

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCE KABUK VASITASIYLA
DÜŞÜK BİR REYNOLDS SAYISINDA KONTROLÜ**

Tuğba SÜDÜPAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TUNCELİ – 2020

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCE KABUK VASITASIYLA
DÜŞÜK BİR REYNOLDS SAYISINDA KONTROLÜ**

Tuğba SÜDÜPAK
(182107104)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TUNCELİ– 2020

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCE KABUK VASITASIYLA
DÜŞÜK BİR REYNOLDS SAYISINDA KONTROLÜ**

Tuğba SÜDÜPAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 10/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Akar DOĞAN
(Munzur Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Ali CELEN
(Erzincan Binali Yıldırım
Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Olcay KAPLAN İNCE
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

15/06/2020

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Tuğba SÜDÜPAK

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Bu zorlu süreçte benden yarımalarını esirgemeyen çok değerli Danışmanım Erhan FIRAT'a çok teşekkür ederim. Her türlü konuda olduğu gibi bu süreçte de desteklerini benden hiç esirgemeyen, bana güç ve azim veren değerli eşime ve kızıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Uzakta olmalarına rağmen manevi desteklerini hep yanımda hissettiğim kıymetli anneme, babama ve kız kardeşlerime de çok teşekkür ederim.

Tuğba SÜDÜPAK
TUNCELİ – 2020



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLOLAR LİSTESİ.....	V
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	1
1.3. Literatür Taraması.....	2
2. MATERYAL VE METOT.....	11
2.1. Test Edilen Modeller.....	11
2.2. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar.....	13
2.3. Sayısal Çözücünün Ayarları.....	15
2.4. Hesaplama Bölgesi.....	15
2.5. Doğrulama ve Geçerleme Çalışmaları.....	16
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	20
3.1. Ortalama ve KOK Kuvvet Katsayıları.....	20
3.2. Akış Desenleri ve Konturları.....	24
3.3. Akış Yapıları.....	27
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	29
5. KAYNAKLAR.....	31
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dalgalı silindire ait şematik diyagram. Dalgaboyu (λ), dalga genliği (a) ve ortalama ϕ ap (D_m) tanımları şekil üzerinde açıkça görölmektedir (Lam ve Lin, 2009).....	3
Şekil 1.2. Clapperton ve Bearman'ın (2018) deneylerinde kullandıkları delikli silindir modeli ve modele ait ölçüler.....	4
Şekil 1.3. Hareketli yüzeye sahip dairesel silindirik model (Salimipour ve Salimipour, 2019).....	4
Şekil 1.4. Silindir ve onun üst ve alt noktalarındaki açıklıktan oluşturulan sentetik jete ait hesaplama bölgesinin bir görüntüsü (Liu ve Feng, 2015).....	5
Şekil 1.5. Tek silindir art izinde oluşan doğal çevrinti desenleri (üst) ve sentetik jet ile kontrol edilen silindir art izinde oluşan simetrik çevrinti desenleri (Liu ve Feng, 2015).....	6
Şekil 1.6. Ana silindir ve dönme yönleri gösterilmiş 8 adet küçük silindirden oluşan sistem (Assi ve ark., 2019).....	6
Şekil 1.7. Ön kısmına ince plaka yerleştirilmiş ana silindirin yan ve üstten görünüm şematığı (Gao ve ark., 2020).....	7
Şekil 1.8. Gözenekli silindire ait şematik ve gözeneklilik oranının (β) hesaplandığı formöl (Durhasan ve ark., 2018).....	8
Şekil 1.9. Yatay eksen de açılan yarığa sahip silindir etrafındaki hesaplama bölgesinin bir görüntüsü (Baek ve Karniadakis, 2009).....	8
Şekil 1.10. Yatay eksen de açılan yarığa alternatif olarak önerilen ince kabuklu modeller (Baek ve Karniadakis, 2009).....	9
Şekil 2.1. Silindir ve dış kabuktan oluşan sistemin hücum açısız ($\alpha=0^\circ$) şematığı ve geometrik parametreleri.....	11
Şekil 2.2. Hesaplama bölgesine ait şematik.....	16
Şekil 2.3. Silindir ve dış kabuk arasındaki yapılandırılmış ağın bir görüntüsü.....	18
Şekil 3.1. Sistem parametrelerinin $a=D/2$ ve $D_K=1,5D$ olduğu durumda zaman-ortalama lı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değışimi.....	20
Şekil 3.2. Sistem parametrelerinin $a=D/4$ ve $D_K=1,5D$ olduğu durumda zaman-ortalama lı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değışimi.....	21
Şekil 3.3. Sistem parametrelerinin $a=D/2$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda zaman-ortalama lı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değışimi.....	22
Şekil 3.4. Sistem parametrelerinin $a=D/4$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda zaman-ortalama lı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değışimi.....	23
Şekil 3.5. Tek silindir, M00-10-21, M04-10-21 ve M08-10-21 için zaman-ortalama lı akım çizgisi desenleri.....	25
Şekil 3.6. M08-10-21 ve M08-11-21 modelleri için zaman-ortalama lı akım çizgisi desenleri.....	26
Şekil 3.7. M03-11-21 ve M08-11-21 modelleri için zaman-ortalama lı akım çizgisi desenleri ve arka kısma eklenmiş hızın v bileşeninin KOK konturları....	26
Şekil 3.8. Farklı sistem parametreleri için St 'nin hücum açısı ile değışimi.....	28

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri.....	12
Tablo 2.2. Tek silindir için zaman adımı olarak 0,05 s durumunda ağdan bağımsızlık testi.....	17
Tablo 2.3. Tek silindir için 160000 ağ sayısında zamandan bağımsızlık testi.....	17
Tablo 2.4. Tek silindir için $Re=75$ 'te elde edilen çıktıların diğer deneysel ve Sayısal çalışmalarla karşılaştırılması.....	18



SEMBOLLER LİSTESİ

A_F	: Ön görünüş alanı
A_P	: Üst görünüş alanı
a	: Açıklık mesafesi, Dalga genliği
C_D	: Direnç katsayısı
C_{D-sis}	: Sistemin direnç katsayısı
C_{D-KOK}	: KOK direnç katsayısı
$C_{D-KOK-sis}$	: Sistemin KOK direnç katsayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_{L-sis}	: Sistemin kaldırma katsayısı
C_{L-KOK}	: KOK kaldırma katsayısı
$C_{L-KOK-sis}$	: Sistemin KOK kaldırma katsayısı
D	: Silindir çapı
D_K	: Kabuk dış çapı
D_m	: Ortalama çap
F_D	: Direnç kuvveti
F_{D-sis}	: Sisteme etkiyen direnç kuvveti
F_L	: Kaldırma kuvveti
F_{L-sis}	: Sisteme etkiyen kaldırma kuvveti
f	: Silindire ait frekans
f_{sis}	: Sisteme ait frekans
L_C	: Karakteristik uzunluk
Re	: Reynolds sayısı
St	: Strouhal sayısı
St_{sis}	: Sistemin Strouhal sayısı
t	: Kabuk kalınlığı
U_∞	: Serbest-akım hızı
u	: Hızın akış doğrultusundaki bileşeni
v	: Hızın akışa dik doğrultudaki bileşeni
α	: Hücum açısı
β	: Gözeneklilik oranı
ε	: Değişim faktörü
λ	: Dalga boyu
μ	: Akışkan dinamik viskozitesi
ρ	: Akışkan yoğunluğu
ϕ	: Herhangi bir fiziksel değişken

KISALTMALAR LİSTESİ

CFD	: Computational Fluid Dynamics
FFT	: Fast Fourier Transformation
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KOK	: Karelerinin Ortalamasının Karekökü
M	: Model
QUICK	: Quadratic Upwind Interpolation
RMS	: Root-Mean-Square
SIMPLE	: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations



ÖZET

Bu çalışmada, bir ince kabuğa sahip bir silindir etrafındaki akışın sayısal benzetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışılan, silindir çapına (D) dayalı Reynolds sayısı (Re) $Re=75$ 'tir. Silindir bir ince kabuk tarafından çevrelenmiştir. İnce kabuğun üç adet açıklığı bulunmaktadır ve $0,005D$ 'lik bir kalınlığa sahiptir. Açıklıklar arasındaki açılar eşittir. Şu muteakip geometrik karakteristiklerin etkileri incelenmiştir: kabuk üzerindeki üç eş-boyutlu açıklığın mesafesi, hücum açısı ve kabuk dış çapının silindir çapına oranı. Tüm sayısal tahminler için ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket program olan Fluent® (Ansys® Academic Research CFD, Release 19.1) kullanılmıştır.

Kuvvet katsayılarının grafikleri, ince kabukların direnç düşürmede etkili olamadıklarını göstermiştir. Zaman-ortalamalı direnç katsayısında hafif bir düşüş (%4,5) olmaktadır fakat bu önemsizdir. İnce kabuk, KOK kaldırma katsayısını düşürmede oldukça yararlıdır. M03-11-21, KOK kaldırma katsayısını düşürmede en iyi performansı göstermiştir. RMS kaldırma katsayısı, tek silindir durumuna göre %41,5 düşürülmüştür. Bununla birlikte, ince kabuğun çalkantı direnç ve kaldırma katsayılarını eş zamanlı tetiklemede de gayet başarılı oluğu bulunmuştur. M05-11-20'nin KOK direnç ve KOK kaldırma katsayıları, sırasıyla, tek silindirinkilerden 16,3 ve 2,24 kat fazladır.

Kabuk ve silindir arası boşluğun, açıklıkların mesafesinin ve hücum açısının art izinde değişiklik açısından oldukça önemli olduğu not edilmelidir.

Anahtar kelimeler: Dairesel silindir, pasif akış kontrolü, açıklığa sahip ince kabuk, hücum açısı

ABSTRACT

Control of Flow around a Cylinder by Thin Shell at Low Reynolds Number

In the present work, numerical simulations of the flow around a cylinder with a thin shell are conducted. The Reynolds number studied, which are based on the cylinder diameter (D), was $Re=75$. The cylinder is covered with a thin shell. The thin shell has three openings on it and has a thickness of $0.005D$. The angle between openings is equal. The influence of the following geometric characteristics was investigated: the width of three equal openings on the thin shell, the angle of attack, and the ratio of the outer diameter of the shell to cylinder diameter. The commercial computational fluid dynamics (CFD) package, Fluent[®] (Ansys[®] Academic Research CFD, Release 19.1), is employed for all numerical predictions.

Plots of force coefficients showed that thin shell is not found to be effective in drag reduction. There is a slight reduction in time-averaged drag (%4.5), but it is not significant. The thin shell is very beneficial to the reduction in RMS lift coefficients. Case M03-11-21 shows the best performance in terms of fluctuating lift force reduction. It is reduced by 41.5% compared to the single cylinder case. However, thin shell is found to be very effective in exciting fluctuating drag and lift forces simultaneously. RMS drag and RMS lift coefficients of the M05-11-20 are 16.3 and 2.24 times larger than those of the single cylinder, respectively.

