

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEK SERBESTLİK DERECELİ DAİRESEL SİLİNDİRİN GİRDAP
KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ ÜZERİNDE SERBEST SU YÜZEYİNİN
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alkın Erdal DEMİRHAN

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

MAYIS 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEK SERBESTLİK DERECELİ DAİRESEL SİLİNDİRİN GİRDAP
KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ ÜZERİNDE SERBEST SU YÜZEYİNİN
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alkın Erdal DEMİRHAN
(508171102)**

**Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI

MAYIS 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508171102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alkın Erdal DEMİRHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TEK SERBESTLİK DERECELİ DAİRESEL SİLİNDİRİN GİRDAP KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ ÜZERİNDE SERBEST SU YÜZEYİNİN ETKİLERİ ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Oral YAĞCI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **21 Nisan 2022**
Savunma Tarihi : **23 Mayıs 2022**





Aileme, hocama, kız arkadaşşıma ve sevdiğim herkese,



ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada, tek serbestlik dereceli dairesel silindirin girdap kaynaklı titreşimleri üzerinde serbest su yüzeyinin etkileri araştırılmıştır. Bir girdap kaynaklı titreşim sisteminden enerji üretmek amaçlandığında veya sistem bir pompa olarak kullanılmak istendiğinde, sistemden maksimum düzeyde hareket etmesi ve sistemin optimum frekansta çalışması beklenmektedir. Eğer bir girdap kaynaklı titreşim sistemi; serbest su yüzeyine yaklaştırılırsa, serbest su yüzeyinin sistem üzerinde bazı etkileri olacaktır. Bu tezin amacı; serbest su yüzeyinin, girdap kaynaklı titreşim sistemi üzerindeki etkilerinin nasıl olacağının araştırılmasıdır. Böylelikle; VIV sisteminin hareketinden maksimum verim alınarak; ülke çapında yeni bir yenilenebilir enerji üretim sistemi teşvik edilmek istenmiştir.

Tez çalışmamın konusunun belirlenmesinde, planlanmasında, literatür taramasında, ilerlemesinde ve en sonunda da tamamlanmasında üstün bilgi, birikim, tecrübe ve yardımlarını asla esirgemeyen Doçent Doktor Ömer Kemal KINACI'ya, ayrıca bu tez çalışmasının bel kemiğini oluşturan deneylerin yapılmasında yardım ve tecrübelerini hiç tereddüt etmeden bana aktaran kıymetli meslektaşım Araştırma Görevlisi Aytekin DURANAY'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Nisan 2022

Alkın Erdal DEMİRHAN
(Araştırma Görevlisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	9
2.1 Güneş Enerjisi	9
2.2 Rüzgar Enerjisi	9
2.3 Hidrolik (Hidroelektrik) Enerjisi	10
2.4 Jeotermal Enerji	10
2.5 Biyo-kütle Enerjisi	11
2.6 Akıntı Enerjisi	11
2.7 Gel-git Enerjisi	12
2.8 Dalga Enerjisi	13
2.9 Girdap Kaynaklı Titreşimler (VIV)	14
3. GİRDAP KAYNAKLI TİTREŞİMLER (VIV)	15
3.1 Girdap Kaynaklı Titreşimlerin Oluşması	18
3.2 VIV’de Kullanılan Bazı Boyutsuz Sayılar Ve Parametreler	20
3.2.1 Reynolds sayısı	21
3.2.2 Strouhal sayısı	24
3.2.3 Froude sayısı	25
3.2.4 Genlik oranı ($A^* - A/D$)	26
3.2.5 Hız oranı (U^*)	26
3.2.6 Frekans oranı (f^*)	26
3.2.7 Kütle oranı (m^*)	27
3.3 VIV’nin Kullanım Amaçları	27
3.4 VIV’nin Hareket Bölgelerinin Adlandırılması	29
4. DENEYLER	31
4.1 Deney Sisteminin Kurulması ve Sistemin Bileşenleri	32
4.1.1 Sistemde kullanılan yaylar	34
4.1.2 Deneylerde kullanılan silindirin özellikleri	35
4.1.3 Sistemin kütle oranının (m^*) ayarlanması için harici kütle	35
4.1.4 Sistemin silindirin derinliğinin ayarlanması için ara parça	36
4.1.5 Sistemin sensörü	37
4.2 Test Matrisi	38

4.3 Sistemin Doğal Frekansı.....	40
4.4 Serbest Sönümlleme Testleri	41
4.5 Deneylerde Kullanılan Bazı Oranlar ve Değerler	41
5. SONUÇLAR	43
5.1 Batma Derinliğinin Etkisi.....	43
5.2 Serbest Su Yüzeyi Yakınında Kütle Oranının Etkisi	48
6. YORUMLAR.....	53
KAYNAKÇA	55
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	89



KISALTMALAR

A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
BP	: British Petroleum
CAD	: Bilgisayar Destekli Grafik (Computer-Aided Design)
FIM	: Akış Kaynaklı Hareketler (Flow-Induced Motions)
GHG	: Sera Gazları (GreenHouse Gases)
HP	: Beygir Gücü (Horse Power)
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (International Atomic Energy Agency)
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
ppm	: Milyonda bir birim (parts per million)
rpm	: Bir dakikadaki devir (Revolution per minute)
S.S.C.B.	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
VIV	: Girdap Kaynaklı Titreşimler (Vortex-Induced Vibrations)
VIVACE	: Girdap Kaynaklı Titreşimlerden Sucul Yeşil Enerji (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy)



SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
$(\text{H}_2\text{O})_g$	: Su buharı
CO_2	: Karbondioksit
O_3	: Ozon
N_2O	: Azotdioksit
CH_4	: Metan
CFC	: Kloroflorokarbon (Chlorofluorocarbon)
C_3H_8	: Propan
C_4H_{10}	: Bütan
kW	: kiloWatt
kWh	: kiloWatt saat
MW	: MegaWatt
GW	: GigaWatt
E	: Enerji
m	: Kütle
c	: Işık hızı
km/h	: Kilometre / saat
m/s	: metre / saniye
Re	: Reynolds Sayısı
St	: Strouhal Sayısı
Fr	: Froude Sayısı
A^*	: Genlik parametresi
U^*	: Hız parametresi
f^*	: Frekans parametresi
m^*	: Kütle parametresi
m_{osc}	: Hareketli parçaların hepsinin toplam ağırlığı
g	: Yerçekimi ivmesi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin detayları.	39
Çizelge 4.2 : Deneylerin birbirleri arasındaki yükseklik farkları.	39
Çizelge 4.3 : Deneylerde kullanılan bazı oranlar ve değerler.....	41
Çizelge 5.1 : Deneylerin serbest sönüm oranları, hem amprik hem de deneysel olarak elde edilen doğal frekansları ve deneylerin hata oranları.....	43
Çizelge A.1 : Deney 1.A'nın deney verileri.	62
Çizelge A.2 : Deney 2.A'nın deney verileri.	63
Çizelge A.3 : Deney 3.A'nın deney verileri.	65
Çizelge A.4 : Deney 4.A'nın deney verileri.	66
Çizelge A.5 : Deney 5.A'nın deney verileri.	68
Çizelge A.6 : Deney 6.A'nın deney verileri.	69
Çizelge B.1 : Deney 1.B'nin deney verileri.....	71
Çizelge B.2 : Deney 2.B'nin deney verileri.....	72
Çizelge B.3 : Deney 3.B'nin deney verileri.....	74
Çizelge B.4 : Deney 4.B'nin deney verileri.....	75
Çizelge B.5 : Deney 5.B'nin deney verileri.....	77
Çizelge B.6 : Deney 6.B'nin deney verileri.....	78
Çizelge C.1 : Deney 1.C'nin deney verileri.	80
Çizelge C.2 : Deney 2.C'nin deney verileri.	81
Çizelge C.3 : Deney 3.C'nin deney verileri.	83
Çizelge C.4 : Deney 4.C'nin deney verileri.	84
Çizelge C.5 : Deney 5.C'nin deney verileri.	86
Çizelge C.6 : Deney 6.C'nin deney verileri.	87



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tüm dünyada yıllara göre enerji tüketim miktarları.	3
Şekil 1.2 : Küresel birincil enerji kaynakların yıllara göre yüzde olarak kullanım payları.	3
Şekil 1.3 : Ham petrolün damıtılma işlemi ve elde edilen ürünler.	4
Şekil 1.4 : 0 ila 7 tehlike seviyesi, nükleer kaza olaylarının Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği piramidinin bir tasviri.	6
Şekil 3.1 : Bir akışkanın küt bir cisim etrafında akışı ve cismin iz bölgesinde oluşturduğu girdapların Leonardo Da Vinci tarafından çizimi, tahmini çizim tarihi: 1510-1513.	15
Şekil 3.2 : Tacoma Köprüsü rüzgar etkisiyle sallanırken.	16
Şekil 3.3 : Tacoma Köprüsü rüzgar etkisiyle yıkılırken.	17
Şekil 3.4 : Rüzgar köprüyü düşey yönde hareket ettirirken (burulma titreşimi).	18
Şekil 3.5 : Karman girdap caddesi ya da von Karman girdap caddesi.	19
Şekil 3.6 : Hareketli bir silindirin üzerine gönderilen akım, cismin iz bölgesinde kopan girdaplar ve kopan girdaplar nedeniyle oluşan kuvvet ile hareket eden cismin hareket doğrultusu.	20
Şekil 3.7 : Sabit akımda düzgün, dairesel bir silindir etrafındaki akış rejimleri.	23
Şekil 3.8 : Bir silindir üzerine gönderilen akışın sınır tabakası, akım ayrılması ve iz bölgesinde oluşmaya başlayan girdapların silindirin üst kısmına yaklaştırılmış halinin şematik gösterimi.	24
Şekil 3.9 : Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyli silindirin, Reynolds sayısı ile Strouhal sayısı ilişkisi.	25
Şekil 3.10 : VIVACE enerji dönüştürücü sistemi laboratuvar modeli (soldaki görsel) (Raghavan, 2007). Michigan Üniversitesi'nin Düşük Türbülanslı Serbest Yüzeyli Su Kanalındaki VIVACE modeli (sağdaki görsel).	28
Şekil 3.11 : Bir VIV testinin boyutsuz genlik (A^*) ve boyutsuz hız (U^*) grafiğindeki hareket bölgeleri.	30
Şekil 4.1 : İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler (FIM) Laboratuvarı.	31
Şekil 4.2 : İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler Laboratuvarı CAD görünümü.	32
Şekil 4.3 : VIV sistemi bileşenleri.	33
Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan baskı yaylarından biri.	34
Şekil 4.5 : Deneylerde kullanılan silindirin demonte halde özellikleri ölçülürken bir baskül üzerindeki görüntüsü.	35
Şekil 4.6 : Destek çubuğuna harici ekstra eklenmiş ağırlıklar.	36
Şekil 4.7 : Silindirin serbest su yüzeyine daha çok yaklaşması için kullanılan ara parçalar ve bu parçaların vidaları (de-monte halde).	37

Şekil 5.1 : Kütle oranı $m^* = 1.65$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.	44
Şekil 5.2 : Kütle oranı $m^* = 1.79$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.	45
Şekil 5.3 : Kütle oranı $m^* = 1.93$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.	45
Şekil 5.4 : Kütle oranı $m^* = 1.65$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.	46
Şekil 5.5 : Kütle oranı $m^* = 1.79$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.	47
Şekil 5.6 : Kütle oranı $m^* = 1.93$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.	47
Şekil 5.7 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 2$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	49
Şekil 5.8 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 5$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	49
Şekil 5.9 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 8$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	50
Şekil 5.10 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 16$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	51
Şekil 5.11 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 25$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	51
Şekil 5.12 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 33$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.	52
Şekil A.1 : Deney 1.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	62
Şekil A.2 : Deney 1.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.	63
Şekil A.3 : Deney 2.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	64
Şekil A.4 : Deney 2.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.	64
Şekil A.5 : Deney 3.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	65
Şekil A.6 : Deney 3.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.	66
Şekil A.7 : Deney 4.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	67
Şekil A.8 : Deney 4.A'nın $f^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	67
Şekil A.9 : Deney 5.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	68
Şekil A.10 : Deney 5.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.	69
Şekil A.11 : Deney 6.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	70
Şekil A.12 : Deney 6.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.	70
Şekil B.1 : Deney 1.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	71
Şekil B.2 : Deney 1.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	72
Şekil B.3 : Deney 2.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	73
Şekil B.4 : Deney 2.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	73

Şekil B.5 : Deney 3.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	74
Şekil B.6 : Deney 3.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	75
Şekil B.7 : Deney 4.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	76
Şekil B.8 : Deney 4.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	76
Şekil B.9 : Deney 5.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	77
Şekil B.10 : Deney 5.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	78
Şekil B.11 : Deney 6.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	79
Şekil B.12 : Deney 6.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.	79
Şekil C.1 : Deney 1.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	80
Şekil C.2 : Deney 1.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	81
Şekil C.3 : Deney 2.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	82
Şekil C.4 : Deney 2.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	82
Şekil C.5 : Deney 3.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	83
Şekil C.6 : Deney 3.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	84
Şekil C.7 : Deney 4.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	85
Şekil C.8 : Deney 4.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	85
Şekil C.9 : Deney 5.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	86
Şekil C.10 : Deney 5.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	87
Şekil C.11 : Deney 6.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.	88
Şekil C.12 : Deney 6.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.	88



TEK SERBESTLİK DERECELİ DAİRESEL SİLİNDİRİN GİRDAP KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ ÜZERİNDE SERBEST SU YÜZEYİNİN ETKİLERİ

ÖZET

Dünyada son yıllarda artan enerji ihtiyacı ile insanlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Önceki yüzyıllarda kullanılan geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı olması ve çevreye olan zararlı etkileri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak akla ilk olarak güneş ve rüzgar gelse de, son dönemlerde suyun gücünden de yararlanma hedefi artmıştır.

Deniz ve okyanuslardaki enerji potansiyeli çok daha yüksek olsa da; nehirler, boğazlar veya kanallarda kısacası akan sulardan da hidrokinetik enerji üretmek mümkündür. Akış kaynaklı hareketler hidrokinetik enerji üretimi yöntemleri arasında son yıllarda önem kazanan bir disiplin olmuştur. Bu kıpırdanmayı başlatan en önemli buluşlardan biri akışkan kaynaklı hareketlerden enerji elde etmeye yarayan VIVACE (Girdap Kaynaklı Titreşimlerden Sucul Yeşil Enerji – İng. Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy) olarak adlandırılan bir mekanizmadır.

Akış kaynaklı hareketlerin (İng. Flow Induced Motions, kısaca FIM) öne çıkan alt dallarından biri de girdap kaynaklı titreşimlerdir. Girdap kaynaklı titreşimler, akış içerisindeki küt bir cismin iz bölgesinde oluşturduğu girdaplardan meydana gelmektedir. Bir akışkan küt bir cisme ulaştığında, cismin etrafında akım ayrılmasına uğramaktadır. Gerçekleşen bu akım ayrılması neticesinde; sürekli, periyodik ve çift yönlü olarak kopan bu girdaplar cisim üzerinde kuvvet oluştur ve cismi hareket ettirir. Söz konusu cismin doğal frekansı, kopan bu girdapların frekanslarına yakın veya eşitse kenetlenme (lock-in) gerçekleşir ve cisim azami düzeyde hareket etmeye başlar. Geçmişte bu durum Tacoma Asma Köprüsü'nde yaşanmış olup, gerçekleşen kontrolsüz hareket neticesinde köprü sulara gömülmüştür.

Bu çalışmada, literatürde de yaygın olduğu üzere, tek serbestlik dereceli (sadece akışa dik olarak düşey yönde hareket edebilen) dairesel bir silindir ele alınmıştır. Silindir, serbest su yüzeyine paralel veya dik olarak yerleştirilebilir. Enerji elde etme bazlı çalışmalarda ise silindir yüzeye paralel olarak yerleştirilmektedir. Ancak serbest su yüzeyinin silindir hareketini engelleyici bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında serbest su yüzeyinin girdap kaynaklı titreşimler üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde Ata Nutku Gemi Model ve Deney Havuzunda bulunan Akış Kaynaklı Hareketler Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler diğer tüm parametreler sabit tutulmak üzere 6 farklı derinlik ve 3 farklı kütle oranı için yapılmıştır. Söz konusu deneylerdeki Reynolds sayısı 16,000 ile 71,000 arasında değişmektedir. Akışkanlar için çok önemli bir parametre olan Reynolds Sayısı; atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranlanmasıyla elde edilmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda serbest su yüzeyinin girdap kopma frekansını değiştirdiği bulunmuştur. Silindir serbest su yüzeyine yaklaştıkça, senkronizasyon bölgesi

daralmakta ve hareket genlikleri azalmaktadır. Senkronizasyon bölgesi, sistemin hareketlerinin gözlemlendiği aralığa denmektedir. Gerçekleşen en büyük genlik, serbest yüzeyinden en uzak ve en derin olan silindirde gözlemlenmiştir. Ayrıca üst bölge (upper branch) ve alt bölge (lower branch) serbest su yüzeyi etkilerinden çok fazla etkilenirken, başlangıç bölgesinin (initial branch) çok fazla etkilenmediği gözlemlenmiştir. Elde edilen frekanslar incelendiğindeyse, serbest su yüzeyine en yakın olan silindir frekansının en yüksek olduğu görülmüştür. Ancak bu durumda senkronizasyon aralığı daralmaktadır. Tüm deneylerde frekanslar, hıza göre neredeyse doğrusal olarak artmıştır.

Yüksek salınım frekansı elde edilen enerjiyi artırır. Ancak diğer yandan silindirin salınım frekansı arttıkça doğal frekanstan uzaklaşmakta; dolayısıyla hareket genliği düşmektedir. Hareketin genliği ve frekansı üretilen enerji açısından iki önemli parametredir. Cismin serbest su yüzeyine yakın olması frekansı artırmasına karşın genliği düşürdüğünden, elde edilen enerjinin azaldığı fark edilmiştir.

Serbest su yüzeyi cismin hareketi için bir bariyer oluşturmaktadır. Bu sınır sebebiyle cisim üzerinden kopan girdap küçülmekte, boyutu küçülen girdap da cisim üzerindeki kuvveti azaltmaktadır. Azalan kuvvet cismin hareket genliğini düşürmektedir. Serbest su yüzeyine yakınlık, frekansı artırsa dahi, toplam üretilen enerji açısından bakıldığında olumsuz olarak değerlendirilmektedir.

FREE SURFACE EFFECTS ON VORTEX-INDUCED VIBRATIONS OF A SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM CIRCULAR CYLINDER

SUMMARY

In last decades, energy consumption has increased enormously around the world. Most of the underground energy resources have been drilled. First, the traditional energy sources were begun to be consumed such as oil, natural gas and coal. Then, the tendency on renewable energy sources has increased especially in the last years because of the environmental damage and the limited reserves of these traditional energy sources. Though the increase in renewable energy investments started with solar and wind energy in near past, the popularity of energy acquisition from water flow has risen considerably in more recent years.

Around 70% of the world is covered with water that has an enormous energy potential. Although the energy potential in oceans is much higher; it is more feasible to convert renewable energy from hydrokinetic energy of flowing waters such as in rivers, straits or canals by adopting vortex-induced vibration (VIV) phenomenon.

VIV is one of the prominent sub-branches of flow-induced motions (FIM). Vortex-induced vibrations occur due to vortices which are created by the flow around a bluff body (in the wake region of bluff body). When the flow encounters a bluff body, it is separated into two shear layers, passing through the top and bottom of the body. One of these shear layers forms a vortex at the aft of the body while the other one attacks and cuts this vortex. As a result of this current separation; these vortices shed continuously, periodically and bidirectionally, which create forces and move the bluff body upward and downward direction according to the route of the eddies. In order to explain easily VIV sections, some zones are named which are initial branch, upper branch and lower branch. All those zones are included by the synchronization zone. Starting of the motion is in initial branch zone, then frequency of the vortex shedding increases, so amplitude of the system also rises and this zone is called upper branch. The maximum movement is observed in here. Later, frequency of the vortex shedding keeps increasing, but the amplitude of the system drops, that zone is called lower branch zone. After passing through lower branch, desynchronization zone begins. The movement is unstable here, and it disappears eventually. In upper branch, there is one point which is the natural frequency and the frequency of the eddies equal each other. If the natural frequency of the object or the structure to which it is attached is equal to the frequencies of vortex shedding, the structure gets resonance. The resonance is named “Lock-in” in VIV. If there is a lock-in case, maximum motion is achieved. In the past, this case happened on the Tacoma Narrows Bridge. The wind flowed over the bridge and its deck that is bluff body, the wind started to shake the bridge. The frequency of the wind became equal with the vortices which shed from the bridge deck, the bridge got resonance. Finally the bridge collapsed just after 4 months from its opening ceremony.

VIV can be observed on different engineering structures such as heat exchangers, lamppost, transmission lines, marine Technologies, offshore structures etc. There are

two types of engineering approach on VIV: First, preventing oscillations on structures to prevent failures. Second, galloping VIV to harvest clean hydrokinetic energy of water currents. VIVACE (The Vortex Induced Vibration for Aquatic Clean Energy) can be given as an outstanding example for the second type of studies. In VIV studies, related to energy harvesting, the system is expected to oscillate with higher oscillation amplitudes. In the first type of VIV studies, examining the phenomenon around engineering structures such as submerged offshore platforms, bridges transmissions lines etc. The oscillations are rather aimed to be suppressed. In both type of studies, the examinations should take free surface effects into the calculations to gain more realistic and verifiable results since it plays an important role in the VIV performance of an elastically mounted bluff body in cross flow direction.

Some submerged or semi-submerged bluff bodies like offshore structures, wave-power generation devices, ships, underwater vehicles and submarines work near the free surface that could be affected by the free surface effects. When a bluff body is exposed to VIV around the free surface, the vortices in the wake may not have enough space in the water. Thus, some unexpected results may be examined in the VIV response. Moreover, these submerged bluff bodies or equipments may not work effectively, face some vibration problems, damaging parts of the system, the unwanted motions like heave, etc. can be seen. Therefore, free surface effects must be considered in the calculations.

The effect of free surface on vortex-induced vibration (VIV) of an elastically mounted rigid circular cylinder in cross-flow investigated experimentally in this thesis over a wide range of Reynolds numbers ($1.6 \times 10^4 < Re < 7.1 \times 10^4$) in order to reveal the role of this effect on three main branches of VIV response; initial branch, upper branch and lower branch. In the experimental study, the edges of the cylinder are extended to the walls of the water channel to avoid from possible tip effects. The tests are carried out at Flow Induced Motion Laboratory of Istanbul Technical University (ITU FIM Lab). The cylinder is submerged into 6 different depths for this purpose and 3 different mass ratios are employed in the tests to observe the correlation between mass ratios and free surface effect, while keeping all other parameters constant. There are some non-dimensional numbers which affect the VIV issue. For example, one dimensionless number is Reynolds number. Normally, Froude number can be ignored while the experiments are performed enough space between the cylinder and the free surface. However, in this thesis, Froude Number plays an important role about affecting to the VIV system and it must be consired.

Before carrying out the experiments, the system is set-up by adjusting each component to allow the observation of three main branches of VIV within the desired Reynolds numbers. First, the outer frame is mounted and moored on the sides of recirculation channel of ITU FIM Lab. The cylinder has 8 cm diameter and smooth surface which is screwed on the side struts. A balancing bar is connected between these struts. These components are treated as solid during the experiments. The moving components are attached into the rails by means of U groove guiding pulleys. The springs are connected to between the struts and main frames. A sensor system is put into the middle of the frame in order to gauge distance between the cylinder and itself which is called amplitude. The experiments are performed in 10 days in total at similar air and water temperatures. The flow velocity range for the experiments is 0 – 0.884 m/s. The tests started from still water and the velocity of the water is increased by 0.05m/s. For each speed, the amplitude and frequency data of the cylinder are measured by means of a sensor. During this process, the 60-second oscillation data of the cylinder

are collected. The first test is carried out at a distance of 6 cm from the free water surface to the center of the cylinder. The second experiment is done with a distance of 9 cm between the free water surface and the center of the cylinder. In the following experiments, the cylinder is relegated one by one with a diameter distance (8 cm) and a total of 18 experiments are conducted, 3 for 6 depths and 3 at different mass ratios.

The results of the experiments show that the vortex shedding frequency is changed by the free water surface effects. As the cylinder approaches to the free water surface, the synchronization zone narrows down and the amplitudes decrease obviously. When all the experiments are examined at the same velocity; the greatest amplitude is observed in the experiment whose cylinder is the deepest and furthest from its free surface. It is also observed that while the upper branch and lower branch are dramatically affected by the free water surface effects, the initial branch is slightly affected. For a selected flow velocity, the frequency value is higher if the cylinder is closer to free surface. However, the synchronization range of a cylinder closer to the free water surface is narrower that ends with a slighter upper branch. Therefore; the frequency value for a deeper cylinder case at a greater flow velocity exceeds the frequency of the experiment which is closer to the free surface. It is also figured out that the frequency of all experiments increases almost linearly.

Frequency and energy are directly proportional quantities in energy harvesting studies of VIV. If the oscillation frequency of the cylinder rises and exceeds VIV system's natural frequency in water, the response loses its harmony and desynchronize. Here, even though more energy is provided into the system from incoming water flow, the system responds with less amplitude. Eventually, the captured energy from the phenomenon is decreased. This proves that both frequency and amplitude are two important parameters for harvesting energy. As a result; it is determined that the closer the system is to the free water surface, the less energy is harvested.

The reason why the free water surface affects the motion or frequency of the body; because of presence to the free surface, when a stream line reaches the cylinder, it cannot shed into the bidirectional and periodic eddies as usual, compared to the cylinder which is far from the free water surface. The cylinder goes to upwards with the force created by the vortex shedding. However, there is no water volume above the cylinder to be shed vortex usually. Thus, the cylinder cannot go back to the downward in a healthy way. Nonetheless, it is thought that how the free surface affects the system, in order to be proven of the case, the streamlines must be observed.



1. GİRİŞ

Son birkaç yüzyıldır, özellikle sanayi devriminden sonra, insanların enerjiye olan ihtiyaçları büyük ölçüde artmıştır. İnsanlar, enerji ihtiyaçlarını ilk olarak petrol, doğalgaz, kömür ve daha sonra da nükleer enerji gibi enerji kaynaklarından karşılamaya başlamışlardır. Ancak bu kaynaklar sınırlıdır; ayrıca nükleer enerji hariç olmak üzere; geleneksel enerji kaynakları, başta atmosfer olmak üzere çevre için de çok zararlı ve tehlikelidir. Nükleer enerjinin çevreye olan etkileri daha sonra anlatılacaktır.

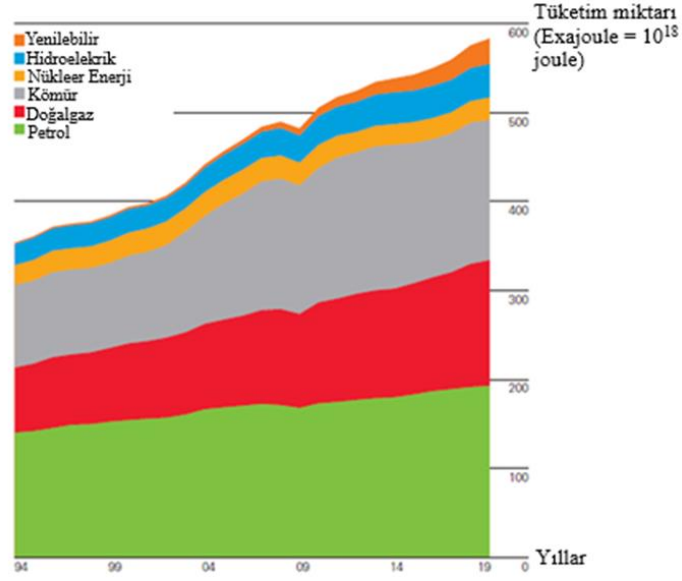
Geleneksel enerji kaynaklarından çıkan zararlı atıkların bazıları, sera gazları (GHG) olarak atmosfere salınmaktadır. Normalde sera gazları, atmosferde hali hazırda belli bir oranda bulunmaktadır. Bu gazlar; su buharı (H_2O)_g, karbondioksit (CO_2), ozon (O_3), azot dioksit (N_2O), metan (CH_4) gibi doğanın kendi kendine ürettiği bileşenler ile kloroflorokarbonlar (CFC'ler) gibi bazı yapay kimyasallardan oluşmaktadır. Sera gazları, dünyanın yeryüzü sıcaklığı için oldukça önemlidir. Örneğin, sera gazları atmosferde halihazırda bulunmasaydı, dünyanın sıcaklığı ortalama 15 °C yerine -18 °C olacaktı (Morgan, 2004). Ancak, bu gazların atmosferdeki miktarının artışı, hava sıcaklığı konusunda çok tehlikelidir; çünkü normalde güneş ışınlarının bazıları dünya yüzeyi tarafından emilirken, bazıları dünya yüzeyinden yansıyıp uzaya geri dönmektedir. Lakin; sera gazlarının atmosferdeki miktarı arttığında, dünya yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarından bazıları atmosferdeki sera gazlarına çarparak dünya yüzeyine tekrar geri dönmekte ve uzaya çıkamamaktadır. Uzaya dönemeyen bu güneş ışınlarının sahip olduğu enerji, ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu döngü sürekli tekrar ettiği için dünyanın sıcaklığı artmaya başlamıştır. Örneğin, sanayi devriminin başlangıcından (yaklaşık olarak 1750'lerden itibaren) günümüze, insan faaliyetleri nedeniyle atmosferdeki karbondioksit yoğunluğu yaklaşık %45 (280 ppm'den 415 ppm'ye) yükselmiştir. Atmosferik karbondioksit konsantrasyonun 30 ppm'lik artışı neredeyse 200 yılda (1958'e kadar) olmuştur, diğer 105 ppm'lik artış ise sadece 56 yılda gerçekleşmiştir (Kibert, 2016).

Sera gazlarıyla ilgili araştırmaların ve farkındalığın artmasının ardından, 1990'lı yılların başında hükümetler sera gazı salınımı ile ilgili bir dizi önlemler almaya karar vermişlerdir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi¹ (UNFCCC) ilk önemli uluslararası anlaşmadır. Bu ilk adımdan sonra her yıl sera gazı salınımı ile ilgili konferanslar yapılmıştır. Bu konferanslardan 1997'deki Kyoto Protokolü ve 2015'teki Paris Antlaşması en önemli olanlarıdır. Paris Antlaşması'nın temel amacı, hali hazırda tüm dünya genelinde ortalama 1.5 °C yükselmiş olan hava sıcaklığının, 2 °C sıcaklık değerine çıkmasına engel olmak ve en azından bu seviyede tutmaktır (Denchak, 2021). Çünkü 1.5 °C ile 2 °C arasında bile büyük fark olduğu çok iyi bilinmektedir.

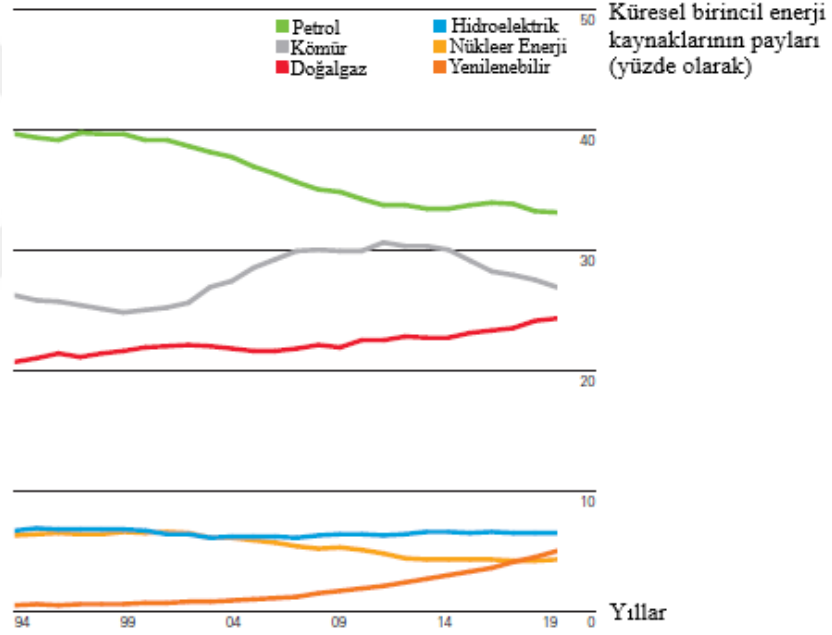
İnsanoğlu çevreye verdiği bu zararlardan dolayı enerji ihtiyacını karşılamak için yeni arayışlara yönelmiştir. Bu arayışlar neticesinde yeni enerji elde etme yöntemleri geliştirmişlerdir. Doğaya zararı olmayan, yeni metotların kullanıldığı enerji kaynaklarına “yenilebilir enerji kaynakları” denilmektedir. Yani, geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere toplamda 2 ana enerji kaynağı vardır. Dünyanın enerji ihtiyacı yıldıan yıla sürekli artış göstermektedir. Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, enerji çeşitlerinin yıllara göre tüketim miktarları exajoule olarak verilmiştir. Her 10 yılda bir, bütün dünyanın enerji tüketim miktarı 100 exajoule artmıştır. Bu tüketim miktarının karşılanması için insanlar geleneksel enerji kaynaklarını kullanmaya devam etse de, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında da ciddi biçimde artış görölmektedir.¹

Küresel olarak enerji çeşitlerinin yıllara göre kullanım oranları Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Özellikle 21. Yüzyıldan sonra nükleer enerji ve petrolden enerji üretme miktarı azalmışken, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki artış oranı açıkça görölmektedir. Yine de, doğaya oldukça zararlı olan petrol ve kömür, enerji üretiminde yaklaşık olarak yüzde 60'lık kısımla büyük pay sahibi olmaya devam etmektedir.

