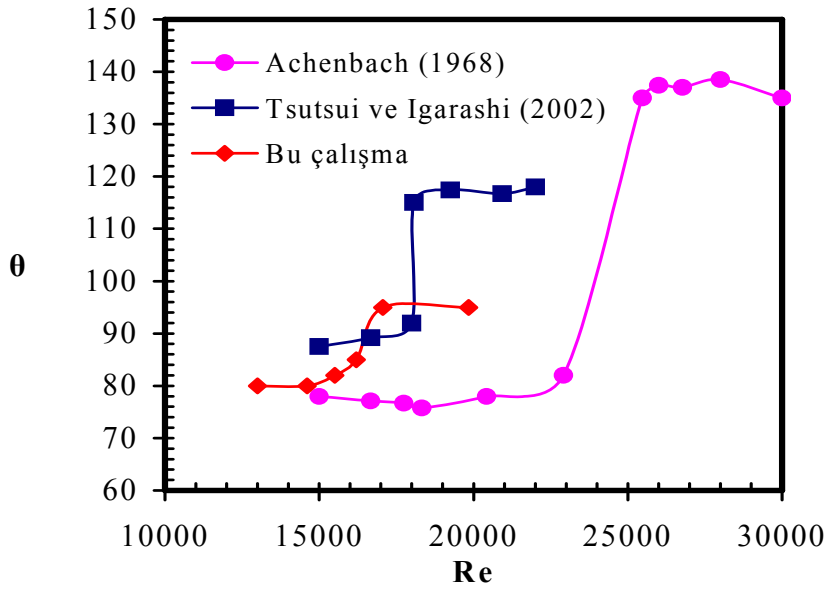
Dairesel kesitli silindir simetrik bir geometriye sahip olduğundan, grafikten de görüldüğü gibi, silindirin ön ve arka yüzeyinde basınç ölçüm değerleri yaklaşık sonuçlar vermiştir. Basınç katsayısı, ön kısımda azalarak, $\theta=70^{o}\sim90^{o}$ civarında minimum değer almakta, bundan sonra az bir miktar artmaktadır. Silindirin diğer yarısında ise, $\theta=270^{o}\sim300^{o}$ civarında bir azalma söz konusudur. Bilindiği gibi silindir üzerinde yüzeyden ayrılma yeri, Re sayısı ile değişmektedir. Burada da görüldüğü gibi, basınç ölçümünün minimum seviyeye inmesi, bu noktalarda yüzeyden ayrılma noktasının oluştuğunu göstermektedir. Laminer akıma göre, türbülanslı akımdaki yüzeyden ayrılma noktası, daha geç oluşmaktadır.

Açısal θ değerinin basınç katsayısının Re sayısı ile değişimi, Tsutsui ve Igarashi'nin [20] 2002 yılında gerçekleştirdiği çalışmayla ve Norberg'in [9], özellikle görünüş oranını incelediği çalışmayla, Şekil 4.40'da karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda grafikten de görüldüğü gibi Re sayısı arttıkça, Cp değerleri de artmaktadır. Re sayısı 23200'den 38200'e artarken, basınç prizinde ölçülen Cp değerleri de ortalama %20~30 oranında artmıştır.



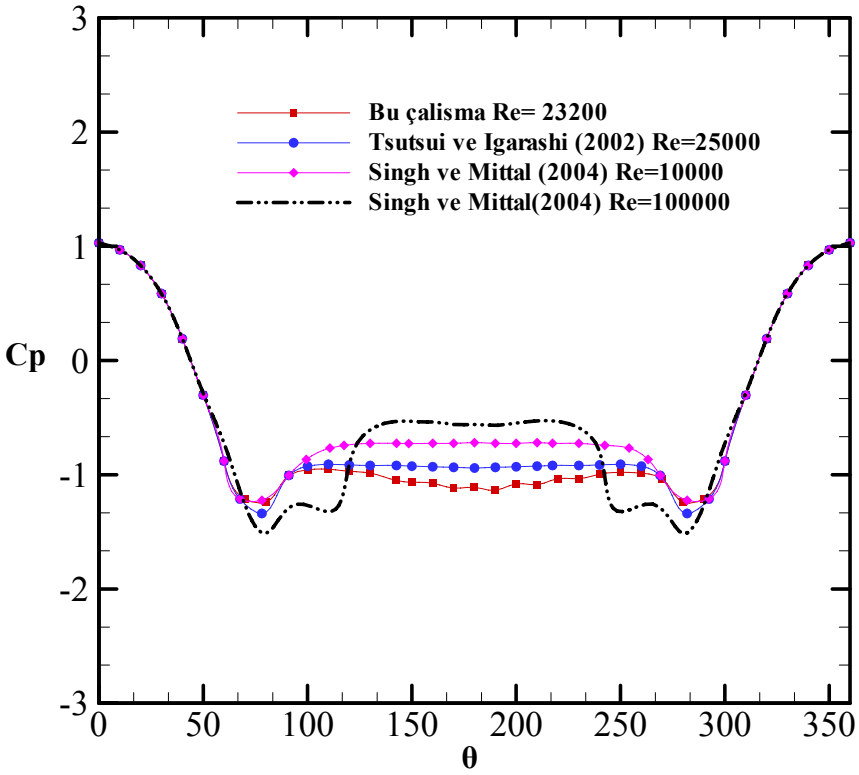
Şekil 4.40. Re Sayısıyla Basınç Katsayısının Değişimi

Tsutsui ve Igarashi [20] tarafından yapılan çalışmada Re sayısının yaklaşık 15000 değerinde yüzeyden ayrılma noktası tam olarak belirlenmiş ve ayrılmanın 87,5°'de oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ise, Re sayısının 13000 değerinde yüzeyden ayrılma noktası 80°~90° civarında, 1968 'de Achenbach [41] tarafından yapılan çalışmada da 70°~80° olduğu tespit edilmiştir.(Şekil 4.41)