It must be noted that clearance between shell and cylinder, the width of the openings and angle of attack are very important in terms of wake modification.

Keywords: Circular cylinder, passive flow control, thin shell with opening, angle of attack

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, genel haliyle, cisimler üzerine etkiyen anlık ve zaman-ortalamalı aerodinamik kuvvetlerin, belirli bir sistem üzerine uygulanan bir takım akış kontrol teknikleri sonucunda ne tarz değişikliklere maruz kaldıklarını araştırmaktadır. Akış kontrol teknikleri, belirli bir akışın yapısında değişiklik yaratmak amacıyla kullanılan tüm araçları içermektedir. Günlük hayatta karşılaştığımız birçok akış sisteminde çeşitli akış kontrol parçalarına rastlayabilmekteyiz. Bunlardan en belirgin olanı otomobillerin yere basma kuvvetini arttırarak savrulmasını belirli bir oranda önlemede kullanılan arka kanatçıklardır (spoiler). Uçakların kalkışı ve inişi esnasında ön kanatların arka kısımlarından dışarıya doğru uzatarak uçağa etkiyen kaldırma kuvvetini arttırmayı amaçlayan flaplar da yine bir akış kontrol parçasıdır. Her akış kontrol parçası belirli bir sistem üzerinde istenilen etkiyi yaratmada başarılı olamayabilir. Bu sebeple test edilmesi gerekmektedir. Kimi zaman da ne tarz etkiler yaratacağı merak konusu olduğundan, araştırılır. Bu çalışma da, bir dairesel silindir etrafına konumlandırılmış ince kabuk plakaların, oluşan sistem (kabuk + silindir) üzerine etkiyen zaman-ortalamalı ve çalkantı kuvvetler üzerinde ne tarz etkiler yaratacağını sayısal olarak test etmek üzere gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın konusu, genel hali ile bakıldığında, aerodinamik içerisinde yer alan akış kontrolü alt konusu içerisinde yer almaktadır. Bu tez kapsamında sayısal olarak incelenecek olan ince kabuk plakalar, silindir etrafındaki akışı kontrol edebilmek için herhangi bir enerji ihtiyacına gerek duymadıklarından pasif akış kontrol tekniği içerisinde yer almaktadırlar.

1.2. Tezin Amacı

Tezin esas amacı bir takım alt amaçların birleşiminden meydana gelmektedir. Bu alt amaçlar önem sırasına göre aşağıda sıralanmıştır:

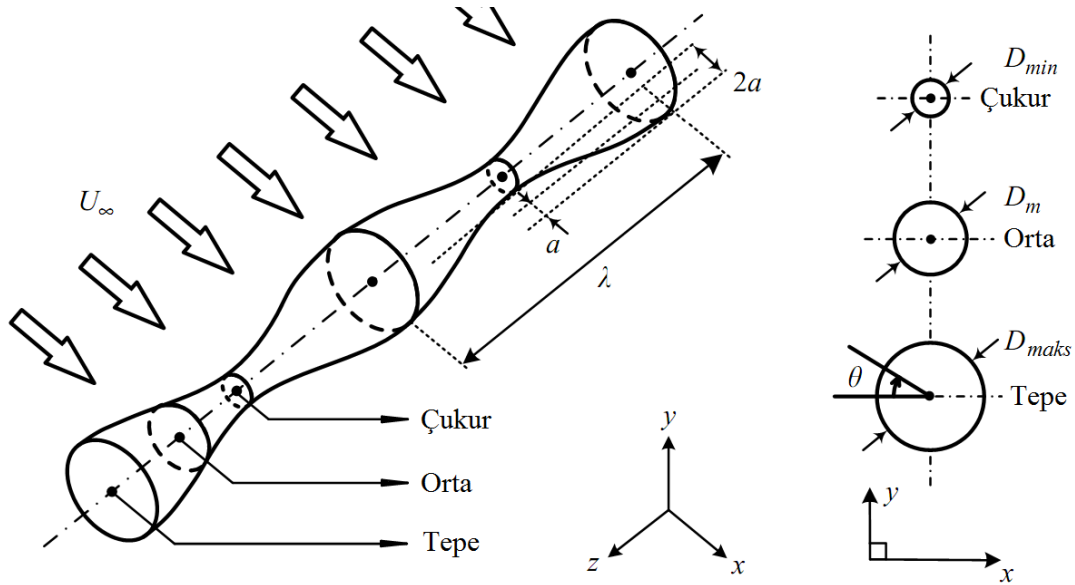
- Zaman-ortalamalı ve anlık aerodinamik kuvvetleri değiştirmek adına mühendislik uygulamalarında ne tarz akış kontrol tekniklerinin kullanıldığını kavramak.
- Bu akış kontrol tekniklerinden pasif grup içerisinde yer alanlardan biri olan ince kabuk plakaların, temel bir aerodinamik model olan dairesel silindir civarına yerleştirilmesi sonucu oluşan sistemi aerodinamik açıdan değerlendirebilmek.

- Lisansüstü derslerde öğretilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programını (FLUENT®) parametrik çalışmalar için kullanabilmek.

1.3. Literatür Taraması

Küt cisimler akım çizgili olanlara nazaran aerodinamik açıdan daha dezavantajlı grubu temsil ederler. Mesela, onlar üzerine etkiyen zaman-ortalamalı direnç akım çizgili olanlara nazaran oldukça yüksektir. Onlar üzerindeki akışta meydana gelen gürültü de akım çizgili olanlara nazaran daha fazladır. Bunların temel sebebinin küt cisim üzerinden ayrılan ve sonrasında büyük-ölçekli çevriye dönüşen kayma tabakaları olduğu düşünülmektedir. Birçok araştırmacı, küt cisimlerin sahip olduğu bu dezavantajlı durumu biraz daha hafifletebilmek adına birtakım akış kontrol teknikleri yardımıyla bu kayma tabakalarının yapısını değiştirmeye çalışmış ve başarılı olmuşlardır.

Örneğin, Lam ve Lin (2009), en-kesiti derinliği boyunca sinüzoidal olarak değişim sergileyen silindir üzerindeki laminar akışı, üç-boyutlu sayısal çalışma gerçekleştirerek incelemişlerdir (Şekil 1.1). Bu tip silindirlere dalgalı silindir adını vermişlerdir. Boyutsuz dalga genliğinin ve boyutsuz dalgaboyunun farklı kombinasyonlarını, ortalama çapa bağlı Reynolds sayısının (Re) 100 değeri için çalışmışlardır. Boyutsuz dalga genliğinin 0,25 ve boyutsuz dalga boyunun 4,5 olduğu durumda dalgalı silindirden çevri dökülmesi gerçekleşmediği belirtilmiştir. Bu durumda, ortalama direnç katsayısında %17'lik bir azalma ve çalkantı kaldırma katsayısının da 0 değerine eriştiği belirtilmiştir. Zhang ve ark. (2006) bir dairesel silindir ve onun ön kısmına yerleştirilen ve çap olarak ondan daha küçük olan bir başka dairesel silindirden (çubuk) oluşan sistemi aerodinamik açıdan sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını farklı çubuk çapları ve çubuk-silindir arası mesafeler için sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. İki-boyutlu sayısal çalışmalarını silindir çapına bağlı Re 'nin 200 değeri için gerçekleştirmişlerdir. Çubuk çapının silindirinkinin yarısı ve çubuk ile silindir merkezleri arası mesafenin 2,6 civarı olduğu durumda, sisteme (silindir+çubuk) etkiyen ortalama direnç katsayısının tek silindirinkine nazaran %35 düşük olduğu ve sisteme etkiyen çalkantı kaldırma katsayısının ise tek silindirinkine nazaran %73 düşük olduğu belirtilmiştir.

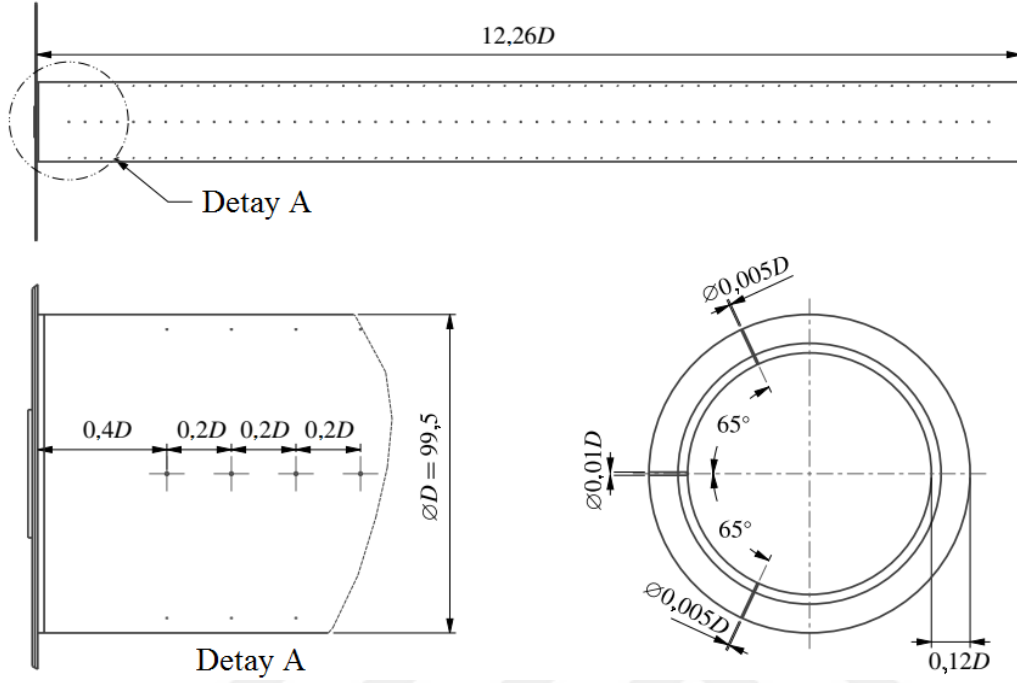


Şekil 1.1. Dalgalı silindire ait şematik diyagram. Dalgaboyu (λ), dalga genliği (a) ve ortalama çap (D_m) tanımları şekil üzerinde açıkça görölmektedir (Lam ve Lin, 2009)

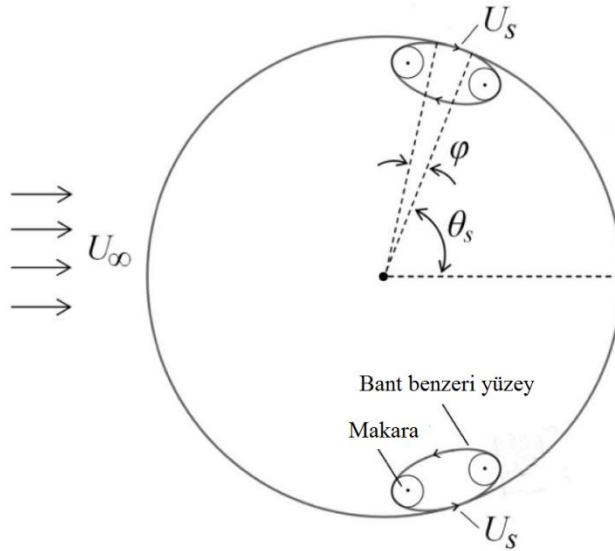
Kuo ve Chen (2009) silindir çapına bağılı Re 'nin 80 değerinde geręekleřtirmiş oldukları sayısal çalışmalarında, ana silindir çapının dörtte biri çapa sahip iki adet küçük silindiri ana modelin arka kısmına ve ana silindirin yatay eksenine simetrik olarak yerleştirmişlerdir. Küçük silindirler arasındaki düşey mesafe ana silindir çapına eşittir. Sonrasında, bu silindirleri ana silindir çapının 0,8 ile 4,5 katı arasındaki farklı akış yönü konumlarına yerleştirmişler ve test etmişlerdir. Sonuç olarak, küçük silindirleri 0,8 ile 3 ana silindir çap aralığına yerleştirildikleri durumlarda sisteme etkiyen ortalama direnci, ana silindirinkine nazaran en fazla %5 oranında düşürebildikleri belirtilmiştir. Sistem içerisindeki ana silindire etkiyen çalkantı kaldırma kuvvetlerinin ise bu aralık için %70-80 oranında düşürülebildiği belirtilmiştir.