¹ Sözleşmenin orijinal ismi ile “United Nations Framework Convention on Climate Change”.



Şekil 1.1 : Tüm dünyada yıllara göre enerji tüketim miktarları (BP, 2020).



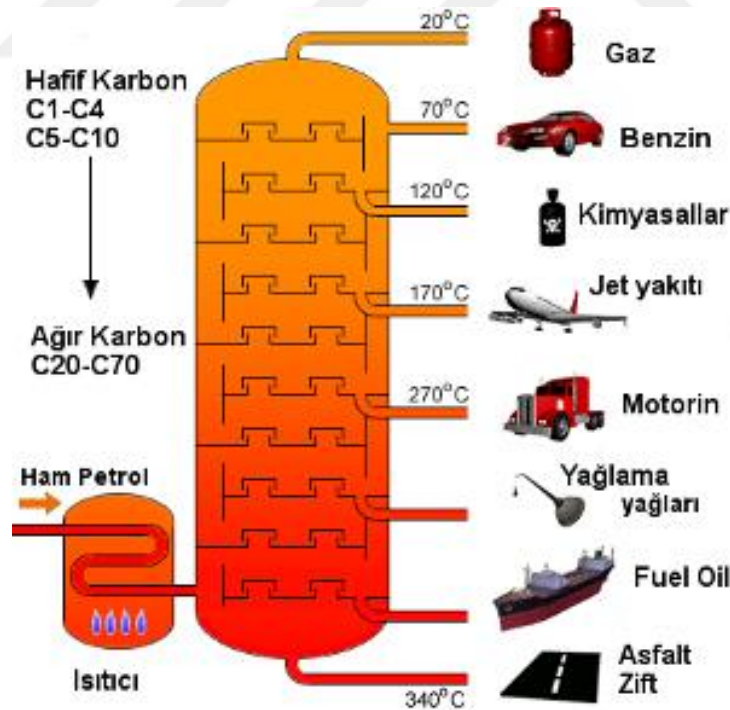
Şekil 1.2 : Küresel birincil enerji kaynaklarının yıllara göre yüzde olarak kullanım payları (BP, 2020).

Şekil 1.1 ve 1.2 incelendiğinde, petrolün kullanım miktarı yıllara göre artmasına rağmen, kullanım oranı oldukça düşmüştür. Bunu sağlayan en büyük etken yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Geleneksel enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha ucuz olması veya daha fazla enerji sağlaması gibi bazı büyük avantajları olsa da; geleneksel enerji kaynakları evre için çok tehlikeli ve zararlıdır. Ayrıca, bu kaynakların rezervleri dünyada belli oranda bulunup, bir gün rezervler bittiğinde kullanılamayacak

kaynaklardır. Dört ana geleneksel enerji kaynağı vardır. Bunlar petrol, doğal gaz, kömür ve nükleer enerji olarak sıralanabilir.

Petrol; deniz tabanının dibine çöken ölmüş büyük bitkiler, dinazorlar veya megalodonlar² gibi hayvanların önce zamanla toprak altında kalıp, ardından milyonlarca yıl boyunca çeşitli kimyasal ve jeolojik değişimlere uğrayarak yüksek basınç ve sıcaklık altında kalarak oluşmuş organik bileşiktir (Algüzey, 2020). Herodot ve Diodorus Siculus'a göre, 4000 yıldan fazla bir süre önce, Babil'de duvarların ve kulelerin yapımında asfalt olarak petrol kullanılmıştır (Chisholm, 1911). Özellikle sanayi devrimi ve içten yanmalı motorların icadından sonra petrole olan ihtiyaç büyük ölçüde artmıştır. Ham petrol topraktan çıkarıldıktan sonra rafinerilerde rafine edilmek zorundadır. Ham petrol ısıtılarak bir damıtma kolonuna gönderilir ve burada ayrışması sağlanır. En altta karbon sayıları çok büyük olan ağır bileşikler kalmaktayken (örneğin asfalt), en üstte kaynama noktaları çok düşük olan propan (C_3H_8) veya bütan (C_4H_{10}) elde edilmektedir. Şekil 1.3'te gösterildiği üzere, ham petrol ayrıştırılıp; gemilerde fuel oil, tırlarda veya bazı arabalarda motorin veya dizel oil, uçaklarda jet yakıtı, arabalarda benzin ve LPG-tüp gaz olarak kullanıma hazır hale getirilmektedir.



Şekil 1.3 : Ham petrolün damıtılma işlemi ve elde edilen ürünler (*Fractional distillation of crude oil*, 2009).

² Soyu tükenmiş, dev köpekbalığı türü. Uzunluğu 21-22 metreyi bulmaktadır.

Petrol; sadece yukarıdaki görseldeki alanlarda değil, aynı zamanda enerji elde etmek için de kullanılmaktadır. Ancak, petrol de tıpkı diğer geleneksel enerji kaynakları gibi çevreye ciddi zararlar vermektedir.

Doğalgaz ise bir petrol türevidir. Yeryüzünde fosil kökenli bir tür yanıcı gaz karışımıdır. Doğalgaz; renksiz, kokusuz ve havadan daha hafiftir. Petrol gibi organik bir bileşiktir, ancak büyük çoğunluğu metan gazından (CH_4) oluşur. Doğalgaz, geçmişte petrol üretimi sırasında ortaya çıkan gereksiz bir atık olarak görülüp, petrol üretim tesislerinde yakılmasına rağmen, günümüzde evlerin en büyük ısınma kaynağıdır ve sanayide de sıklıkla kullanılmaktadır.

Kömür, katmanlı tortul birikintiler arasında bulunan karbon ve yanıcı gazlar açısından zengin, katı, koyu renkli bir kayadır. Ana bileşeni karbondur; ayrıca değişen miktarlarda hidrojen, kükürt, oksijen ve azot içermektedir. Kömür de petrole benzer şekilde; bataklıklarda uygun ortam şartlarında, gerekli organik maddeler ortamda mevcut olduğunda; bozunmuş, çürüyen bitkilerin su altına çökmesi ve bataklığın zamanla üstünün kaplanması gibi olaylar sonucu oluşmaktadır. Kömürün madenlerden çıkarılması ve kullanılması birçok hastalığa neden olmaktadır. Her yıl binlerce insan kömür yüzünden erken yaşta ölmektedir (Hausfather, 2018).

Geleneksel bu enerji kaynakları dünyanın enerji ihtiyacını yeterince karşılayamayınca, dünyadaki bazı büyük devletler daha fazla enerji elde etmek adına yapılan araştırmalara önem vermiş ve bir enerji kaynağı olarak atomların içindeki gücün kullanılabileceğini keşfetmişlerdir. İlk olarak 1905 yılında Albert Einstein, " $E=mc^2$ " formülü ile fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkabilecek enerji hakkında bir tahminde bulunmuştur (Magurean vd., 2019). Daha sonra bu ispatlanmıştır ve 1940'lı yıllarda nükleer enerji kademeli olarak kullanılmaya başlanmıştır; ancak nükleer güç sadece enerji üretmek için kullanılmamıştır. Hem 2. Dünya Savaşı'nı tamamen bitirmek hem de insanların radyasyondan nasıl etkilendiğini öğrenmek için A.B.D., atomun gücünü Japonya üzerinde nükleer bomba olarak kullanmış ve 1945'te Hiroşima ve Nagazaki'ye toplamda iki adet atom bombası atmıştır. Bu olaydan sonra nükleerle ilgili çalışmalar devam etmiş olup, yeni nükleer santraller açılmıştır. İlk büyük nükleer felaket 1986 yılında SSCB'nin Pripyat kenti yakınlarındaki Çernobil nükleer santralinde meydana gelmiştir. Felaketin ardından santralin yakınında yaşayan insanlar, radyasyondan kirlenmiş topraklardan derhal güvenli yerlere nakledilmiştir; yine de Avrupa'nın çoğu toprakları, Türkiye'nin kuzeyi ve özellikle Sovyetler

Birliği'nin batısı (Beyaz Rusya) radyasyondan aşırı derecede etkilenmiştir (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006). Hatta S.S.C.B. ölenlerin sayısının 31 olarak açıklamıştır ancak gerçekte ölü sayısı 3940'tır ve bunlardan 9'u lösemiden ölen çocuklardır (*Chernobyl: the true scale of the accident*, 2005).

Bir diğer büyük nükleer felaket ise Japonya'nın Fukushima kentinde bulunan Fukushima Daiichi nükleer santralinde meydana gelmiştir. Kaza, 11 Mart 2011 Cuma günü Tōhoku depremi ve tsunamisinden kaynaklanmıştır (Lipsy vd., 2013). Tesis 5,7 metre yükseklikteki bir dalgaya dayanabilecekken, depremden sonra 14 metre yükseklikteki bir tsunami dalgası tesise çarpmıştır (*Fukushima faced 14-metre tsunami*, 2011). Tsunami, soğutma sistemine güç sağlayan santralin jeneratörlerini vurup, sistemi bozmuştur. Soğutma sistemi çalışmadığı için reaktörler erimiş ve sonunda patlamıştır (*IAEA says 170,000 people evacuated from area near damaged Japan nuclear plant*, 2011). Tehlike seviyesi olarak Fukushima Daiichi santrali nükleer kazası, Çernobil felaketi ile aynıdır (7. tehlike seviyesi), yani şekil 1.4'te gösterildiği üzere, hem Fukushima hem de Çernobil felaketleri büyük nükleer santral kazaları nedeniyle tarihin en tehlikeli radyasyon seviyeleridir.



Şekil 1.4 : 0 ila 7 tehlike seviyesi, nükleer kaza olaylarının Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği piramidinin bir tasviri (Smythe, 2011).

Nükleer güç çok verimli olmasına rağmen, Fukushima ve Çernobil kazalarından sonra bu gücün insan sağlığı ve çevre için çok tehlikeli olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle insanoğlu, doğaya ve çevreye daha az zarar verme potansiyeli olan enerji üretme yollarına ağırlık vermeye karar vermiştir.

Bu tezin amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarından olan VIVACE³ (Girdap Kaynaklı Titreşimlerden Sucul Yeşil Enerji) sisteminin de içinde bulunduğu VIV⁴ (girdap kaynaklı titreşimler) sistemine ait olan bir silindirin; serbest su yüzeyine çok yakın bir derinlikte çalıştığı için serbest su yüzeyi etkisine maruz kalması durumundaki iz bölgesinde oluşan von-Karman girdap caddesi ile normal şartlar altında oluşması gereken çift yönlü ve periyodik girdaplar üzerindeki etkilerin gözlenmesidir. Girdap kaynaklı titreşimler, bunun bir alt dalı olan VIVACE sistemi, iz bölgesi ve von-Karman girdap caddesi ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.



³ “Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy” teriminden çevrilmiştir.

⁴ “Vortex Induced Vibration” teriminden çevrilmiştir.



2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Fosil yakıtların çevreye çok fazla zararının olması ve büyük nükleer santral kazalarının çevreye ve insan sağlığına verdiği büyük zararlar nedeniyle; ek olarak bu geleneksel enerji kaynaklarının rezervlerinin bir gün tükeneceği gerçeği, insanoğlunu yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmeye itmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından bazıları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, akıntılar, gelgitler, dalgalar ve VIV⁵’dir.

2.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinin doğaya hiçbir zararı yoktur ve dış ülkelere bağımlılığı azaltmaktadır; ayrıca ekvatora yakın, güneş ışınlarının dik açıyla geldiği bölgeler için çok önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Ancak ilk yatırım maliyeti çok fazladır. Ek olarak, mevsimsel olarak yıl boyunca aynı seviyede enerji üretilmemektedir. Yani, enerji verimi çok düşüktür. Ayrıca, gün içinde bile bulutlu havalarda istenilen enerji üretimi seviyesi düşmektedir. Son olarak, bazen üretilen enerjinin depolanması gerekmektedir. Bu da güneş enerjisi sistemi için ek maliyet anlamına gelmektedir.

2.2 Rüzgar Enerjisi

Yeryüzünün belirli noktaları güneşten aldığı ışınlarla farklı miktarlarda ısınmaktadır. Bu oluşan ısı farkları, farklı basınç seviyelerinin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bunun sonucunda da, oluşan basınç ve sıcaklık farkları hava akımına sebep olmaktadır. Bu oluşan hava akımına “Rüzgar” denilmektedir (Sarışan, 2019). Rüzgardan enerji üretmek, eskiden çok pahalı bir yöntem olsa da, bu sektör sürekli gelişen bir alan olduğu için maliyetleri azalmıştır. Böylece rüzgar türbinleri yaygınlaşmıştır. Örneğin, Türkiye’deki kurulu rüzgar türbinleri enerji üretim kapasitesi 2008 yılında 364 MW iken, 2019 yılında bu sayı 7615 MW’ye yükselmiştir (Sarışan, 2019). Rüzgarlar bir bölgede sürekli estiği için sürekli enerji

⁵ Vortex-Induced Vibrations

üretilebilmektedir. Ayrıca, çok temiz bir enerji kaynağıdır, çevreye neredeyse hiç zararı bulunmamaktadır ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Fakat, rüzgar türbinleri görüntü ve ses kirliliği yaratabilmektedir. Verimleri düşüktür. İlâveten, rüzgar türbinleri için çok geniş ve açık alanlar gerekmektedir, dolayısıyla şehirlere çok yakın yerlere konulamamaktadır, çünkü verimleri buralarda daha çok düşmektedir. Ayrıca, göçmen kuşlar için çok büyük risk teşkil etmektedirler. Son olarak dikkatli yerleştirilmezlerse, devrilme vb. gibi durumlarla karşı karşıya gelinebilmektedir.

2.3 Hidrolik (Hidroelektrik) Enerjisi

Hidrolik veya hidroelektrik santralleri, suyun potansiyel enerjisinden enerji üretme prensibine dayanmaktadır. Su yüksekten akmakta, türbinleri döndürmekte ve enerji üretilmektedir (Yaman ve Haşıl, 2018). Hidrolik santralleri, doğa için çok tehlikeli sera gazı etkisi yaratacak gazlar salmamakla birlikte çevreci bir enerji üretim sistemidir. Çok verimlidir. Doğa ve nehirlerin gücünden enerji üretildiği için, dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Acil durumlarda ivedilikle devreye alınıp, devreden çıkartılabilmektedir. Ayrıca, eğer yapı bir baraj sistemini (depo-rezervuar) de barındırıyorsa, bir bölgede tarım için sulama ihtiyacını da karşılayabilmektedir (Yaman ve Haşıl, 2018). Ama enerji verimi yağın yağmur miktarına çok bağlıdır. İlk yatırım maliyeti yüksekken, yapım hızı da nispeten düşüktür. Ayrıca, bir baraj bir nehre kurulduğunda, o bölgenin ekosistemini değiştirebilmektedir. Son olarak, çok büyük ve beklenmedik bir deprem olması gibi durumlarda, yakınlardaki yerleşim yerlerini su altında bırakma gibi bir riski mevcuttur.

2.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, bir bölgeden çıkan jeotermalin kullanılarak üretilen enerji çeşididir. Jeotermal, enerji üretimine ek olarak, kaplıcalarda da kullanılmaktadır. Örneğin, Türkiye'deki jeotermal kaynağının 10'da 9'u kaplıca, ısıtma, mineral eldesi vb. işlerde kullanılırken, geriye kalan kısım enerji üretimi için kullanılmaktadır. İlâveten; Türkiye, jeotermalden enerji üretimi konusunda dünyada ilk 5'te yer almaktadır (Küçükkaya, 2017). Jeotermal enerjinin enerji verimliliği çok yüksektir. Ayrıca, yatırım maliyetleri de düşüktür. Enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Fakat üretim için araştırma ve hazırlık maliyetleri fazladır ve sondaj için yeterli alana sahip olunması gerekmektedir. Ek olarak, enerji üretildiği yerde kullanılmalıdır çünkü

iletim verimliliği düşüktür. Bu yüzden de jeotermal yerleşim alanlarına yakın bölgelerde olmalıdır. Son olarak, toprağın altından çıkartıldığı için, içinde zararlı kimyasallar ve kirlilik yaratan materyaller de çıkabilmektedir. Toprağın altından çıkan bu zehirli maddelerle, atmosfere karbondioksit ve hidrojen sülfür salınımı gerçekleşebilmektedir.

2.5 Biyo-kütle Enerjisi

Biyo-kütle enerjisi; organik atıklardan, bitkilerden, alglerden veya yosunlardan elde edilmektedir (Üçgül ve Akgül, 2010). Biyo-yakıtlar veya biyoetanol, biyo-kütle enerjisine örnek verilebilmektedir. Biyo-kütle enerjisinin çevreye zararları çok azdır. Depolanabilmektedir. Gerekli her büyüklükte üretilebilmektedir. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Enerji üretimi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymamaktadır. Fakat verimleri düşüktür. Ayrıca su ihtiyaçları yüksektir. Organik atıklar yakıldığında, çevreye zehirli gazlar salınmaktadır. Son olarak, geniş yerleşim alanlarına uygundur.

2.6 Akıntı Enerjisi

Akıntılar; tuzluluk farkı, yoğunluk farkı, sıcaklık farkı, sürekli esen rüzgarlar veya dünyanın dönmesinden dolayı meydana gelen Coriolis etkisiyle oluşabilmektedir (Aktaş vd., 2019). Boğazlar vb. yerlerde, akıntılar tuzluluk farkı ve yoğunluk farklarıyla sürekli olarak akmaktadır. Buralara yerleştirilen türbin sistemleriyle sürekli akış olan yerlerde enerji üretimi mümkündür. Ancak, bu tarz bir işlemin ilk yatırım maliyeti çok fazladır. Ayrıca, tuzlu suyun korozyon etkisinden dolayı, bakım-onarım çalışmaları da dikkatli yürütülmelidir. Boğaz akıntılarına ek olarak, dünyanın dönüşünden kaynaklanan akıntılar da mevcuttur. Örneğin; Gulf stream akıntısı bunlara bir örnektir. Gulf Stream akıntısının gücünün, güçlü bir fırtınanın yaratacağı güçte enerji verebileceği görülmüştür (Yücel, 2013). Dünyadaki ilk akıntı enerji üretimi santrallerinden olan İngiltere'deki Lynmouth'da Mayıs 2003'ten beri kurulu olan sistemden 300 kW'lık güç üretilmektedir (Gülsaç, 2009). Ayrıca, nehirlerdeki akıntılardan yaralanan sistemlerle de yerel enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Yatay olarak yerleştirilen çarklarla suya değen alan arttığı için, sistemin verimi de artmaktadır. Bu sistemler de enerjide dışa bağımlılığı azaltmaktadır.

2.7 Gel-git Enerjisi

Gel-git olayı, güneşin ve özellikle ayın dünyaya göre konumlara istinaden gerçekleşen çekim gücüyle; dünyadaki suların, denizlerin veya göllerin alçalıp yükselmesi olayına denmektedir (Kaya vd., 2018). Gel-git olayından enerji üretmek için ya suyun potansiyel enerjisi ya da kinetik enerjisi kullanılmaktadır.

Suyun potansiyel enerjisini kullanma prensibinde, gel-git etkisi altındaki bir lagün veya göl benzeri kıyısal yerin; baraj ile set çekilerek ortadan ikiye ayrılmasıyla, barajın altındaki kapakların açılıp gel-git sayesinde yükselen suyun artan potansiyel enerjisini kullanarak, daha alçakta olan tarafa geçerken türbinleri döndürmesiyle elde edilmesidir. Bu yöntemi kullanarak inşa edilen ilk enerji santrali Fransa'nın Rance Gel-Git Enerji Santralidir. Rance nehrinin ağzına kurulan bu santral 1966 senesinde inşa edilmiş olup, 240 MW'lık güç üretmektedir (Kaya ve Koç, 2015). Daha sonraları ABD'de, Güney Kore'de, İngiltere'de, Çin'de, Japonya'da ve eski SSCB'de kurulan gel-git enerji santralleri de bulunmaktadır. Fakat en önemlisi, 2011'de Güney Kore'de kurulan Sihwa Gel-Git Enerji Santralidir. Bu santral 254 MW'lık güçle hali hazırda dünyanın en büyük gel-git enerji santrali unvanını taşımaktadır (Şimşek, 2015).

Gel-git olayından enerji üretmek için kullanılan ikinci yöntem ise, suyun kinetik enerjisini kullanma prensibi ile gerçekleşmektedir. Gel-git olan alanın tabanına kurulan türbinler sayesinde, gel-git olayı yaşandığında gelen su, türbinleri döndürmekte ve enerji üretilmektedir. Bu gel-git türbinleri rüzgar türbinleriyle karşılaştırıldığında; çok küçük ölçekte olsalar bile, rüzgar türbinleriyle aynı miktarda enerji üretebilmektedir. Çünkü su havadan yaklaşık 800 kat daha yoğundur ve türbinleri havaya göre çok daha etkili bir şekilde döndürebilmektedir. Ayrıca gel-git türbinlerinin rüzgar türbinlerine göre maliyetleri ve çevresel etkileri daha azdır (Şimşek, 2015). Gel-git enerji üretim yöntemi son derece çevrecidir. Zararlı gazlar yaymaz. Ek olarak, önceden hesaplanabilir bir olay olduğu için, elde edilen enerji miktarını arttırmaktadır. Enerji konusunda dışa bağımlılığı ciddi ölçüde azaltmaktadır. Ancak, gel-git enerjisi santrali kurmak çok pahalı bir işlemdir ve çok geniş alan gerektirebilir. Başkaca, tabana türbin kurulduğu için, buradaki canlıların yaşam alanları göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, dünyanın her yerinde gel-git olayı olmamaktadır. Örneğin; çoğu okyanus kıyılarında gel-git olayı yaşanırken, Türkiye için bu durum söz konusu değildir. Dünya genelindeki gel-gitlerin toplam gücünün

3.000 GW olduğu düşünölmektedir, ama bu miktarın sadece 60 GW'ı kullanılabilir konumdadır (Uyar, 2017).

2.8 Dalga Enerjisi

Dünyanın 4'te 3'ü sudur. Bu sular, çeşitli etkenlerle hareket etmekte ve dalgalar oluşmaktadır. Bu dalgaların enerjisinin tüm dünyadaki bir yıllık potansiyelinin, yaklaşık 36 trilyon kWh olduğu tahmin edilmektedir (Yücel, 2013). Dalgaların oluşmasının en temel kaynağı enerjidir. Bir ortama enerji verilirse ve o bölgede uygun koşullar sağlanırsa o bölgede dalgalar oluşmaktadır. Sudaki yüzey dalgalarının en büyük kaynağı rüzgarlardır. Rüzgarlar eğer denizlerde oluşuyorsa, rüzgar o bölgedeki su moleküllerini hareket ettirmeye başlamaktadır. Bu hareket eden su moleküllerine “su dalgaları” denmektedir (*Wave Formation*, 2019).

Dalgalardan enerji elde etmenin 3 tane yolu vardır. Bunlar; kıyılarda kurulu sistemlerden enerji elde etme, yakın denizlerde kurulu sistemlerden⁶ enerji elde etme ve son olarak açık denizlerde⁷ kurulu sistemlerden enerji elde edilmektir. Dalgalardan enerji elde etmek de enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltmaktadır.

Kıyılarda kurulu dalga enerji dönüşüm sistemlerinde; kıyı ve karada çalışıldığı için, kurulum ve bakım-onarım maliyeti yakın kıyı ve açık deniz enerji üretim sistemlerine göre çok daha azdır. Ayrıca, uzun enerji iletim hatları gerektirmemektedir. Ancak, dalgalar tabanla etkileşim halinde olduğu için, enerjilerinin bir bölümünü burada kaybetmektedirler.

Yakın kıyılara kurulan dalga enerji sistemi, 15-20 metre derinliğe kadar olan denizlere kurulmaktadır (Mert, 2012). Bu yapılar, halatlarla bağılı halde deniz yüzeyinde durabilirken, deniz dibinde rijit halde de kurulabilmektedir.

Açıkta kurulan dalgalardan enerji üretim sistemlerinde dalgalar tabandan etkilenmediği için, dalganın enerjisinden maksimum seviyede faydalanılmaktadır. Çünkü enerji hiç kaybedilmemektedir. Ancak, bu sistemlerde uzun iletim kabloları gerekmektedir. Ayrıca, bu sistemlerin kurulacağı yerlerde devasa dalgalar olacağı için, uygun dizayn gerekmektedir. Bu yapılar hem dalgaların yüzeyde maksimum olması sebebiyle, hem de deniz dibindeki yüksek basınç nedeniyle, ya yüzeyde halatlarla sabit

⁶ “Onshore wave energy systems” teriminden çevrilmiştir.

⁷ “Offshore wave energy systems” teriminden çevrilmiştir.

şekilde duran ya da yüzeyde aşağı-yukarı, sağa-sola hareket edip hidrolik sistemleri hareket ettiren sistemlerdir (Kapluhan, 2014).

2.9 Girdap Kaynaklı Titreşimler (VIV)

Girdap kaynaklı titreşimler (VIV) bir sonraki bölümde anlatılacaktır.



3. GİRDAP KAYNAKLI TİTREŞİMLER (VIV)

Girdap kaynaklı titreşimler olgusu, akış kaynaklı hareketlerin⁸ (FIM) bir alt dalıdır. Bir akışkan; küt bir cismin (örneğin bir engel) üzerinden geçtiğinde, cismin arkasında girdapların ortaya çıkmasıyla birlikte türbülanslı bir bölge oluşturmaktadır. Küt bir cisim etrafından geçen bir akışkanın, cismin arka⁹(iz) kısmında oluşturduğu girdaplı bölgenin ilk kez Leonardo da Vinci tarafından keşfedildiği düşünülmektedir. Gelmiş geçmiş en büyük dehalardan biri olarak kabul edilen Leonardo da Vinci; sadece ressam veya sanatçı değil, aynı zamanda filozof, müzisyen, heykeltıraş, jeolog, botanikçi, matematikçi, astronom, mimar, anatomist, mucit ve mühendistir (Farago, 1999). İlk kez belgelenmiş ve günümüze ulaşan en eski “*bir cismin arkasında kalan girdaplı bölge*” görseli, şekil 3.1’de görüleceği üzere, kendisinin bazı eskizlerine atfedilmektedir (Bonheure vd., 2019).



Şekil 3.1 : Bir akışkanın küt bir cisim etrafında akışı ve cismin iz bölgesinde oluşturduğu girdapların Leonardo Da Vinci tarafından çizimi, tahmini çizim tarihi: 1510-1513 (Bonheure vd., 2019).

⁸ “Fluid-Induced Motions” teriminden çevrilmiştir.

⁹ “Wake” teriminden çevrilmiştir.

Girdap Kaynaklı Titreşimler; Türkiye için yeni bir konu sayılsa da, dünyadaki gelişmiş devletler ve özellikle A.B.D. için geçtiğimiz onlarca yıl boyunca çalışılmış bir konudur. Ancak, VIV konusu daha yeterince bilinmiyorken, 1940 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Washington eyaletinde açılan Tacoma köprüsü¹⁰, 853 metre uzunluğuyla döneminin en büyük üçüncü asma köprüsü olma özelliğini taşımaktadır (Topal, 2020). Köprü, beton bloklara sabitlenmiş karbon çelikten imal edilmiş kirişlerle inşa edilen ilk köprüdür. Şekil 3.2'de gösterildiği üzere köprü, kullanılmaya başlandıktan sonra en ufak rüzgarda bile aşağı yukarı sağa sola sallanmaya başlamıştır.



Şekil 3.2 : Tacoma Köprüsü rüzgar etkisiyle sallanırken (*Tacoma Narrows Köprüsü Neden Yıkıldı?*, 2020).

Köprü'nün yapmış olduğu salınımlar göz önüne alındığında; arabaların ve insanların köprüye giriş çıkışı güvenlik önlemleri için yasaklanmıştır. Köprü'nün yaptığı salınımları durdurmak adına o dönem Washington Üniversite'sinden bir profesör ve onun öğrencileri 2 Kasım 1940'ta bir çözüm önerisi sunmuştur. Ne var ki bu çözüm önerisi uygulanamamıştır (Çağlar, 2017), çünkü köprü'nün açılışının üzerinden sadece 4 ay geçtikten sonra, 7 Kasım 1940'ta çok yüksek bir hız sayılmayan 67 km/h hızda esen bir rüzgarla (ki projenin ilk yapıldığı plana göre 140 km/h hızla esen bir rüzgara dayanabileceği düşünülmektedir) daha fazla dayanamayıp rezonansa girerek yıkılmıştır (şekil 3.3) (*Tacoma Narrows Köprüsü Neden Yıkıldı?*, 2020).

¹⁰ Orijinal ismi ile "Tacoma Narrows Bridge".

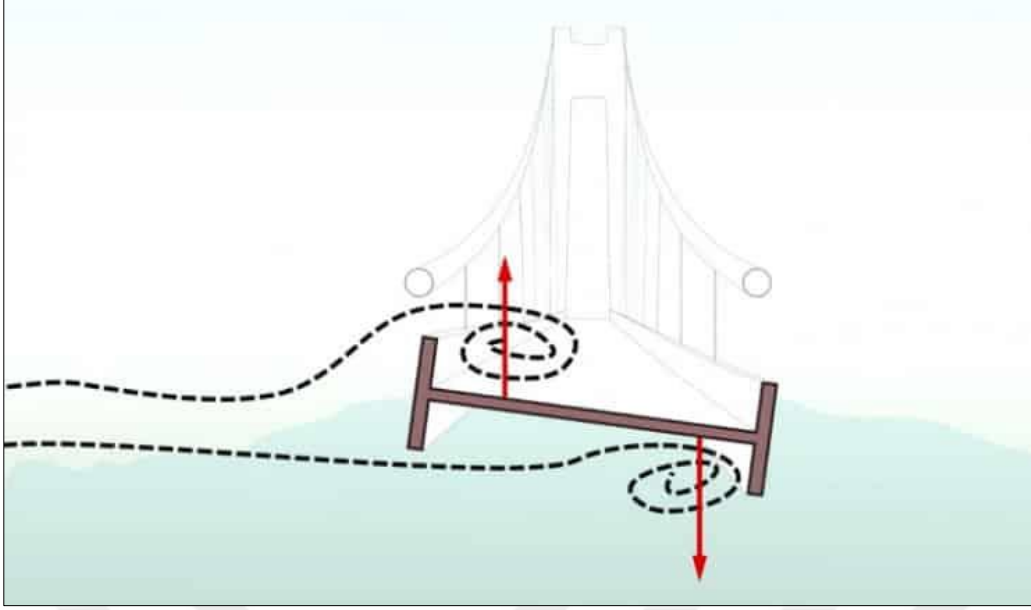


Şekil 3.3 : Tacoma Köprüsü rüzgar etkisiyle yıkılırken (*Tacoma Narrows Köprüsü Neden Yıkıldı?*, 2020).

Çağlar (2017)'a göre, eğer inşa edilen bir yapı rüzgar gibi dış etkilerle sürekli sallanıyorsa ve buna uygun olarak aerodinamik veya hidrodinamik açıdan uygun olarak tasarlanmadıysa, yapılan yapının sağlamlığının bir önemi bulunmamaktadır. Çünkü bir akışkan, hidrodinamik veya aerodinamik olarak uygun inşa edilmeyen yapılardan geçtiğinde; iz bölgesinde akım ayrılır, girdaplar oluşur ve periyodik olarak kopan bu girdaplar zıt yönlü¹¹ kuvvetler oluşturarak yapıyı hareket ettirmeye çalışmaktadır ve yapıyı taşıyan elemanları yormaktadır (Kinaci, 2016). Örneğin, rüzgarın sürekli estiği yerlerde rüzgarın geçmesi için hafifletme delikleri açılması gerekmektedir, ancak Tacoma köprüsünde bu delikler açılmamıştır (Çağlar, 2017). Köprüler birer küt cisimlerdir, bu da rüzgarın köprülerin altından ve üstünden geçerken köprülerin düşey yönlü¹² hareket etmelerini sağlamıştır, buna burulma hareketi de denmektedir (Şekil 3.4). 7 Kasım 1940 günü, Tacoma Köprüsü de rüzgarın etkisiyle önce 0.6 Hz'lik bir frekansla 0.5 metre yukarı aşağı yönde harekete başlamış, ardından şiddetlenen rüzgarla birlikte buna buna 0.2 Hz'lik bir dönme frekansı da eklenmiştir. En sonunda şiddetlenen bu salınımların frekansı ile köprünün kendi frekansı üst üste binmiş ve köprü rezonansa girerek yıkılmıştır (Büyükyıldırım, 2013).

¹¹ Asma köprülerde aşağı-yukarı yönde.

¹² Köprünün tabilyelerine göre aşağı-yukarı yönde.



Şekil 3.4 : Rüzgar köprüyü düşey yönde hareket ettirirken (burulma titreşimi) (Çağlar, 2017).

Bu kazadan sonra aerodinamik araştırmalara başlanmıştır ve köprü inşaatlarında rüzgar tüneli testi standartlaştırılmıştır (Çağlar, 2017). Böylelikle VIV'nin derinlemesine araştırılmasına başlanmıştır.