Şekil 4.41. θ Açısının Re Sayısına Göre Değişimi

Şekil 4.42'de yaptığımız çalışmanın, basınç katsayısının θ ile değişimi yönünden, literatürde bulunan diğer çalışmalarla karşılaştırılması verilmiştir. Yüzeyden ayrılma noktası diğer çalışmalarla uyum içinde olsada, Cp katsayısı düşük çıkmıştır. Sing ve Mittal'in [19] yaptığı çalışmada ise, iki farklı Re sayısı için, farklı sonuçlar elde edilmiştir. Re sayısının 10000 değeri için Cp katsayıları, bu çalışmayla uyum gösterirken, Re=100000 değerinde iki tepelilik oluşmuştur. Bu durum, akımın yüzeyden ayrıldıktan hemen sonra tekrar emilmesi ve yeniden yüzeyden ayrılmanın gerçekleşmesi olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.42.Çevresel Basınç Katsayısının θ ile Değişimi

4.5.2.5 Dairesel Kesitli Silindirik Modeli Etkileyen Sürükleme ve Kaldırma Kuvvet Katsayıları

Basınç dağılımı, sınır tabaka üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Silindirin arka tarafında, iz bölgesindeki basınç düşük olup, yaklaşık olarak sabittir. Silindirin ön tarafındaki basınç yüksektir ve bundan dolayı silindir üzerinde net bir basınç kuvveti vardır. Bu net basınç kuvveti sürüklemeyi meydana getirir. Alt kritik Re sayısı civarındaki bir akışta dairesel küt bir cisme etki eden sürükleme kuvvetlerinin önemli

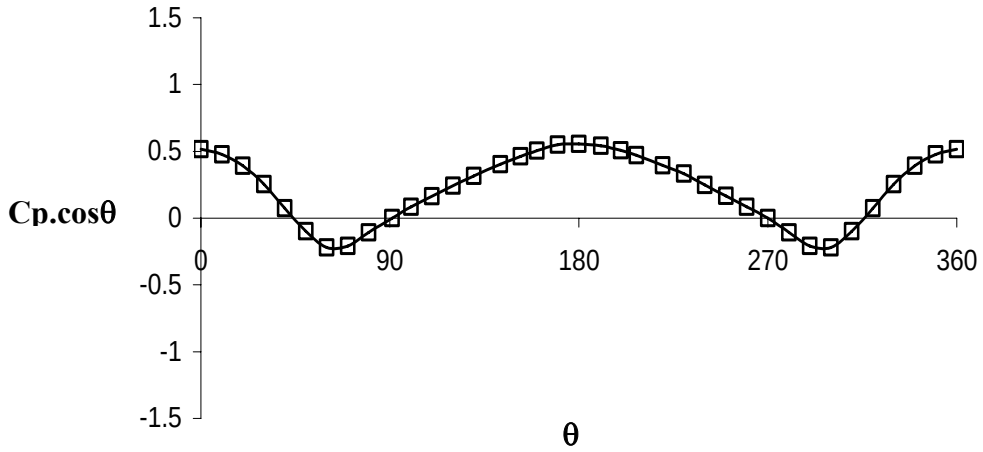
bir bölümü basınç kuvvetlerinden oluşmaktadır. Bunun için, çoğunlukla sürükleme katsayısı sadece basınç kuvvetlerinden hesaplanmakta ve sürtünme nedeniyle oluşan sürükleme kuvveti ihmal edilebilmektedir. Bölüm 3'de bahsettiğimiz gibi, dairesel kesitli silindirik modelin basınç katsayısı dağılımından sürükleme ve kaldırma kuvvet katsayılarını bulmamız mümkündür. Sürükleme katsayısı denklem 3-8'de ifade edildiği gibi,

$$C_D = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} C_P.\cos\theta.d\theta$$

şeklinde tanımlanır. Kaldırma katsayısı ise,denklem 3-7'den;

$$C_L = -\frac{1}{2}\int_0^{2\pi} C_P.\sin\theta.d\theta$$

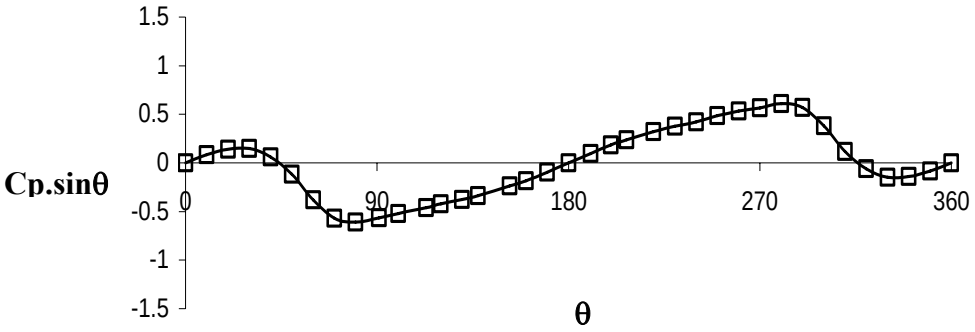
şeklinde ifade edilir. Yaptığımız deneylerde Re sayısının yaklaşık 15000~55000 değerleri arasında çalışılmış olup, burada sürükleme katsayısının tespitinde, Re sayısının 38200 değeri örnek olarak seçilmiştir. Re sayısının bu değerinde elde edilen Cp katsayılarına göre, sürükleme katsayısının belirlenmesinde kullanılan "Cp.cosθ" ifadesinin dağılımı Şekil 4.43'de verilmiştir. Bu eğrinin altında kalan alan sürükleme kuvvetinin büyüklüğünü belirlemektedir. Burada, durma noktası basıncı ve silindir arka yüzeyindeki basınç sürükleme kuvvetini önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 4.43. Modelin Basınç Katsayısı Dağılımından Sürükleme Kuvvet Katsayısının Bulunması