Bir silindir yüzeyindeki en yüksek basıncın durma noktasında olduğu bilinmektedir. Clapperton ve Bearman (2018) bundan faydalanarak boş silindirik bir model üzerine etkiyen ortalama direncin, $Re=30000$ ile 280000 aralığı için, durma noktasına (silindir çapının %10'u ve %20'si) ve durma noktasından olan $\pm 65^\circ$ 'lik konumlara boşluklu şekilde yerleştirilen delikler sayesinde ne tarz bir değişim sergileyeyeceğini deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 1.2). Reynolds sayısının 250000 değerinde, bu deliklerden oluşan jetlerin silindir üzerindeki akışı rahatsız etmesi sonucu elde edilen direnç katsayısı, akış sendeletici tel kullanılarak elde edileninkinden bile %14,6 düşük olduğu belirtilmiştir.

Bununla birlikte, $Re < 70000$ için, bu jetlerin silindire etkiyen ortalama direnç katsayısını düşürebilme etkinliğinin olmadığı da gösterilmiştir.



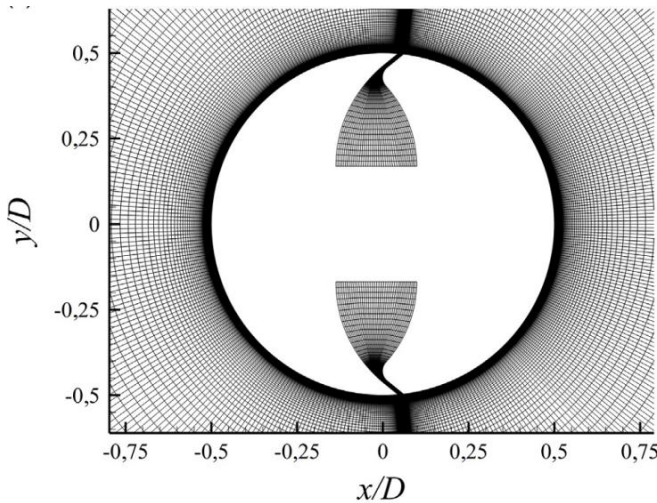
Şekil 1.2. Clapperton ve Bearman'ın (2018) deneylerinde kullandıkları delikli silindir modeli ve modele ait ölçüler



Şekil 1.3. Hareketli yüzeye sahip dairesel silindirik model (Salimipour ve Salimipour, 2019)

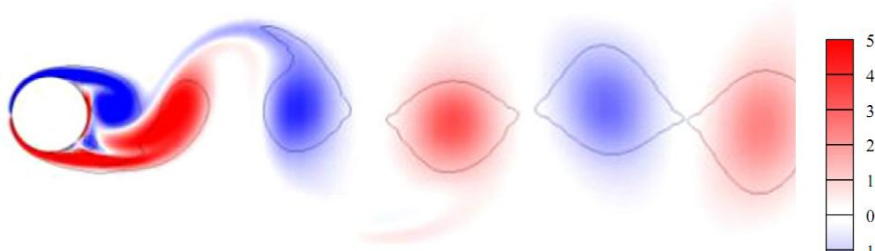
Salimipour ve Salimipour (2019), bir dairesel silindir yüzeyinde hareketli yüzey oluşturulduğu durumda, bu hareketli yüzey hızının ve hareketli yüzey yerleştirilme açısının

silindir üzerindeki akışa etkisini incelemişlerdir (Şekil 1.3). Sayısal çalışmalarını $60 < Re < 180$ için gerçekleştirmişlerdir. Yüzey hareketi bir enerji tüketimi gerektirdiğinden, minimum güç harcayarak direnci düşürebilmek için gerekli parametreleri tayin etmişlerdir. Buna göre, hareketli bandın arka durma noktasından başlayarak 70° 'ye yerleştirildiği ve bant hızının serbest akım hızına oranının $Re=60$ için 0,5, $Re=100$ için 0,9, $Re=140$ için 1,1 ve $Re=180$ için 1,3 olduğu durumlar için direnç katsayısındaki düşüşler, sırasıyla, %10, %20, %22 ve %28 değerlerine erişmiştir. Bu durumlarda silindirlerde çevri dökülmesi mevcut olduğu gösterilmiştir. Çevri dökülmesini ve dolayısıyla çalkantı kaldırma katsayısını ortadan kaldırmak için hareketli bandın 60° 'ye yerleştirilmesi gerektiğini ve hız oranlarının $Re=60$ için 1,5, $Re=100$ için 2, $Re=140$ için 2,25 ve $Re=180$ için 2,75 değerine artırılması gerektiğini de göstermişlerdir. Liu ve Feng (2015) bir dairesel silindir etrafındaki akışı, silindir alt ve üst yüzeyindeki açıklıklardan oluşturdukları sentetik (net-sıfır-kütle-akıllı) jet ile kontrol etmeye çalışmışlardır (Şekil 1.4). Reynolds sayısının 500 değerinde gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında momentum katsayısı ve uyarma frekansını temel parametreler olarak kullanmışlardır. Özellikle uyarma frekansının ve momentum katsayısının belirli kombinasyonlarında akış yapısının simetrik hale geldiğini belirtmişler ve bu akış modunu simetrik çevri dökülmesi olarak adlandırmışlardır. Bu moda, silindir art izinde çevriler mevcut olmasına rağmen herhangi bir çalkantı kaldırma katsayısının değerinin sıfır olduğunu ve ortalama direncin ise %40 civarında düşürüldüğünü belirtmişlerdir. Simetrik çevri dökülmesi moduna ait bir görüntü Şekil 1.5'te verilmiştir.

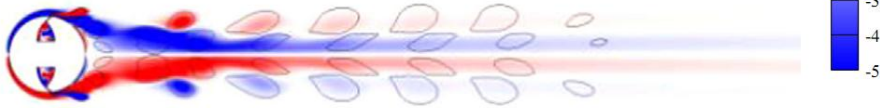


Şekil 1.4. Silindir ve onun üst ve alt noktalarındaki açıklıktan oluşturulan sentetik jete ait hesaplama bölgesinin bir görüntüsü (Liu ve Feng, 2015)

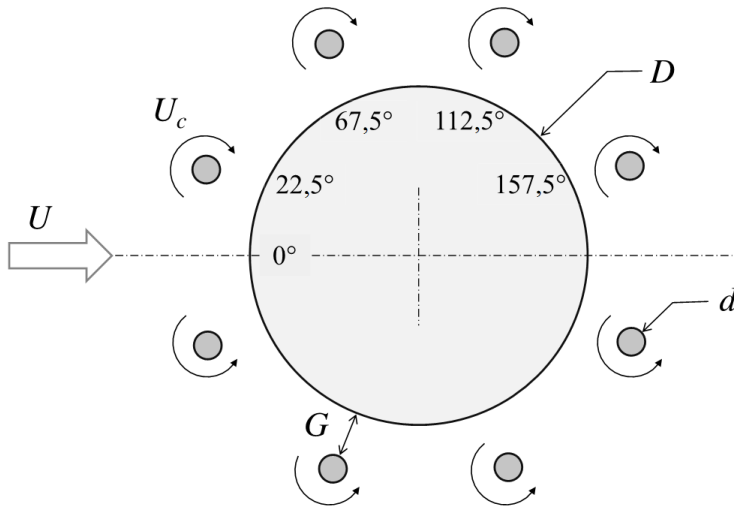
Doğal çevri dökülmesi deseni



Simetrik çevri dökülmesi deseni



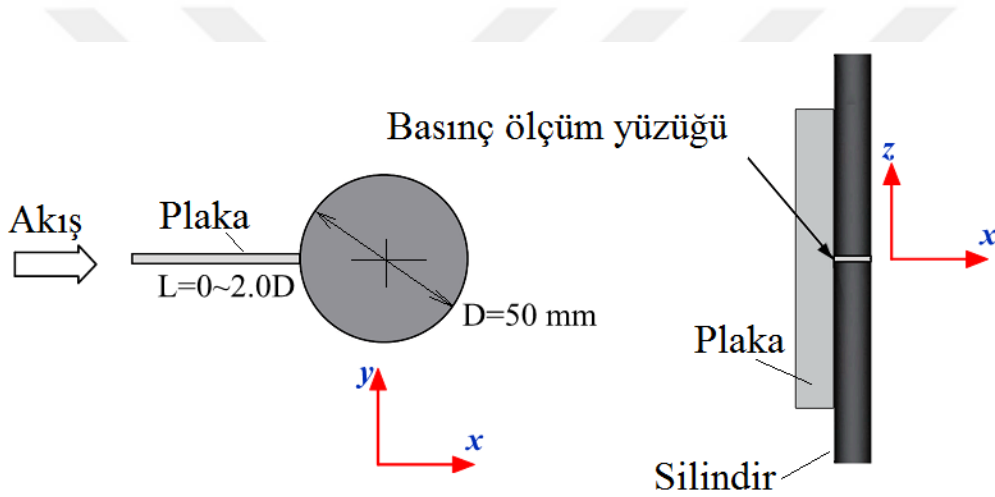
Şekil 1.5. Tek silindir art izinde oluşan doğal çvrinti desenleri (üst) ve sentetik jet ile kontrol edilen silindir art izinde oluşan simetrik çvrinti desenleri (Liu ve Feng, 2015)