VIV'nin etkileri sadece asma köprülerde gözlenmez, aynı zamanda ısı eşanjörleri¹³ (ısı değiştiriciler), sokaklardaki elektrik direkleri¹⁴, enerji aktarım hatları¹⁵, açık deniz yapıları¹⁶ ve deniz dibi boru aktarım hatları¹⁷ gibi küt bir yapıya sahip olan mühendislik alanlarında da gözlenmektedir. Elektrik direkleri, enerji aktarım hatları ve asma köprülerdeki VIV olayına “Rüzgar Titreşimi”¹⁸ denmektedir (Wang vd., 2021).

3.1 Girdap Kaynaklı Titreşimlerin Oluşması

Bir akışkan, küt bir cismin etrafından geçerken iz bölgesinde akım ayrılmasına uğrayarak girdaplar oluşturmaktadır. Ardışık, periyodik ve çift yönlü olarak oluşan bu girdaplar kuvvet oluşturup, cismi zıt (akışa göre aşağı-yukarı) yönlü hareket ettirmektedir (Kinaci, 2016). Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, sürekli kopan bu girdaplar

¹³ Heat exchangers.

¹⁴ Lampposts.

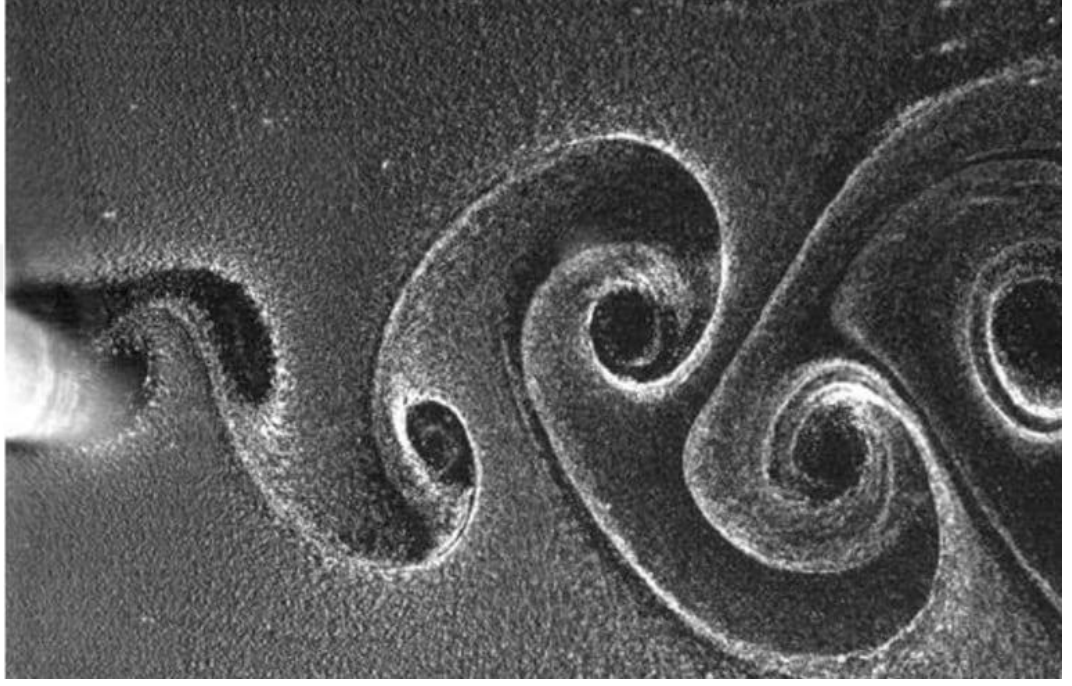
¹⁵ Transmission lines.

¹⁶ Offshore structures.

¹⁷ Underwater Pipelines

¹⁸ “Aeolian Vibration” teriminden çevrilmiştir.

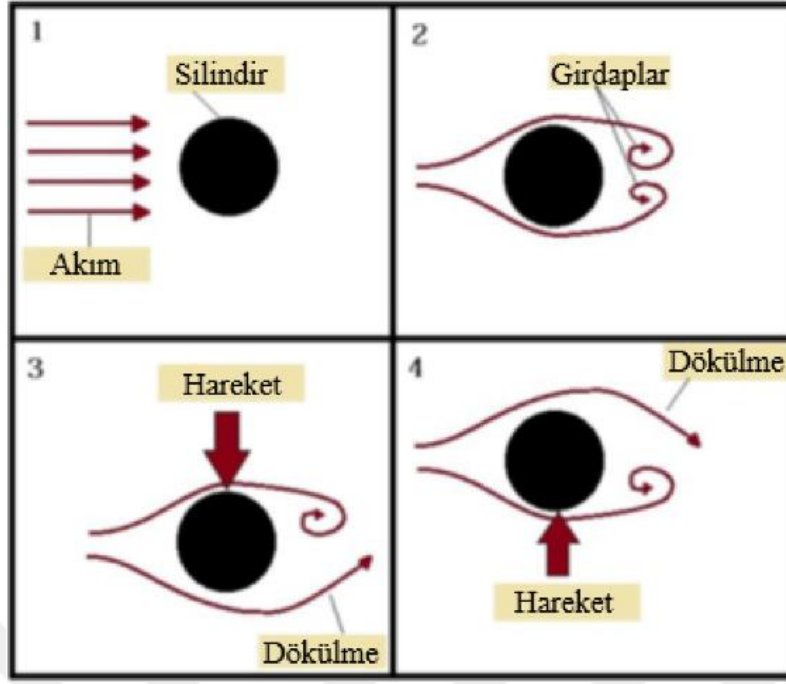
cismin iz bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Silindirin arkasında kalan bu iz bölgesine “Karman Girdap Caddesi” ya da “von Karman Girdap Caddesi”¹⁹ denmektedir. Akış düzenli olarak gelmeye devam ettikçe bu girdaplar (çift yönlü ve periyodik olarak) oluşmaya devam etmektedir. Karman girdap caddesi, 20. yüzyılın başlarında Macar asıllı A.B.D.’li bilim insanı Theodore von Kármán tarafından keşfedilmiştir (Antman, 2006).



Şekil 3.5 : Karman girdap caddesi ya da von Karman girdap caddesi (Karaoğlu, 2019).

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere; 1 numaralı kısımda, bir akım küt bir cisme (silindire) çarpmaktadır. Şeklin 2 numaralı kısmında, akış cismin etrafından geçerken cismin iz bölgesinde bir akım ayrılmasına uğramaktadır ve girdaplar yavaş yavaş oluşmaktadır. Şeklin 3 numaralı kısmına gelindiğinde; girdap cismin üst kısmında oluşmuş olup, girdabın etkisiyle oluşan kuvvet cismi aşağı doğru itmektedir. Şeklin son kısmı incelendiğinde, bu sefer 3 numaranın tersi olarak girdap cismin aşağısında oluşmaktadır ve girdabın etkisiyle oluşan kuvvet cismi yukarı doğru itmektedir. Bu aşağı yukarı hareket; cismin arka tarafından kopan girdaplar periyodik ve çift yönlü oluşu için, akış sabit hızlı ve sürekli olduğu sürece, aynı şekilde devam edecektir.

¹⁹ Karman Vortex Street – von Karman Vortex Street



Şekil 3.6 : Hareketli bir silindirin üzerine gönderilen akım, cismin iz bölgesinde kopan girdaplar ve kopan girdaplar nedeniyle oluşan kuvvet ile hareket eden cismin hareket doğrultusu (Modir vd., 2016).

Asma köprüler ayaklarıyla karaya bağlıdır ve sabittir, yani cismin yana hareketi engellenmiştir. Fakat köprünün tabliye kısmı²⁰ düşey olarak harekete açıktır. Tacoma köprüsünde de, rüzgar tabliyenin etrafından geçtiğinde, bu girdaplar oluşmuş ve tabliyeyi aşağı yukarı hareket ettirmiştir. Oluşan bu düşey hareketlerle köprünün doğal frekansı üst üste bindiğinde bu hareketler çok büyümektedir. Bu sebeple; Tacoma köprüsünün yıkılma nedeni, oluşan bu düşey hareketlerle köprünün doğal frekansının üst üste binmesinden kaynaklanmıştır. Bu duruma “Rezonans” denmektedir. Ancak VIV literatüründe bu durum “Kenetlenme”²¹ olarak adlandırılmaktadır (Kinaci, 2016).

3.2 VIV’de Kullanılan Bazı Boyutsuz Sayılar Ve Parametreler

VIV direkt olarak bir akışkanla bağlantılıdır. Bu yüzden Reynolds sayısı (Re) ve Strouhal sayısı (St) gibi bazı boyutsuz sayılar VIV’de kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak; yapılan birçok çalışmada olduğu gibi, VIV’de de bazı parametreler boyutsuzlaştırılıp sonuca öyle varılmaktadır. VIV’de kullanılan bazı boyutsuz parametreler; genlik oranı (A^*), hız oranı (U^*), kütle oranı (m^*) ve frekans oranı (f^*)’dır.

²⁰ Arabaların köprülerden geçerken ilerlediği bölüm.

²¹ “Lock-in” teriminden çevrilmiştir.

3.2.1 Reynolds sayısı

Girdap kaynaklı titreşimler, bir akışkanın katı küt bir cismin etrafında oluşturduğu girdaplarla ilgili olduğu için, yani direkt olarak bir akışkanla ilgili olduğu için, akışkanlar mekaniğinin en temel yasaları VIV’de de kullanılmaktadır. Akışkanlar mekaniğinin en temel ve en önemli boyutsuz parametresi, Osborne Reynolds tarafından 19. yüzyılın sonunda bulunan Reynolds Sayısı’dır. Osborne Reynolds, bir akışın laminar bölgeden türbülanslı bölgeye geçerken, atalet kuvvetlerini viskoz kuvvetlerine oranlayarak formül 3.1’de gösterilen “Reynolds Sayısı’nı” bulmuştur (Rott, 1990).

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu} = \frac{DU}{\nu} = \frac{\text{ATALET KUVVETLERİ}}{\text{VİSKOZ KUVVETLER}} \quad (3.1)$$

Burada ρ akan akışkanın yoğunluğunu, D sistemde kullanılan silindirin çapını, U akış hızını, μ akışkanın dinamik viskozitesini ve son olarak $\nu = \mu/\rho$ kinematik viskoziteyi temsil etmektedir.

Reynolds sayısı, bir akışkanın akış karakterini belirlemede kullanılmaktadır. Örneğin akış bir iç akışsa, Reynolds sayısı 2300’den küçük olduğunda akış laminar bir akıştır, eğer 2300 ve 4000 arasında ise akış geçiş bölgesindedir, eğer 4000’den büyükse akış türbülanslı bir akıştır (Çengel ve Cimbala, 2008).

0’dan başlayarak artan Reynolds sayısı ile gerçekleşen akış rejimleri Şekil 3.7’de özetlenmiştir. Çok küçük Re sayıları için ayrılma olmamamaktadır. Ayrılmama ilk olarak Reynolds sayısı 5 olduğunda ortaya çıkmaktadır (şekil 3.7.a). Reynolds sayısı $5 < Re < 40$ aralığı için, silindirin arkasında sabit bir çift girdap oluşmaktadır (Şekil 3.7.b). Bu girdap formasyonunun uzunluğu Reynolds Sayısı ile artmaktadır (Batchelor, 1967). Reynolds Sayısı $40 < Re < 200$ aralığı için girdaplar (girdap sokağı) laminardır (Şekil 3.7.c). Reynolds Sayısı daha da arttığında, iz kararsız hale gelmektedir ve bu da sonunda girdapların silindirin her iki tarafında belirli bir frekansta dönüşümlü olarak oluştuğu “Girdap kopması”²² adı verilen olayı doğurmaktadır. Sonuç olarak; iz, bir girdap sokağı görünümüne sahiptir (şekil 3.7.d-f). Reynolds sayısının daha fazla artmasıyla, iz bölgesinde türbülansa geçiş meydana gelmektedir (Şekil 3.7.d). Türbülansa geçiş bölgesi, $Re \ 200 < Re < 300$ aralığında arttıkça silindire doğru hareket etmektedir (Bloor, 1964). Reynolds sayısı 400’den

²² “Vortex Shedding” teriminden çevrilmiştir.

sonra oluşmaya başlayan girdaplar, türbülanslı olarak oluşmaktadır (Bloor, 1964). $40 < Re < 200$ aralığında gözlemlenen girdap kopmalarının iki boyutlu özelliğinin, bu aralıkta belirgin şekilde üç boyutlu hale geldiğini gözlenmiştir (Gerrard, 1978) ve (Williamson, 1988). $Re > 300$ için iz tamamen türbülanslıdır. Bununla birlikte, çok geniş bir Reynolds sayısı aralığında, yani $300 < Re < 3 \times 10^5$ aralığında, silindir yüzeyi üzerindeki sınır tabaka laminar kalmaktadır. Bu rejim, kritik altı akış rejimi²³ olarak bilinmektedir (Şekil 3.7.e). Reynolds sayısının daha da artmasıyla türbülansa geçiş, sınır tabakanın kendisinde gerçekleşmektedir. Geçiş önce sınır tabakanın ayrıldığı noktada gerçekleşmektedir ve daha sonra türbülansa geçiş bölgesi Reynolds sayısı arttıkça silindir yüzeyi üzerinden yukarı akışta durma noktasına doğru hareket etmektedir (Şekil 3.7.f – 3.7.i). Dar Reynolds sayısı bandında $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ (Şekil 3.7.f) sınır tabaka ayrılma noktasında türbülanslı hale gelmektedir, ancak bu sadece silindirin bir tarafında meydana gelmektedir. Böylece sınır tabaka ayrımı silindirin bir tarafında türbülanslı ve diğer tarafında laminar olmaktadır. Bu akış rejimine kritik (veya alt geçiş) akış rejimi²⁴ denmektedir. Ayrılmanın türbülanslı olduğu taraf bazen bir taraftan diğerine geçmektedir. Bu nedenle, laminar kısım türbülansa kayarken, kaldırma kuvveti de yön değiştirip diğer tarafa geçmektedir (Schewe, 1983). Bir sonraki Reynolds sayı rejimi, $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ (Şekil 3.7.g) olduğu süper kritik akış rejimidir²⁵ (Sumer ve Fredsøe, 1997). Bu rejimde, sınır tabaka ayrımı silindirin her iki tarafında türbülanslıdır. Ancak sınır tabakada türbülansa geçiş henüz tamamlanmamıştır; türbülansa geçiş bölgesi, durma noktası ile ayrılma noktası arasında bir yerde bulunmaktadır. Re Sayısı, yaklaşık 1.5×10^6 değerine ulaştığında bir taraftaki sınır tabaka tamamen türbülanslı hale gelmektedir. Dolayısıyla, bu akış rejiminde, sınır tabaka silindirin bir tarafında tamamen türbülanslı, diğer tarafında ise kısmen laminar ve kısmen türbülanslıdır. Üst geçiş akış rejimi²⁶ olarak adlandırılan bu tür akış rejimi, $Re, 1.5 \times 10^6 < Re < 4.5 \times 10^6$ (Şekil 3.7.h) aralığında geçerli olmaktadır (Sumer ve Fredsøe, 1997). Son olarak, Reynolds sayısı $Re > 4.5 \times 10^6$ olduğunda, silindir yüzeyi üzerindeki sınır tabaka neredeyse her yerde türbülanslıdır. Bu akış rejimine transkritik akış rejimi²⁷ denmektedir (Sumer ve Fredsøe, 1997).

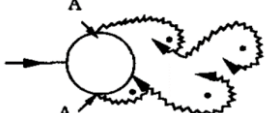
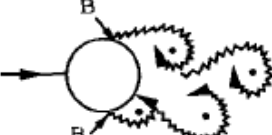
²³ “Subcritical Flow Regime” teriminden çevrilmiştir.

²⁴ “Critical – the Lower Transition Flow Regime” teriminden çevrilmiştir.

²⁵ “Supercritical Flow Regime” teriminden çevrilmiştir.

²⁶ “Upper-Transition Flow Regime” teriminden çevrilmiştir.

²⁷ “Transcritical Flow Regime” teriminden çevrilmiştir.

	Akış Profili	Reynolds Sayısı	Akış Rejimi
a)		$Re < 5$	Ayrılma yok. Yavaş akış
b)		$5 < Re < 40$	Sabit bir çift simetrik girdap
c)		$40 < Re < 200$	Laminer girdap caddesi
d)		$200 < Re < 300$	Türbülansa geçiş
e)		$300 < Re < 3 \times 10^5$ Alt kritik	İz bölgesi tamamen türbülanslı A: Laminer sınır tabaka ayrışması
f)		$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Kritik (alt geçiş)	A: Laminer sınır tabaka ayrımı B: Türbülanslı sınır tabaka ayrımı; ancak sınır tabaka laminer
g)		$3 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Kritik üstü	B: Türbülanslı sınır tabaka ayrımı; sınır tabaka kısmen laminer kısmen türbülanslı
h)		$1.5 \times 10^5 < Re < 4.5 \times 10^6$ Üst geçiş	C: Bir tarafta tamamen türbülanslı sınır tabakası
i)		$4.6 \times 10^6 < Re$ Trans kritik	C: Sınır tabakası iki tarafta tamamen türbülanslı

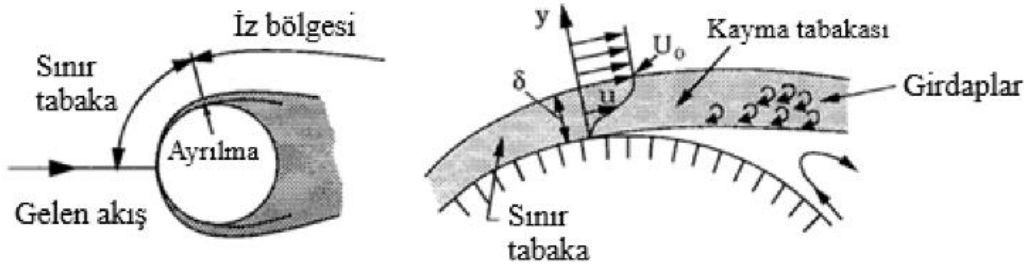
Şekil 3.7 : Sabit akımda düzgün, dairesel bir silindir etrafındaki akış rejimleri (Sumer ve Fredsøe, 1997).

Farell (1981)'e göre tanımlanan akış rejimleri ve bunların meydana geldiği Reynolds sayısı aralıkları ile ilgili terminoloji ile ilgili olarak, çeşitli yazarlar arasında genel bir fikir birliği yok gibi görünmektedir. Yukarıdaki sınıflandırma ve açıklama esas olarak Roshko (1961) ve Schewe (1983)'nin çalışmalarına dayanmaktadır. Roshko

(1961)'nın çalışması üst geçiş ve transkritik rejimlerin varlığını ortaya koyup, $10^6 < Re < 10^7$ Reynolds sayısı aralığını kapsarken, Schewe (1983)'in çalışması altkritik ve transkritik rejimlerini açıklamış ve $2.3 \times 10^4 < Re < 7.1 \times 10^6$ Reynolds sayısı aralığında gerçekleşmiştir (Sumer ve Fredsøe, 1997).

Şekil 3.8'de, iz ve sınır tabakası ile ilgili tanım taslağı gösterilmektedir. Gönderilen bir akım, silindire ulaştığında silindirin arkasında oluşan iz, silindir çapı D ile karşılaştırılabilir bir mesafe boyunca uzanırken; sınır tabakası, D ile karşılaştırıldığında normalde küçük olan çok küçük bir kalınlık ζ boyunca oluşmaktadır. Bu ζ kalınlığı, silindirin çapı D ile kıyaslandığında çok küçük bir değer olarak görülmektedir. Örneğin, formül 3.2'ye göre, (Schlichting, 1979) laminar sınır tabaka durumundaki sınır tabaka kalınlığı, $O(100)$ 'den büyük Reynolds sayısı için $\zeta/D \ll 1$ olduğunun görüldüğünü söylemiştir (Sumer & Fredsøe, 1997).

$$\frac{\zeta}{D} = O\left(\frac{1}{\sqrt{Re}}\right) \quad (3.2)$$



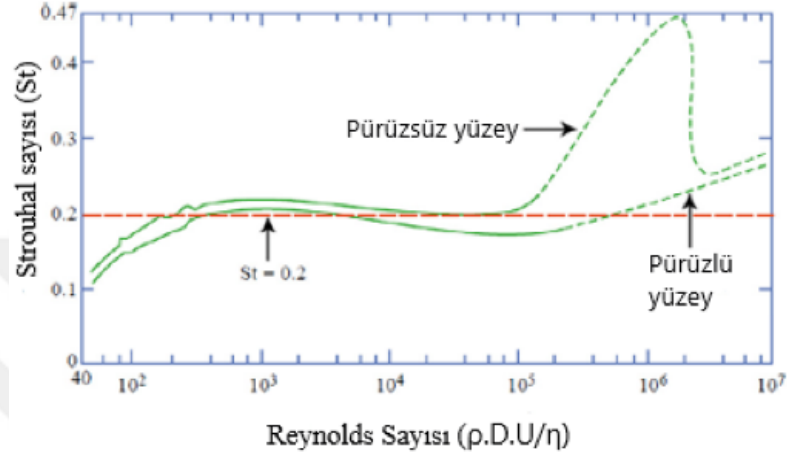
Şekil 3.8 : Bir silindir üzerine gönderilen akışın sınır tabakası, akım ayrılması ve iz bölgesinde oluşmaya başlayan girdapların silindirin üst kısmına yaklaştırılmış halinin şematik gösterimi (Sumer ve Fredsøe, 1997).

Şekil 3.7 ve 3.8'de görüldüğü üzere; küt cisim pürüzsüz yüzeye sahip bir silindir, girdap kopmaları silindirin en üst ve en alt kısmında yaşanmaktadır. Bu noktadan sonra akış geldikçe girdap kopmaları silindirin arka kısmındaki iz bölgesinde devam etmektedir ve Karman girdap caddesi boyunca oluşmaktadır.

3.2.2 Strouhal sayısı

Bir silindir etrafındaki akış için Strouhal sayısı oldukça önemlidir (Karasu, 2019). Bir bölgede oluşan ivme nedeniyle ortaya çıkan atalet kuvvetlerinin, akışkan sebebiyle oluşan ivme nedeni ile ortaya çıkan atalet kuvvetlerinin birbirine olan oranıdır. Girdapların silindirin iz bölgesinde koptuğu boyutsuz frekans, Strouhal sayısı olarak bilinmektedir (Modir ve Goudarzi, 2019). Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyli dairesel

silindirler için Reynolds sayısı ile Strouhal sayısı arasındaki ilişki şekil 3.9'da gösterilmiştir. Geniş bir Reynolds sayı aralığında, Strouhal sayısı çok az değişmektedir ve sabit olarak kabul edilebilmektedir. Yaklaşık $10^3 < Re < 10^5$ aralığının tamamı için, pürüzsüz yüzeyler için Strouhal sayısı yaklaşık 0.2 olmaktadır (Blevins, 2001). Bu durum, yapılan deneylerin Reynolds sayısı aralığı yaklaşık $1.6 \times 10^4 < Re < 7.1 \times 10^4$, Strouhal sayısının da 0.2 olacağını göstermektedir.



Şekil 3.9 : Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyli silindirin, Reynolds sayısı ile Strouhal sayısı ilişkisi (Blevins, 2001; Modir vd., 2016).

Strouhal sayısı 3.3 numaralı formül ile bulunmaktadır.

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (3.3)$$

Burada; f girdapların kopma frekansı, D silindirin çapı ve U gönderilen akışın hızıdır.

3.2.3 Froude sayısı

Normalde, serbest su yüzeyinden etkilenmeyecek derinlikte yapılan girdap kaynaklı titreşim deneylerinde, Froude sayısı sistemi çok fazla etkilememektedir. Ancak serbest su yüzeyine yakın yerlerde yapılan çalışmalarda Froude sayısı da derinliğe bağlı olarak sistemi etkilemektedir (Sheridan vd., 1997). Yapılan bu çalışmada da serbest su yüzeyi etkisi olduğu için, Froude sayısı (Fr) da çalışmada önemli bir rol almaktadır. Yapılan deneylerde Froude sayısı yaklaşık $Fr \cong 0.6$ 'dır. Chung (2016)'ın yaptığı benzer bir çalışmada Froude sayısının yaklaşık 0.8 değerinde olduğunu farketmiştir ve serbest su yüzeyi etkilerinin VIV sistemini bastırdığını görmüştür. Dolayısıyla Froude sayısındaki bu seviyeler, serbest su yüzeyi etkisi altındaki VIV sistemleri için yüksek sayılabilmektedir. Froude sayısı denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (3.4)$$

Burada; U akışkanın hızı, g yerçekimi ivmesi ve D silindirin çapıdır. Ancak buna ek olarak, batma derinliğine dayalı Froude sayısının değeri formül 3.5'te verilmiştir.

$$Fr = \frac{U_L}{\sqrt{g \cdot d}} \quad (3.5)$$

Burada; U_L akışkanın yerel hızı, g yerçekimi ivmesi ve d silindirin batma derinliğidir. Sheridan vd. (1997)'e göre, formül 3.5 akış fizikini daha iyi temsil edebilmektedir. Yani, yerel bir Froude sayısının tanımı, yerel hıza ve silindirin üst yüzeyinin hemen üzerindeki serbest yüzeyi ile olan mesafesine dayalı olarak en uygun olanıdır.

3.2.4 Genlik oranı (A^* - A/D)

Boyutsuz genlik oranı yani genlik oranı; denklem 3.6'da görüldüğü üzere, silindirin akış altında yapmış olduğu genliğin (A), silindirin çapına (D) bölünmesi ile elde edilmektedir. A^* veya A/D ile gösterilmektedir.

$$A^* = \frac{A}{D} \quad (3.6)$$

3.2.5 Hız oranı (U^*)

Boyutsuz hız oranı (U^*); akışkanın hızının, doğal frekans ve silindirin çapına bölünmesi ile bulunmaktadır (3.7).

$$U^* = \frac{U}{f_{n,w} \cdot D} \quad (3.7)$$

3.2.6 Frekans oranı (f^*)

Boyutsuz frekans oranı (f^*); formül 3.8'de gösterildiği üzere, salınımın frekansının (oscillation frequency) sistemin doğal frekansına (natural frequency) bölünmesiyle elde edilmektedir (Modir ve Goudarzi, 2019). Formüldeki sistemin doğal frekansı $f_{n,w}$, ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.

$$f^* = \frac{f_{osc}}{f_{n,w}} \quad (3.8)$$

3.2.7 Kütle oranı (m^*)

VIV’de kullanılan son boyutsuz oran kütle oranıdır (m^*). Sistemin hareketli parçalarının toplam kütesinin (oscillation mass), silindirin yer değiştirdiği suyun kütesine (deplasmanına – displacement) oranıyla bulunmaktadır (3.9).

$$m^* = \frac{m_{osc}}{m_{deplasman}} \quad (3.9)$$

Silindirin deplasmanı, silindirin hacmi ile akışkanın yoğunluğunun çarpılmasıyla elde edilmektedir.

3.3 VIV’nin Kullanım Amaçları

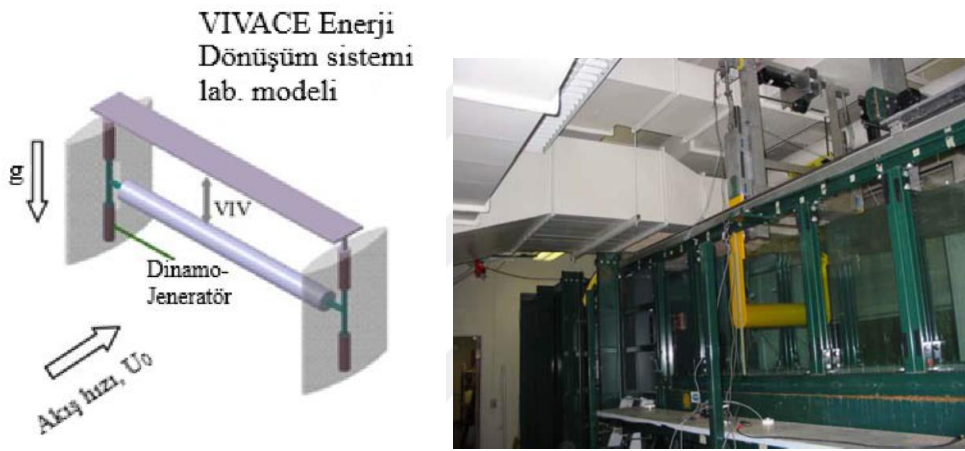
VIV; açık deniz yapıları, soğutma kuleleri, köprüler, ısı eşanjörleri, elektrik direkleri ve elektrik iletim hatları gibi pek çok mühendislik alanında yarım yüzyılı aşkın süredir kullanılmaktadır (Modir ve Goudarzi, 2019). Bu yapıların bazılarının, hava akışkanı (rüzgar) nedeni ile salınım yapmasına “Rüzgar titreşimi” denmektedir (Lu ve Chan, 2007). Bu titreşimden; köprüler, ince uzun ve ayrıca açık alandan sürekli rüzgar alan ince uzun balkon demirleri, elektrik direkleri ve özellikle elektrik iletim hatları çok etkilenmektedir (Lu ve Chan, 2015).

VIV, üzerine akışkan gelen yapıları inşa eden - kapsayan bütün mühendislik alanlarında 2 temel amaç için kullanılmaktadır. Bunlardan ilki; küt bir cisim etrafında kopan girdaplar nedeni ile oluşan hareketin olabildiğince baskılanması veya kısıtlanmasıdır. Hareketin engellemeye çalışıldığı mühendislik yapıları; asma köprüler ve köprünün tabliyeleri, elektrik direkleri, enerji aktarım hatları, deniz dibindeki aktarım boruları ve bazı açık deniz yapılarıdır. Örneğin; yarı batık bir petrol platformu için, platform çapa atılamayacak derinliklerle çalışmakta ve operasyon durumunda (deniz tabanından petrol çıkartırken) pozisyonunu dinamik pozisyon yöntemini kullanarak (iticiler vasıtası ile²⁸) yapmaktadır. Operasyon sırasında platformun ayakları suya batıktır ve platformun bu durumdayken minimum şekilde hareket etmesi istenmektedir. Sharma vd. (2010)’nın belirttiği gibi, platformun bacakları üzerine akıntı ve dalgalar; platformun üst yapısına ise rüzgar kuvvetleri gelmektedir. Özellikle platformun bacaklarına binen dalga ve akıntılardan oluşan girdaplar sebebiyle yapı

²⁸ “Thruster” teriminden çevrilmiştir.

hareket edebilmekte ve platformun petrol çıkarttığı ana boruya²⁹ zarar verebilmektedir.

VIV'nin diğer kullanım amacı ise; nehir, boğaz, kanal vb. gibi bölgelerden geçen bir akışkanın bir silindirin etrafında oluşturduğu girdaplarla olabilecek maksimum harekete ulaşarak enerji üretmek veya çevredeki tarım arazilerine içinde bulunduğu tatlı suyu hiç enerji harcanmadan veya herhangi bir elektrikli pompaya ihtiyaç duyulmadan basmaktır. VIV'den enerji üretmek için kullanılan sistemlere VIVACE denmektedir (Bernitsas vd., 2008). VIVACE'nin laboratuvar model resmi, şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : VIVACE enerji dönüştürücü sistemi laboratuvar modeli (soldaki görsel) (Raghavan, 2007). Michigan Üniversitesi'nin Düşük Türbülanslı Serbest Yüzeyle Su Kanalındaki VIVACE modeli (sağdaki görsel) (Bernitsas vd., 2008).

VIVACE enerji dönüşüm sisteminde U_0 akış hızı, g yer çekimi ivmesidir. Silindirin hareketi yer çekimi ile aynı olmak üzere tek doğrultudadır. Birer enerji dönüştürücü jeneratör (dinamo) sistemin iki tarafındaki payandalara³⁰ (sistemin bileşenleri bir sonraki bölümde anlatılacaktır) yerleştirilmiştir. Akış, silindire dik bir doğrultuda geldiğinde, silindirin altından ve üstünden düzenli, periyodik ve çift yönlü olarak girdaplar kopartarak silindiri aşağı yukarı yönde hareket ettirmektedir. Silindir aşağı yukarı hareket ettikçe yanlarındaki payandalardaki enerji dönüştürücü jeneratörlere de bu hareketi aktaracağından, silindir aşağı yukarı hareket ettikçe sistem enerji üretecektir. Benzer şekilde, VIV sistemi pompa olarak kullanılmak istenirse; sistemin desteklerine birer pompa takılmak suretiyle; sistem, silindir aşağı yukarı hareket

²⁹ “Drill pipe” teriminden çevrilmiştir.

³⁰ VIV sisteminin silindir ve yayları birbirine bağlayan yapılarıdır. “Side Struts” teriminden çevrilmiştir.

ettikçe, sistemin içinde bulunduğu tatlı su, hiçbir ekstra enerji harcanmadan etraftaki tarım arazilerine basılma olanağı sağlamaktadır.

VIVACE, 0.5 ila 5 knots arasındaki hızlarda akan akarsu veya boğazlardan enerji elde edebilmekte ve o bölgenin coğrafi şartlarına göre ölçeklendirilerek inşa edilebilmektedir (Bernitsas ve Raghavan, 2009). VIVACE'nin, sulardan (akuatik olarak) enerji üreten diğer sistemlere göre büyük avantajı; diğer sistemler düşük hızlarda enerji üretemezken, VIVACE 0.25 m/s gibi çok düşük hızlarda çalışabilip, enerji elde edebilmektedir.