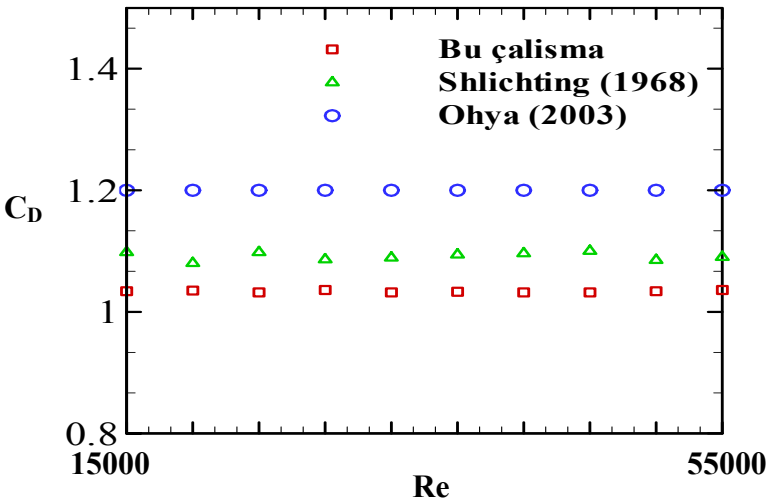
Kaldırma katsayısının belirlenmesinde kullanılan "Cp.sinθ"ifadesinin dağılımı ise, Şekil 4.44'de görülmektedir. Burada silindirin alt ve üst bölgesindeki basınç dağılımının simetrik oluşu ve kaldırma kuvvetlerinin birbirini dengelemesi bakımından C_D sıfır

değerini almaktadır. Bu durum grafikten de açık bir şekilde görülmektedir. Yani eğrinin altında kalan alan sıfır değerini vermektedir.



Şekil 4.44. Modelin Basınç Katsayısı Dağılımından Kaldırma Kuvvet Katsayısının Bulunması

Üniform akıma maruz dairesel bir silindirin, sürükleme katsayısı, oluşan türbülans artışıyla azalmaktadır. Yani yapılan çalışmalar da, silindir etrafındaki laminer akışa göre akımın yüzeyden ayrılma noktası $\theta=82^{o}$ ve sürükleme katsayısı $C_D=1,2$ olarak ifade edilmiştir. Fakat bu durum türbülansın artmasıyla, θ açısının artmasına, sürükleme katsayısının ise azalmasına yol açmaktadır. Bu çalışmada, silindir çevresindeki basınç dağılımının integrasyonundan elde edilen sürükleme katsayısı yaklaşık 1,03 olarak bulunmuştur. Şekil 4.45'de literatürle karşılaştırılması yapılan sürükleme katsayısının, Re sayısı ile değişimi görülmektedir. Burada Ohya'nın[16] yaptığı çalışma ideal bir çalışma olup,laminer akıştaki sürükleme katsayısı $C_D=1,2$ değeri elde edilmiştir. Shlichting'in[34] çalışmasında sürükleme katsayısı 1,05 çıkarken, yaptığımız çalışmada sürükleme katsayısı türbülansın etkisine göre daha düşük çıkmıştır.