Şekil 1.6. Ana silindir ve dönme yönleri gösterilmiş 8 adet küçük silindirden oluşan sistem (Assi ve ark., 2019)

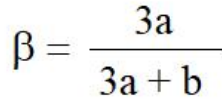
Assi ve ark. (2019), açık deniz uygulamaları bulunan dairesel silindir üzerindeki çevri dökülmesini kontrol edebilmek için sekiz adet, çapları ana silindirin %5'i kadar olan, ana silindir çevresine eşit açıda yerleştirilen, ana silindir ile aralarındaki boşluk ana silindir çapının %10'u kadar olan ve belirli bir yönde dönen küçük silindirlerden faydalanmışlardır (Şekil 1.6). Sayısal çalışmalarını $Re=100$ 'de gerçekleştirmişler ve temel parametre olarak küçük silindir dönme hızının serbest akım hızına oranını kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda şu önemli çıktıları belirtmişlerdir. Şayet temel amaç, minimum enerji harcayarak ana silindirden çevri dökülmesinden dolayı meydana gelen çalkantı kuvvetleri

düşürmekse, hız oranının 3 olduğu durum idealdir. Şayet temel amaç, ne kadar enerji harcadığından daha çok sisteme etkiyen direnci düşürmekse, hız oranının 6 veya daha yüksek olduğu durumlar idealdir. Gao ve ark. (2020) uzunlukları silindir çapının 2 katına kadar olan ince plakaları silindirin ön durma noktasına yatay ve boşluksuz olacak şekilde sırayla sabitlemişler ve bu durumda akış yapısı ve aerodinamik karakteristiklerde ne tarz değişimler olduğunu araştırmışlardır (Şekil 1.7). $Re=26600$ 'de gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında hem zaman-ortalamalı hem de çalkantı kuvvetleri azaltmada en etkin plaka uzunluğunun 1 silindir çapına eşit olduğunu belirtmişlerdir. Bu uzunluktaki plaka ve silindirden oluşan sisteme etkiyen ortalama direnç katsayısındaki ve çalkantı kaldırma katsayısındaki düşüşler, tek silindirinkinden, sırasıyla, %36 ve %63 daha düşüktür.

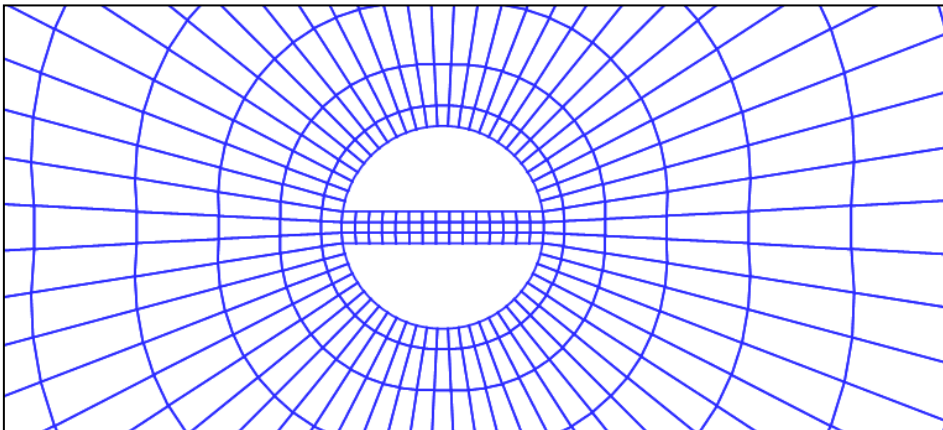


Şekil 1.7. Ön kısmına ince plaka yerleştirilmiş ana silindirin yan ve üstten görünüm şematığı (Gao ve ark., 2020)

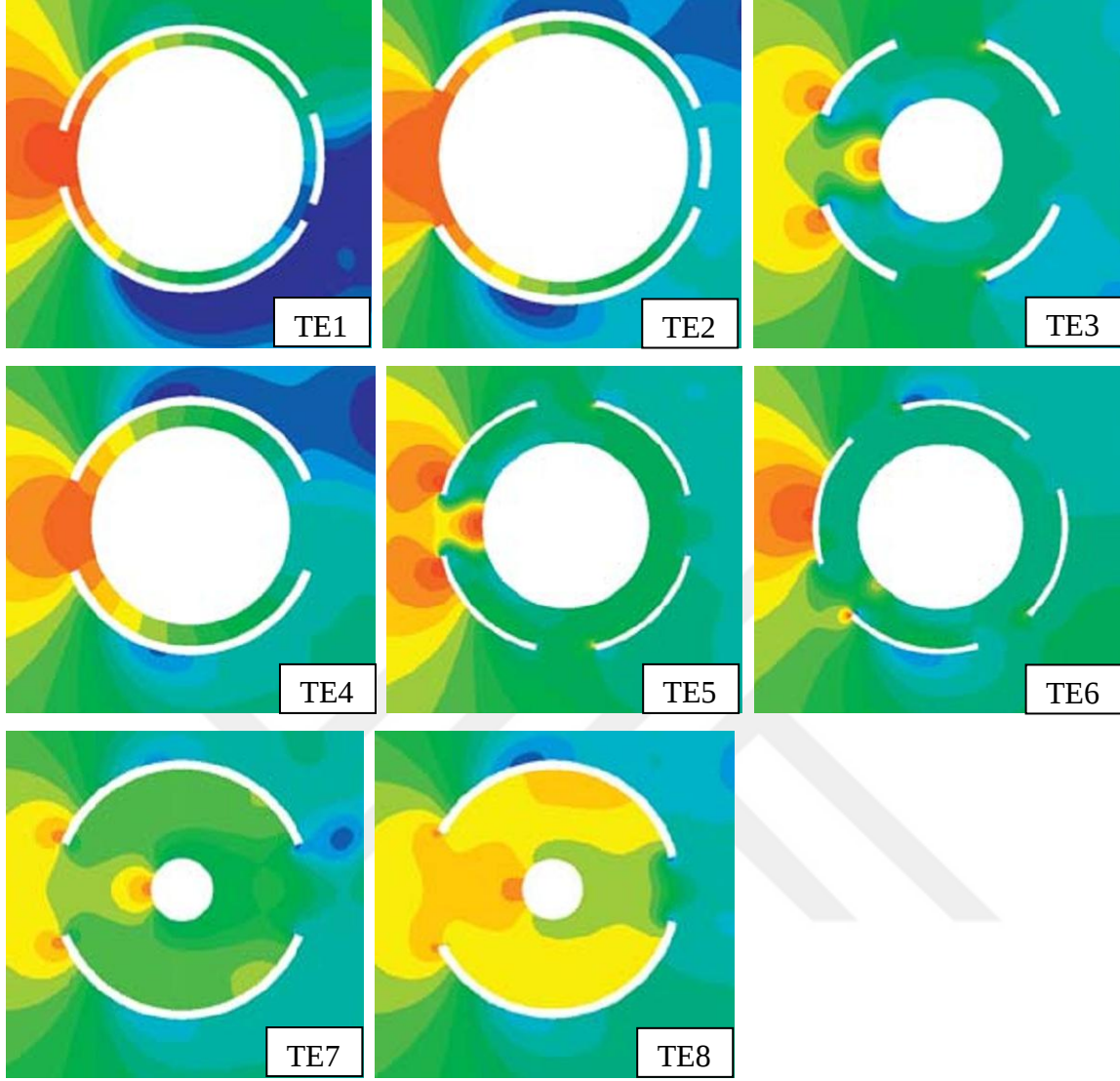
Durhasan ve ark. (2018) sabit çapa sahip bir boş silindir yanal yüzeyine, çapları silindirinkinin 1/10'u kadar olan farklı yoğunlukta gözenekler açmışlar ve gözeneklilik oranının model art izinde oluşan akış yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Şekil 1.8). Deneysel çalışmalarını silindir çapına dayalı Re 'nin 10000 değerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, gözeneklilik oranının 0,25 ten 0,6'ya kadar artması durumunda art izindeki türbülans şiddetinin oransal şekilde azaldığını yani akışın stablize edildiğini, 0,6'dan 0,8'e kadar artması durumunda ise düşüş oranında azalma olduğunu göstermişlerdir.



Baek ve Karniadakis (2009), çevri-kaynaklı titreşimi minimuma indirebilmek için ilk olarak bir silindirin yatay eksenine farklı genişliklerde yarıklar açmışlardır (Şekil 1.9). Bu genişliklerin silindir çapına oranları 0,0, 0,05, 0,12, 0,14, 0,16, 0,20 ve 0,30'dur. Sayısal çalışmalarını iki Re için gerçekleştirmişler ve yarıkların etkisini silindirik modellerin sabit olduğu, sadece düşey yönde salınım yapabildiği ve hem düşey hem de yatay yönde salınım yapabildiği durumlar için incelemişlerdir. Bu yarıkların, yarıklık genişliğine bakılmaksızın, sabit silindir üzerine etkiyen çalkantı kaldırma kuvvetlerini ve salınabilen silindirlerin salınım genliklerini düşürmede çok etkili bir akış kontrol yöntemi olduğunu belirtmişlerdir.



8



Şekil 1.10. Yatay ekseninde açılan yarığa alternatif olarak önerilen ince kabuklu modeller (Baek ve Karniadakis, 2009)

Araştırmacılar, çalışmalarında, yarık açmaya alternatif olarak silindir etrafına ince kabuk yerleştirmişler ve kalınlığını sabit tutmak kaydıyla, kabuk çapının, silindir çapının, kabuk üzerinde açılan açıklıkların ve açıklık yerleştirilme açılarının farklı konfigürasyonlarının aerodinamik karakteristiklere etkisini de incelemişlerdir (Şekil 1.10). TE6 isimli modele etkiyen ortalama-direnç ve çalkantı kaldırma katsayılarının, tek silindire etkiyeninkilerden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Kimi zaman, aerodinamik açıdan daha dezavantajlı durum oluşturacak bir kontrol yöntemi, yani kullanıldığında zaman-ortalamalı veya çalkantı kuvvetlerde artışa sebep olan bir akış kontrol yöntemi, güç üretimi bakımından avantaj sağlayabilmektedir. Mesela, son zamanlarda ilerleyen teknoloji ile birlikte birçok malzemede verimlilik açısından

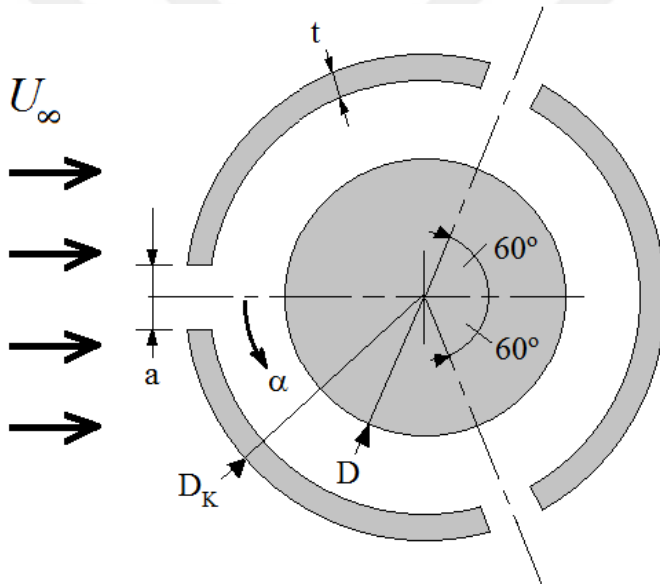
iyileştirmeler sağlanmıştır. Bunlardan biri de piezoelektrik malzemelerdir (Yang ve ark., 2018). Bunlar, kuvvet kaynaklı gerinmeye dayalı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen bir tür malzemedir. Uygulanan çalkantı kuvvetin artması, daha fazla elektrik gücü üretimi anlamına gelmektedir.