3.4 VIV'nin Hareket Bölgelerinin Adlandırılması

Daha önce de anlatıldığı gibi, VIV deneylerinden elde edilen veriler boyutsuzlaştırılmaktadır. Örneğin şekil 3.11'de, VIV'nin bir deneyinin verileri genlik ve hız olmak üzere boyutsuz olarak verilmiştir. Burada; sarı bölge silindirin hareketinin ilk kez başladığı “Başlangıç Bölgesi”³¹ olarak adlandırılmaktadır, kırmızı bölge hareketin maksimum seviyeye çıktığı bölgedir ve “Üst Bölge”³² olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede sistemin frekansı ile silindirin etrafında kopan girdapların frekansları birbirlerine çok yaklaşmakta ve hatta üst üste binmektedir. Üst üste bindikleri bu anda rezonans durumu denmektedir. VIV literatüründe ise bu durum “Kenetlenme” adlandırılmaktadır (Kinaci, 2016). Tam kenetlenme anında, sistemin hareketi maksimuma ulaşmaktadır. Bu sebepten ötürü, tam olarak bu noktada bina köprü vb. yapılarda hareketin sönümlenmesi çok önemli rol oynamaktadır. Bu konuya verilebilecek en önemli örnek daha önceki bölümde anlatılan Tacoma Narrow Asma Köprüsüdür. Bu noktadan sonra, kopan girdapların frekansları artmasına rağmen, hareketin genliği düşmektedir. Genlik gittikçe düşmekte ve mor renkle gösterilen “Alt Bölge”³³ye girmektedir. Akışkanın hızının daha da artmasıyla, akışkan sistem üzerinde aşırı derecede yatay kuvvet³⁴ oluşturup, sistem üzerinde daha fazla sürtünme ve titreşim meydana getirmektedir. Bu durum da, genliğin daha da düşmesine sebep olmakta ve sistemi siyah renkle gösterilen “Desenkronizasyon Bölgesi”ne³⁵ sokmaktadır.

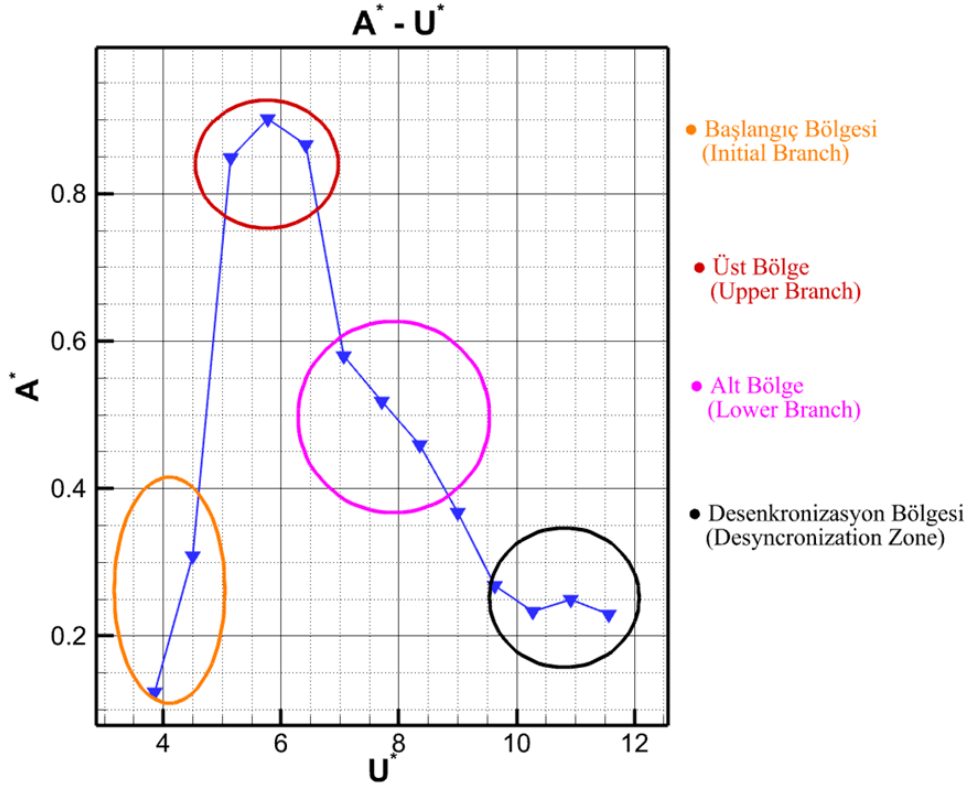
³¹ “Initial Branch” teriminden çevrilmiştir.

³² “Upper Branch” teriminden çevrilmiştir.

³³ “Lower Branch” teriminden çevrilmiştir.

³⁴ “Drag Force” teriminden çevrilmiştir.

³⁵ “Desynchronization Zone” teriminden çevrilmiştir.



Şekil 3.11 : Bir VIV testinin boyutsuz genlik (A^*) ve boyutsuz hız (U^*) grafiğindeki hareket bölgeleri.

Eğer VIV'den yararlanılarak enerji üretilmek isteniyorsa veya VIV sistemi bir pompa olarak kullanılacaksa, sistemin verimini arttırmak yani daha fazla enerji elde etmek veya daha fazla su basmak için daha yüksek salınımın yapıldığı bölge olan üst bölgede çalışılması uygundur. Elde edilen enerji veya basılan maksimum su miktarı en çok kilitlenme anında olacaktır. Kilitlemeden sonra A/D oranı küçülmektedir. Her şeye rağmen; akışın hızı arttığından, dolayısıyla sürüklenme kuvveti de arttığından, VIV sistemi akış yönünde aşırı yüklenmeye başlar ve bu da gereksiz titreşim üretmektedir. Ayrıca, sistem desenkronize bölgesine girdiğinde genlikler küçüktür ve artan hıza rağmen hemen hemen aynı ve çok düşük seviyede kalmaktadır.

4. DENEYLER

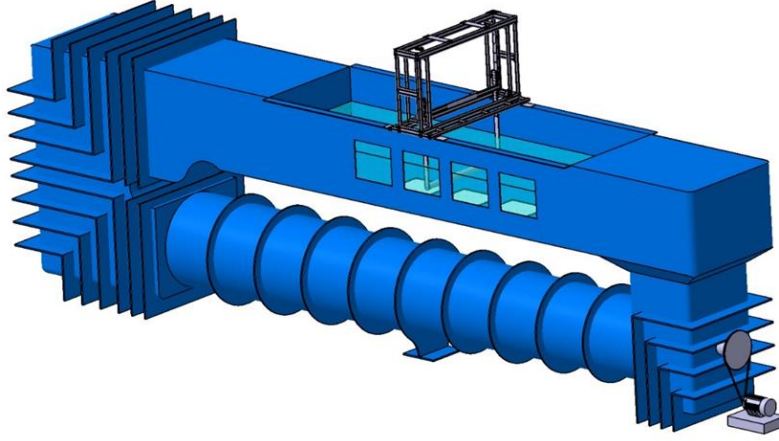
Deneyler, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler (FIM) Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Laboratuvar ilk olarak 1953 yılında inşa edilmiş ve 1988 yılında bugünkü konumuna taşınmıştır (*Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı*, t.y.).



Şekil 4.1 : İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler (FIM) Laboratuvarı.

FIM Laboratuvarı'nın içinde bulunduğu sirkülasyon kanalı; 5 metre uzunluğa, 1.5 metre genişliğe ve 0.64 metre su derinliğine sahiptir. Şekil 4.2, FIM Laboratuvarının CAD görünümünü göstermektedir. Sirkülasyon kanalı Kempf & Remmers üretimidir. Rotor, 50 kW gücünde Ward-Leonard AC Motor ile döndürülmektedir. Bu değer de yaklaşık 67 HP'lik³⁶ güce denk gelmektedir. Sirkülasyon kanalının hız kapasitesi 0 - 2 m/s arasındadır (*Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı*, t.y.).

³⁶ HP: Horse Power.



Şekil 4.2 : İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler Laboratuvarı CAD görünümü.

FIM Laboratuvarı'nda kullanılan akışkanın yani suyun akış hızı, laboratuvarın motorunun dakikadaki devri (rpm) ile ayarlanmaktadır. Suyun hızı ve motorun devri arasındaki ilişki formül 4.1'de gösterilmiştir. Burada V ve n sırasıyla suyun akışının hızını (m/s) ve motorun devrini (rpm) ifade etmektedir.

$$V = 0.0013 \times n \quad (4.1)$$

4.1 Deney Sisteminin Kurulması ve Sistemin Bileşenleri

Deneylere başlanırken ilk olarak, VIV sisteminin dış çerçevesi sirkülasyon kanalının kenarlarına monte edilmektedir. Ardından; silindir, payandalara vidalanmaktadır. Payandalar arasına bir destek çubuğu bağlanmaktadır. Payandalar, destek çubuğu ve silindir; dış çerçevenin iç tarafındaki U oluklu kılavuz makaralar vasıtasıyla raylara dikey bir biçimde oturtulmaktadır. Ardından, yaylar da payandalara bağlanmaktadır. Dış çerçevenin en üstüne ve ortasına, silindirin yapmış olduğu genliği ve frekansı ölçmek için bir sensör sistemi yerleştirilmektedir. VIV sisteminin tamamı şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.3'te VIV sistemi bileşenlerini göstermek için kullanılan kırmızı oklardan; (1) numaralı ok dış çerçeveyi³⁷, (2) numaralı ok payandaları³⁸, (3) numaralı ok silindiri³⁹, (4) numaralı ok destek çubuğunu⁴⁰, (5) numaralı ok yayları⁴¹, (6)

³⁷ “Main Frame” teriminden çevrilmiştir.

³⁸ “Side Struts” teriminden çevrilmiştir.

³⁹ “Cylinder” teriminden çevrilmiştir.

⁴⁰ “Balancing Bar” teriminden çevrilmiştir.

⁴¹ “Springs” teriminden çevrilmiştir.

numaralı ok tekerlekleri⁴², (7) numaralı ok U oluklu kılavuz makarayı ve onun rayını⁴³ ve (8) numaralı ok da sensörü⁴⁴ ifade etmektedir.

Bu bileşenlerden; dış çerçeve, ray ve sensör, deneyler yapılırken hareketsizken; payandalar, silindir, destek çubuğu, yaylar, tekerlekler, U oluklu kılavuz makaralar hareketlidir. Hareketli parçaların tümünün kütleleri toplandığında m^* 'ı hesaplamada kullanılan m_{osc} ⁴⁵ elde edilmektedir. Deneyin m^* oranını değiştirirken, denge çubuğuna ekstra dış ağırlıklar eklenip, toplam m_{osc} 'ye dahil edilmektedir.



Şekil 4.3 : VIV sistemi bileşenleri.

⁴² “Wheels” teriminden çevrilmiştir.

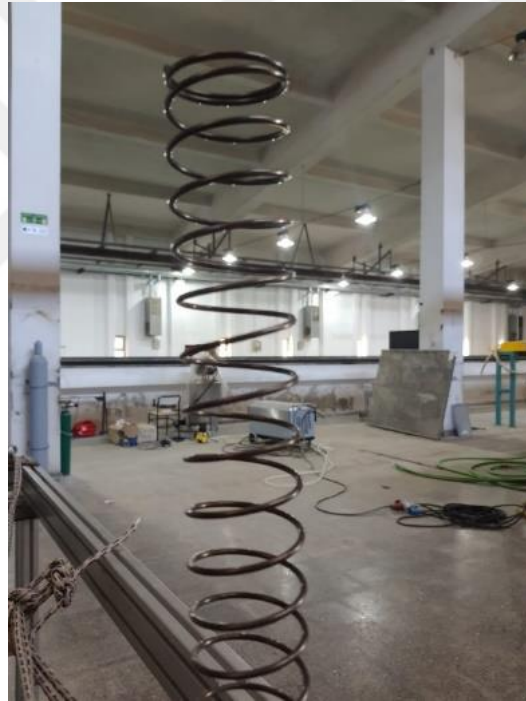
⁴³ “Groove guide pulley and its rail” teriminden çevrilmiştir.

⁴⁴ “Sensor” teriminden çevrilmiştir.

⁴⁵ m_{osc} : Hareketli parçaların toplam kütlesi.

4.1.1 Sistemde kullanılan yaylar

Yayların üzerine bazı kuvvetler etki etmektedir; bu kuvvetler sonucu yaylar; basılmaya, çekilmeye, eğilmeye ve burulmaya uğramaktadır. Baskı yayları, çekme yayları, kalıp yaylar, disk yayları, çubuk (torsiyon) yaylar, yaprak yaylar ve spiral yaylar gibi yaylar; kullanım yerleri ve özelliklerine göre sınıflandırılabilir (Kutay, 2010). En yaygın yay türlerinden ikisi, baskı ve çekme yaylarıdır (Patil, 2016). Çekme yayları bir noktadan sonra sıkıştırılamaz, bu da silindirin daha fazla yukarı gitmesine engel olmaktadır. Silindir, daha az hareket ettiği için özellikle genliğinde ciddi bir düşüş yaşanmaktadır. Bu nedenle, çekme yayları VIV sistemi için uygun yaylar değildir. Bu sebeple, şekil 4.4'te gösterildiği gibi, deneylerde 2 adet baskı yayı kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan baskı yaylarından biri.

Yay sabitini (k)⁴⁶ bulmak için yay, bir kanca vasıtası ile asılmaktadır. İlk olarak, yayın serbest durumdaki ilk boyu ölçülmekte, ardından her seferinde yayın altına birer kilogram eklenmekte ve yayın her bir durumdaki uzama miktarı ölçülerek yay sabiti bulunmaktadır. Seçilen yayların yay sabitlerinden biri, yayın her yerinde sabit bir değer olan 383 N/m olarak bulunmuştur. Böylece sistemde 2 yay olduğu için sistemin toplam yay rijitliği 766 N/m olmaktadır.

⁴⁶ k : Yayın sertliği veya rijitliği de denmektedir.

4.1.2 Deneylerde kullanılan silindirin özellikleri

Sistemde kullanılan silindir, pürüzsüz yüzeyli alüminyum alaşımdan yapılmıştır. Silindirin çapı 8 cm, uzunluğu ise 1.423 metre, ağırlığı ise 2.55 kg olarak ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan silindir; henüz sisteme monte edilmemişken ve özellikleri ölçülürken, tartı üzerindeki bir görüntüsü şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Deneylerde kullanılan silindirin demonte halde özellikleri ölçülürken bir baskül üzerindeki görüntüsü.

Deneylerin yapıldığı sirkülasyon kanalının genişliği 1.5 metre iken, silindirin toplam uzunluğu 1.423 metredir. Yani; silindirin uzunluğunun kanal genişliğine oranı yaklaşık 0,95'tir, bu da silindir kenarlarında uç etkilerinden kaçınmak için önemlidir.

4.1.3 Sistemin kütle oranının (m^*) ayarlanması için harici kütle

Sistemin kütle oranı (m^*), sistemin hareketli bileşenlerinin toplam kütesinin yer değiştiren sıvının kütesine (deplasmanına) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Kütle

oranını istenilen şekilde ayarlamak için salınlı bileşenlerden biri olan çubuğa harici kütle eklenmektedir. Örneğin; şekil 4.6; her biri 0.5 kg olan ek kütle ile bu amaca yönelik harici ağırlık eklenmiş bir örneği göstermektedir. Bu örnekte eklenen toplam ağırlık 1 kg olmaktadır.



Şekil 4.6 : Destek çubuğuna harici ekstra eklenmiş ağırlıklar.

Deneylerin B harfi ile gösterilen kısmı bu örneğe girmektedirken ($m^*=1.79$) (her biri 0.5 kg olan toplamda 1 kg ağırlık ekleme), A kısmında hiç ağırlık eklenmemiştir ($m^*=1.65$). Deneylerin C kısmında ise, her biri 1 kg olan toplamda 2 kg ekstra ağırlık eklenmiştir ($m^*=1.93$). Şekil 4.6'daki görseldeki örnek, deney adı olarak 1.B'nin yapıldığı andan bir kesittir.

4.1.4 Sistemin silindirinin derinliğinin ayarlanması için ara parça

VIV sistemi üzerindeki serbest su yüzeyi etkilerinin anlaşılması için, deneylerde kullanılan silindirin serbest su yüzeyine yaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için de, sistemin dış çerçevesi üzerine 4 adet ara parça yerleştirilmektedir. Böylelikle, sistemin bütün hareketli parçaları serbest su yüzeyine bu parçanın yüksekliği olan 8 cm kadar daha yaklaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan bu parçalar, sisteme entegre edilmeden önceki haliyle şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Silindirin serbest su yüzeyine daha çok yaklaşması için kullanılan ara parçalar ve bu parçaların vidaları (de-monte halde).

Şekil 4.7’de gösterilen ara parçalar teflon malzemeden üretilmiştir. Boyutları 8 x 10.25 x 5.2 cm’dir. Bu parçaların, deney sonuçlarına tesir edecek bir biçimde sisteme herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

4.1.5 Sistemin sensörü

Deneylerde kullanılan sensör bir ultrasonik sensördür. Sensörün modeli HC-SR 04’tür. Sensörde bir verici bir de alıcı bulunmaktadır. Verici ultrasonik dalgalara gönderirken, alıcı yansıyan ses dalgalarını toplamaktadır. Ultrasonik sensörün çalışma prensibi, radarlarla aynıdır (Akgul, 2021). Elde edilen veriler Arduinio Mega programı ile işlenmektedir. Kullanılan sensörün menzili yaklaşık 4 metredir (Şeremet, 2019). Silindirin yapmış olduğu hareket 4.2 numaralı formül ile belirlenmektedir.

$$z = \frac{t \cdot c}{2} \quad (4.2)$$

Burada; z silindir ile sensör arasındaki mesafeyi, t ses dalgasının iletilmesi ve alınması arasında geçen süreyi, c ise sesin havadaki yaklaşık yayılma hızını (343 m/s) ifade etmektedir (Akgul, 2021).

4.2 Test Matrisi

Deneyler toplamda 10 günde, benzer hava ve su sıcaklıklarında yapılmıştır. Deneyler için akış hız aralığı 0 – 0.884 m/s'dir. Deneylere durgun haldeki sudan başlanmıştır ve suyun hızı 0.050 m/s'lik arttırılarak devam edilmiştir. Her bir hız için, silindirin genliği ve frekans verileri bir sensör vasıtasıyla ölçülmüştür. Bu işlem sırasında silindirin yapmış olduğu 60 saniyelik salınım verileri toplanmıştır.

Tüm deneylerin Reynolds sayısı aralığı $16.000 < Re < 71.000$ arasındadır. Üst bölge, Zdravkovich (2003) tarafından tanımlandığı gibi Geçiş Kayma Katmanı 3'ün (Transition Shear Layer 3 - TrSL3) bir akış rejimine karşılık gelen yaklaşık Reynolds sayısı 30.000-45.000'de meydana gelmiştir.

İlk deney; serbest su yüzeyinden silindirin merkezine 6 cm uzaklıkta yapılmıştır. İkinci deney, serbest su yüzeyi ile silindirin merkezi arasında 9 cm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki deneyler ise, silindirin yaklaşık bir çapı mesafesi⁴⁷ olacak şekilde birer birer aşağı indirilip, toplamda 6 derinlik için, 3 de değişik kütle oranlarında olmak üzere toplamda 18 deney yapılmıştır. Deneyler, kütle oranlarına (m^*) göre üç gruba ayrılmışlardır, kütle oranlarını temsil eden deneyler; “A”, “B” ve “C” harfleri olarak gösterilmektedirler. Ayrıca, çizelge 4.1'de gösterilen “1”, “2”, “3”, “4”, “5” ve “6” sayıları, silindirin serbest su yüzeyine göre numaralandırılmış deney derinlikleridir.

Yapılan deneylerin silindirlerinin en üst noktası ile merkezinden itibaren olmak üzere serbest su yüzeylerine olan mesafeleri, ayrıca silindirin en üst noktasından serbest su yüzeyine olan mesafenin çap cinsinden boyutsuz olarak gösterimi, sakin sudaki doğal frekansları ve kütle oranları çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

1 ve 2 numaralı deneyler hariç, normalde her bir deneyde silindirin bir çap mesafesi (8 cm) kadar aşağı inilmektedir. Ancak; suyun kaldırma kuvveti, payandaları (batık hacmi) etkilemektedir. Bu da her durum arasında 1 çap farkının mükemmel şekilde ayarlanmasında bazı hatalara yol açmaktadır. Deneylerin birbirleri arasındaki derinlik farkı Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. 1 ve 2 numaralı deneylerde; serbest su yüzeyine silindiri çok yaklaştırarak, serbest su yüzeyinin bütün etkilerinin gözlenmesi amaçlanmıştır.

⁴⁷ Deneylerde kullanılan silindirin bir çap mesafesi $D = 8$ cm.

Çizelge 4.1 : Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin detayları.

Deney Adı:	Serbest su yüzeyinden silindirin merkezine olan uzaklık (cm)	Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık (cm)	Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık (çap (D) olarak – h/D)	Serbest Sönüm Testleri (ζ) (Birimsiz)	Sakin sudaki doğal frekanslar ($f_{n,w}$) (Hz)	Kütle oranı (m^*)
1.A	6	2	0.25	0.07	1.012	1.65
2.A	9	5	0.625	0.068		
3.A	11.7	7.7	0.963	0.067		
4.A	19.5	15.5	1.938	0.06		
5.A	28.7	24.7	3.088	0.057		
6.A	36.9	32.9	4.113	0.053		
1.B	7.3	3.3	0.413	0.067	0.986	1.79
2.B	10.5	6.5	0.813	0.066		
3.B	12.9	8.9	1.113	0.066		
4.B	20.9	16.9	2.113	0.063		
5.B	30	26	3.25	0.058		
6.B	38.1	34.1	4.263	0.060		
1.C	8.5	4.5	0.563	0.066	0.962	1.93
2.C	11.9	7.9	0.988	0.065		
3.C	14.2	10.2	1.28	0.065		
4.C	22	18	2.25	0.063		
5.C	31.2	27.2	3.4	0.059		
6.C	39.2	35.2	4.4	0.059		

Çizelge 4.2 : Deneylerin birbirleri arasındaki yükseklik farkları.

Deneyler	Farklar (cm)	Farklar (Çap (D) olarak ($\frac{h_{n+1}-h_n}{D}$))
2A-1A	3	0.375
3A-2A	2.7	0.3375
4A-3A	7.8	0.975
5A-4A	9.2	1.15
6A-5A	8.2	1.025
2B-1B	3.2	0.4
3B-2B	2.4	0.3
4B-3B	8	1
5B-4B	9.1	1.1375
6B-5B	8.1	1.0125
2C-1C	3.4	0.425
3C-2C	2.3	0.2875
4C-3C	7.8	0.975
5C-4C	9.2	1.15
6C-5C	8	1

Burada; 4. ve 5. Seviye derinlikteki deneyler arasındaki farkın, silindirin 1 çap farkı olan 8 cm yerine yaklaşık olarak 9 cm olduğu görülmektedir. Bunun sebebi dış çerçevenin üst kenarının yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

4.3 Sistemin Doğal Frekansı

Daha önce de anlatıldığı gibi; bir mühendislik yapısının doğal frekansı, yapısal dayanıklılığı ve yaşam döngüsü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir dış kuvvet bir yapı üzerinde doğal frekansına yakın bir frekansta titreşime neden olduğunda, titreşimler rezonans olarak bilinen çok daha yüksek salınımlara ulaşmaktadır. Bu olayın VIV’de özel bir ismi vardır ve bunun adına “Kenetlenme” denmektedir (Kinaci, 2016). Sudaki doğal frekans denklemi, eklenen kütle (m_a) ve salınan bileşenlerin toplam kütlesi (m_{osc}) terimlerini içeren bir VIV sistemi için aşağıda verilmiştir; mühendislik yapısı, yapısal dayanıklılık ve yaşam döngüsü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Sudaki doğal frekans denklemi; ek su kütlesi (m_a) ve salınan bileşenlerin toplam kütlesi (m_{osc}) terimlerini içeren bir VIV sistemi için ifade aşağıda verilmiştir (4.3).

$$f_{n,w} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{osc} + m_a}} \quad (4.3)$$

Ek su kütlesi, denklem 4.4’te görüldüğü üzere, yer değiştiren sıvı kütlesinin, dairesel silindirin ideal koşulları için 1’e eşit olan eklenen kütle katsayısı “ C_a ” ile çarpılmasıyla elde edilmektedir (Modir vd., 2016).

$$m_a = C_a \cdot m_d \quad (4.4)$$

Burada m_d silindirin yer değiştirdiği suyun kütlesidir ve denklem 4.5’te gösterilmiştir.

$$m_d = \rho \pi \frac{D^2}{4} L \quad (4.5)$$

D silindirin çapı, L silindirin boyu, ρ da akışkanın yoğunluğudur. (4.3) numaralı denkleme göre, sistemin sakin sudaki doğal frekansı ($f_{n,w}$); yüksek oranda yay sertliğine, hareketli parçaların toplam kütlesine ve ek su kütlesine bağlıdır. Buna göre yapılan çalışmalarda; A deneylerinde ($m^*=1.65$) sakin sudaki doğal frekans 1.012 Hz çıkarken, B deneylerinde ($m^*=1.79$) 0.986 Hz, C deneylerinde ($m^*=1.93$) 0.962 Hz bulunmuştur. Yani, eğer deneyler su yerine havada yapılmış olsaydı, ek bir su kütlesi

olmaması nedeniyle A,B ve C deneylerinin doğal frekansları sırasıyla; 1.28 Hz, 1.23 Hz ve 1.18 Hz olacaktır.

4.4 Serbest Sönümleme Testleri

Serbest sönümleme testleri⁴⁸, sönüm oranını (ζ) bulmak için yapılmaktadır. Testler, silindire ilk yer değiştirmeyi sağlayarak ve sudaki silindir salınımının art arda iki tepe noktasını (y_n ve y_{n+1}) gözlemleyerek gerçekleştirilmektedir (Modir vd., 2016). Böylece sönüm oranı formül 4.6'da gösterilmektedir.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{y_n}{y_{n+1}} \quad (4.6)$$

Böylelikle sönüm testleri denklem 4.6'da gösterildiği şekilde; ardışık iki tepe noktasının birbirlerine oranlarının, e tabanındaki logaritmarının sonuçlarının alınmasının ardından 2 ve π sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir

4.5 Deneylerde Kullanılan Bazı Oranlar ve Değerler

Deneylerde kullanılan bazı veriler ve boyutsuz oranlar çizelge 4.3'te verilmiştir. Örneğin; salınım frekansı (f^*), sistemin enerjisi hesaplanırken kullanılan oranlardan biriyken, genlik oranı (A^*), hem sistemin enerjisi için hem de silindirin yapmış olduğu hareketle alakalıdır. Bu oranların değerleri tüm deneylerdeki minimum ve maksimum değerler baz alınarak yazılmıştır.

Çizelge 4.3 : Deneylerde kullanılan bazı oranlar ve değerler.

Kullanılan değişkenler ve oranlar	Semboller	Birimler	Deneylerdeki değerler veya elde edilen sonuçlar (azami ve asgari değerler)
Silindirin çapı	D	cm	8
Silindirin boyu	L	cm	142.3
Silindirin boyunun çapına oranı	AR	-	17.7875
Silindirin boyunun kanalın enine oranı	AR	-	0.949
Reynolds sayısı	Re	-	16000 – 72000
Kütle oranı	m^*	-	1.65 / 1.79 / 1.93
Yay sabiti	k	N/m	766
Serbest sudaki doğal frekans	$f_{n,w}$	1/s	1.012 / 0.986 / 0.962
Hız	U	m/s	0.208 – 0.884
Boyutsuz hız	U^*	-	2.56 – 11.48
Frekans	f	1/s	0.568 – 1.65
Boyutsuzlaştırılmış frekans	f^*	-	0.561 – 1.703
Genlik oranı	A/D	-	0.51 – 1.219

⁴⁸ “Free Decay Tests” teriminden çevrilmiştir.



5. SONUÇLAR

Deneysel çalışmada, kullanılan parametreler ve bileşenleri sönüm oranları açısından kontrol etmek için önce serbest sönümleme testleri yapılmaktadır. Testler arasındaki tutarlılığı kontrol etmek için serbest sönümleme testleri en az beş kez tekrarlanmaktadır. Serbest sönüm testlerinin sonuçları çizelge 5.1’de diğer verilerle birlikte verilmiştir.

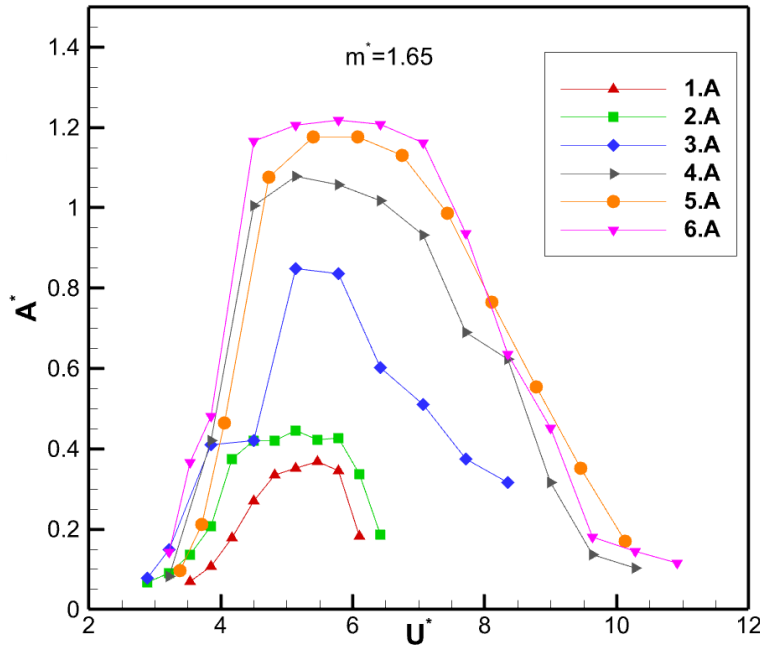
Çizelge 5.1 : Deneylerin serbest sönüm oranları, hem analitik hem de deneysel olarak elde edilen doğal frekansları ve deneylerin hata oranları.

Deney Adı:	Serbest sönüm testleri (ζ) (Birimlessiz)	Denklem 4.3 ile bulunmuş olan sudaki doğal frekanslar ($f_{n,w}$) (Hz)	Deneylerden elde edilen doğal frekanslar (Hz)	Yüzdelik fark
1.A	0.070	1.012	0.983	% 2.85
2.A	0.068	1.012	0.986	% 2.52
3.A	0.067	1.012	0.999	% 1.25
4.A	0.060	1.012	1.001	% 1.12
5.A	0.057	1.012	1.009	% 0.27
6.A	0.053	1.012	1.009	% 0.24
1.B	0.067	0.986	0.959	% 2.77
2.B	0.066	0.986	0.963	% 2.36
3.B	0.066	0.986	0.968	% 1.84
4.B	0.063	0.986	0.975	% 1.11
5.B	0.058	0.986	0.986	% 0.07
6.B	0.600	0.986	0.989	% 0.30
1.C	0.066	0.962	0.952	% 1.07
2.C	0.065	0.962	0.954	% 0.86
3.C	0.065	0.962	0.961	% 0.13
4.C	0.063	0.962	0.956	% 0.61
5.C	0.059	0.962	0.958	% 0.48
6.C	0.059	0.962	0.961	% 0.12

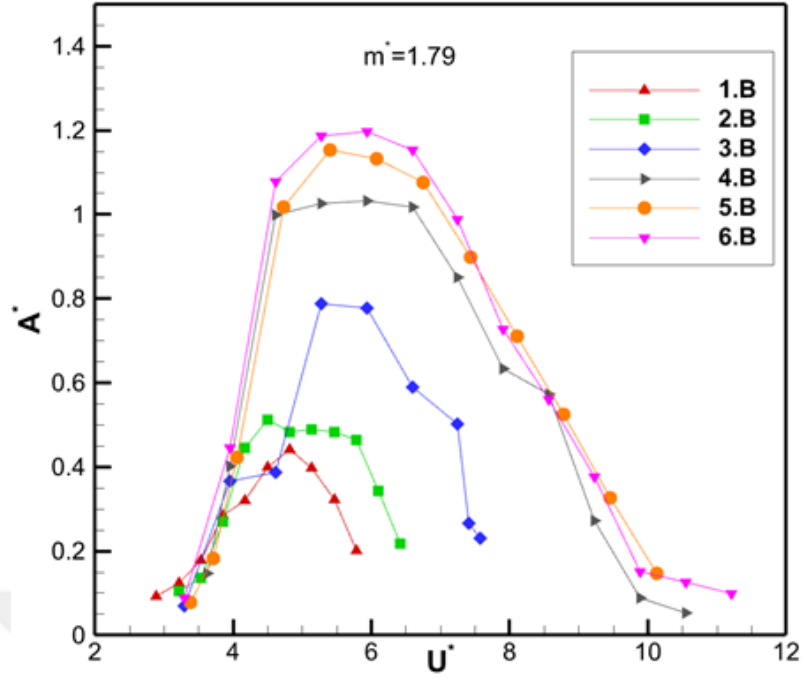
5.1 Batma Derinliğinin Etkisi

Daha önce de bahsedildiği üzere, yapılan deneylerde 6 adet farklı derinlik bulunmaktadır. İlk derinlik, silindirin en üst noktasıyla serbest su yüzeyi arasındaki

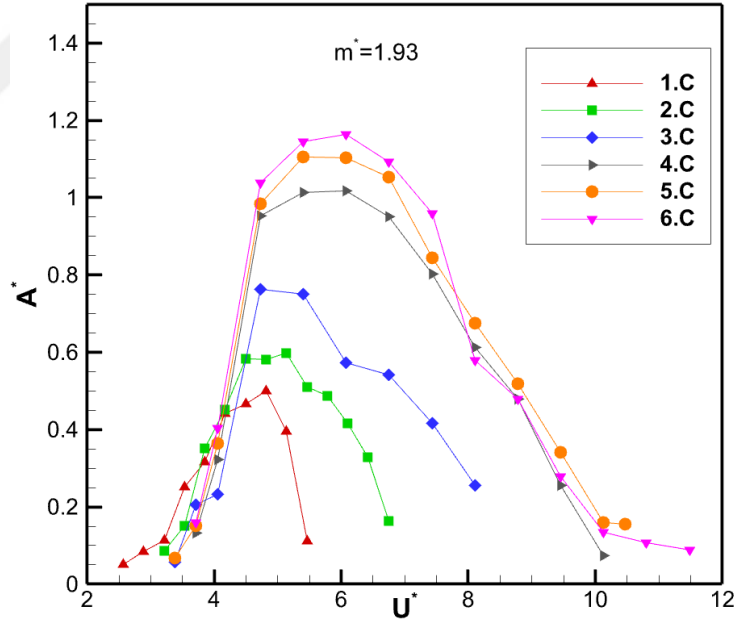
mesafe olan 2 cm'dir. Bu seviyede derinlikteki deneyler 1 numara ile adlandırılmaktadır (1.A , 1.B , 1.C gibi). İkinci derinlikteki deneyde silindirin en üst noktasıyla serbest su yüzeyi arasındaki mesafe 5 cm'dir. Buradaki deneyler 2 numara ile adlandırılmış (2.A , 2.B , 2.C gibi). Bir alt derinlikteki deneyler, silindirin en üst noktasıyla serbest su yüzeyi arasındaki derinlik olarak yaklaşık 8 cm'de yapılmış olup, 3 numara olarak adlandırılmışlardır (3.A , 3.B , 3.C gibi). Bu derinlikteki deneylerden sonra her bir seviye için yaklaşık olarak silindirin çapı olan 8 cm kadar daha aşağı inilmiştir ve 6. seviye derinliğe kadar deneylere devam edilmiştir. Eğer silindirin merkezinden serbest su yüzeyine olan mesafe hesaplanmak istenirse, serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan mesafeye, silindirin yarı çapı olan 4 cm eklenerek bu mesafe bulunabilmektedir. Sabit kütle oranlarında, farklı derinlikler için yapılan deneylerin genlik ve hız sonuçları boyutsuz olarak şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te gösterilmiştir. Şekil 5.1'deki deneylerin kütle oranı $m^* = 1.65$ iken, şekil 5.2'deki için $m^* = 1.79$, şekil 5.3'teki için ise $m^* = 1.93$ 'tür.