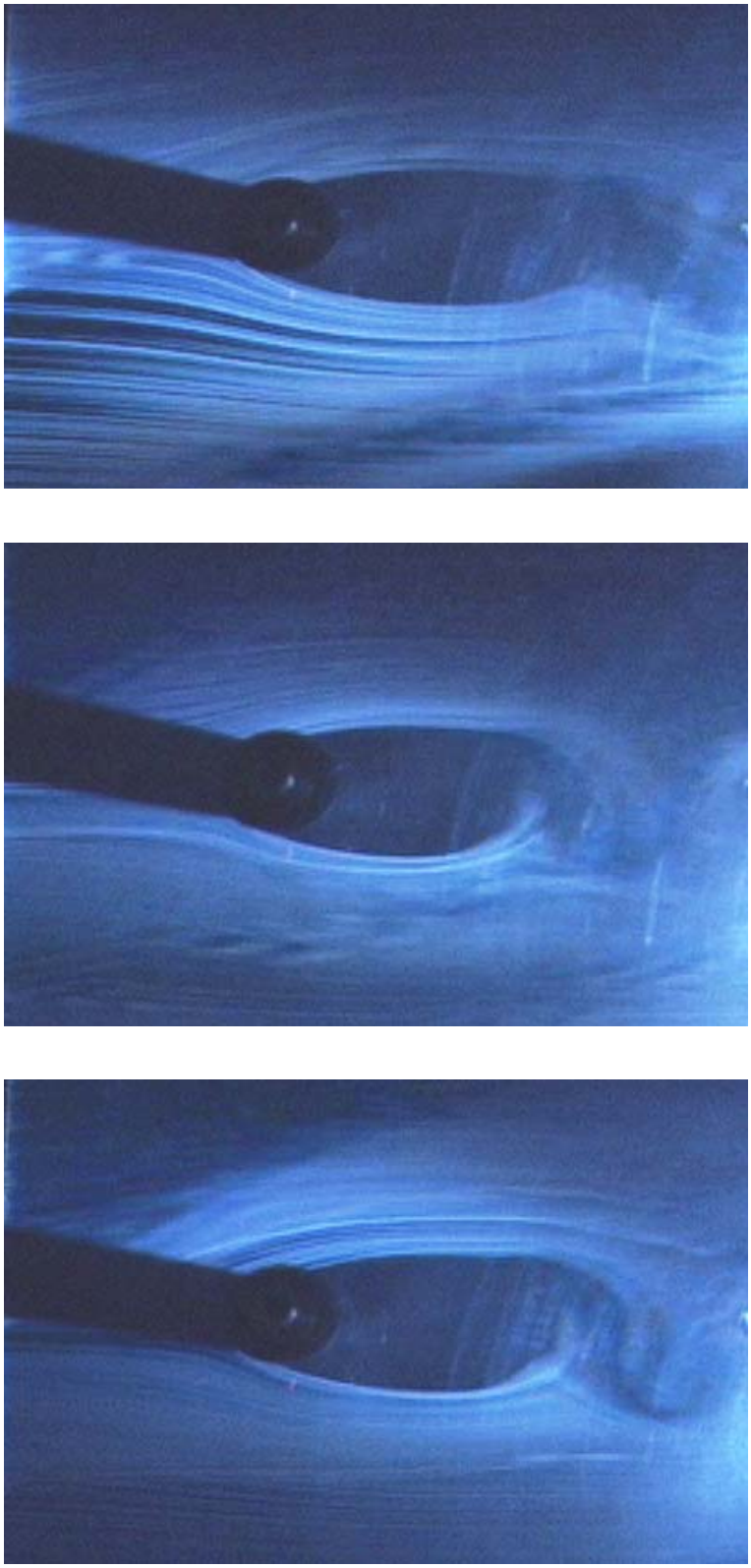


Şekil 4.45. Sürükleme Kuvvet Katsayısının Re Sayısı ile Değişimi

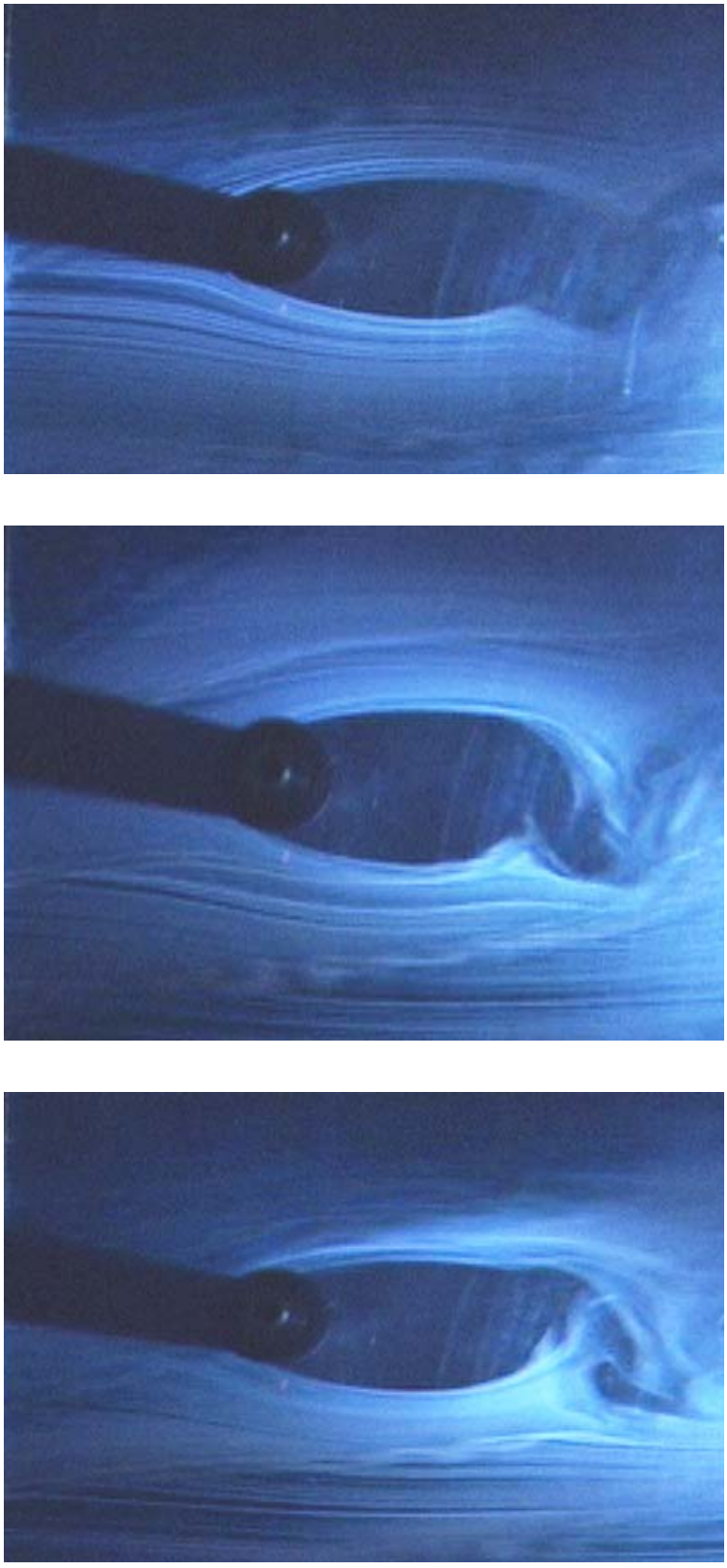
4.5.2.6 Dairesel Kesitli Silindirik Model Etrafındaki Akış Görünürlüğü

Smoke-wire yöntemiyle ve yaklaşık 3 ve 3,5 m/s'lik tünel hızlarında gerçekleştirilen, model etrafındaki akış görüntüleme olayının fotoğrafları Şekil 4.46 ve 4.47'de görülmektedir. Akış gözlemleri düşük tünel hızlarında yapılmış olup, bu hız değerleri Reynolds sayısının 7 x 10^3~8 x 10^3değerlerine karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, deneylerde kullandığımız Re sayılarından, bu değerler oldukça düşüktür. Fakat her iki durumda da silindir etrafındaki akışta, Re sayıları belirli bir aralıkta olduğu için, oluşan akım çizgilerinde çok büyük farklar gözlenmez. Yani, düşük Re sayılarında yapılan akış gözlemleri, diğer Re sayılarında yapılan deneyleri büyük ölçüde karakterize etmektedir. Sakamoto ve arkadaşları [46] yaptıkları çalışmada, deney esnasında Re sayısının 5,5 x 10^4 değerinde ardışık iki silindir etrafındaki akım karakteristiğini incelemişler, fakat akış gözlemini Re sayısının 350 değerinde yaparak, seçilen Re sayısının gözlem yapabilmek için yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Şekil 4.46'ya baktığımızda, 3 m/s'lik tünel hızında model arkasında gözlenen girdap oluşumları görülmektedir. Model önüne konulan rezistans telinin 3D uzaklığa yerleştirilmesi, model arkasındaki iz bölgesininde yaklaşık 3D kadar uzaklıkta başlamasına neden olmuştur. Şekil 4.47'yi incelediğimizde ise, Re sayısının 8 x 10^3 değerinde oluşan girdaplar, daha belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Öncelikle silindir etrafındaki akım laminer gözükürken, zamanla akım ayrılmaları net bir şekilde gözlenip, girdapların silindirin alt ve üst bölgesinde simetrik bir şekilde oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. Model Etrafındaki Akış Görüntüsünün Farklı Zamanlarda Çekilmiş Fotoğrafları ($Re=7 \times 10^3$)