Yukarıda, Baek ve Karniadakis (2009) tarafından gerçekleştirilen ince kabuklu çalışma bu tezin gerçekleştirilmesine ilham kaynağı olmuştur. Bunun ilk sebebi, ince kabukların, ana model üzerinde herhangi bir değişiklik gerektirmiyor olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede, şayet ana model içerisinde bir iç akış varsa bu engellenmemiş olacaktır. İkinci sebep, bu konuda gerçekleştirilmiş herhangi bir parametrik çalışma bulunmamasıdır. Mevcut tezde, özellikle hücum açısının, silindir ile kabuk çapları oranının ve açıklık genişliklerinin etkisi incelenecektir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Test Edilen Modeller

Sayısal çalışmada test edilmesi planlanan sistemin en-kesitini veren şematik şekil 2.1 içerisinde sunulmuştur. Burada t sembolü kabuğun kalınlığını, D sembolü silindir çapını, D_K sembolü dairesel kabuk dış çapını, a sembolü kabuğun üzerindeki açıklığın genişliğini, α sembolü kabuğun ön kısmındaki açıklığın ortası ile yatay eksen çizgisinin kesiştiği durumdaki sistemin (kabuk + silindir) saat yönünün tersine olan dönme açısını ve U_∞ sembolü serbest-akım hızını temsil etmektedir.



Şekil 2.1. Silindir ve dış kabuktan oluşan sistemin hücum açısız ($\alpha=0^\circ$) şematiki ve geometrik parametreleri

Kabuk, tüm modeller için 3 adet açıklığa sahiptir. Silindir merkezinden ve açıklık ortasından geçen eksenler arasında kalan açılar eşit yani 120° 'dir. Sayısal çalışmada kullanılan diğer önemli parametrelere ve değerlerine tablo 2.1'den erişilebilir.

Sayısal çalışma, silindir çapına bağlı tek bir Reynolds sayısında ($Re=75$) gerçekleştirilmiştir. Bu sayı kabuk çapına bağlı olarak elde edildiğinde değeri en fazla 150 olmaktadır. Reynolds sayısının 49 ile 190 değer aralığında yer aldığı durumda iki-boyutlu silindir etrafındaki akış laminar ve üç-boyutlu etkilerden uzak bir karakteristik göstermektedir (Williamson, 1996). Bundan dolayı, akış içerisinde hız çalkantıları

meydana gelse de, bunların zamana bağlı değişimleri sinüzoidal bir dağılım sergiler. Reynolds sayısı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L_C}{\mu} \quad (2.1)$$

Burada yer alan sembollerden ρ (kg/m³) akışkan yoğunluğunu, U_{∞} (m/s) serbest-akım hızını, L_C (m) karakteristik uzunluğu (bu çalışmada L_C referans çapa göre değerlendirilmiştir) ve μ (kg/m/s) akışkanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre adı ve sembolü	Değeri/Değerleri
Reynolds sayısı (Re)	75 olarak 1 adet
Silindir çapı (D)	0,1 m olarak 1 adet
Açıklık mesafesi (a)	D/2 ve D/4 olarak 2 adet
Kabuk dış çapı (D _K)	1,5D ve 2D olarak 2 adet
Kabuk kalınlığı (t)	D/20 olarak 1 adet
Hücum açısı (α)	0°, 7,5°, 15°, 22,5°, 30°, 37,5°, 45°, 52,5° ve 60° olarak 9 adet

Çalışmada, farklı parametrelerin kombinasyonları test edilmiştir. Modeller arası karışıklığı önlemek amacıyla bir kodlama sistemi geliştirilmiştir. Bu kodlama sistemindeki ilk terim hücum açısı hakkında, ikinci terim kabuk çapının silindir çapına oranı hakkında ve son terim ise açıklığın silindir çapına oranı hakkında bilgi vermektedir. İlk terimde M'den sonra gelen 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 ve 08, sırasıyla, 0°, 7,5°, 15°, 22,5°, 30°, 37,5°, 45°, 52,5° ve 60°'lik açıları temsil etmektedir. İkinci terimde yer alan 10 ve 11, sırasıyla, kabuk çapının silindir çapına oranının 1,5 ve 2 olduğunu göstermektedir. Son terimde yer alan 20 ve 21, sırasıyla, açıklığın çapının silindir çapına oranının 0,25 ve 0,50 olduğunu göstermektedir. Örneğin, M03-11-20 modeli, sabit kalınlıklı kabuk çapının silindir çapına oranının 2 olduğu, açıklık genişliğinin silindir çapına oranının ise 0,25

olduğu üç parçalı kabuğun eş merkezli olarak silindir etrafına 22,5° hücum açısıyla yerleştirildiği modeli temsil etmektedir.

2.2. Çalışmada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Silindire ve kabuk ile silindirden oluşan sisteme etkiyen ortalama direnç katsayıları, sırasıyla, aşağıdaki formüllerden elde edilmiştir.

$$< C_D > = \frac{< F_D >}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A_F} \quad (2.2)$$

$$< C_{D-sis} > = \frac{< F_{D-sis} >}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A_{F-sis}} \quad (2.3)$$

Burada, herhangi bir parametrenin zaman ortalaması $<...>$ operatörüyle, silindire ve kabuk ile silindirden oluşan sisteme etkiyen ortalama direnç kuvveti, sırasıyla, F_D ve F_{D-sis} sembolleriyle, silindire ve sisteme etkiyen ortalama direnç katsayısı, sırasıyla, C_D ve C_{D-sis} sembolleriyle ve silindirin ve sistemin ön görünüş alanları, sırasıyla, A_F ve A_{F-sis} sembolleriyle gösterilmiştir. Sayısal çalışma iki-boyutlu olarak gerçekleştirildiğinden derinlik 1 m olarak alınmıştır. Silindire ve kabuk ile silindirden oluşan sisteme etkiyen ortalama kaldırma katsayıları, sırasıyla, aşağıdaki formüllerden elde edilmiştir.

$$< C_L > = \frac{< F_L >}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A_P} \quad (2.4)$$

$$< C_{L-sis} > = \frac{< F_{L-sis} >}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A_{P-sis}} \quad (2.5)$$

Burada, silindire ve sisteme etkiyen ortalama kaldırma kuvveti, sırasıyla, F_L ve F_{L-sis} sembolleriyle, silindire ve sisteme etkiyen ortalama kaldırma katsayısı, sırasıyla, C_L ve C_{L-sis} sembolleriyle ve silindirin ve sistemin üst görünüş alanları, sırasıyla, A_P ve A_{P-sis} sembolleriyle gösterilmiştir.

Hem silindirin hem de sistemin direnç ve kaldırma katsayılarına ait KOK (karelerinin ortalamalarının karekökü) değerleri ise aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$C_{D-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_D(i) - \langle C_D \rangle)^2} \quad (2.6)$$

$$C_{D-KOK-sis} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{D-sis}(i) - \langle C_{D-sis} \rangle)^2} \quad (2.7)$$

$$C_{L-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_L(i) - \langle C_L \rangle)^2} \quad (2.8)$$

$$C_{L-KOK-sis} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{L-sis}(i) - \langle C_{L-sis} \rangle)^2} \quad (2.9)$$

Burada, $C_D(i)$, $C_{D-sis}(i)$, $C_L(i)$ ve $C_{L-sis}(i)$, sırasıyla, silindirin anlık direnç katsayısını, sistemin anlık direnç katsayısını, silindirin anlık kaldırma katsayısını ve sistemin anlık kaldırma katsayısını temsil etmektedir. Yukarda verilen i ve n sembolleri ise, sırasıyla, sistem üzerine etkiyen anlık kuvvet katsayılarının geçici rejim sonrasında periyodik, düzenli değişim göstermeye başladığı kısımdaki ilk anlık veri numarasını ve en az 15 periyot sonrasındaki son anlık veri numarasını temsil etmektedir. Boyutsuz frekans olarak da bilinen Strouhal sayısı ise, silindir ve sistem için, sırasıyla, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$St = \frac{f \cdot D}{U_\infty} \quad (2.10)$$

$$St_{sis} = \frac{f_{sis} \cdot D_K}{U_\infty} \quad (2.11)$$

Burada, f ve f_{sis} , sırasıyla, silindirin kaldırma katsayısı-zaman serisinin hızlı Fourier dönüşümünden (fast Fourier transformation, FFT) ve dış kabuk çapının üç katı gerisine ve yatay eksenden 0,5 dış kabuk çapı yukarısında yerleştirilen bir noktadan elde edilen hız-zaman serisinin FFT'sinden elde edilen frekansları temsil etmektedir. Strouhal sayısı,

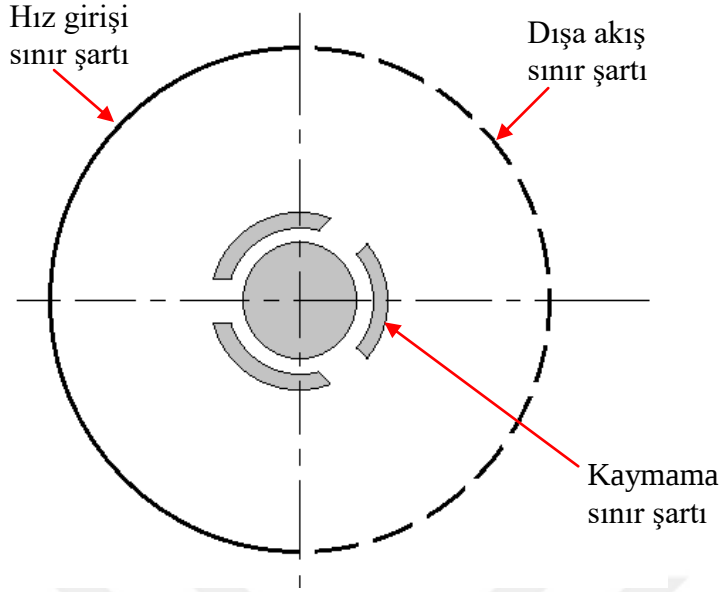
bizlere, akış yapısının mevcut halinin korunup korunmadığı hakkında bilgiler sunabilmektedir.