Şekil 5.1 : Kütle oranı $m^* = 1.65$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.2 : Kütle oranı $m^* = 1.79$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.3 : Kütle oranı $m^* = 1.93$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin genliklerinin karşılaştırılması.

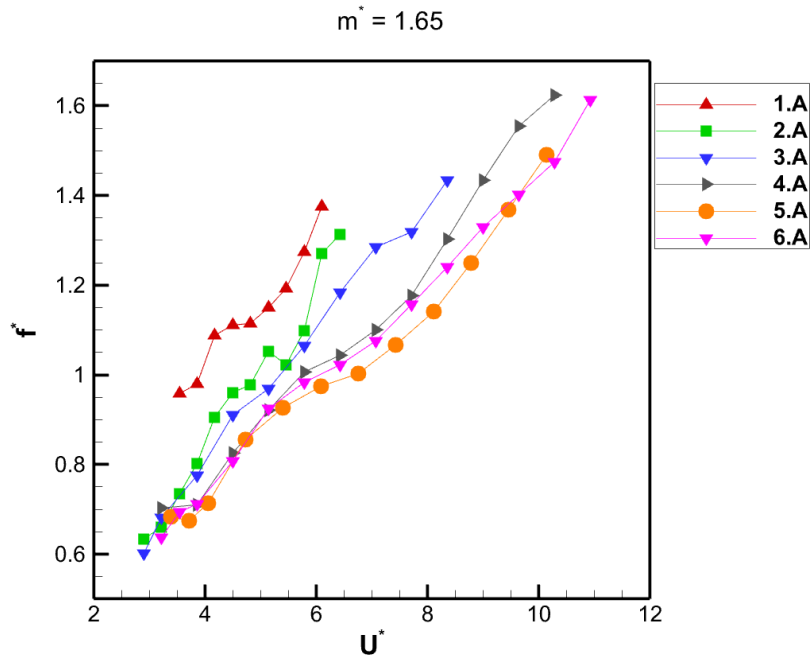
Toplam 6 farklı derinliğin olduğu bu deneylerde, derinlikler en sığdan en derine olarak seviye seviye 1' den 6' ya kadar adlandırılmıştır. Bu şekillerde sunulan sonuçlarda, aynı seviyedeki derinlik için aynı renk kullanılmıştır. En sığ derinlik olan 1. seviye kırmızı renkle temsil edilirken; en derin olan 6. seviye pembe ile gösterilmiştir. Ara seviyelerin temsil renkleri şekillerde görülmektedir. Gri renkteki deneyler, silindirin

en üst kısmının serbest su yüzeyinden 16 cm aşağıda olduğu 4. seviye derinlikte yapılmıştır. Turuncu renk, 5. seviye derinlik olan su yüzeyinde 25 cm yapılan deneyleri temsil etmektedir. Son olarak, 6. seviyedeki deneyler ise 33 cm derinlikte yapılmıştır

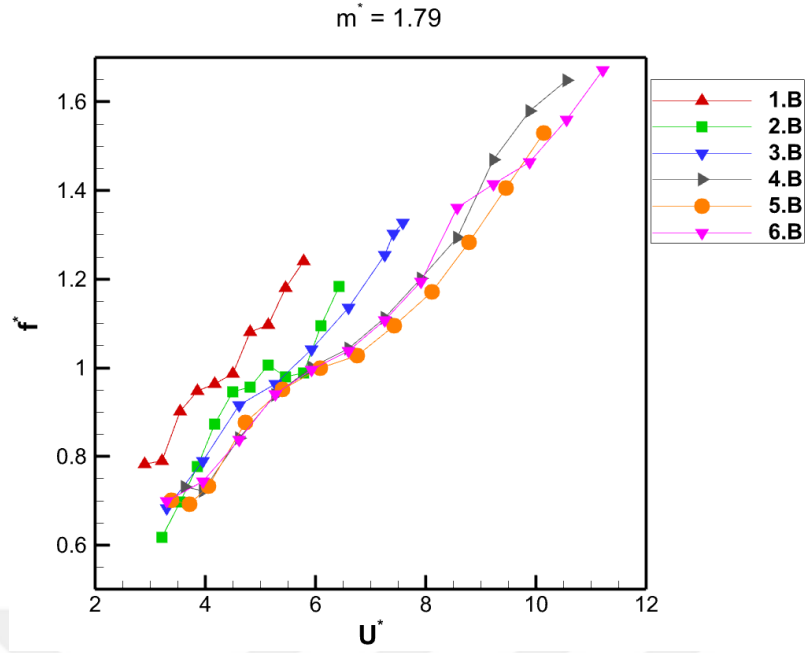
Kırmızı renkle gösterilen deneyler, aynı hızlardaki en düşük genliğe sahip deney olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca kenetlenme pozisyonundaki genlik değeri de en düşük deneylerdir. Yapılan deneylerde daha derine inildikçe aynı hızlardaki genlik değerleri git gide artmaktadır. Örneğin, U^* değeri 5.8 olarak alındığında, en derindeki deneylerin en büyük genliklere sahip olduğu gözlenmektedir. Aynı şekilde, kenetlenme durumunda da maksimum genliğe sahip deneylerin en derinde yapılmış deneyler olan pembe renkli deneyler olduğu anlaşılmaktadır.

Ek olarak, üst bölge, alt bölge ve desenkronizasyon bölgesi serbest su bölgesinin etkilerinden oldukça fazla etkilenirken, başlangıç bölgesinin çok fazla etkilenmediği gözlenmektedir.

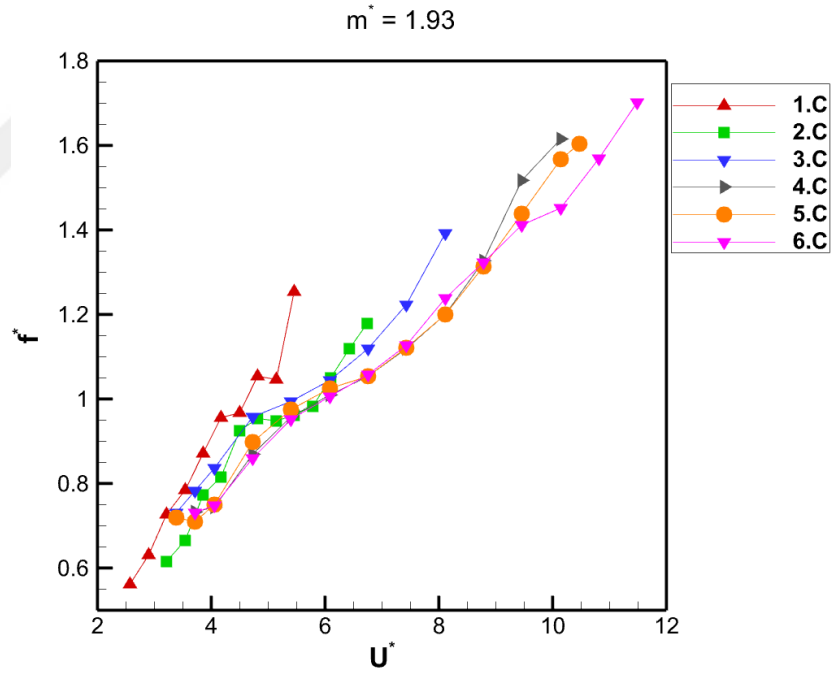
Sabit kütle oranlı deneylerin frekans ve hız parametrelerinin boyutsuzlaştırılmış olarak şekil 5.4, 5.5 ve 5.6’da görülmektedir. Şekil 5.4’teki deneylerin kütle oranı $m^* = 1.65$ iken, şekil 5.5’teki için $m^* = 1.79$, şekil 5.6’daki için ise $m^* = 1.93$ ’tür.



Şekil 5.4 : Kütle oranı $m^* = 1.65$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.



Şekil 5.5 : Kütle oranı $m^* = 1.79$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.



Şekil 5.6 : Kütle oranı $m^* = 1.93$ olan, farklı yüksekliklerde yapılan deneylerin frekanslarının karşılaştırılması.

Aynı şekilde kırmızı renkle gösterilen grafikteki deneyler, serbest su yüzeyine en yakın olan deneylerdir. Yeşil renkteki deneyler 2. Seviye derinlikte yapılmış deneylerdir. Mavi renkteki deneyler, 3. Derinlikte yapılmış deneyleri göstermektedir. Gri renkteki deneyler, 4. Derinliği temsil etmektedir ki burada da serbest su yüzeyi ile silindirin üst kısmının mesafesi yaklaşık 16 cm'dir. Turuncu renkteki deneyler, en derin

deneyden bir önceki deneyleri göstermektedir, buradaki serbest su yüzeyi ile silindirin en üst kısmının mesafesi yaklaşık 25 cm'dir. Son olarak, pembe renkteki deneyler, en derin deneylerdir ve silindirin en üst kısmının serbest su yüzeyinden uzaklığı yaklaşık 33 cm'dir.

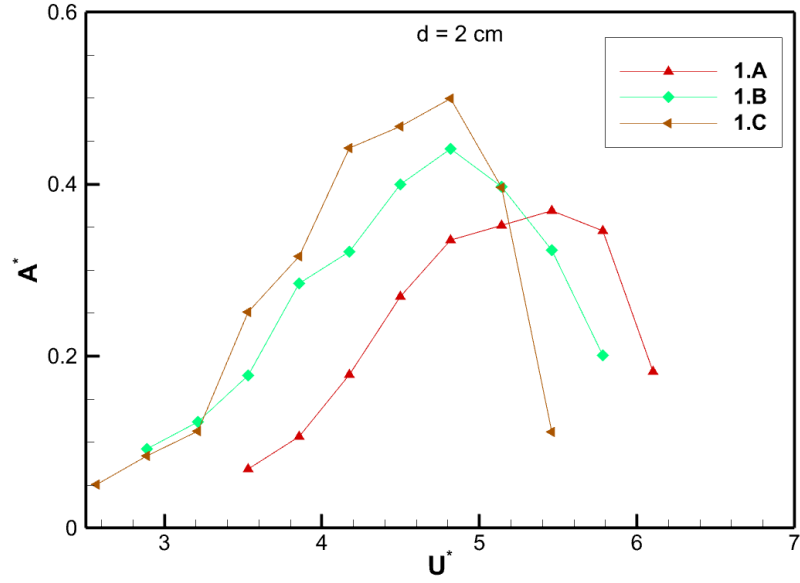
Burada, kırmızı renkli deneyler serbest su yüzeyine en yakın deneyler olup, aynı hızlar ele alındığında en yüksek frekans değeri bu deneye aittir. Örneğin, $U^* = 5$ değeri alındığında, en yüksek frekans değerinin serbest su yüzeyine en yakın deney verisinin olduğu gözlenmektedir. Daha derine inildiğinde, yine aynı hızlarda frekans değerlerinin en derin deneyde yaklaşık olarak en düşük olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca, bütün deneylerdeki frekans verileri incelendiğinde, frekansların neredeyse lineer olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Ek olarak; hem boyutsuz genlik – hız grafikleri hem de boyutsuz frekans – hız grafikleri incelendiğinde, frekansın akışkanın hızı arttıkça arttığı gözlemlenirken, genlikte kenetlenmeye kadar artıp, kenetlenme noktasında maksimuma ulaşp, ardından düştüğü sonuçlarına ulaşılmıştır. Yani buradan şu sonuç çıkartılabilmektedir: Frekans enerji ile ilgilidir, sistemin salınım frekansı arttıkça, sistemin doğal frekansından uzaklaşmıştır. Yani sistem daha fazla akıntı enerjisi altındayken, buna tepki olarak sistemde daha az genlik oluşmaktadır. Bu nedenle, enerji konusunda hem frekans, hem de genlik ikisi birlikte önemli bir rol oynamaktadır.

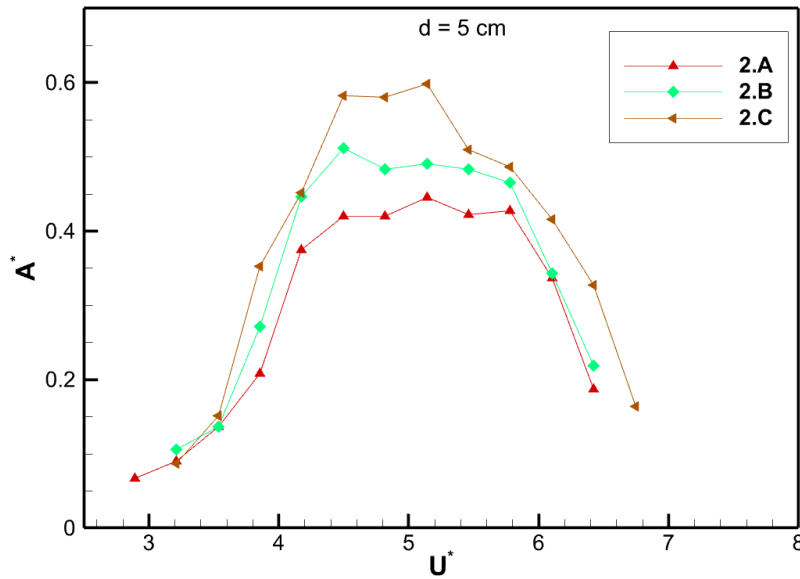
5.2 Serbest Su Yüzeyi Yakınında Kütle Oranının Etkisi

Deneylerde 3 farklı kütle oranı kullanılmıştır. Bunlar A, B ve C şeklinde gösterilmiştir. A kütle oranına karşılık gelen değer $m^* = 1.65$ iken, B kütle oranına karşılık gelen değer $m^* = 1.79$ 'dur. C kütle oranına karşılık gelen değer ise $m^* = 1.93$ 'tür. Şekil 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12'de gösterildiği üzere deneylerin derinlikleri sabitken, farklı kütle oranlarındaki boyutsuz genlikleri ile boyutsuz hız parametrelerinin grafikleri verilmiştir. Şekil 5.7'deki deneylerin silindir ile serbest su yüzeyi arası mesafesi $d = 2$ cm, şekil 5.8'de bu sayı $d = 6$ cm, şekil 5.9'da yaklaşık olarak $d = 8$ cm, şekil 5.10'da yaklaşık olarak $d = 16$ cm, şekil 5.11'de yaklaşık olarak $d = 25$ cm ve şekil 5.12'de bu mesafe yaklaşık olarak 33 cm'dir.



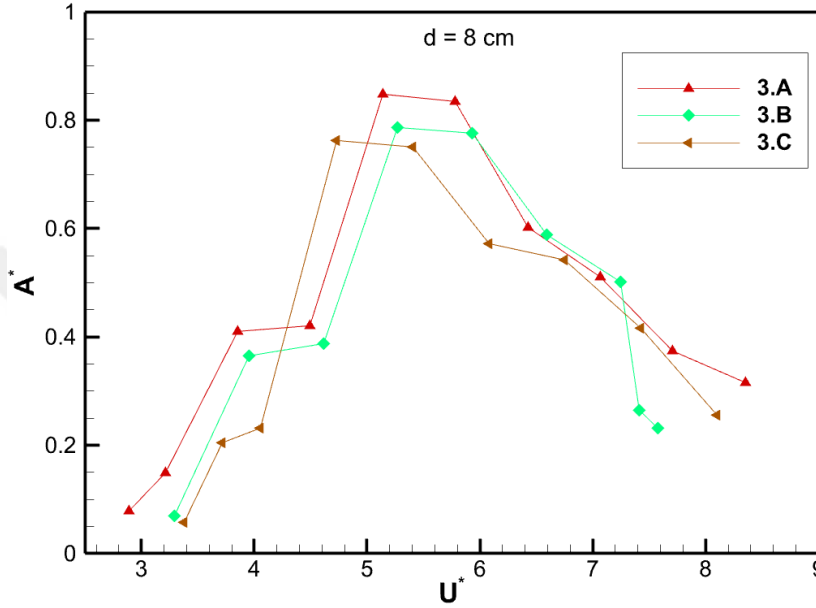
Şekil 5.7 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \approx 2$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Şekil 5.7 incelendiğinde, serbest su yüzeyinin yoğun olarak etkisi altında kaldığı serbest su yüzeyine en yakın olan grafiklerdir. Burada, kütle oranı düşük olan sistemin deneyinde (1.A deneyi); sistemin, üst bölgeye ve kenetlenme noktasına daha geç girdiği ve bu seviyenin daha düşük bir genlik değeri verdiği görülmektedir. Ayrıca aynı hızlar ele alındığında, en düşük genlik seviyesinin yine kütle oranı en düşük olan deneyde olduğu gözlenmektedir. Serbest su yüzeyi etkilerinden ötürü, desenkronizasyon bölgesi burada gözlenmemiştir.



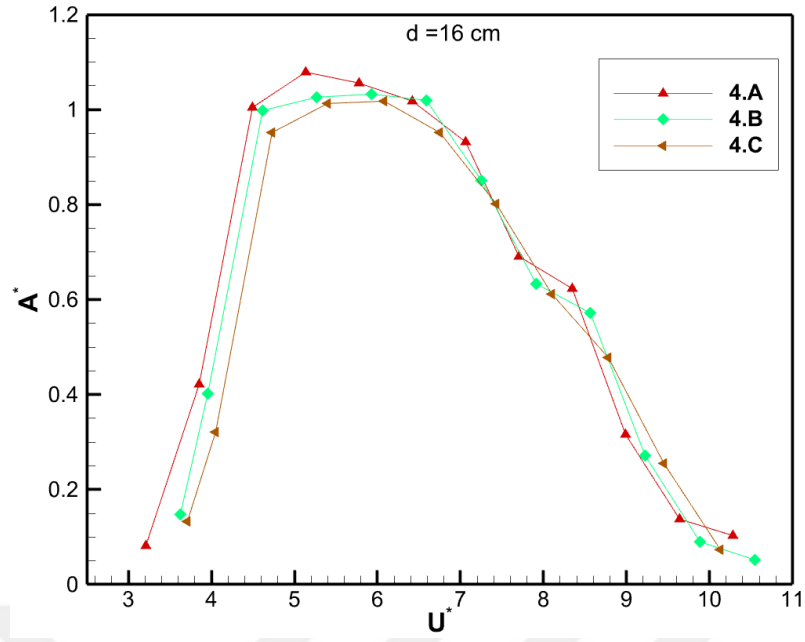
Şekil 5.8 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \approx 5$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Şekil 5.8 derinlemesine incelendiğinde ki buradaki deneyler, sistemin yapılan ilk deneye göre 3 cm daha derine gittiği deneylerdir. Burada, üst bölgeye giriş ve kenetlenme noktaları 3 kütle oranlı deney için de hemen hemen aynıdır ve yine en yüksek değer, en büyük kütle oranına sahip olan 2.C deneyine aittir. Serbest su yüzeyine en yakın deneylerle benzer olarak; serbest su yüzeyi etkileri nedeni ile bu derinlikte de desenkronizasyon bölgesi görülememektedir.



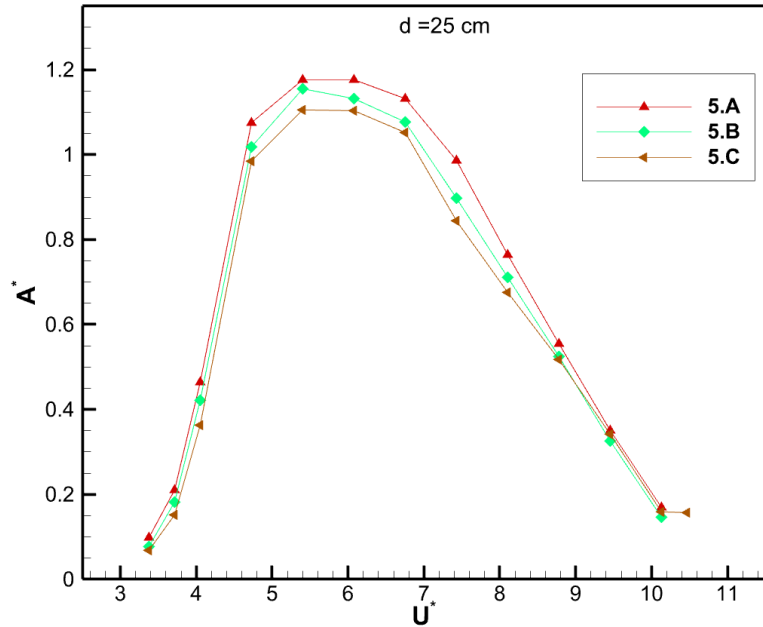
Şekil 5.9 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \approx 8$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Şekil 5.9'da ise, serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan mesafe yaklaşık 8 cm'dir ve yavaş yavaş serbest su yüzeyinin etkisinden çıkılmaya başlanmıştır ancak serbest su yüzeyi etkisinin deneyler üzerinde etkisi hala gözükmemektedir çünkü deneydeki sistemlerin yapmış olduğu genlikler hala düzensizdir. Yapılan ilk 2 deneyin aksine artık buradaki derinliklerden sonra kütle oranı en düşük olan yani en hafif olan deney sisteminin aynı hızlarda daha yüksek genlikle cevap verdiği görülmektedir.



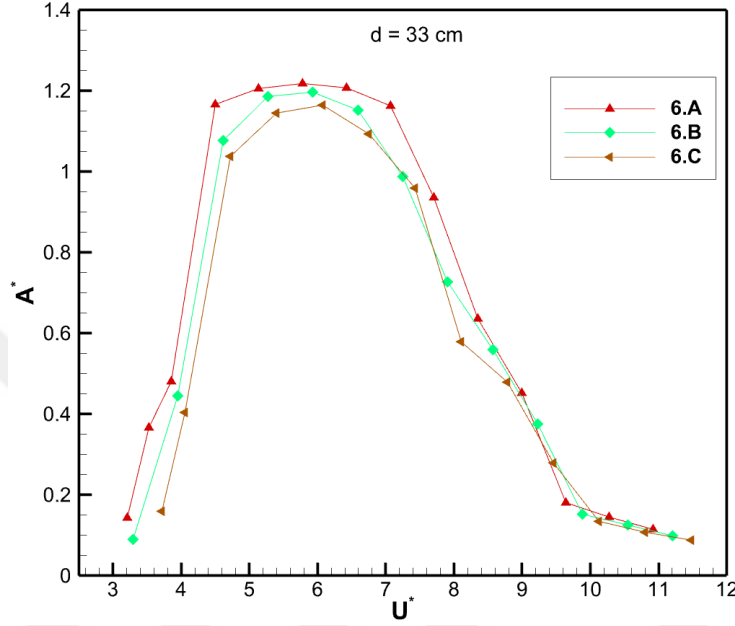
Şekil 5.10 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 16$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Şekil 5.10’da deneylerin yapıldığı derinlik yaklaşık 16 cm olmuştur ve buradaki deneyler üzerindeki serbest su yüzeyi etkileri gittikçe azalmıştır. Burada da aynı hızlarda örneğin $U^* = 5.5$ değerinde, en yüksek genliğe sahip deneyin en hafif ve en düşük kütle oranına sahip olan 4.A olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.11 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 25$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Serbest su yüzeyinden silindirin en üst seviyesine olan uzaklığı yaklaşık 25 cm olan deneylerin genlik-hız grafiği şekil 5.11 verilmiştir. Bu seviyede yapılan deneyler üzerinde artık hiçbir serbest su yüzeyi etkisi bulunmamaktadır. Yine aynı hızlarda $U^* = 6$ gibi bir hız değeri alınırsa, en yüksek genliğin en düşük kütle oranına sahip olan 5.A'nın yaptığı belirlenmiştir.



Şekil 5.12 : Serbest su yüzeyinden yaklaşık $d \cong 33$ cm derinlikte yapılan deneylerin genliklerinin kütle oranlarına göre karşılaştırılması.

Şekil 5.12’de görülmek üzere, en derin derinlikteki deneyler serbest su yüzeyinden yaklaşık 33 cm derinlikte yapılmıştır. Burada da artık serbest su yüzeyi etkisinden asla söz edilememektedir ve benzer olarak kütle oranı en düşük sistemin en yüksek genliği verdiği görülmüştür. Ek olarak, desenkronizasyon bölgesinin en açıkça gözlemlendiği aralığın da bu derinlikte olduğu görülmektedir.

Genlik – hız şekillerindeki (şekil 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12) d mesafeleri serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık olmak üzere yaklaşık olarak verilmektedir. Çizelge 4.1’e tekrar bakılırsa; B ve C kütle oranlarına sahip deneyler, dışarıdan ekstra ağırlık eklenerek yapıldığı için suya ilk anda daha çok batmaktadırlar. Bu da, d derinliklerini değiştirmektedir. Normalde deneylerin başlangıçta, bir önceki deneyle her bir derinlik farkı bir çap mesafesi olan 8 cm kadar derine inmesi planlanırken, 4. Seviye derinlikte yapılan deneyler ($d \cong 16$ cm) ile 5. Seviye derinlikte yapılan deneylerin ($d \cong 25$ cm) arasında bulunan 9 cm’lik fark, sistemin dış çerçevesinin yüksekliği ile alakalıdır.

6. YORUMLAR

Bu tezde, akış kaynaklı hareketlerin (FIM) öne çıkan alt dallarından biri olan girdap kaynaklı titreşim olgusu, serbest su yüzeyi etkisi açısından deney sonuçları üzerinden anlatılmıştır. Akışkan-yapı etkileşimi problemleri lineer değildir ve tek bir teori ile tam olarak temsil edilmesi çok zordur. Bu nedenle; yapılan araştırmalar ve deneyler, bir VIV sistemine ait olan tek dereceli serbestlikle hareket eden dairesel bir silindirin, bir akışkan içindeki farklı derinliklerde kullanılırken yaptığı genliklerin ve frekansların farklılıklarını ortaya çıkartmayı amaçlamıştır.

Aynı hız ve kütle oranına sahip deney sonuçları incelendiğinde batma derinliği azaldıkça genlik oranının da azaldığı gözlenmiştir. Bir akışkan, silindirin iz bölgesinde çift yönlü ve periyodik girdaplar kopartmaktadır. Bu girdaplar, hareketli silindiri yukarı yönde itmektedir. Serbest su yüzeyi etkisindeki silindirin üst bölgesinde yeterince su hacmi olmadığı için, silindirin yukarısında yeterli sayıda girdap oluşamamaktadır. Bu durumda, silindir tekrar aşağı yönlü itilememektedir. Serbest su yüzeyi, VIV sistemini bu şekilde etkilemektedir. Ancak bu yorumlar deney sonuçları gözetilerek yapılmıştır; daha sağlam kanıtlar için akımın görüntülenmesi gerekmektedir.

Genlik oranı gibi frekanslar da aynı hız ve kütle oranlarında karşılaştırıldığında, batma derinliği azaldıkça frekansların arttığı görülmektedir. Buna ek olarak, yapılan bütün deneylerin frekans ve hız grafikleri incelendiğinde, sudaki doğal frekansların neredeyse lineer olarak arttığı görülmektedir.

Sistem başta hareketsizken, akışkan hızı artarak silindirin etrafından girdap kopartmaya başlamaktadır. Sistem, önce başlangıç bölgesine oradan da üst bölgeye girmekte; daha sonra girdap frekansı sistemin doğal frekansı ile eşitlenmekte ve maksimum genlik bu şekilde elde edilmektedir. Akışkanın hızı ve kopan girdapların frekansları artmaya devam ettikçe, sistemin genliği düşmektedir. Akışkanın hız ve frekansı çok büyük değerlere ulaşmasına rağmen, hareket genliği düşmektedir ve böylece sistem en sonunda desenkronizasyon bölgesine girmektedir. Bir başka deyişle; deneylerdeki akışkanın hızı arttıkça, salınımın frekansı da artmasına rağmen,

sistem buna daha az genlikle yanıt vermektedir. Sonuç olarak, VIV sisteminden enerji elde edilme konusunda sadece frekansın değil, genliğin de önemli olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, girdap kaynaklı titreşim sistemleri için enerji üretirken veya su pompalarken çok yüksek hızlar, belli bir noktadan sonra (kenetlenme noktası) iyi değildir.