Şekil 4.47. Model Etrafındaki Akış Görüntüsünün Farklı Zamanlarda Çekilmiş Fotoğrafları ($Re=8 \times 10^3$)

BÖLÜM V

İRDELEME VE SONUÇLAR

5.1 İrdeleme

Bu bölümde, 4.bölümde elde edilen bulgular irdelenmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır. Kullanılan rüzgar tünelinin, 400 x 400 mm kesite sahip test bölgesinde,test bölgesi boşken yapılan çalışmalar, şekil 4.18, 19, 20, 21ve 22'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, Re sayısının 14500 ve 57500 değerleri arasında düşey düzlemde, tünel yüksekliği boyunca hız dağılımları üniform çıkmıştır. Cidarlara yaklaşırken hızda oluşan ani bir azalma, bu bölgede sınır tabakanın varlığını göstermiştir. Türbülans şiddeti ise düzgün bir dağılım göstermemiş olup, oluşan yüksek türbülans nedenin yayıcıdan kaynaklanacabileceği kanısına varılmıştır. Yatay düzlemde, elde edilen bulgularda aynı özellikler göstermiştir. Sonuçta; kullandığımız rüzgar tünelinin, yüksek türbülanslı akımda yapılacak deneysel çalışmalar için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Dairesel kesitli silindirik model arkasında değişik x istasyonlarında, kesit içerisinde z yönünde 37 noktada ve farklı tünel hızlarında alınan ortalama hız değerlerine göre elde edilen anlık hız dağılımları, Şekil 4.23, 24 ve 25'de verilmiştir.Şekil 4.23'deki grafik incelendiğinde, x/D=2 ve z/D=1.6 konumunda üç farklı hızda alınan değerler, hızın artmasıyla sinyallerin titreşim frekansı ve genliklerinin arttığını göstermiştir. Şekil 4.25'e bakıldığında ise, x/D=4 ve üç farklı z/D konumlarında incelenen anlık hız dağılımlarında, z/D=0.8'den 2.4 değerine değişirken, z/D=2.4 değerinde hız zaman değişimi sinyallerinin genliği önemli derecede azalmıştır. Bunun sebebi ise, z/D=2.4 değerinde iz bölgesi dışına çıkılmış olmasındandır. Bilindiği gibi, iz bölgesi dışında türbülans şiddeti önemli derecede azalmaktadır. Bu bulgular sonucunda, hız zaman değişimi sinyallerinden, iz bölgesi sınırının hareketinin periyodik olmadığı ve bu hareket aralığının zamanla sürekli değiştiği söylenebilir.

Bilindiği gibi modelin iz bölgesinde meydana gelen vorteks kopması olayı, bu bölgede ölçülen hız veya basınç sinyallerine ait spektral grafiklerde oluşan tepelerden belirlenmektedir. Model arkasında x/D=2 ve 4 istasyonunda, z/D=0.8 ve 1.6 konumunda, elde edilen spektral yoğunluk grafiklerinde (Şekil 4.26~4.29) oluşan tepelerden, bu konumlarda girdap kopması olayının meydana geldiği anlaşılmaktadır. x/D=2, z/D=0.8 konumunda elde edilen spektral grafiklerdeki tepelerin şiddeti, Re sayısı 14500'den 45500'e artarken %136 oranında artmıştır. Akım yönünde ilerledikçe(x/D=4), yine aynı konumda elde edilen spektral grafiklerdeki tepelerin şiddeti ise, aynı Re sayısı artışında %93 oranında artmıştır. Model arkasında, farklı istasyonlarda incelenen spektral yoğunluk grafiklerinde, girdap kopması olayının ancak $0.5 \leq z/D \leq 1.6$ aralığında gerçekleştiği gözlenmiştir. $z/D \geq 1.6$ konumundan sonra artık girdap kopması ve dolayısıyla tepeler oluşmamaktadır (Şekil 4.30). Çünkü bu konumda serbest akım bölgesine ulaşılmaktadır.

Girdap kopma frekansı, silindir çapı ve serbest akım hızına bağlıdır.($St=fsD/U$) St sayısının hesaplanmasında kullanılan girdap kopma frekansı, sinyallerin spektral yoğunluk fonksiyonlarından belirlenmektedir. Bu çalışmada, 4.31 (a)'da görüldüğü gibi, silindir arkasında x/D=2 ve 4 istasyonlarında ve z/D=1.6 konumunda yapılan ölçümlerden hesaplanan St sayısı 0.16 civarındadır. Akım yönünde ilerledikçe bu değer sabit kalmıştır (Şekil 4.31(b)). Elde edilen St sayısının Re sayısı ile değişimi, Bearman[43], Norberg [9], Tsutsui ve Igarashi'nin [20] yaptığı çalışmalarla uyum içerisindedir. Şekil 4.32'de görüldüğü üzere sonuçların az da olsa birbirlerinden farklı olması blokaj oranlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Tsutsui ve Igarashi'nin[20] yaptığı çalışmada blokaj oranı %10, Bearman'ın çalışmasında %6.5, Norberg'in çalışmasında ise %6.2 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada ise, blokaj oranı %6 civarındadır. Şekil 4.32 incelendiğinde, en düşük St sayısı değerleri, en küçük blokaj oranına sahip bu çalışmada elde edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, Kim'in[44] çalışmasında ifade edildiği gibi, yüksek blokaj oranının serbest akım bölgesi hızını artırdığı, buna karşılık cisim arkasındaki iz bölgesi genişliğini küçülttüğü ve neticede blokaj oranı arttıkça St sayısının arttığı sonucuyla, yaptığımız çalışma uyum içerisindedir. Tsutsui ve Igarashi'nin [20] yaptığı çalışmada ise, St sayısı, ayrılma noktasına bağlı, kayma tabakaları arasındaki genişliğe göre de değiştiği gözlenmiştir. Yani yüksek Re sayılarında, kayma tabakaları arasındaki mesafe azalır, tabakalar