2.3. Sayısal Çözücünün Ayarları

Mevcut sistem üzerindeki Newton-tipi akışkanın daimi olmayan, laminar, sıkıştırılamaz, iki-boyutlu, izotermal akışı, ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı olan Fluent[®] Student (Ansys[®] Academic Research CFD, Release 19.1) ile modellenmiştir. Bu program ayrıklaştırma metodu olarak sonlu hacimler metodunu kullanmaktadır. Çalışmada basınç-tabanlı çözücü seçilmiştir. Hücre merkezlerindeki çözüm değişkenlerinin gradyanları için Green-Gauss hücre-tabanlı yaklaşım seçilmiştir. Hücrelerdeki basınç gradyanlarını hesaplayabilmek için ikinci derece şema seçilmiştir. Basınç-hız ilişkisi için basınç bağlantılı denklemler için yarı-kapalı metot (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, SIMPLE) tercih edilmiştir. Zamana bağlı parametreler, ikinci derece doğrulukta ve zaman bakımından geriye adımlı olmak üzere kapalı bir tarzda ayrıklaştırılmıştır. Taşınım içeren terimler için kuadratik ileri adım interpolasyon (Quadratic Upwind Interpolation, QUICK) şeması seçilmiştir. Yayınım içeren terimler için ise ikinci-derece doğruluğa sahip sonlu fark interpolasyon şeması seçilmiştir.

2.4. Hesaplama Bölgesi

Hesaplama bölgesine ait şematik şekil 2.2’de verilmiştir. Hesaplama bölgesi dairesel en-kesite sahiptir, çapı 100D’dir. Çapın yeterince büyük seçilmesi akışla ilgili değerlerin gerçek değerlere yeterince yakın olmasını sağlamak için gerekmektedir. İnce kabuk, silindir ve hesaplama bölgesinin merkezleri çakışıktır. Hesaplama merkezini kesen düşey eksenin sol tarafında kalan hesaplama merkezi çevresi boyunca (sürekli kalın çizgi) hız girişi sınır şartı atanmıştır. Bu sınır şartında belirtilmesi gereken, hızın akım yönü ve akıma dik bileşenlerinin değerleri, sırasıyla, $u=0,01096$ m/s ve $v=0$ m/s’dir. Hesaplama merkezi çevresinin diğer yarısına ise (kesikli kalın çizgi) dışa akış sınır şartı atanmıştır. Silindir ve kabuğa ait tüm kenarlara (gri alanların çevreleri) ise kaymama sınır şartı atanmıştır. Bundan dolayı bu geometrilerin yüzeyindeki akışkanlar herhangi bir hız bileşenine sahip değildir ($u=v=0$ m/s).



Şekil 2.2. Hesaplama bölgesine ait şematik

2.5. Doğrulama ve Geçerleme Çalışmaları

Kullanılan sayısal yöntemlerin silindir ve ince kabuktan oluşan sistem etrafındaki akışı modellemede ne derece etkin olduklarını ortaya koyabilmek için ilk olarak tek silindir (ince kabuğun olmadığı durum) etrafındaki akış modellenerek doğrulama süreci gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise elde edilen çıktılar diğer sayısal ve deneysel çalışma çıktılarıyla kıyaslanarak geçerleme süreci gerçekleştirilmiştir.

Hesaplama bölgesinde yapılandırılmış dikdörtgen ağ oluşturulmuştur. Özellikle kaymama koşulunun atandığı sınırlara yakın bölgeler içerisinde olabildiğince ince taneli ağ oluşturulmaya özen gösterilmiştir. Bu adımlar temel alınarak beş farklı ağ sayısına sahip hesaplama bölgesi oluşturulmuş ve uzaysal çözünürlük test edilmiştir. Testlerde, en uygun ağ sayısını belirleyebilmek için değişim faktörü (ε) kullanılmıştır. Bu faktör aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_1 = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_1} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Burada kullanılan ϕ sembolü herhangi bir değişkeni, 1 ve 2 alt indisleri ise, sırasıyla, mevcut ağ sayısını ve sonraki ağ sayısını ifade etmektedir. Bu faktörü 2'nin altına düşüren ağ sayısı sonraki tüm benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere seçilecektir. Bu

bağlamda 5 adet ağ sayısı belirlenmiş ve elde edilen değişim faktörleriyle birlikte tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Tek silindir için zaman adımı olarak 0,05 s durumunda ağdan bağımsızlık testi

Ağ adı	Ağ sayısı	$\langle C_D \rangle$	ϵ	C_{D-KOK}	ϵ	C_{L-KOK}	ϵ	St	ϵ
Ağ-1	40000	1,343	0,89	0,00362	43	0,181	16	0,142	4,1
Ağ-2	80000	1,355	0,074	0,00253	7,7	0,156	3,3	0,148	0,67
Ağ-3	120000	1,356	0,074	0,00235	3,1	0,151	1,3	0,149	0
Ağ-4	160000	1,357	0	0,00228	1,3	0,149	0,68	0,149	0
Ağ-5	200000	1,357	-	0,00225	-	0,148	-	0,149	-

Yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere tek silindir etrafındaki akış durumundan elde edilen ortalama direnç değerine, direncin KOK değerine, kaldırmanın KOK değerine ve Strouhal sayısının değerine ait değişim faktörü değerlerinin hepsinin 2’nin altına düştüğü ağ, Ağ-4’tür. Bundan dolayı sonraki çalışmaların hepsine, bu ağ yapısı oluşturulurken kullanılan tüm parametreler uygulanacaktır.

Tablo 2.3. Tek silindir için 160000 ağ sayısında zamandan bağımsızlık testi

Zaman adımı (s)	Ağ sayısı	$\langle C_D \rangle$	ϵ	C_{D-KOK}	ϵ	C_{L-KOK}	ϵ	St	ϵ
0,2	160000	1,35	0,37	0,00199	9,5	0,138	5,5	0,148	0,67
0,1	160000	1,355	0,15	0,0022	3,5	0,146	2	0,149	0
0,05	160000	1,357	0	0,00228	1,3	0,149	0,67	0,149	0
0,025	160000	1,357	-	0,00231	-	0,15	-	0,149	-

Tablo 2.3, bizlere, zaman adımı 0,05 s olarak ayarlandığında yukarıda verilen parametrelere ait değişim faktörlerinin hepsinin 2’nin altına düştüğünü göstermektedir. Bundan dolayı sonraki çalışmaların hepsinde bu zaman adımı kullanılacaktır.

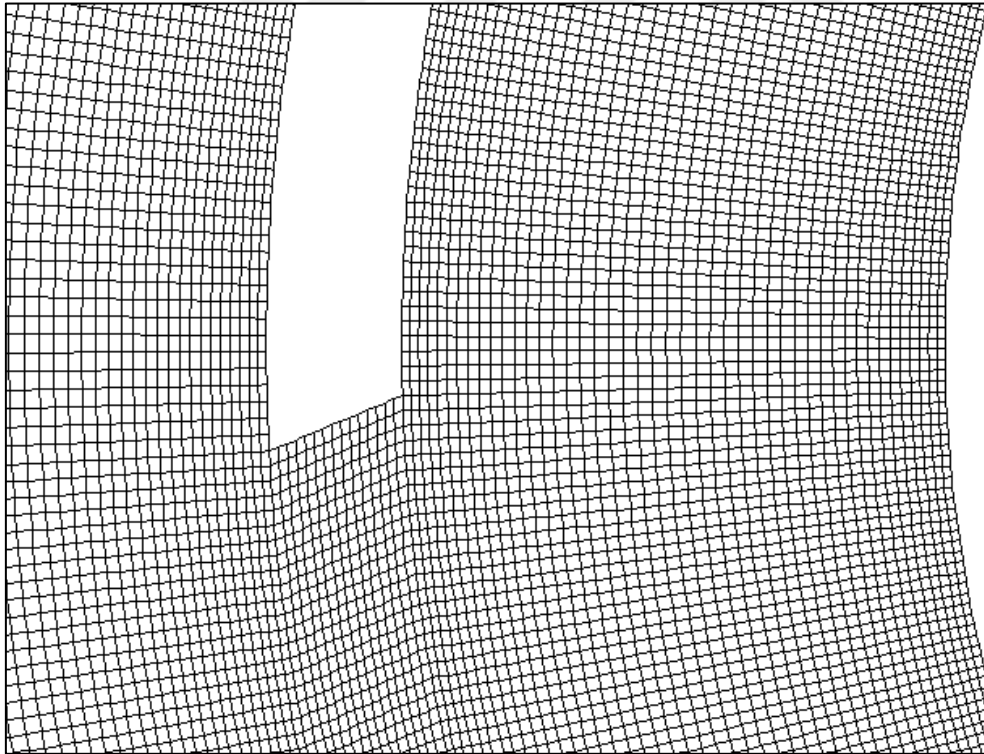
Doğrulama süreci yukarıdaki tablolarda elde edilen çıktıların bizlere sunmuştur. Şimdi de, 160000 ağ sayısı ve 0,05 s zaman adımı için elde edilen çıktıları aynı Re’de gerçekleştirilmiş diğer sayısal ve deneysel verilerle kıyaslayarak geçerleme sürecini tamamlayacağız.

Kıyaslamada kullanılan değerlere bakıldığında, mevcut sayısal çalışma ile Posdziech ve Grundman (2007) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmanın neredeyse tamamen aynı sonuçları elde ettikleri görülmektedir. Hatta bu sayısal çalışmalara ait St

değerleri de deneysel çalışmalarla gayet iyi örtüşmektedir. Bununla birlikte, sayısal çalışmalardan elde edilen dirençler Tritton (1959) tarafından deneysel olarak elde edilenden hafifçe yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, mevcut çalışmada kullanılan sayısal yöntemlerin olayın fiziğini yeterli doğrulukla yansıttığına kanaat getirilmiştir.