Özetle, bu çalışmada doğaya birçok zararı bulunan ve bir gün tükenecek olan geleneksel enerji kaynaklarını kullanmaktansa, yeni sayılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarından girdap kaynaklı titreşim enerji dönüşüm sistemi ve direkt olarak girdap kaynaklı titreşimler üzerinde durulmuştur. Girdap kaynaklı titreşim sistemi şayet serbest su yüzeyine yaklaştırılır ve o bölgede çalıştırılırsa; serbest yüzey etkileri ile genlik oranının düşmesi beklenen bir durumdur ve yapılan deneylerle bu sonuçlara ulaşılmıştır. Yüksek genlik değerleri önemli olduğundan, VIV cihazı pompa olarak kullanılıyorsa veya VIV sisteminden enerji üretmek amaçlanıyorsa, serbest yüzey etkileri gözlemlenmeli, dikkate alınmalı ve bu etkilerden kaçınılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Akgul, T. F.** (2021). *Ultrasonik (Ultrasonic) Sensör Nedir? Nasıl Çalışır? Ne İşe Yarar?* Robotistan. <https://maker.robotistan.com/ultrasonic-sensor/>
- Aktaş, A., Kırççek, Y., & Şener, A. Ş.** (2019). Rüzgâr ve Deniz Akıntı Enerjisinin Tahrik Ettiği Güç Üretim Sisteminin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 141–152. <https://doi.org/10.29109/gujsc.452124>
- Algüzey, A. K.** (2020). *Petrol Nedir? Nasıl Oluşur, Nasıl Çıkarılır, Nasıl İşlenir? Nerelerde Kullanılır?* <https://evrimagaci.org/petrol-nedir-nasil-olusur-nasil-cikarilir-nasil-islenir-nerelerde-kullanilir-8223>
- Antman, S. S.** (2006). *A Panorama of Hungarian Mathematics in the Twentieth Century I* (J. Horváth & L. Márki (Ed.)). Janos Bolyai Mathematical Society and Springer-Verlag.
- Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı.** (t.y.). Erişim: 01 Mart 2020 <http://www.istanbul-cemberci.com/ata.pdf>
- Batchelor, G. K.** (1967). *AN INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS* (2000. baskı). Cambridge University Press.
- Bernitsas, M. M. & Raghavan, K.** (2009). *FLUID MOTON ENERGY CONVERTER* (Patent Sayı US 7,493,759 B2).
- Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. H.** (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(4), 1–15. <https://doi.org/10.1115/1.2957913>
- Blevins, R. D.** (2001). *Flow-Induced Vibration* (2. baskı). KRIEGER PUBLISHING COMPANY.
- Bloor, M. S.** (1964). *The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder*. Cambridge University Press.
- Bonheure, D., Gazzola, F., & Sperone, G.** (2019). Eight(y) mathematical questions on fluids and structures. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, Rendiconti Lincei Matematica e Applicazioni*, 30(4), 759–815. <https://doi.org/10.4171/RLM/870>
- BP.** (2020). Statistical Review of World Energy. *Statistical Review of World Energy* (C. 69). bp.com/statisticalreview
- Büyükyıldırım, Ü.** (2013). *Tacoma Narrows Köprüsü neden yıkıldı?* <https://www.bilim.org/tacoma-narrows-koprusu-neden-yikildi/>

- Çağlar, S. (2017). *Ders Çıkartılan Bir Kaza: Tacoma Narrows Köprüsü Çöküşü*. <https://www.matematiksel.org/tacoma-narrows-koprusu/>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2008). *AKIŞKANLAR MEKANİĞİ*. İzmir Güven Kitabevi.
- Chernobyl: the true scale of the accident.** (2005). <https://web.archive.org/web/20160911014549/http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/>
- Chisholm, H. (1911). One or more of the preceding sentences incorporates text from a publication now in the public domain: “Petroleum”. İçinde *Encyclopædia Britannica* (11th ed.). Cambridge University Press.
- Chung, M. H. (2016). Two-degree-of-freedom vortex induced vibration of low-mass horizontal circular cylinder near a free surface at low Reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57, 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.10.004>
- Denchak, M. (2021). *The Paris Agreement What is the Paris Agreement?* NRDC. <https://www.nrdc.org/stories/paris-climate-agreement-everything-you-need-know>
- Duranay, A., & Kinaci, O. K. (2020). Enhancing two-dimensional computational approach for vortex-induced vibrations by scaling lift force. *Ocean Engineering*, 217(June), 107620. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107620>
- Farago, C. (1999). *Biography and Early Art Criticism of Leonardo da Vinci*. Garland Publishing Inc.
- Farell, C. (1981). Flow Around Fixed Circular Cylinders: Fluctuating Loads. *Journal of Engineering Mechanics*, 107(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002725>
- Fractional distillation of crude oil.** (2009). SHALOM EDUCATION GSCE Chemistry <https://www.shalom-education.com/courses/gcsechemistry/lessons/organic-chemistry/topic/fractional-distillation/>
- Fukushima faced 14-metre tsunami.** (2011). World Nuclear News. https://web.archive.org/web/20151211003056/http://www.world-nuclear-news.org/RS_Fukushima_faced_14-metre_tsunami_2303113.html
- Gerrard, J. H. (1978). The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsta.1978.0020>
- Gülsaç, I. I. (2009). *Okyanuslardan Gelen Enerji (Dalga Enerjisi)*. Bilim ve Teknik. <http://www.sureyelken.com/etiket/akinti-enerjisi/>
- Hausfather, Z. (2018). *Coal in China: Estimating Deaths per GW-year*. <https://web.archive.org/web/20200201081522/http://berkeleyearth.org/deaths-per-gigawatt-year/>

- IAEA says 170,000 people evacuated from area near damaged Japan nuclear plant.** (2011). The Associated Press - The Canadian Pres. <https://web.archive.org/web/20110325012712/http://www.google.com/hostednews/canadianpress/article/ALeqM5h27to-uk4j6utkt4KKWlUQJX6AHA?docId=6230208>
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** (2006). *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Radiological Assessment Reports Series No. 8*, IAEA, Vienna.
- Kapluhan, E.** (2014). ENERJİ COĞRAFYASI AÇISINDAN BİR İNCELEME: BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ VE TÜRKİYE'DEKİ KULLANIM DURUMU. *ULUSLARARASI AVRASYA SOSYAL BİLİMLER DERGİSİ*, 5(17), 65–86. <https://doi.org/10.14781/mcd.98631>
- Karaoğlu, B.** (2019). *Von Karman Vortex Nedir?* Sanal Şantiye. <https://www.sanalsantiye.com/von-karman-vortex-nedir/>
- Karasu, İ.** (2019). Silindir Etrafındaki Kararsız Akışın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Olarak İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 77–84. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.560925>
- Kaya, K., & Koç, E.** (2015). Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36–47.
- Kaya, K., Şenel, M. C., & Koç, E.** (2018). DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ. *Technological Applied Sciences*. <https://doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.3.2A0152>. Kaya
- Kibert, J. C.** (2016). *Sustainable Construction: Green Building Design and Deliver* (4th baskı). John Wiley & Sons, Inc.,.
- Kinaci, O. K.** (2016). Girdap kaynaklı titreşimler. *GMO-SHIPMAR*, 51–65.
- Küçükaya, E.** (2017). *Jeotermal Nedir? Jeotermal Enerji Nedir?* enerjiportali. <https://www.enerjiportali.com/jeotermal-nedir-jeotermal-enerji-nedir/>
- Kutay, M. G.** (2010). *ELASTİK YAYLAR*.
- Lipscy, P. Y., Kushida, K. E., & Incerti, T.** (2013). The Fukushima Disaster and Japan's Nuclear Plant Vulnerability in Comparative Perspective. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/https://web.stanford.edu/~plipscy/LipscyKushidaIncertiEST2013.pdf>
- Lu, M. L., & Chan, J. K.** (2015). Rational design equations for the aeolian vibration of overhead power lines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2015-Septe*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286498>
- Lu, Ming L., & Chan, J. K.** (2007). An efficient algorithm for Aeolian vibration of single conductor with multiple dampers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1822–1829. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899779>

- M. Magurean, A., G. Pop, O., G. Pocola, A., Serban, A., & C. Balan, M.** (2019). Einstein's Equation in Nuclear and Solar Energy. *Thermodynamics and Energy Engineering*, December. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90574>
- Mert, S.** (2012). *DALGA ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMASI*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Modir, A., & Goudarzi, N.** (2019). Experimental investigation of Reynolds number and spring stiffness effects on vortex induced vibrations of a rigid circular cylinder. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 74, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.016>
- Modir, A., Kahrom, M., & Farshidianfar, A.** (2016). Mass ratio effect on vortex induced vibration of a flexibly mounted circular cylinder, an experimental study. *International Journal of Marine Energy*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214166916300303?via%3Dihub>
- Morgan, M. R.** (2004). Climate change 2001. *Weather* (C. 59, Sayı 8, ss. 198-236). <https://doi.org/10.1256/wea.58.04>
- Patil, A.** (2016). *Four Different Types of Springs*. Creative Mechanisms Blog. <https://www.creativemechanisms.com/blog/four-different-types-of-springs>
- Raghavan, K.** (2007). *Energy Extraction from a Steady Flow Using Vortex Induced Vibration*. The University of Michigan.
- Roshko, A.** (1961). Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 54(3), 565–575. <https://doi.org/10.1017/S0022112072000874>
- Rott, N.** (1990). Note on the History of the Reynolds Number. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 22(1), 1–12. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000245>
- Sarısan, H.** (2019). *Rüzgar Enerjisi Nedir, Kullanım Alanları Nelerdir?* sehatek. <https://sehatek.com.tr/blog/ruzgar-enerjisi-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>
- Schewe, G.** (1983). On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 133(1983), 265–285. <https://doi.org/10.1017/S0022112083001913>
- Schlichting, H.** (1979). *Boundary-layer theory* (7. baskı). New York : McGraw-Hill.
- Şeremet, Ö.** (2019). *Ultrasonik Mesafe Sensörü Nedir? Nasıl Kullanılır?* Özgür Şeremet Bilişim Teknolojileri Eğitimcileri Derneği. <https://ozgurseremet.com/ultrasonik-mesafe-sensoru-nedir-nasil-kullanilir/>
- Sharma, R., Kim, T.-W., Sha, O. P., & Misra, S. C.** (2010). Issues in offshore platform research - Part 1: Semi-submersibles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(3), 155–170. <https://doi.org/10.2478/ijnaoe-2013-0032>

- Sheridan, J., Lin, J.-C., & Rockwell, D.** (1997). Flow past a rectangular cylinder close to a free surface. *J. Fluid Mech.*, 330, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106118>
- Şimşek, Ç.** (2015). *Gelgit Enerjisi Santrali Nedir*. Mühendis Beyinler. <https://www.muhendisbeyinler.net/gelgit-enerjisi-santrali-nedir/>
- Smythe, D.** (2011). An objective nuclear accident magnitude scale for quantification of severe and catastrophic events. *Physics Today*. <https://doi.org/10.1063/pt.4.0509>
- Sumer, B. M., & Fredsøe, J.** (1997). Hydrodynamics around cylindrical structures (revised edition). İçinde *Hydrodynamics around Cylindrical Structures (Revised Edition)* (C. 26). <https://doi.org/10.1142/6248>
- Tacoma Narrows Köprüsü Neden Yıkıldı?** (2020). Sanal Şantiye. <https://www.sanalsantiye.com/tacoma-narrow-koprusu/>
- Topal, E.** (2020). *Tacoma Narrows Köprüsü*. <https://dremretopal.com/tacoma-narrows-koprusu/>
- Üçgül, İ., & Akgül, G.** (2010). Biyokütle Teknolojisi. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 1(1), 3–11.
- Uyar, F.** (2017). *Gelgit Enerjisi Nedir? Medcezir Nedir?* Enerji Bes- Temiz Enerji Portalı. <https://www.enerjibes.com/gelgit-enerjisi-nedir/>
- Wang, Z., Li, H.-N., & Song, G.** (2021). Aeolian Vibration Control of Power Transmission Line Using Stockbridge Type Dampers — A Review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1142/S0219455421300019>
- Wave Formation.** (2019). University of British Columbia Faculty of Science https://www.eoas.ubc.ca/courses/atasc113/sailing/met_concepts/08-met-waves/8a-wave-formation/index.html
- Williamson, C. H. K.** (1988). The existence of two stages in the transition to three-dimensionality of a cylinder wake. *Physics of Fluids*, 31(11), 3165. <https://doi.org/10.1063/1.866925>
- Yaman, M., & Haşıl, F.** (2018). *HİDROELEKTRİK SANTRALİ (HES) UYGULAMALARINA*. 5, 145–156.
- Yücel, A.** (2013). *36 trilyon kW'lık Enerji Denizi*. <https://www.dunya.com/sektorler/enerji/36-trilyon-kwlik-enerji-denizi-haberi-215637>
- Zdravkovich, M. M.** (2003). *Flow around circular cylinders: Volume 2: Applications* (Vol. 2). Oxford university press.
- Zhu, H., & Yao, J.** (2015). Numerical evaluation of passive control of VIV by small control rods. *Applied Ocean Research*, 51, 93–116. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.03.003>
- Zou, Q., Ding, L., Wang, H., Wang, J., & Zhang, L.** (2019). Two-degree-of-freedom flow-induced vibration of a rotating circular cylinder. *Ocean Engineering*, 191(April), 106505. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106505>



EKLER

EK A : Kütle oranı $m^* = 1.65$ olan veriler ve grafikler

EK B : Kütle oranı $m^* = 1.79$ olan veriler ve grafikler

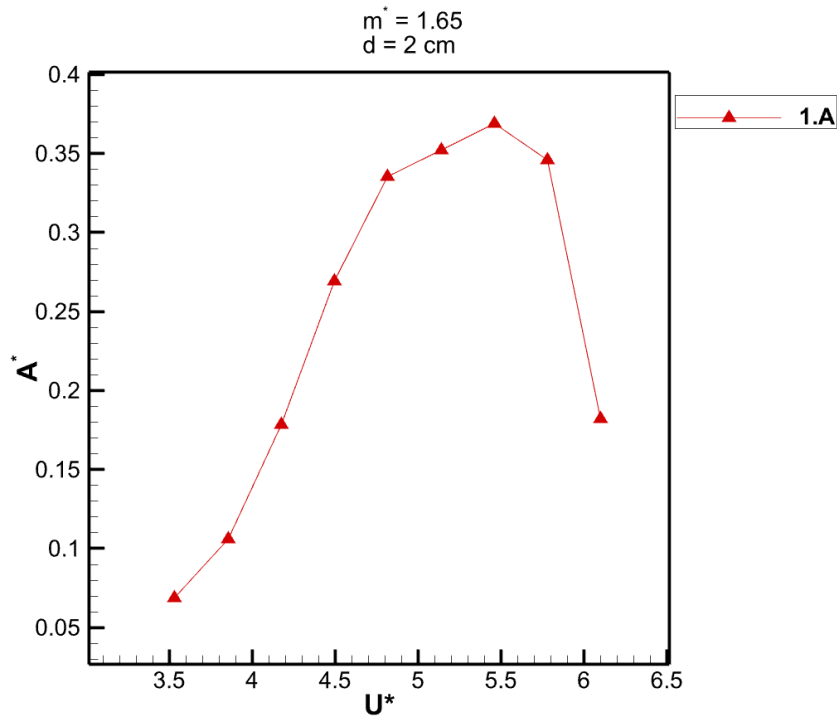
EK C : Kütle oranı $m^* = 1.93$ olan veriler ve grafikler



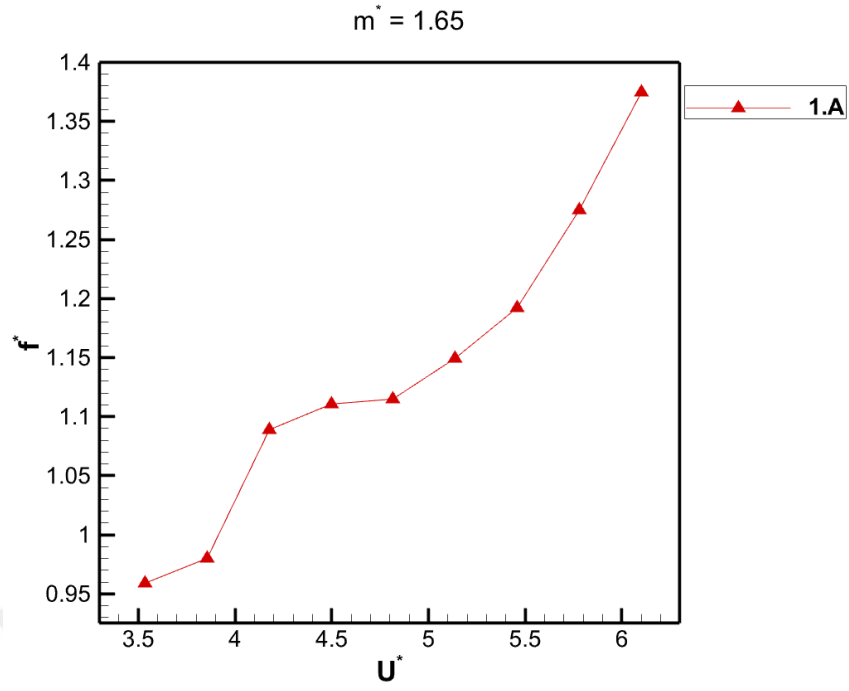
EK A

Çizelge A.1 : Deney 1.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
220	0.286	22880	0.646	3.533	0.069	0.970	0.959
240	0.312	24960	0.704	3.854	0.106	0.991	0.980
260	0.338	27040	0.763	4.176	0.178	1.102	1.089
280	0.364	29120	0.822	4.497	0.269	1.124	1.111
300	0.39	31200	0.880	4.818	0.335	1.128	1.115
320	0.416	33280	0.939	5.139	0.352	1.163	1.150
340	0.442	35360	0.998	5.461	0.369	1.206	1.192
360	0.468	37440	1.057	5.782	0.346	1.290	1.275
380	0.494	39520	1.115	6.103	0.182	1.391	1.375



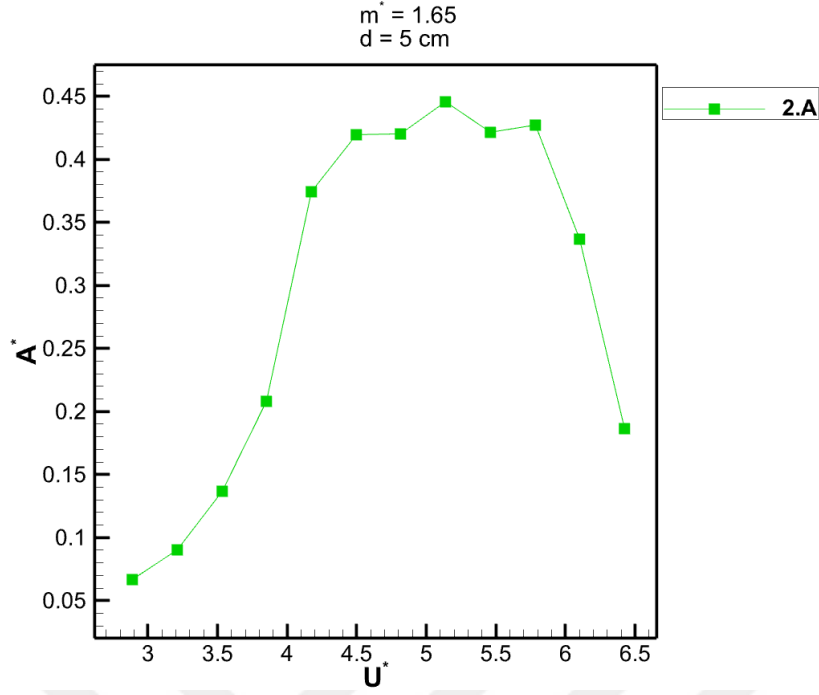
Şekil A.1 : Deney 1.A'nın A^* - U^* grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



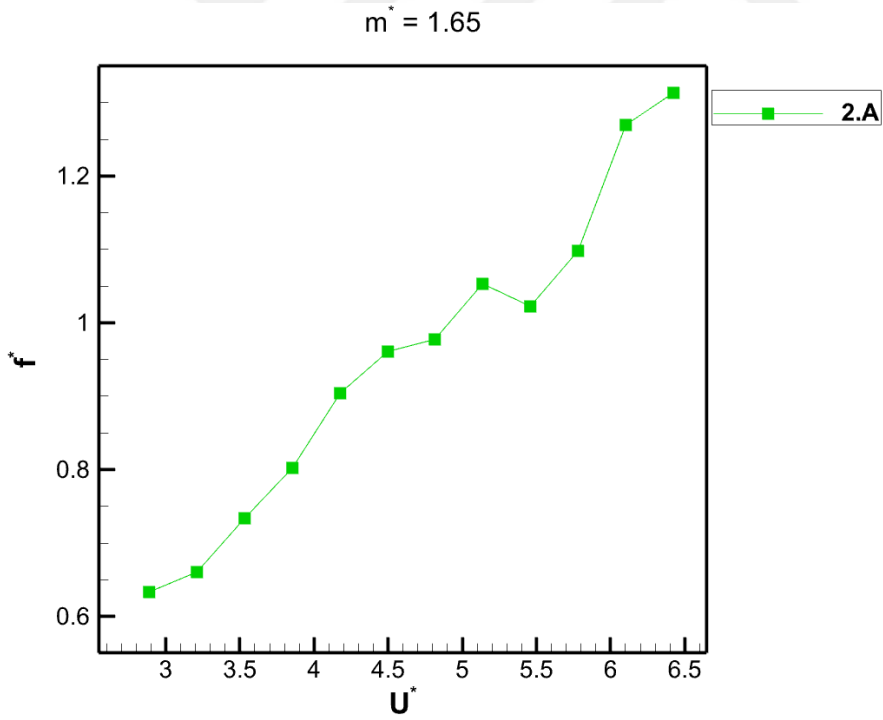
Şekil A.2 : Deney 1.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge A.2 : Deney 2.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
180	0.234	18720	0.334	2.891	0.067	0.641	0.633
200	0.26	20800	0.371	3.212	0.090	0.669	0.661
220	0.286	22880	0.408	3.533	0.137	0.743	0.734
240	0.312	24960	0.445	3.854	0.208	0.812	0.802
260	0.338	27040	0.483	4.176	0.375	0.915	0.904
280	0.364	29120	0.520	4.497	0.420	0.972	0.961
300	0.39	31200	0.557	4.818	0.421	0.989	0.978
320	0.416	33280	0.594	5.139	0.446	1.066	1.053
340	0.442	35360	0.631	5.461	0.422	1.034	1.022
360	0.468	37440	0.668	5.782	0.427	1.111	1.098



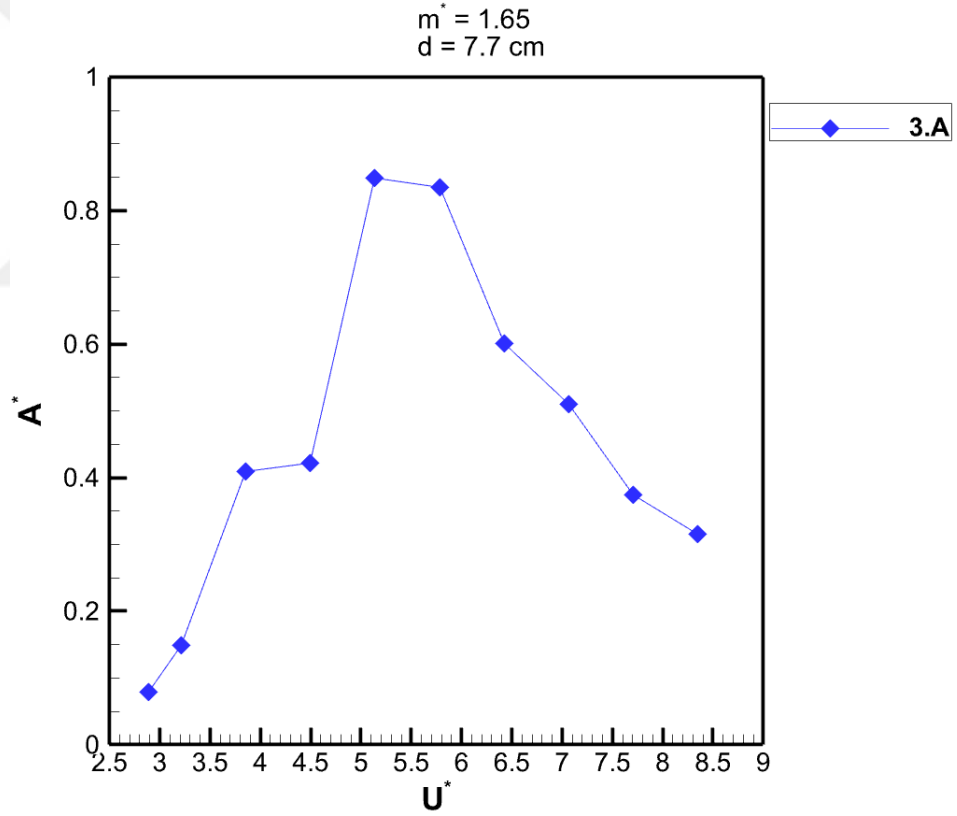
Şekil A.3 : Deney 2.A'nın A^* - U^* grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



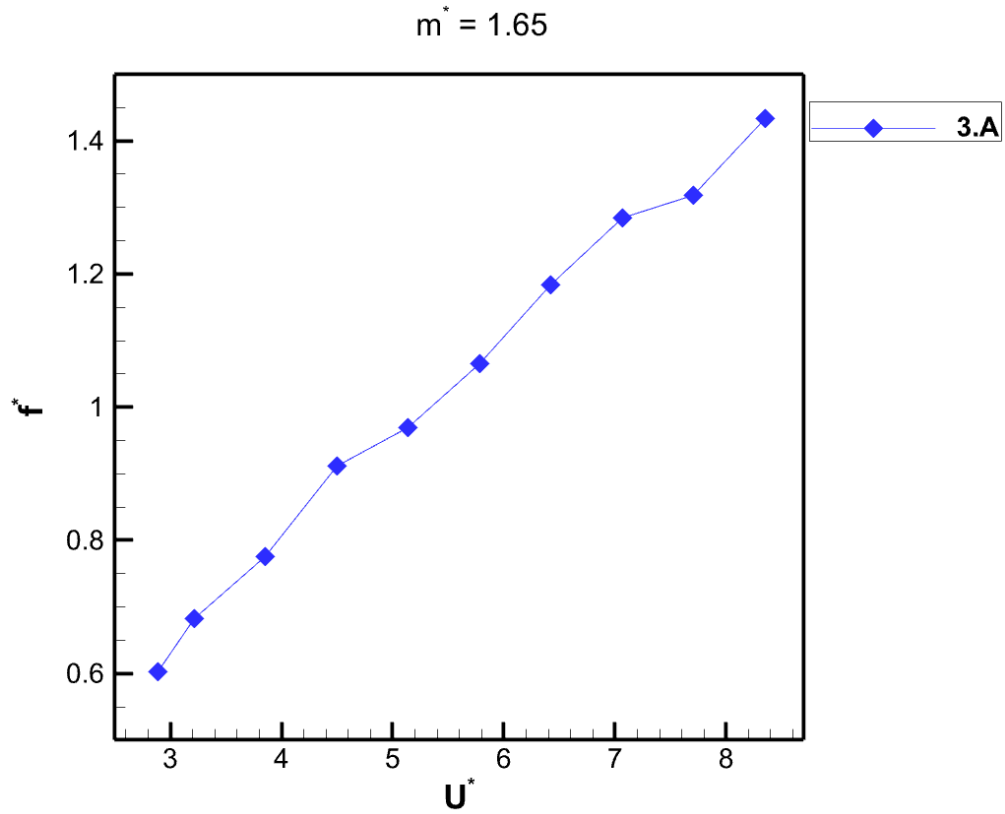
Şekil A.4 : Deney 2.A'nın f^* - U^* grafiği.

Çizelge A.3 : Deney 3.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
180	0.234	18720	0.269	2.891	0.078	0.610	0.602
200	0.26	20800	0.299	3.212	0.149	0.690	0.682
240	0.312	24960	0.359	3.854	0.410	0.784	0.775
280	0.364	29120	0.419	4.497	0.421	0.922	0.911
320	0.416	33280	0.479	5.139	0.848	0.981	0.970
360	0.468	37440	0.538	5.782	0.835	1.078	1.066
400	0.52	41600	0.598	6.424	0.602	1.198	1.184
440	0.572	45760	0.658	7.067	0.510	1.299	1.284
480	0.624	49920	0.718	7.709	0.375	1.334	1.318
520	0.676	54080	0.778	8.351	0.315	1.450	1.433



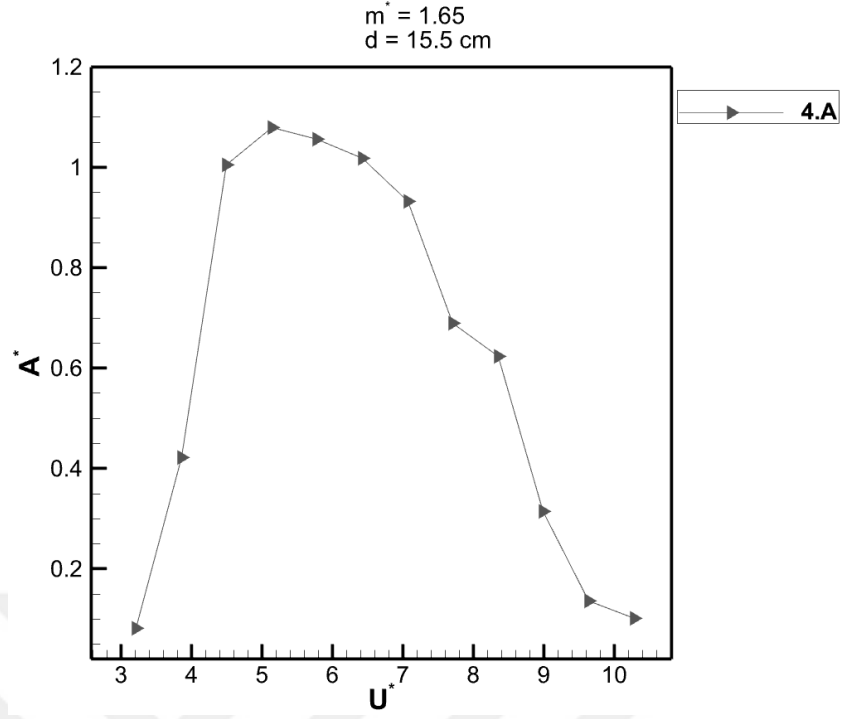
Şekil A.5 : Deney 3.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



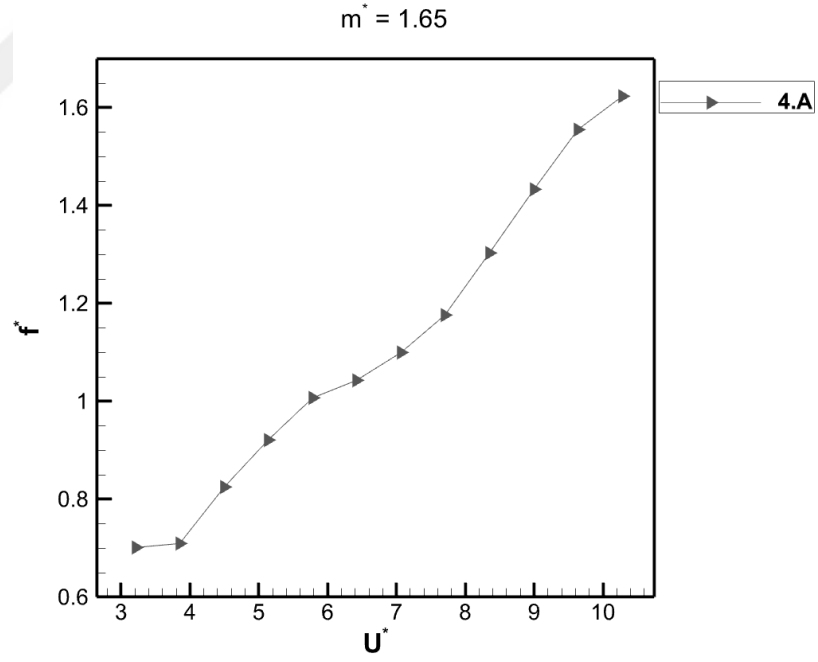
Şekil A.6 : Deney 3.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge A.4 : Deney 4.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.211	3.212	0.081	0.710	0.702
240	0.312	24960	0.253	3.854	0.421	0.718	0.709
280	0.364	29120	0.295	4.497	1.005	0.835	0.825
320	0.416	33280	0.337	5.139	1.079	0.931	0.921
360	0.468	37440	0.380	5.782	1.056	1.019	1.007
400	0.52	41600	0.422	6.424	1.018	1.056	1.043
440	0.572	45760	0.464	7.067	0.932	1.113	1.100
480	0.624	49920	0.506	7.709	0.690	1.190	1.176
520	0.676	54080	0.548	8.351	0.624	1.318	1.303
560	0.728	58240	0.590	8.994	0.315	1.450	1.433
600	0.78	62400	0.633	9.636	0.137	1.573	1.555
640	0.832	66560	0.675	10.279	0.102	1.643	1.623



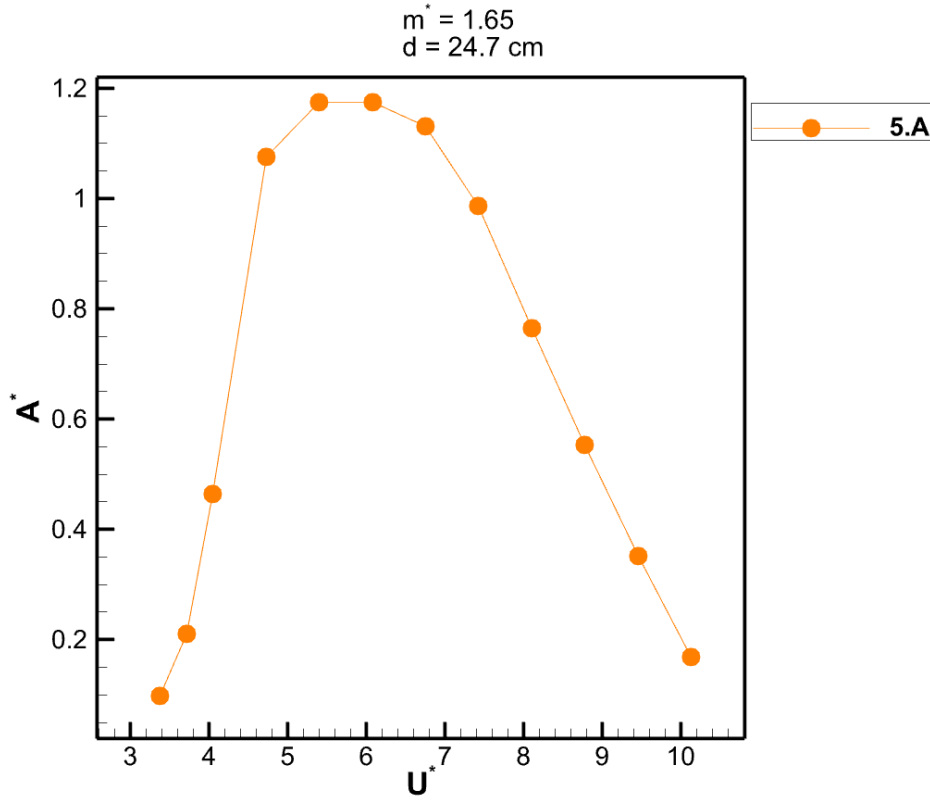
Şekil A.7 : Deney 4.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



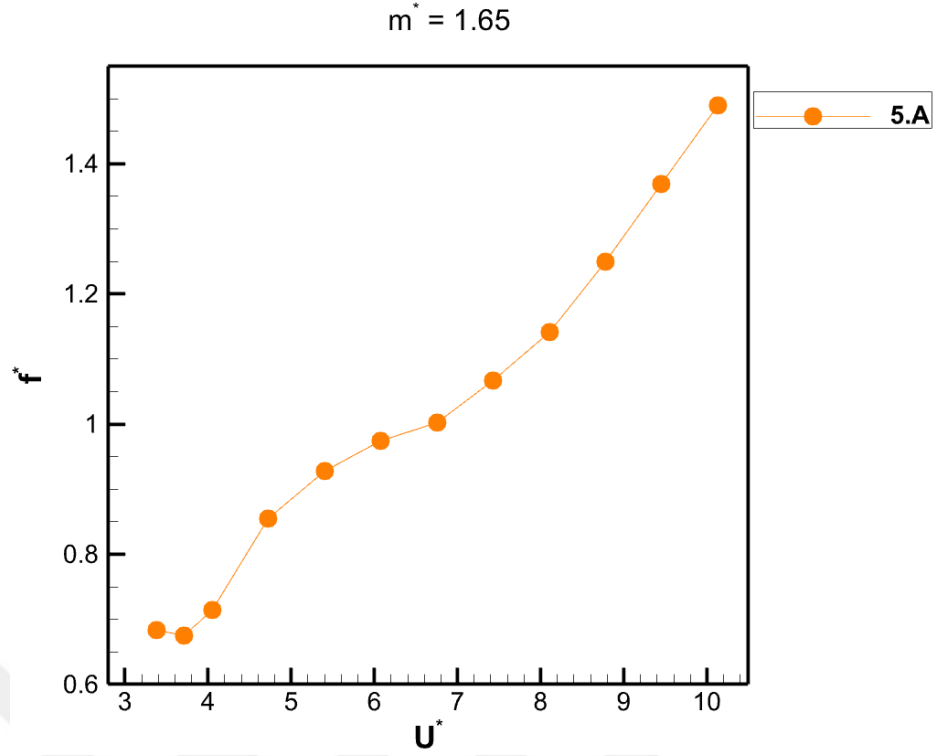
Şekil A.8 : Deney 4.A'nın $f^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.