arasındaki hız düşer ve buna bağlı olarak St sayısı artar. Tsutsui ve Igarashi'nin bu görüşü doğrultusunda yaptığımız çalışmada, Re sayısı $2x10^4$'den $3x10^4$'e artarken, St sayısı da artmıştır. Diğer taraftan şekil 4.33'de incelenen grafikte, St sayıları sınır tabaka kalınlığına bağlı olarak, Karem ve Cheng'in [22] çalışması ve Choi ve Lee'nin [21] çalışmasıyla karşılaştırılmış ve bu çalışmayla uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Silindirik model arkasında ölçülen ortalama hız dağılımlarının verildiği şekil 4.34'de görüldüğü üzere, z/H=0 civarında hızların değerleri önemli derecede azalmaktadır. Re sayısı artarken ortalama hız değeri de artmaktadır. Ayrıca bu grafiklerden iz bölgesinin yapısı açıkça görülebilmektedir. İz genişliği akım yönünde ilerledikçe ve Re sayısı arttıkça artmaktadır. Yani modelin hemen arkasında alınan ölçümlerde iz genişliği en yüksek değerini alırken, modelden uzaklaşıldıkça iz genişliğinde önemli bir azalma olmaktadır. Nigim ve Batill'in [45] yaptığı çalışmada, dairesel silindir yüzeyine farklı uzaklıklarda yerleştirilen akım engelleyicilerle oluşturulan, türbülanslı sınır tabakadaki iz genişliğinin de artan Re sayısıyla değiştiği gözlenmiştir.

Şekil 4.35'de verilen, dairesel kesitli silindirin iz bölgesindeki türbülans şiddeti dağılımları incelendiğinde x/D büyüdükçe, yani iz bölgesinde silindirden uzaklaştıkça, silindirin etkisinin azalması sonucu türbülans şiddeti de azalmaktadır. Artan Re sayısıyla türbülans şiddeti azalmaktadır. Türbülans şiddetinin en yüksek olduğu bölge, z/H=0 civarındaki bölgedir. Re sayısının 14500 değerinde türbülans şiddeti ortalama %30 civarında iken, 45500 değerinde ise %20 civarlarına inmiştir. Düşük Re sayılarında türbülansın yüksek çıkmasının sebebi, yayıcıda oluşan kararsızlıktan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.36 ve 4.37'de incelenen grafiklerde ise, boyutsuz hız dağılımları ve türbülans şiddeti dağılımları verilmiş olup, yukarıda bahsedilen durumlar daha açık bir şekilde görülmektedir. Model arkasında akım yönünde ilerledikçe, türbülans şiddeti dağılımında, z/H=0 civarında W şeklinde iki tepelilik söz konusudur. Bu durum tam bu bölgede oluşan ters akışın bir ifadesidir.

Choi ve Lee'nin [21] dairesel ve eliptik silindir önüne yerleştirilen pürüzlülük elemanıyla oluşturulan akım ortamında, incelenen türbülans şiddeti dağılımları yaptığımız bu çalışmayla uyum içerisindedir. Her iki çalışmada da, Re sayısının yaklaşık değerleri ve aynı konumlarda incelenen türbülans şiddetleri için, modele yakın bölgelerde ters akışın oluştuğunu gösteren iki tepelilik oluşmuştur (Şekil 4.38).

Şekil 4.39'da dairesel kesitli silindirik model yüzeyinde ölçülen basınç dağılımları verilmektedir. Dairesel kesitli silindir simetrik bir geometriye sahip olduğundan, grafikten de görüldüğü gibi, silindirin ön ve arka yüzeyinde basınç ölçüm değerleri yaklaşık sonuçlar vermiştir. Grafik incelendiğinde, ayrılma olayı yaklaşık olarak $\theta=70^{o}\sim90^{o}$ civarında meydana gelmektedir. Fiziksel olarak ayrılma, sınır tabakanın sona erdiğine ve nispeten düşük hızlara sahip ters akış bölgesinin başladığına işaret eder. Bilindiği gibi ayrılma noktasının yeri, cismin arkasındaki iz bölgesinin genişliğine, yüzey üzerindeki basınç dağılımı ve sınır tabaka akımının durumuna bağlıdır.

Ayrılmış tabakalar, küt cisim arkasındaki iz akışında, girdap kopmaları meydana getirirler ve bu sözkonusu akış büyük ölçüde Re sayısına bağlıdır. Şekil 4.40'da basınç katsayısının Re sayısıyla değişimi verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Norberg [9] ve Tsutsui ve Igarashi'nin[20] yaptığı çalışmalarla yaptığımız bu çalışma tam bir uyum içerisindedir. Re sayısının 23200~38200 değerleri arasında Cp katsayısındaki artış %20~30 arasında olmuştur.

Şekil 4.41'de ise, θ açısının Re sayısıyla değişimi gösterilmiştir. Tsutsui ve Igarashi'nin [20] yaptığı çalışmada yüzeyden ayrılma noktası tam olarak belirlenirken, Achenbach'ın [41] yaptığı çalışmada ve bu çalışmada yüzeyden ayrılma noktasından yaklaşık olarak bahsedilmiştir. Re sayısının farklı değerlerinde elde edilen ayrılma noktaları Tsutsui ve Igarashi'nin çalışmasında $87,5^{o}$'de, Achenbach'ın çalışmasında $70^{o}\sim80^{o}$'de, bu çalışmada ise $80^{o}\sim90^{o}$ civarında gerçekleşmiştir.

Şekil 4.42'de literatür çalışmalarındaki basınç katsayılarının θ ile değişimi verilmiştir. Yaptığımız bu çalışma, Tsutsui ve Igarashi'nin[20] çalışmasıyla, Singh ve Mittal'ın[19] Re sayısının 10000 değerinde yaptığı çalışmayla tam bir uyum içerisindedir. Grafik incelendiğinde, diğer çalışmalara göre tek farklılığın, Singh ve Mittal'in Re sayısının 100000 değerinde oluşan iki tepelilik olduğu gözlenmiştir. Bu durum ters akışın bir özelliği olarak ifade edilmiştir.