Tablo 2.4. Tek silindir için $Re=75$ 'te elde edilen çıktıların diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılması

Referans	Çalışmanın türü	$\langle C_D \rangle$	C_{L-KOK}	St
Williamson (1989)	Deneysel	-	-	0,149
Tritton (1959)	Deneysel	1,27	-	0,147
Posdziech ve Grundman (2007)	Sayısal	1,344-1,357	0,149	0,148-0,149
Mevcut Çalışma	Sayısal	1,357	0,149	0,149



Şekil 2.3. Silindir ve dış kabuk arasındaki yapılandırılmış ağın bir görüntüsü

Kıyaslamada tek silindir kullanılmıştır fakat çalışma ince kabuk ve silindirden oluşan sistem üzerinedir. İnce kabuk ve silindirden oluşan sistem, kabuk ve silindir yüzeylerine yakın bölgelerde ince ağ gerektirmektedir. Bundan dolayı sistemin hesaplama

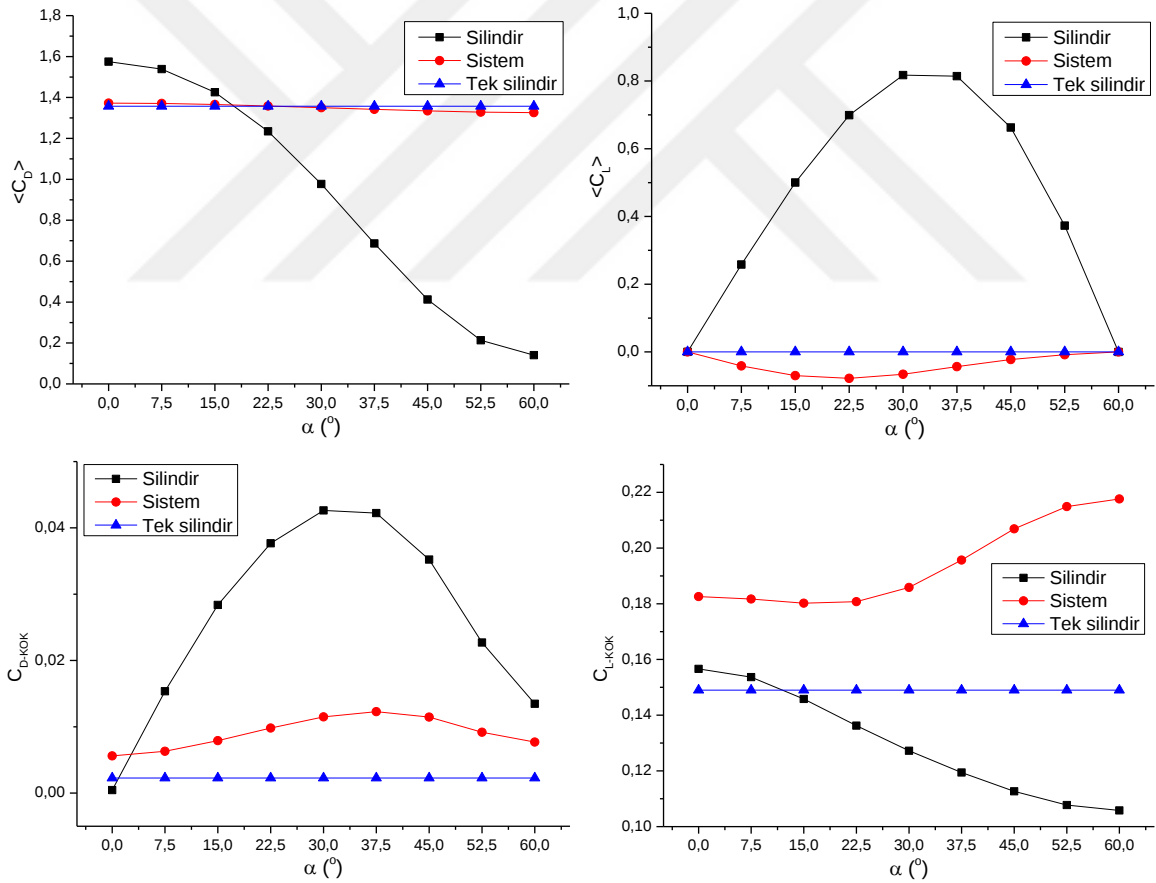
bölgesinde oluşturulan ağ sayısı 160000'den 214000-236000 aralığına artırılmıştır. Kabuk ve silindir etrafındaki yapılandırılmış ağa ait görüntü şekil 2.3 içerisinde verilmiştir. Silindir çevresinde, model türüne bakılmaksızın, 800 ağ oluşturulmuştur. Silindir yüzeyinde bulunan ağın yüksekliği $0,003D$ kadardır. Hesaplama bölgesinde yapılan kontroller sonucu, model türüne bakılmaksızın, oluşturulan ağlara ait maksimum şekil oranı ve maksimum eş-açılı çarpıklık değerleri, sırasıyla, 4,02 ve 0,0025 olarak elde edilmiştir.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Ortalama ve KOK Kuvvet Katsayıları

Şekil 3.1 içerisinde, sistem parametrelerinin $a=D/2$ ve $D_K=1,5D$ olduğu durumda sistem içerisindeki silindire, sisteme ve tek silindire (kabuğun olmadığı durum) etkiyen kuvvet katsayılarının farklı hücum açılarındaki (α) değerleri grafik olarak sunulmuştur. Zaman-ortalamalı dirençlere bakıldığında, sisteme etkiyen direncin, $\langle C_{D-sis} \rangle$, tek silindire etkiyeninki civarında olduğu görülmektedir. Özellikle hücum açısındaki artışın, sistem üzerine etkiyen kuvvetin silindirden gelen kısmında düşüş kabuktan gelen kısmında da artış olduğunu göstermektedir.

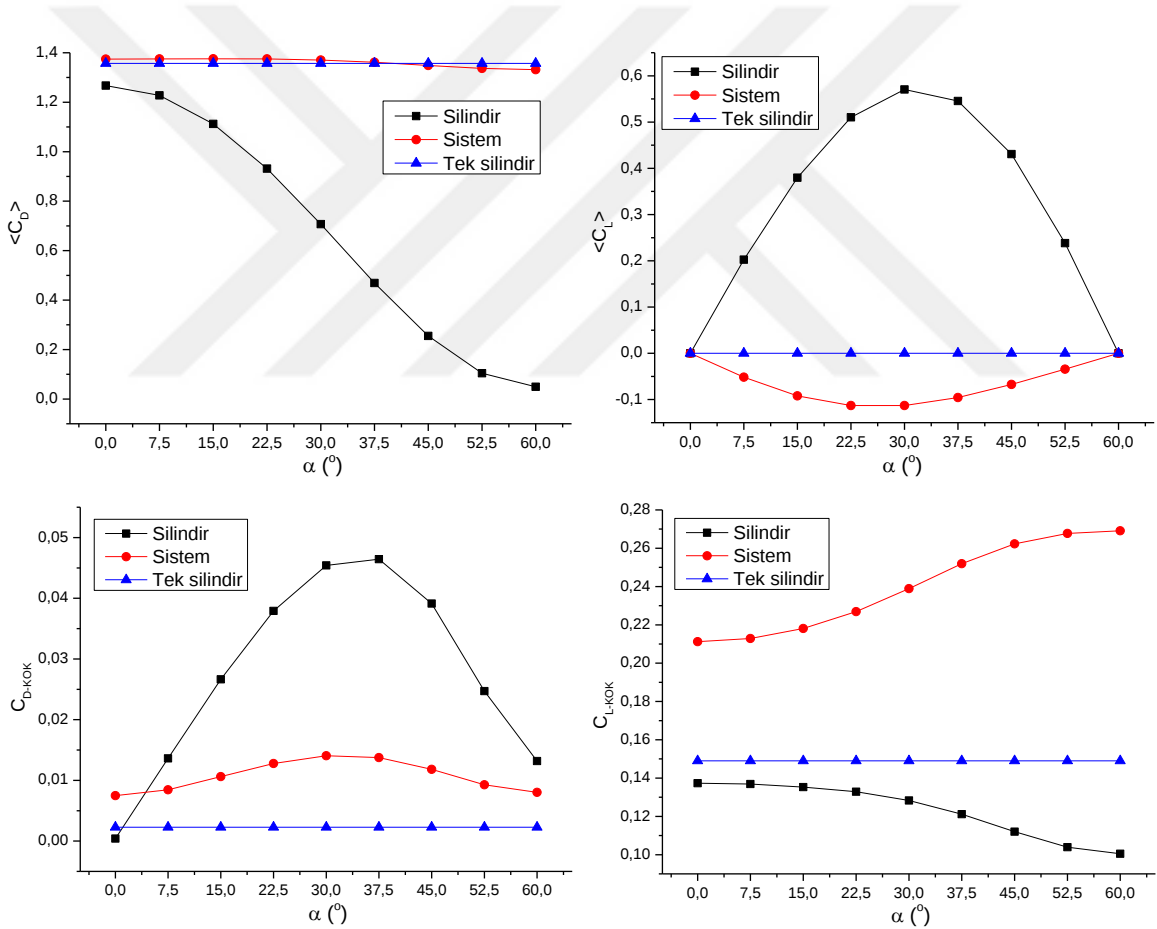


Şekil 3.1. Sistem parametrelerinin $a=D/2$ ve $D_K=1,5D$ olduğu durumda zaman-ortalamalı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

Zaman-ortalamalı kaldırmalara bakıldığında, sisteme etkiyen kaldırmada, $\langle C_{L-sis} \rangle$, hafif düşüş ve tekrar yükseliş gözlemlenirken kabuk iç kısmında yer alan silindire etkiyen

kaldırma, sisteminkine ters yönde ve şiddetli şekilde yükselmiş sonrasında ise tekrar 0 değerine düşmüştür. Kabuk bileşeni üzerindeki kaldırma ise silindire ters yönde bir değişim sergilemiş olmalıdır ki $\langle C_{L-sis} \rangle$ negatif değerlere sahip olsun. Tek silindire ait kaldırma, $\langle C_L \rangle$, model, yatay eksene göre simetrik olduğundan 0 çıkmakta ve hücum açısından etkilenmemektedir.