Çizelge A.5 : Deney 5.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.167	3.377	0.098	0.692	0.684
220	0.286	22880	0.184	3.715	0.211	0.683	0.675
240	0.312	24960	0.200	4.053	0.464	0.722	0.714
280	0.364	29120	0.234	4.728	1.075	0.865	0.855
320	0.416	33280	0.267	5.404	1.175	0.938	0.927
360	0.468	37440	0.301	6.079	1.175	0.986	0.975
400	0.52	41600	0.334	6.755	1.131	1.014	1.002
440	0.572	45760	0.367	7.430	0.986	1.079	1.067
480	0.624	49920	0.401	8.106	0.764	1.155	1.141
520	0.676	54080	0.434	8.781	0.554	1.265	1.250
560	0.728	58240	0.468	9.456	0.351	1.385	1.369
600	0.78	62400	0.501	10.132	0.169	1.508	1.490



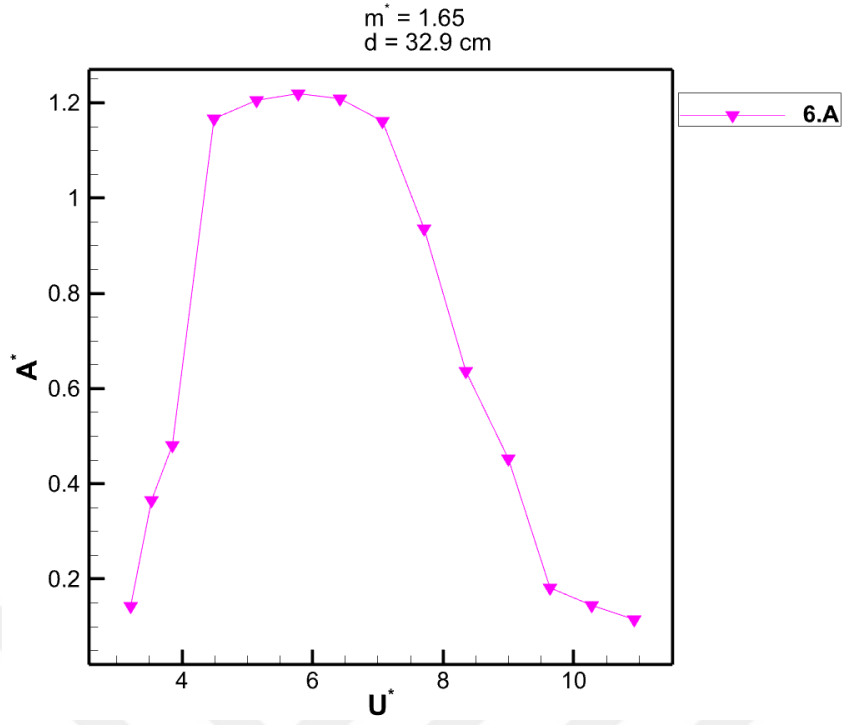
Şekil A.9 : Deney 5.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



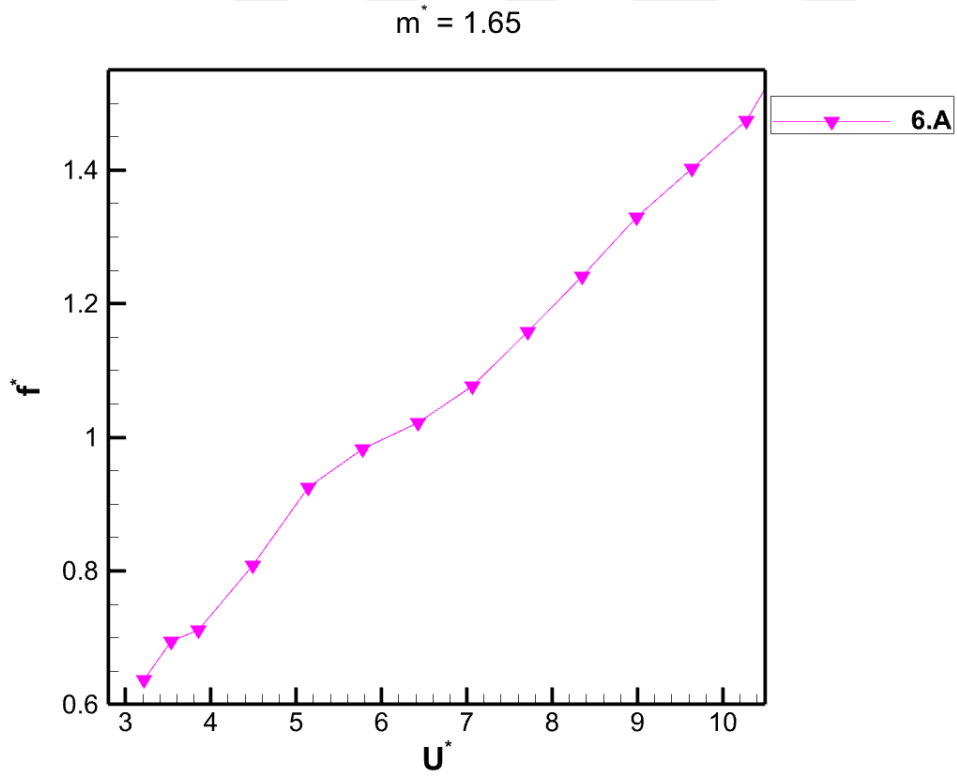
Şekil A.10 : Deney 5.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge A.6 : Deney 6.A'nın deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
200	0.26	20800	0.145	3.212	0.144	0.645	0.638
220	0.286	22880	0.159	3.533	0.366	0.703	0.695
240	0.312	24960	0.174	3.854	0.481	0.720	0.712
280	0.364	29120	0.203	4.497	1.166	0.817	0.808
320	0.416	33280	0.232	5.139	1.205	0.935	0.924
360	0.468	37440	0.261	5.782	1.219	0.994	0.983
400	0.52	41600	0.289	6.424	1.208	1.034	1.022
440	0.572	45760	0.318	7.067	1.162	1.089	1.076
480	0.624	49920	0.347	7.709	0.936	1.172	1.158
520	0.676	54080	0.376	8.351	0.636	1.256	1.241
560	0.728	58240	0.405	8.994	0.452	1.345	1.330
600	0.78	62400	0.434	9.636	0.181	1.419	1.403
640	0.832	66560	0.463	10.279	0.145	1.491	1.474
680	0.884	70720	0.492	10.921	0.115	1.633	1.613



Şekil A.11 : Deney 6.A'nın $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.

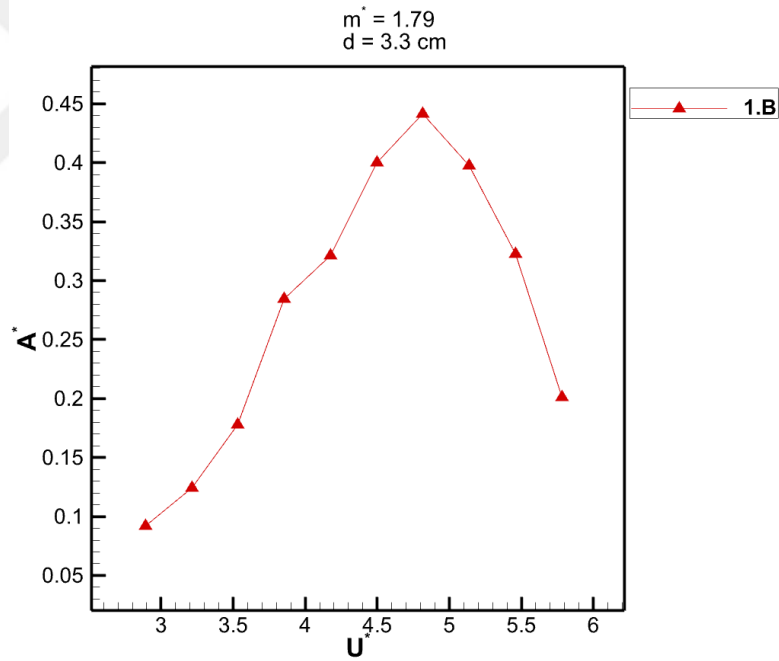


Şekil A.12 : Deney 6.A'nın $f^* - U^*$ grafiği.

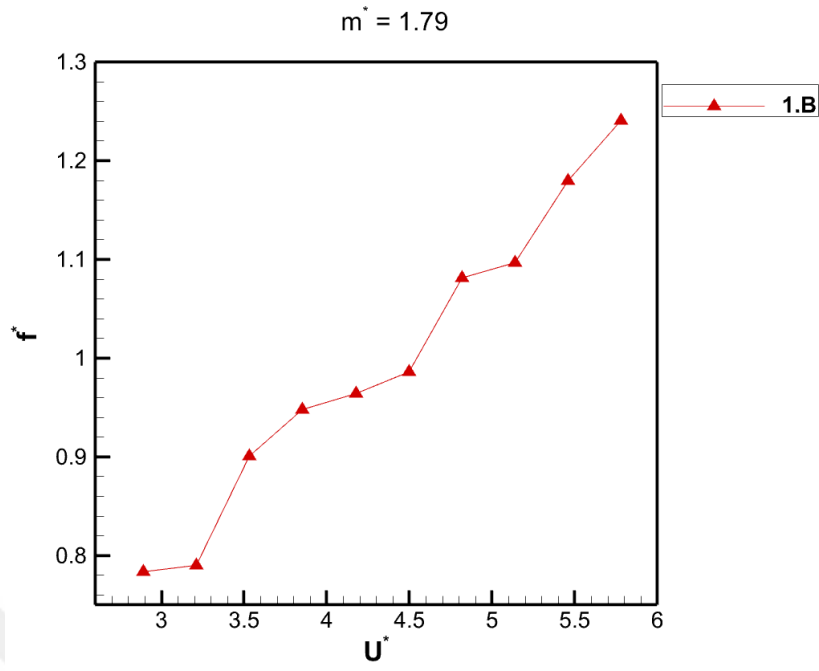
EK B

Çizelge B.1 : Deney 1.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
180	0.234	18720	0.411	2.966	0.092	0.793	0.804
200	0.26	20800	0.457	3.296	0.124	0.800	0.811
220	0.286	22880	0.503	3.625	0.178	0.911	0.924
240	0.312	24960	0.548	3.955	0.285	0.959	0.973
260	0.338	27040	0.594	4.284	0.321	0.976	0.990
280	0.364	29120	0.640	4.614	0.400	0.998	1.012
300	0.39	31200	0.685	4.944	0.441	1.094	1.109
320	0.416	33280	0.731	5.273	0.397	1.109	1.125
340	0.442	35360	0.777	5.603	0.323	1.194	1.210
360	0.468	37440	0.823	5.932	0.201	1.255	1.273



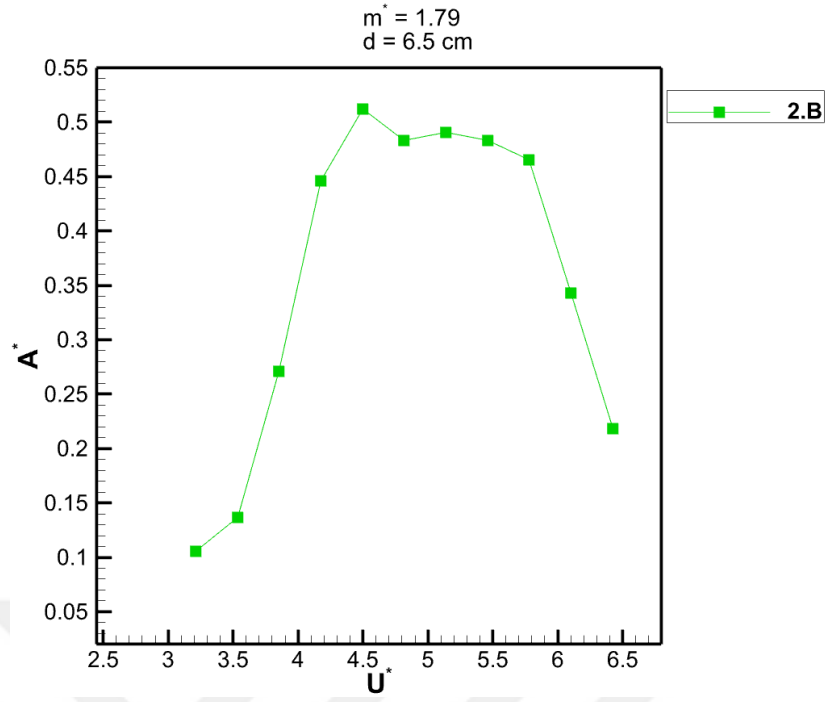
Şekil B.1 : Deney 1.B'nin A^* - U^* grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



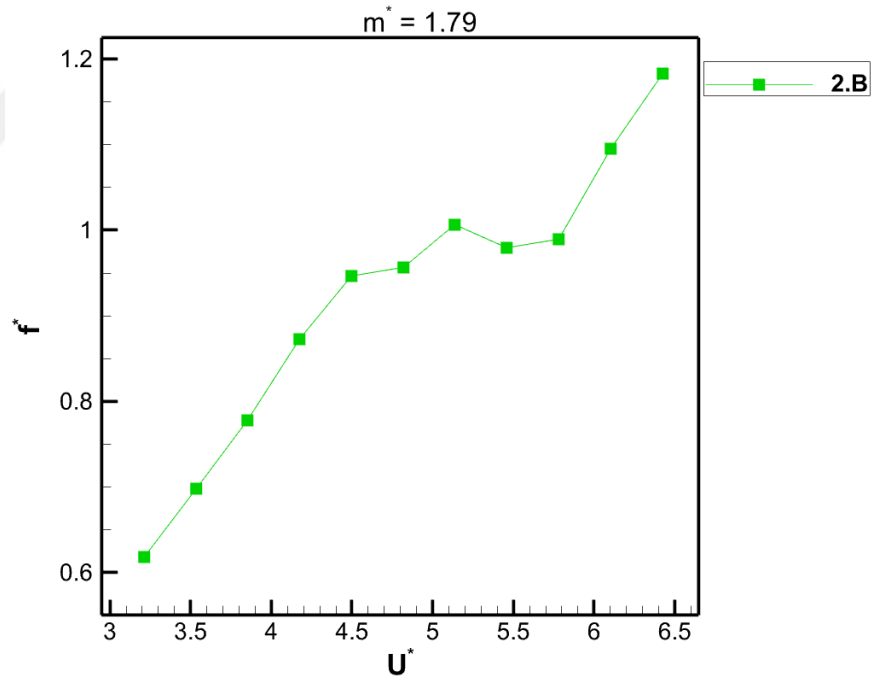
Şekil B.2 : Deney 1.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge B.2 : Deney 2.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
200	0.26	20800	0.326	3.296	0.106	0.625	0.634
220	0.286	22880	0.358	3.625	0.137	0.707	0.717
240	0.312	24960	0.391	3.955	0.271	0.787	0.798
260	0.338	27040	0.423	4.284	0.446	0.883	0.895
280	0.364	29120	0.456	4.614	0.512	0.957	0.971
300	0.39	31200	0.488	4.944	0.483	0.967	0.981
320	0.416	33280	0.521	5.273	0.490	1.018	1.032
340	0.442	35360	0.554	5.603	0.483	0.991	1.005
360	0.468	37440	0.586	5.932	0.465	1.001	1.015
380	0.494	39520	0.619	6.262	0.343	1.108	1.124
400	0.52	41600	0.651	6.591	0.218	1.197	1.214



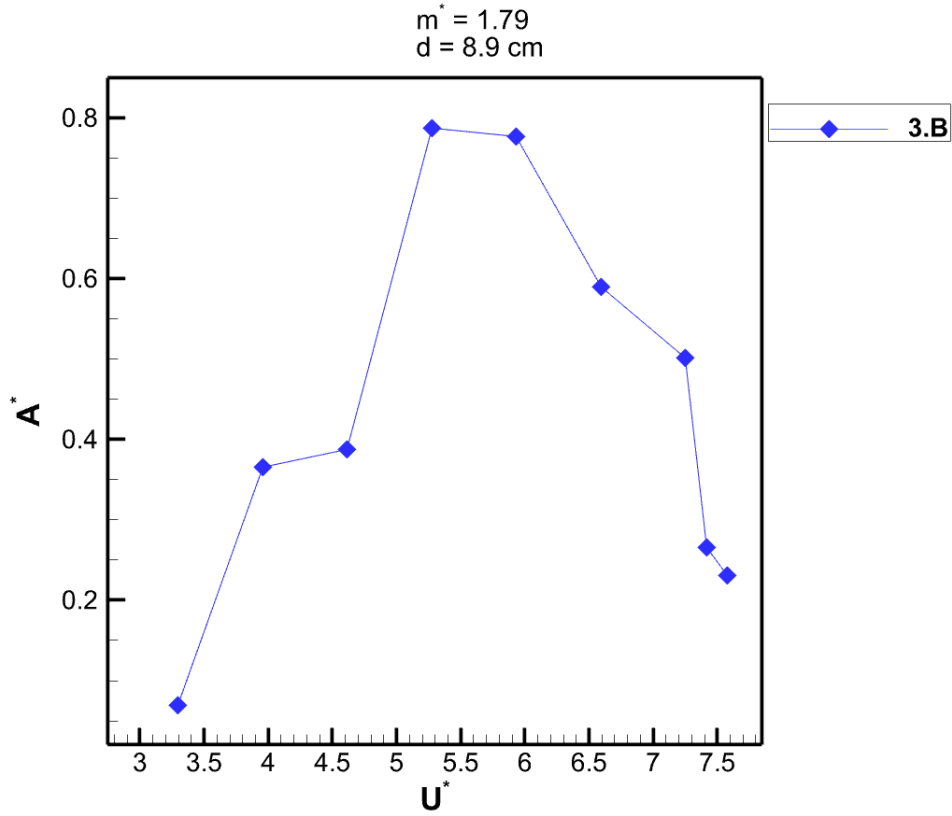
Şekil B.3 : Deney 2.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



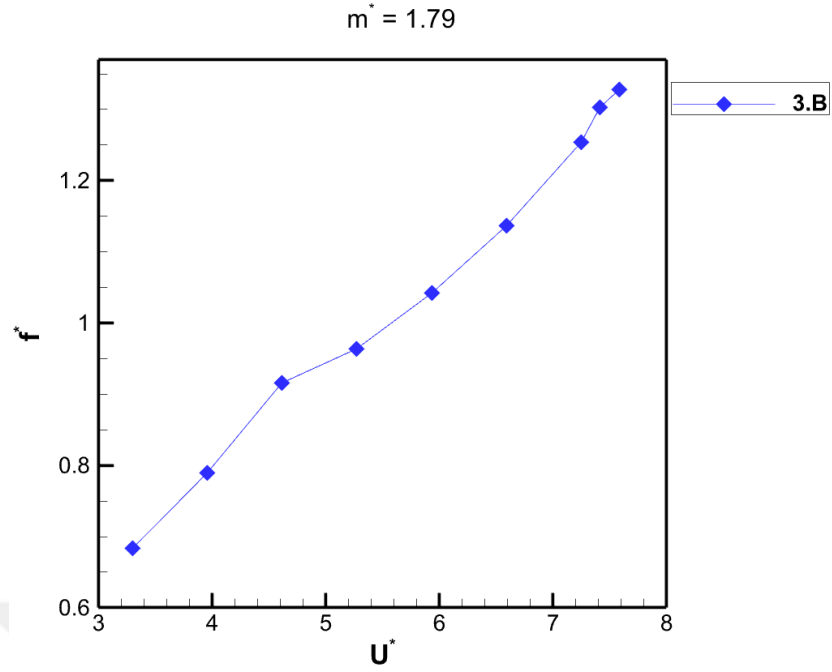
Şekil B.4 : Deney 2.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge B.3 : Deney 3.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.278	3.296	0.069	0.674	0.684
240	0.312	24960	0.334	3.955	0.365	0.779	0.790
280	0.364	29120	0.390	4.614	0.387	0.903	0.915
320	0.416	33280	0.445	5.273	0.787	0.950	0.964
360	0.468	37440	0.501	5.932	0.777	1.027	1.042
400	0.52	41600	0.557	6.591	0.589	1.121	1.137
440	0.572	45760	0.612	7.251	0.502	1.237	1.254
450	0.585	46800	0.626	7.415	0.265	1.284	1.302
460	0.598	47840	0.640	7.580	0.231	1.309	1.327



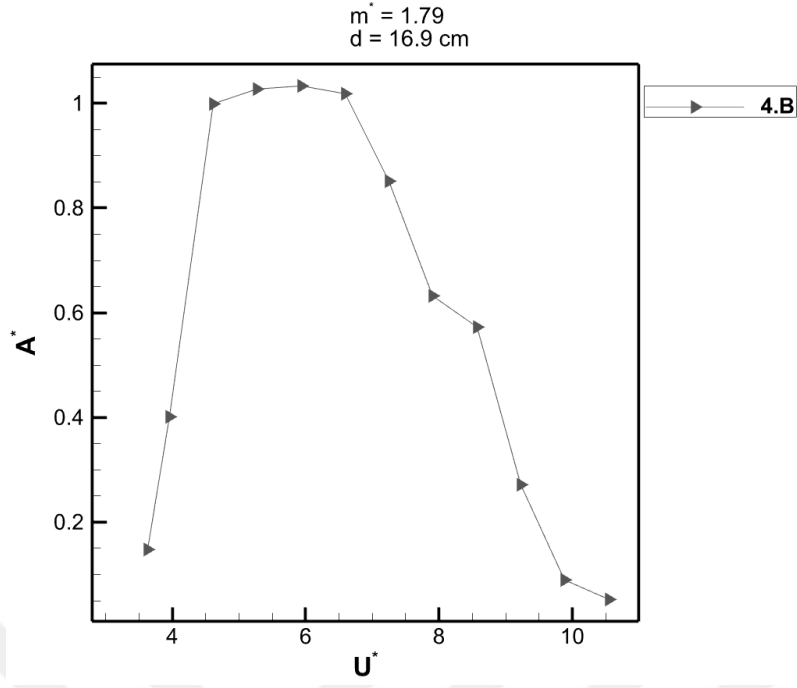
Şekil B.5 : Deney 3.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



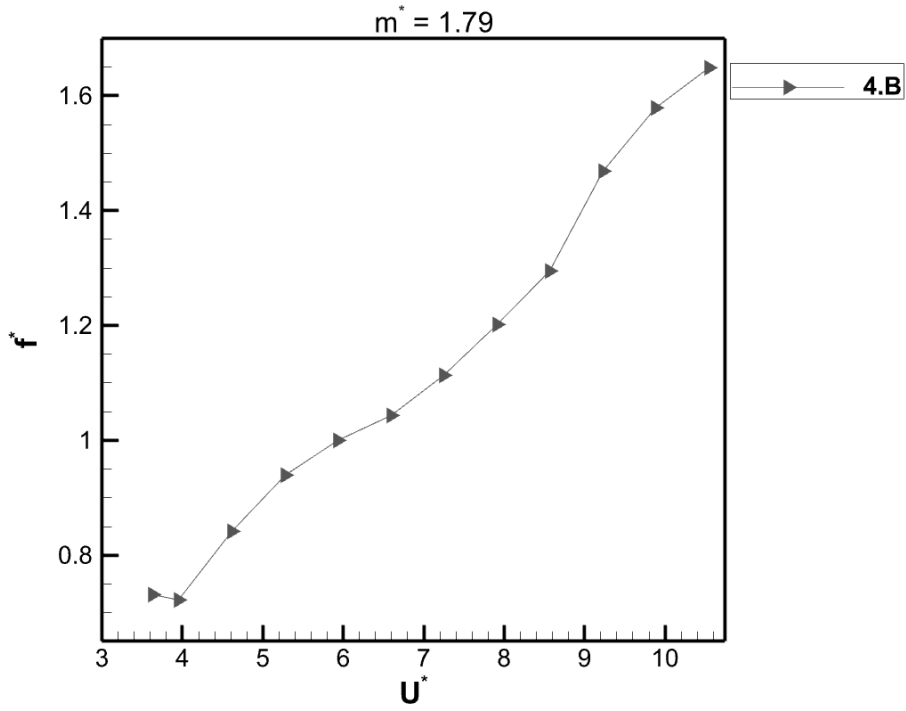
Şekil B.6 : Deney 3.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge B.4 : Deney 4.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
220	0.286	22880	0.222	3.625	0.147	0.721	0.731
240	0.312	24960	0.242	3.955	0.402	0.712	0.722
280	0.364	29120	0.283	4.614	0.999	0.829	0.841
320	0.416	33280	0.323	5.273	1.027	0.927	0.940
360	0.468	37440	0.363	5.932	1.033	0.987	1.001
400	0.52	41600	0.404	6.591	1.019	1.029	1.044
440	0.572	45760	0.444	7.251	0.852	1.098	1.113
480	0.624	49920	0.485	7.910	0.633	1.184	1.201
520	0.676	54080	0.525	8.569	0.572	1.277	1.294
560	0.728	58240	0.565	9.228	0.271	1.449	1.469
600	0.78	62400	0.606	9.887	0.089	1.557	1.579
640	0.832	66560	0.646	10.546	0.052	1.626	1.649



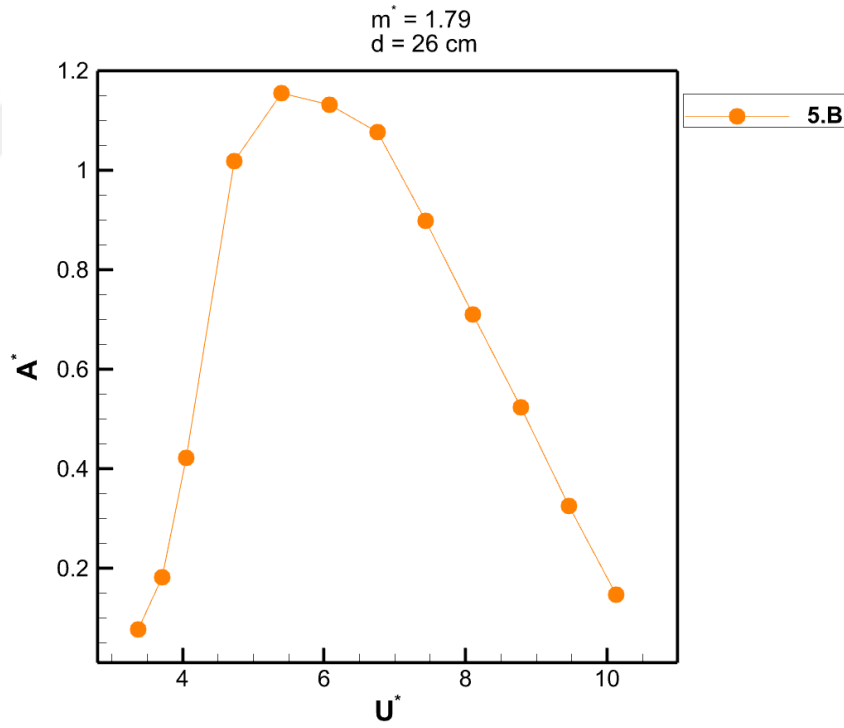
Şekil B.7 : Deney 4.B'nin A^* - U^* grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



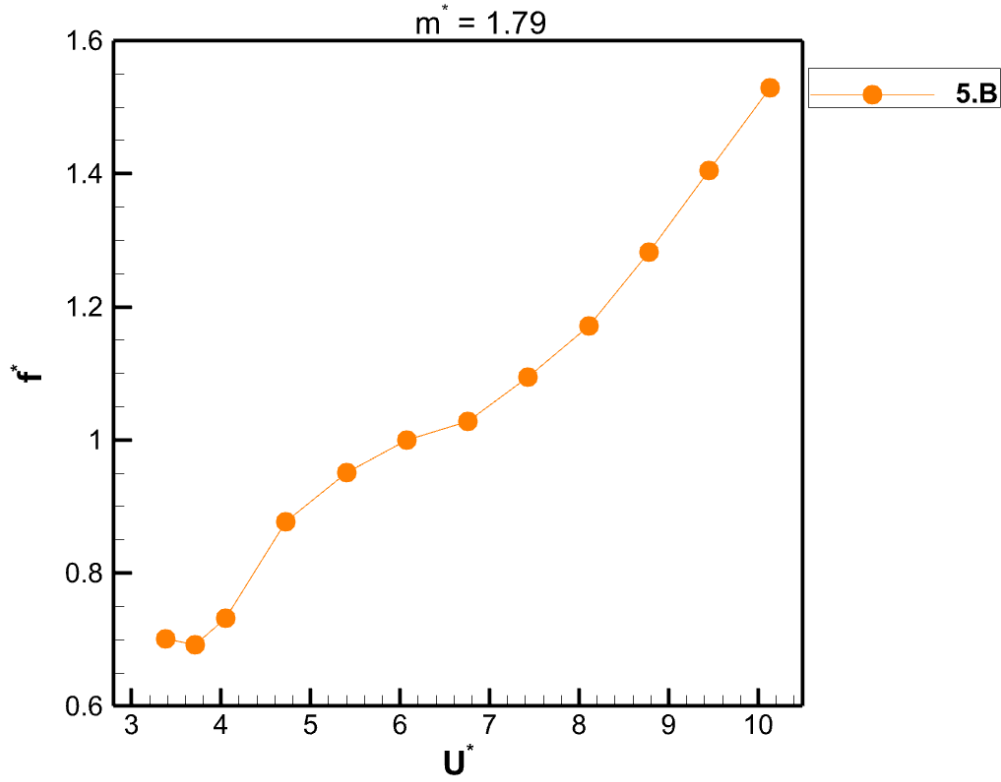
Şekil B.8 : Deney 4.B'nin f^* - U^* grafiği

Çizelge B.5 : Deney 5.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.163	3.377	0.078	0.692	0.701
220	0.286	22880	0.179	3.715	0.183	0.683	0.693
240	0.312	24960	0.195	4.053	0.422	0.722	0.732
280	0.364	29120	0.228	4.728	1.018	0.865	0.878
320	0.416	33280	0.260	5.404	1.154	0.938	0.951
360	0.468	37440	0.293	6.079	1.132	0.986	1.000
400	0.52	41600	0.326	6.755	1.076	1.014	1.028
440	0.572	45760	0.358	7.430	0.898	1.079	1.095
480	0.624	49920	0.391	8.106	0.711	1.155	1.171
520	0.676	54080	0.423	8.781	0.524	1.265	1.283
560	0.728	58240	0.456	9.456	0.326	1.385	1.405
600	0.78	62400	0.488	10.132	0.147	1.508	1.529



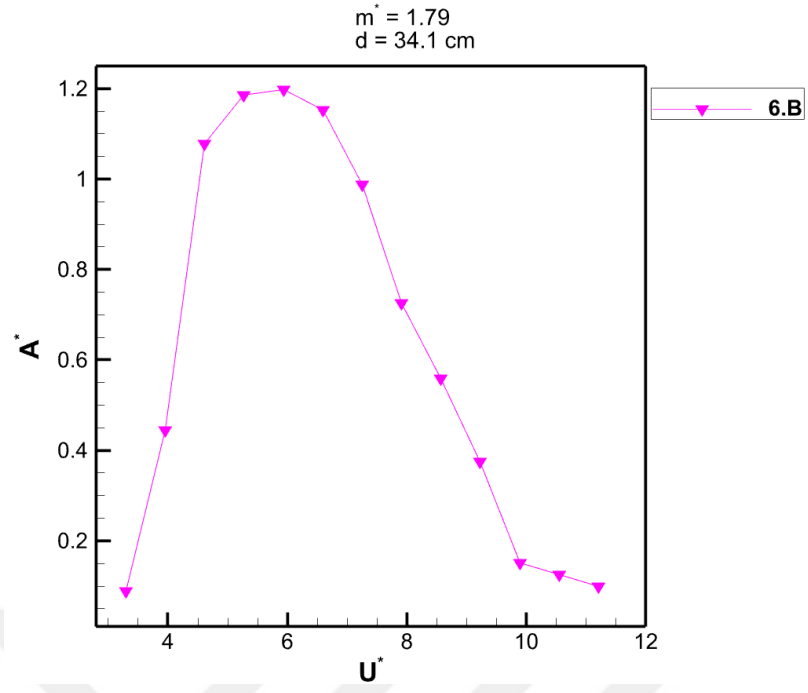
Şekil B.9 : Deney 5.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



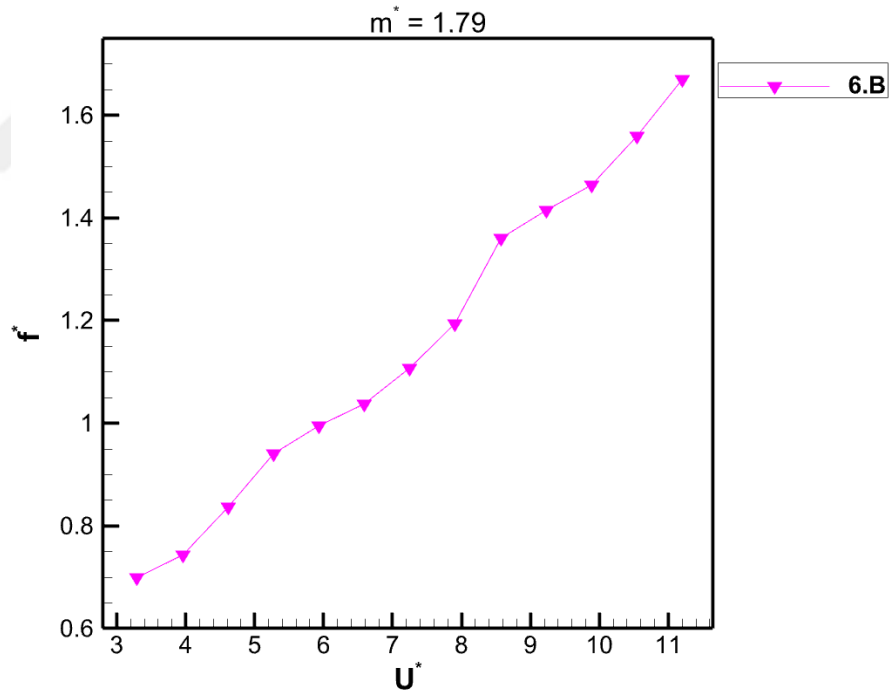
Şekil B.10 : Deney 5.B'nin f^* - U^* grafiği.