Silindirik model çevresindeki basınç dağılımının integrasyonundan, sürükleme ve kaldırma kuvvet katsayılarını bulmak mümkündür. Şekil 4.43 ve 44'de görüldüğü üzere, elde edilen eğriler altında kalan alan kuvvet katsayılarını ifade etmektedir. Burada basınç dağılımının simetrik oluşu ve silindirin alt ve üst bölgesindeki kaldırma

kuvvetleri de birbirini dengelediği için, kaldırma katsayısı C_L sıfır olarak elde edilir. Yani silindir üzerinde kaldırma kuvvetinin etkisinin olmadığı, sadece sürükleme kuvvetine maruz kaldığı ifade edilebilir. Sürükleme kuvvet katsayısı ise, bu çalışmada 1,03 olarak bulunmuştur. Genellikle laminer akımda C_D katsayısı 1.2 civarında elde edilirken, türbülansın artmasıyla bu katsayı değeri düşmektedir. Literatürle karşılaştırılması yapılan bu durum Şekil 4.45'de bahsedilmiş ve yapılan çalışmaların şartlarına göre C_D katsayısı değişiklik göstermiştir.

Şekil 4.46 ve 4.47'de sunulan akış gözlem fotoğraflarına bakıldığında; kayma tabakasının silindirin alt ve üst yüzeyinden ayrılması ve cisim arkasında ayrılan bu kayma tabakalrının iz bölgesi içerisine doğru yuvarlanarak girdap oluşturmaları görülmektedir. Sonuçta akışkan hızının artmasıyla, yani yüksek Re sayılarında, iz bölgesi içerisindeki girdapların, modelden itibaren başlama noktası değişmezken, daha geç sönümlendiği ve daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir.

5.2 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Reynolds sayısının 14500~45500 değerleri arasında, blokaj oranının %6 olduğu, dairesel kesitli silindirik küt cismin, açık devre üflemeli tip rüzgar tünelinde, test edilmesiyle deneysel olarak bulunmuştur. Model etrafındaki çevresel yüzey basıncı basınç ölçerle, akış alanındaki hız dağılımları ise, sıcak tel anemometresiyle ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, basınç katsayısı ve hız dağılımları incelenmiştir. Bunların yanı sıra, basınç katsayısından; sürükleme ve kaldırma kuvvet katsayıları hesaplanmış, hız-zaman grafikleri incelenerek, spektral yoğunluk ve Strouhal sayıları gibi akış karakteristikleri elde edilmiştir ve çıkarılan ana sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

İz bölgesinde ölçülen ortalama hız ve türbülans şiddeti dağılımları, z/H=0 civarında değişiklik göstermiş olup, akım yönünde ilerledikçe türbülans şiddeti artmıştır. Hız dağılımlarını inceleyerek elde edilen iz genişliği, yine akım yönünde ilerledikçe ve Re sayısı arttıkça artmıştır.

Re sayısının 23200~38200 değerleri arasında model yüzeyinde yapılan basınç ölçümleri neticesinde, basınç katsayısı ön kısımda azalarak θ'nın 70^o~90^o değeri civarında

minimum değerini almış bundan sonra bir miktar artarak, silindirin arka bölgesinde, üniforma yakın basınç dağılımı oluşmuştur. Re sayısının artmasıyla değişiklik göstermeyen ve basınç dağılımının bir fonksiyonu olan C_D katsayısı 1,03 olarak ve C_L katsayısı ise 0 olarak tespit edilmiştir. Bu durum farklı Re sayılarında ve farklı hızlardaki bir akımda, akım önüne yerleştirilen silindire herhangi bir kaldırma kuvvetinin etki etmediğini göstermektedir.

Modelin iz bölgesinde yapılan spektral ölçümlerde, farklı istasyonlarda radyal yönde $0.5 \leq z/D \leq 2.4$ aralığında girdap kopma olayı tespit edilmiş olup, $z/D \geq 2.4$ bölgesinde, serbest akım bölgesine ulaşıldığından, spektral tepeler meydana gelmemiştir.Artan Re sayısı ile girdap kopma frekansı da artmıştır. Bu ölçümler sonucunda hesaplanan St sayısı ise yaklaşık 0,16 olarak bulunmuştur Artan Re sayısı ve akım yönünde modelden uzaklaşıldıkça St sayısında pek fazla bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

Sonuçta; kullanılan rüzgar tünelinin oluşturduğu akış ortamında cisme etki eden akış karakteristikleri hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. Artan türbülans nedeniyle, St sayısı ve sürükleme katsayısı gibi akış karakteristikleri, literatürde yapılan çalışmalara uygun, ancak göreceli olarak daha düşük çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışmalara baktığımızda, kullanılan birçok rüzgar tünelinde küt cisimler etrafındaki akım karakteristiklerinin incelenmesi için, özellikle tünelde türbülans etkisinin artırılmaya çalışıldığı görülmektedir. Yaptığımız çalışma ile küt cisimler etrafındaki türbülanslı akış ile ilgili yapılan bu çalışmalara önemli ölçüde katkıda bulunulmuştur.

KAYNAKLAR

1- Sarıoğlu, M., Küt Cisimler Aerodinamiği ve Vorteks-Shedding Olayının Deneysel İncelenmesi,Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 1997.

2- Gerrard, J.H., The Mechanics Of The Formation Region Of Vortices Behind Bodies, J.Fluid mech., 25, pp. 401-413, 1966.

3- Laneville, A., Gartshore, I.S., Parkinson, G.V., An Explanation of Some Effects of Turbulence on Bluff Bodies, Proc. 4th Int. Conf. On Wind Effs on Bldgs and Strcts, Heathrow 1975

4- Özkılıç, S., Küt Cisimler Etrafındaki Dalga Hareketinin Vorteks Metodu İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1987.

5- Chang, K., Sa, J., The Effect of Buoyancy on Vortex Shedding in the Near Wake of a Circular Cylinder, J. Fluid Mech., 220, pp. 253-266, 1990.

6- Neish, A., Smith, F.T., On Turbulent Seperation in the Flow Past a Bluff Body, J. Fluid Mech., 241,pp. 443-467, 1992.

7- Popiel, C.O., Robinson, D.J., Turner, J. T., Vortex shedding from a circular cylinder With a slit and a concave rear surface, Appl. Sci. Res. 51, pp. 209-215, 1993.