Çizelge B.6 : Deney 6.B'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
200	0.26	20800	0.142	3.296	0.089	0.690	0.700
240	0.312	24960	0.171	3.955	0.445	0.734	0.744
280	0.364	29120	0.199	4.614	1.078	0.825	0.837
320	0.416	33280	0.227	5.273	1.187	0.928	0.941
360	0.468	37440	0.256	5.932	1.197	0.982	0.996
400	0.52	41600	0.284	6.591	1.153	1.023	1.038
440	0.572	45760	0.313	7.251	0.988	1.091	1.107
480	0.624	49920	0.341	7.910	0.727	1.177	1.194
520	0.676	54080	0.370	8.569	0.560	1.342	1.361
560	0.728	58240	0.398	9.228	0.376	1.395	1.415
600	0.78	62400	0.426	9.887	0.152	1.443	1.464
640	0.832	66560	0.455	10.546	0.125	1.538	1.559
680	0.884	70720	0.483	11.205	0.098	1.648	1.671



Şekil B.11 : Deney 6.B'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.

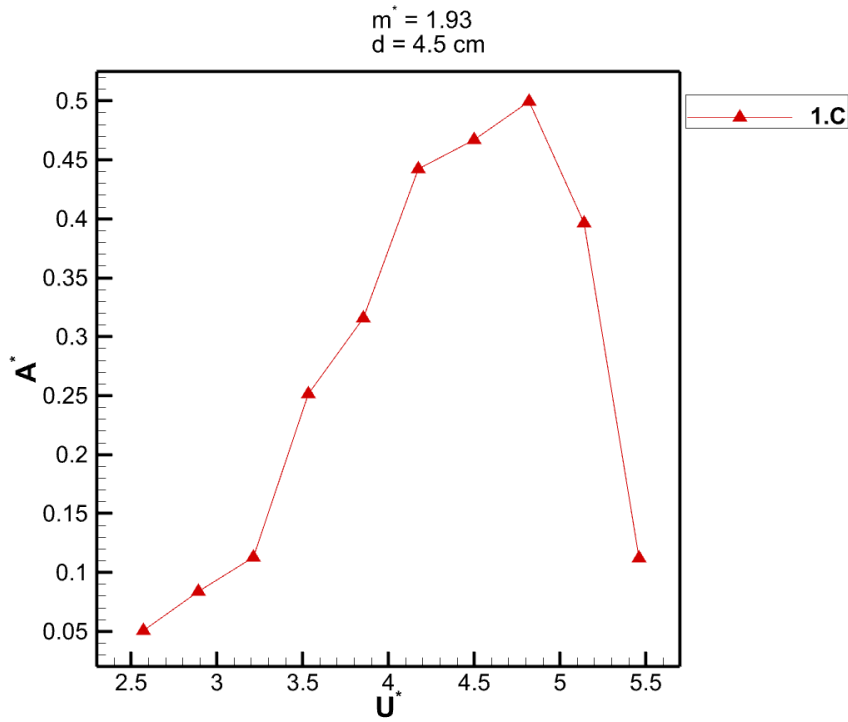


Şekil B.12 : Deney 6.B'nin $f^* - U^*$ grafiği.

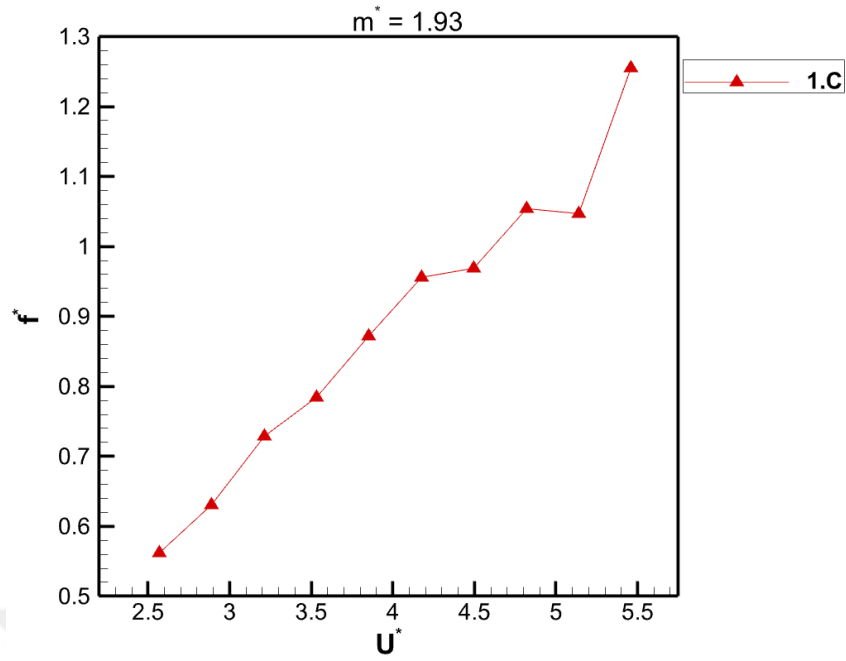
EK C

Çizelge C.1 : Deney 1.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
160	0.208	16640	0.313	2.702	0.051	0.568	0.591
180	0.234	18720	0.352	3.040	0.084	0.639	0.664
200	0.26	20800	0.391	3.377	0.113	0.737	0.766
220	0.286	22880	0.430	3.715	0.251	0.794	0.825
240	0.312	24960	0.470	4.053	0.316	0.882	0.917
260	0.338	27040	0.509	4.390	0.442	0.967	1.005
280	0.364	29120	0.548	4.728	0.467	0.980	1.018
300	0.39	31200	0.587	5.066	0.499	1.067	1.108
320	0.416	33280	0.626	5.404	0.396	1.059	1.100
340	0.442	35360	0.665	5.741	0.112	1.270	1.320



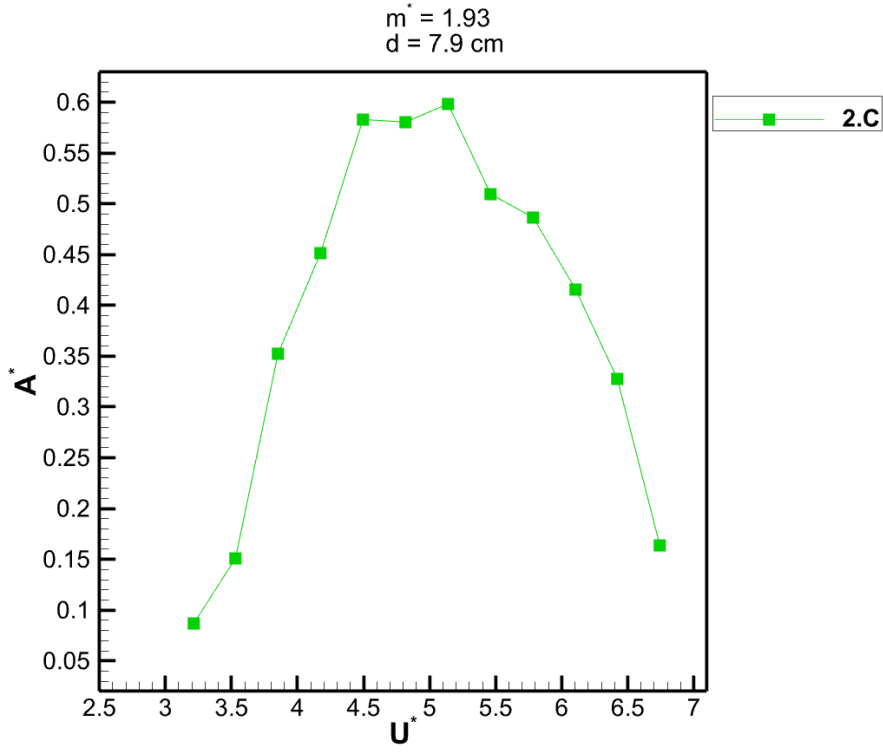
Şekil C.1 : Deney 1.C'nin A^* - U^* grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



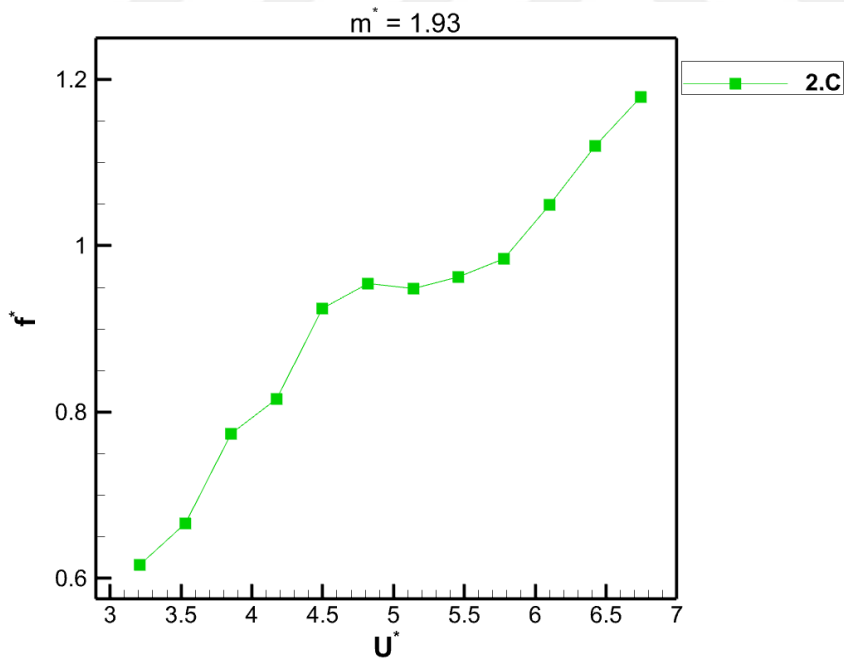
Şekil C.2 : Deney 1.C'nin f^* - U^* grafiği.

Çizelge C.2 : Deney 2.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
200	0.26	20800	0.310	3.377	0.087	0.623	0.648
220	0.286	22880	0.341	3.715	0.151	0.674	0.701
240	0.312	24960	0.371	4.053	0.352	0.783	0.814
260	0.338	27040	0.402	4.390	0.452	0.826	0.858
280	0.364	29120	0.433	4.728	0.583	0.936	0.972
300	0.39	31200	0.464	5.066	0.580	0.966	1.003
320	0.416	33280	0.495	5.404	0.599	0.960	0.998
340	0.442	35360	0.526	5.741	0.509	0.974	1.012
360	0.468	37440	0.557	6.079	0.487	0.996	1.035
380	0.494	39520	0.588	6.417	0.416	1.062	1.104
400	0.52	41600	0.619	6.755	0.328	1.133	1.178
420	0.546	43680	0.650	7.092	0.164	1.193	1.240



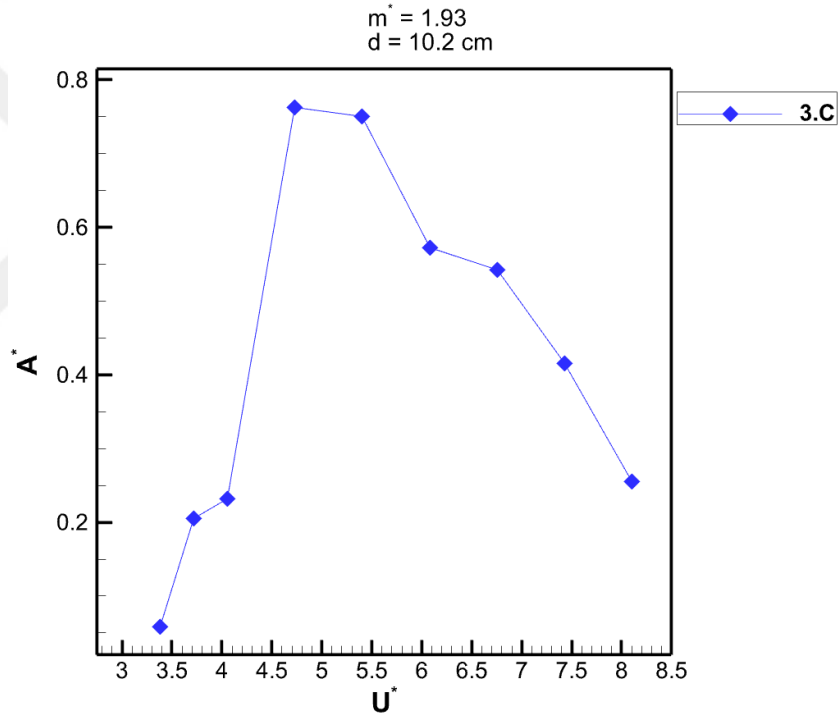
Şekil C.3 : Deney 2.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



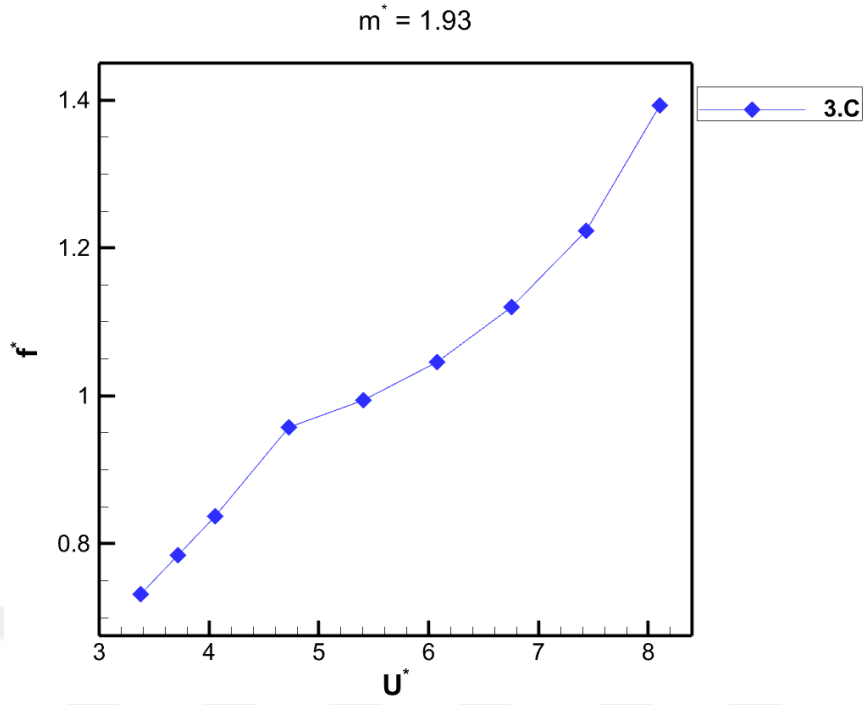
Şekil C.4 : Deney 2.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge C.3 : Deney 3.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.260	3.377	0.058	0.704	0.732
220	0.286	22880	0.286	3.715	0.205	0.755	0.784
240	0.312	24960	0.312	4.053	0.232	0.806	0.837
280	0.364	29120	0.364	4.728	0.762	0.921	0.957
320	0.416	33280	0.416	5.404	0.750	0.956	0.994
360	0.468	37440	0.468	6.079	0.572	1.006	1.045
400	0.52	41600	0.520	6.755	0.542	1.078	1.120
440	0.572	45760	0.572	7.430	0.416	1.177	1.223
480	0.624	49920	0.624	8.106	0.255	1.340	1.393



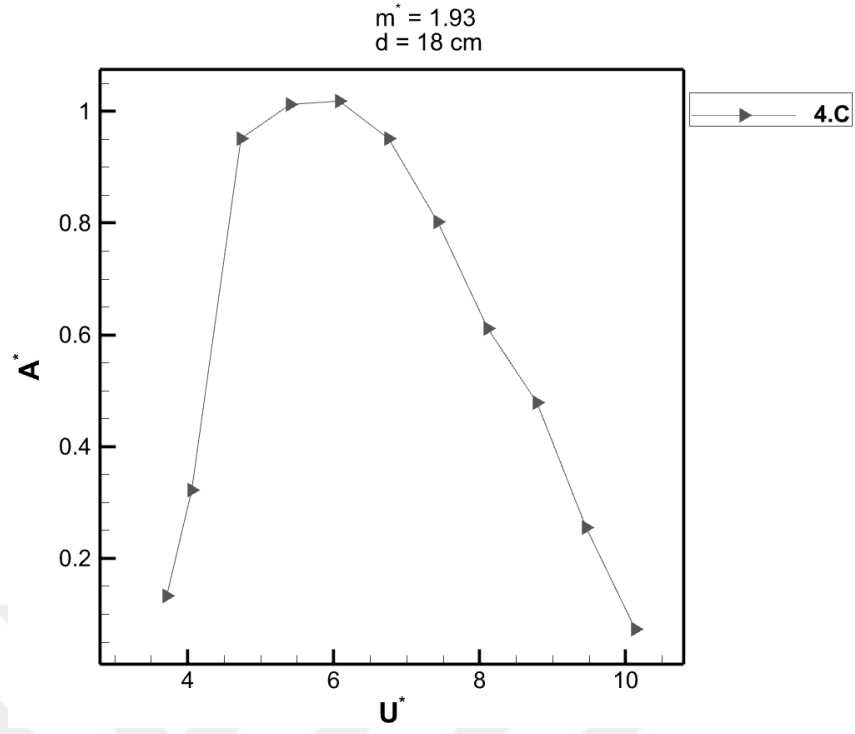
Şekil C.5 : Deney 3.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



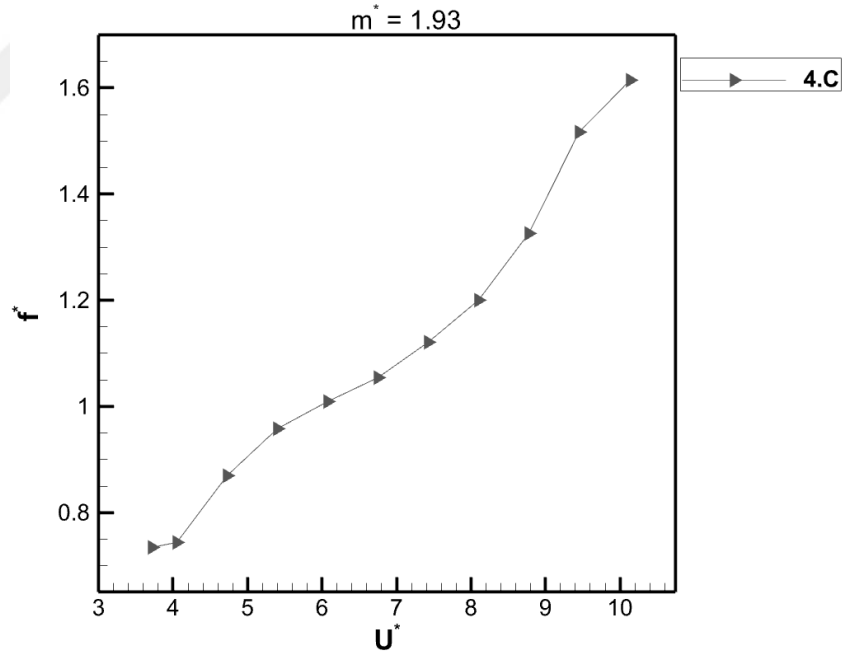
Şekil C.6 : Deney 3.C'nin f^* - U^* grafiği.

Çizelge C.4 : Deney 4.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
220	0.286	22880	0.215	3.715	0.132	0.706	0.734
240	0.312	24960	0.235	4.053	0.322	0.716	0.744
280	0.364	29120	0.274	4.728	0.952	0.836	0.869
320	0.416	33280	0.313	5.404	1.013	0.922	0.958
360	0.468	37440	0.352	6.079	1.018	0.971	1.009
400	0.52	41600	0.391	6.755	0.951	1.014	1.054
440	0.572	45760	0.430	7.430	0.802	1.078	1.120
480	0.624	49920	0.470	8.106	0.612	1.155	1.200
520	0.676	54080	0.509	8.781	0.478	1.276	1.326
560	0.728	58240	0.548	9.456	0.255	1.460	1.517
600	0.78	62400	0.587	10.132	0.073	1.554	1.615



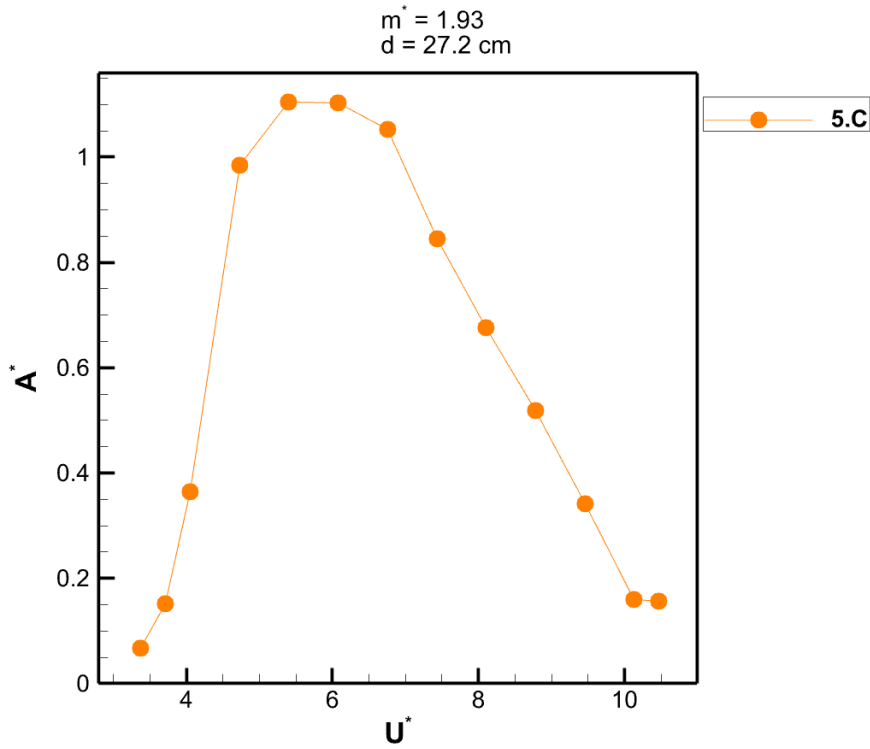
Şekil C.7 : Deney 4.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



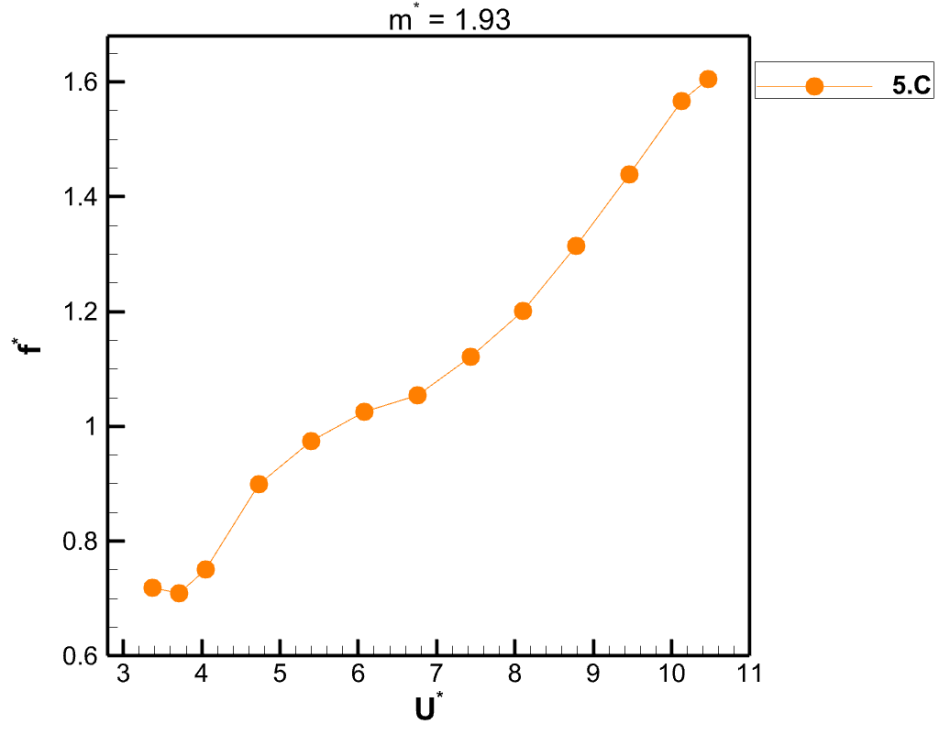
Şekil C.8 : Deney 4.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.

Çizelge C.5 : Deney 5.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U*	A/D	f	f*
200	0.26	20800	0.159	3.377	0.068	0.692	0.719
220	0.286	22880	0.175	3.715	0.151	0.683	0.710
240	0.312	24960	0.191	4.053	0.364	0.722	0.751
280	0.364	29120	0.223	4.728	0.984	0.865	0.899
320	0.416	33280	0.255	5.404	1.105	0.938	0.975
360	0.468	37440	0.287	6.079	1.103	0.986	1.025
400	0.52	41600	0.318	6.755	1.053	1.014	1.054
440	0.572	45760	0.350	7.430	0.844	1.079	1.122
480	0.624	49920	0.382	8.106	0.676	1.155	1.200
520	0.676	54080	0.414	8.781	0.518	1.265	1.314
560	0.728	58240	0.446	9.456	0.341	1.385	1.439
600	0.78	62400	0.478	10.132	0.159	1.508	1.567
620	0.806	64480	0.493	10.470	0.156	1.544	1.604



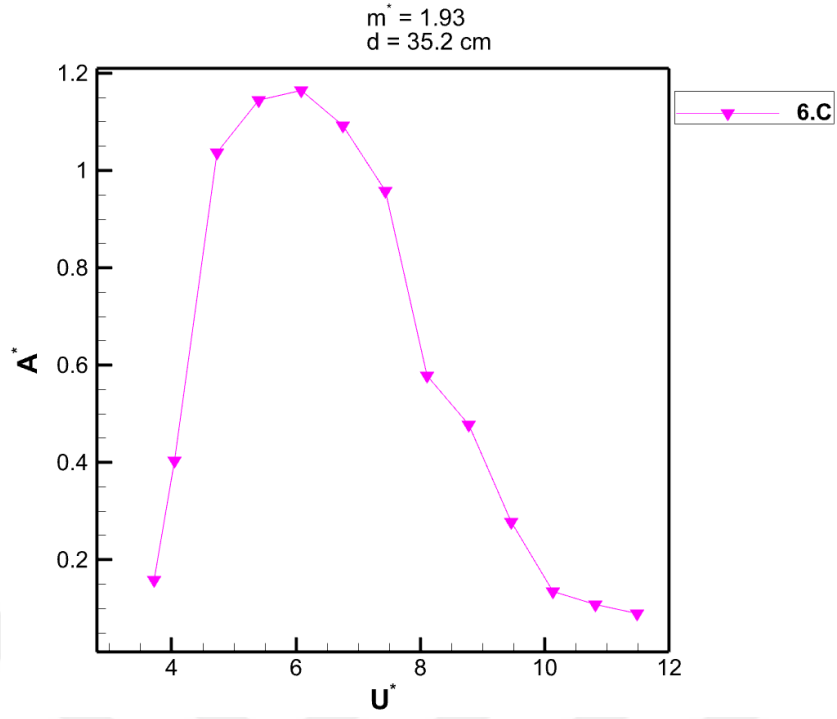
Şekil C.9 : Deney 5.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



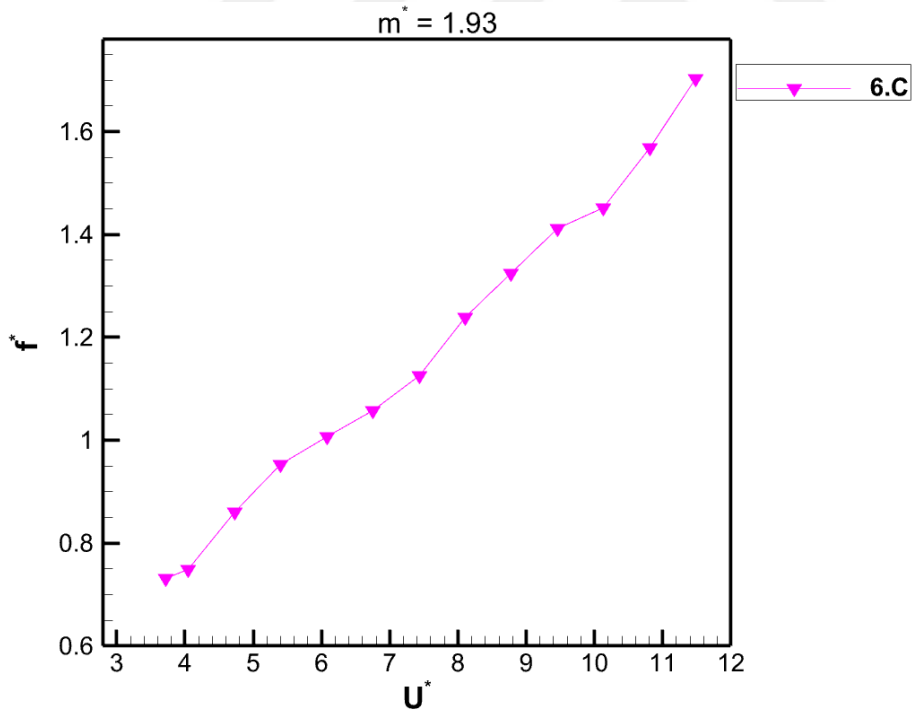
Şekil C.10 : Deney 5.C'nin f^* - U^* grafiği.

Çizelge C.6 : Deney 6.C'nin deney verileri.

n (rpm)	U (m/s)	Re	Fr	U^*	A/D	f	f^*
220	0.286	22880	0.154	3.715	0.159	0.704	0.732
240	0.312	24960	0.168	4.053	0.403	0.721	0.749
280	0.364	29120	0.196	4.728	1.038	0.829	0.861
320	0.416	33280	0.224	5.404	1.145	0.917	0.952
360	0.468	37440	0.252	6.079	1.164	0.969	1.007
400	0.52	41600	0.280	6.755	1.093	1.019	1.058
440	0.572	45760	0.308	7.430	0.959	1.084	1.127
480	0.624	49920	0.336	8.106	0.579	1.192	1.239
520	0.676	54080	0.364	8.781	0.478	1.274	1.324
560	0.728	58240	0.392	9.456	0.278	1.359	1.412
600	0.78	62400	0.420	10.132	0.135	1.398	1.453
640	0.832	66560	0.448	10.807	0.108	1.509	1.568
680	0.884	70720	0.476	11.483	0.089	1.639	1.703



Şekil C.11 : Deney 6.C'nin $A^* - U^*$ grafiği - d : Serbest su yüzeyinden silindirin en üst noktasına olan uzaklık.



Şekil C.12 : Deney 6.C'nin $f^* - U^*$ grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alkın Erdal DEMİRHAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2018 yılları arasında özel bir tersanede proje mühendisi olarak çalıştı.
- İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi ve Model Laboratuvarı Sirkülasyon Kanalı Akış Kaynaklı Hareketler (FIM) Laboratuvarı'nda halen çalışmakta.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN BİLDİRİLER:

- **Demirhan A. E.**, Duranay A., Kınacı O. K., Abdelaziz M. T. 2021. A Study About The Free-Surface Effect On The Vortex Induced Vibrations Of Circular Cylinders. *2nd INTERNATIONAL CONGRESS ON SHIP AND MARINE TECHNOLOGY – SHIPMAR GMO*, 16-18 September, 2021 Istanbul, Turkey.