8- Roussopoulos, K., Feedback Control of Vortex Shedding At Low Reynolds Numbers, J.Fluid Mech., 248, pp. 267-296, 1993.

9- Norberg, C., An Experimental İnvestigation of the Flow Around a Circular Cylinder: İnfluence of Aspect Ratio, J. Fluid Mech., 258, pp. 287-316, 1994.

10- Yamazaki, T., Inoue, O., Bisako, T., Numerical Simulation of Forced Wakes Around a Cylinder, Int. J. Heat and Fluid Flow, 16, pp. 327-332, 1995.

11- Choi, H., Active Controls of Flows Over Bluff Bodies For Drag Reduction, Seoul National University, 151-742, Korea, 1997.

12- Paranthoen, P., Characteristics of the Near Wake of a Cylinder at Low Reynolds Numbers, J. Mech. B/Fluids, 18, pp. 659-674, 1998.

13- Akins, R.e., Hottle, N.E., Reinhold, T.A., Laser Doppler Velocimeter Measurements of Flow Field Around a Bluff Body, J. Wind Eng. And Ind. Aer., 77&78, 457-465, 1998.

14- Olsen, J.F., Rajagopalan, S., Vortex Shedding Behind Modified Circular Cylinders, J. Wind Eng. And Ind. Aer., 86, 55-63, 2000.

15- Weickgenannt, A., Monkewitz, P.A., Control of Vortex Shedding in an Axisymmetric Bluff Body Wake, J. Mech. B/Fluids, 19, 789-812, 2000.

16- Ohya, Y., Drag of Circular Cylinders in the Atmospheric Turbulnce, Fluids Dyn. Research, 34, 135-144, 2003.

17- Sarıoğlu, M., Akansu, Y.E., Yavuz, T., Düzlem Plaka-Dairesel Silindir Sistemi Etrafındaki Akışın Deneysel İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2003.

18- Iqbal, M.O., Bluff Body Aerodynamics, Universty of Notre Dame, Notre Dame, 2004.

19- Singh, S.P., Mittal, S., Flow Past a Cylinder: Shear Layer İnstability and Drag Crisis, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 47, 75-98, 2005.

20- Tsutsui T., Igarashi T., Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-stream, J. Wind Eng. And Ind. Aer., 90, 527-541, 2002

21- Choi J.H., Lee S. J., Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer, J. Fluids and Strc., 14, 697-709, 2000

22- Kareem A.,Cheng C.M., Pressure and Force Fluctuations on Isolated Roughened Circular Cylinders of Finite Height in Boundary Layer Flows, J. Fluids and Strc.,13, 97-933, 1998

23- Souza F., Delville J., Lewalle J., Bonnet J.P., Large Scale Coherent Structures in a Turbulent Boundary Layer İnteracting with a Cylinder Wake, Experimental Tkermal and Fluid Science, 19, 204-213, 1999

24- Örs, H., Akışkanlar Mekaniği, Boğaziçi Üniversitesi Matbaası, 1994.

25- www.astron.berkeley.edu/~jrg/node21.html-12k

26- Swanson, W.M., Fluid Mechanics, Washington University, United States of America, 1970.

27- Buresti, G., Lanciotti, A., Mean and Fluctuating Forces on a Circular cylinder in Cross-flow Near a Plane Surface, J. Wind Eng. And Ind. Aer., 41-44, 639-650, 1992.

28- Akansu, Y.E., Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2004.

29- Igarashi, T., Flow Properties Around a Cylinder With a Slit. Part1, Flow Control and Flow Pattern, Trans. J.S.M.E., 43, 2974-2984, 1997.

30- Castro,I.P., Measurements in Shear Layers Seperating From Surface-Mounted Bluff Bodies, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., 7, 253-272, 1981.

31- White, F.M., Fluid Mechanics, Rhode Island University,

32- Igarashi, T., Terachi, N., Drag Reduction of Flat Plate Normal to Airstream by Flow Control Using a Rod, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 90, 359-376, 2002.

33- Prasad, A., Williamson, C.H.K., A Method for the reduction of bluff body drag, J. Wind Eng. Ind. Aerdyn., 69-71, 155-167, 1997.

34- Schlichting, H., Boundary Layer Theory, Seventh Edition, Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1979.

35- www.mmo.org.tr/mühendismakina/arsiv/2000/ekim/aero.htm

36- Meroney, R.N., Wind Tunnel Modeling of the Flow About Bluff Bodies, J. Wind Eng. Ind. Aerdyn., 29, 203-223, 1988.

37- Orbay, N.Z., Sıcak Tel Anemometresi ile Deney Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1976.

38- Gümüş, S., Sıcak Tel Probunun Kalibrasyonu, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 2002.

39- Bruun, H.H., Hot-wire Anemometry, Oxford University Press Inc., New York, 1996

40- Lomas, C.G., Fundementals of Hot Wire Anemometry, First Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1986

41- Acenbach, E., Distribution of Local Pressure and Skin Friction Around a Circular Cylinder in Cross-Flow up to Re= 5 x 10^6, J. Fluid Mech, 34, 625-639, 1968

42- Goldstein, S., Modern Developments in Fluid Dynamics, Oxford University Press, London 1938

43- Bearman, R.W., On Vortex Shedding From a Circular Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime, J. Fluid Mech., 37, 577-585, 1969

44- Kim, H.J., An Experimental Investigation on the Flow Around a Circular Cylinder in the First Critical Subregion, The Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota,1986

45- Nigim H.H., Batill S.M., Flow About Cylinders With Surface, J. Fluids and Structures, 11, 893-907, 1997

46- Sakamoto, H., moriya, M., Alam, M., Takai, K., Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on The Switching Phenomenon, J. Fluids and Structures, 18, 325-346, 2003

ÖZGEÇMİŞ

Esra AKÇADIRCI 17/01/1979 tarihinde Kayseri'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de tamamladı. 1996 yılında Nuh Mehmet Küçükçalık Anadolu Lisesini bitirdi. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 2000 yılında bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2002-2003 yılında Yüksek Lisans sınavında başarılı olarak yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen öğrenimine devam etmektedir.