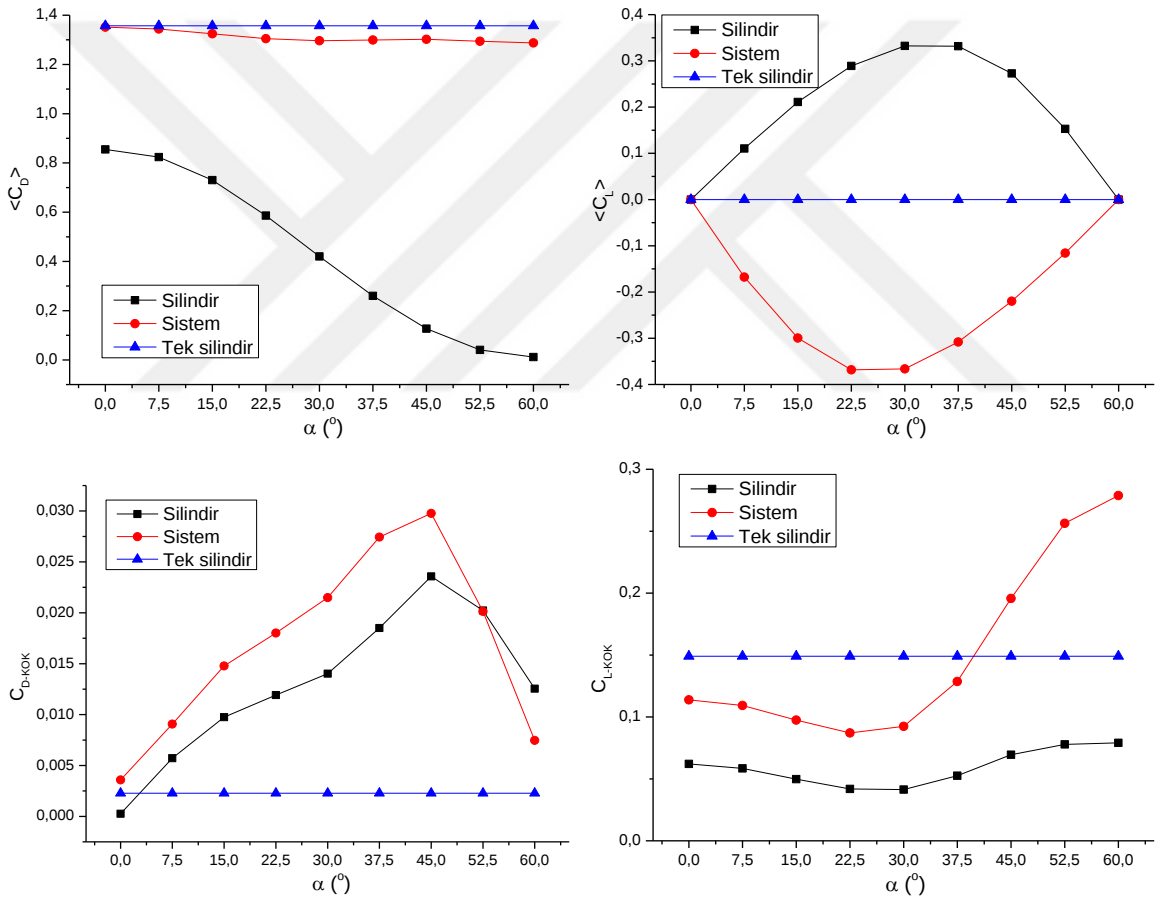
Tek silindir ile kıyaslandığında, dış tarafında kabuk bulunan silindirin C_{D-KOK} ve C_{L-KOK} değerleri, sırasıyla, yüksek ve düşük çıkmaktadır. Yani, kabuk eklenmesi, kabuk iç kısmında yer alan silindir üzerindeki çalkantı direnç kuvvetlerini genellikle artırırken, çalkantı kaldırma kuvvetlerini genellikle düşürmektedir. Özellikle $\alpha=60^\circ$ için, kabuk içi silindire etkiyen C_{L-KOK} değeri, tek silindirinkinden %29 daha düşüktür.



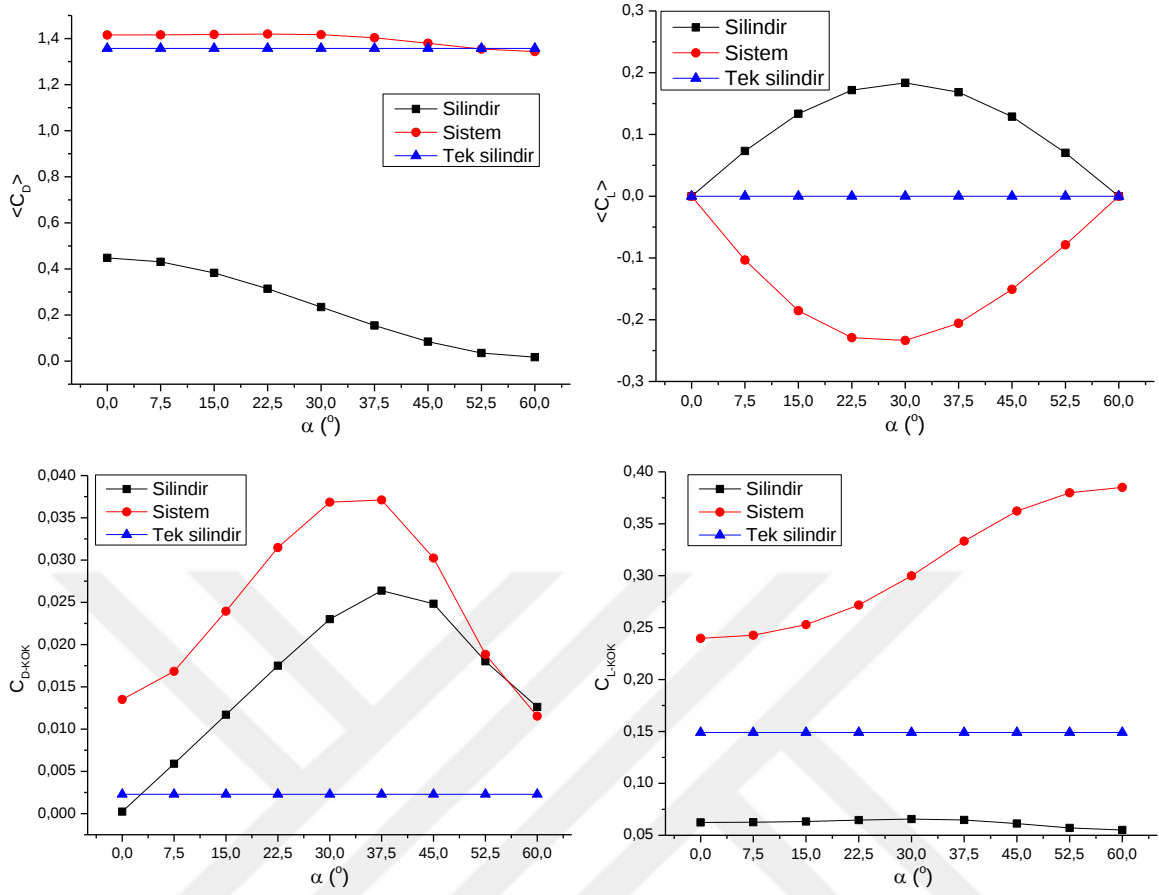
Şekil 3.2. Sistem parametrelerinin $a=D/4$ ve $D_K=1,5D$ olduğu durumda zaman-ortalamalı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

Bununla birlikte, sistem olarak bakıldığında kabuğun etkisi de hesaba katılmalıdır ve bu durumda elde edilen $C_{L-KOK-sis}$ değeri, aynı açıda, tek silindirinkinden %46 daha yüksektir. Şekil 3.2 içerisinde ise, sistem parametrelerinden sadece kabuk üzerindeki

açıklığın genişliğinin $D/2$ 'den $D/4$ 'e düşürüldüğü durumda elde edilen kuvvet katsayılarını göstermektedir. Bu değişiklik, sisteme etkiyen direncin, tek silindirinkinin altına daha yüksek bir hücum açısında düştüğünü göstermektedir. Kabuk içindeki silindire etkiyen direnç ise, hücum açısına bakılmaksızın, hep tek silindirinkinin altında çıkmıştır. Bu durumun temel sebebi, açıklığın kısılmasından dolayı kabuk ile silindir arasında kalan akışın daha durağan hale gelmesi ile alakalıdır. Bu değişim, KOK direnç grafiklerinde çok bir değişim yaratmamışken, KOK kaldırma katsayılarında gözle görülür bir değişiklik meydana getirmiştir. Kabuk içindeki silindirin C_{L-KOK} değeri, hücum açısına bakılmaksızın, hep tek silindirinkinden düşük seviyelerde kalmıştır.



Şekil 3.3. Sistem parametrelerinin $a=D/2$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda zaman-ortalamalı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi



Şekil 3.4. Sistem parametrelerinin $a=D/4$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda zaman-ortalamalı ve KOK kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

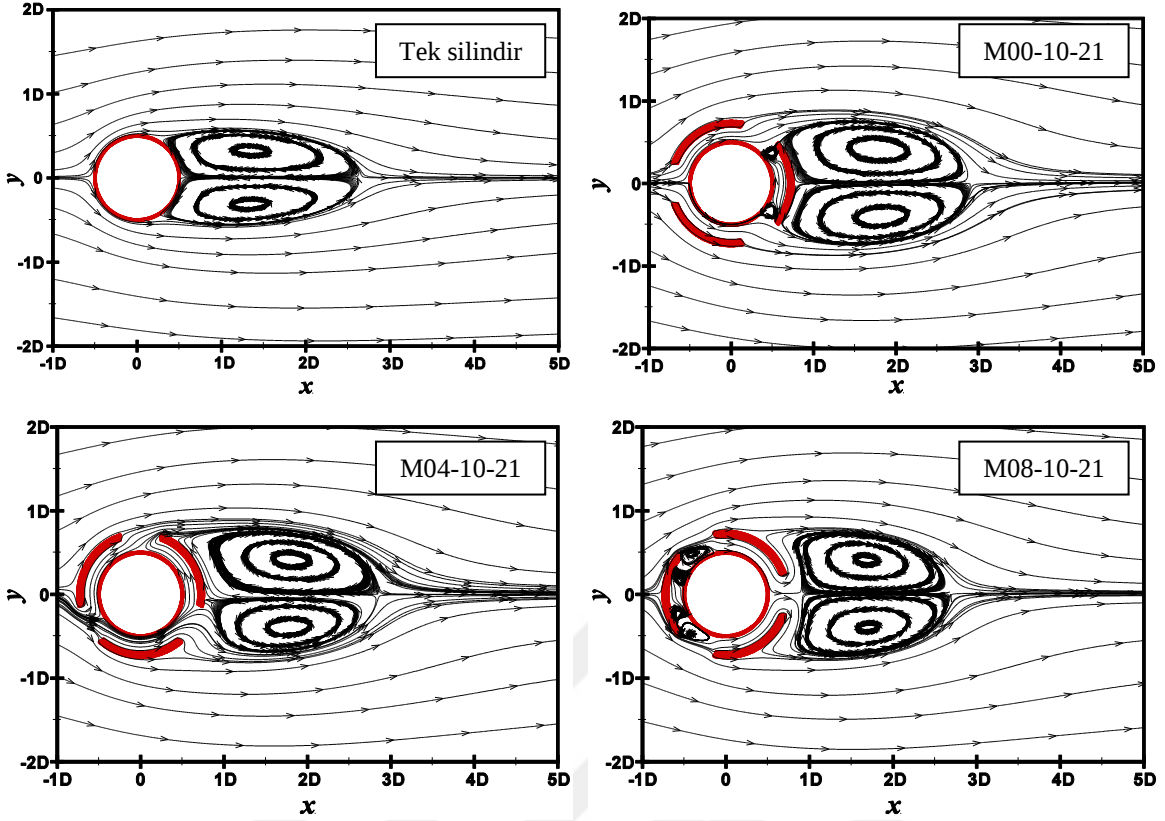
Şekil 3.3, açıklığın $0,5D$ ve dış kabuk çapının da $2D$ olduğu durumda elde edilen kuvvet değerlerinin hücum açısı ile değişimini sergilemektedir. Burada üzerine ilk konuşulacak durum hücum açısının $22,5^\circ$ ve 30° olduğu durumdur. M03-11-21 ve M04-11-21 modellerine bakıldığında hem $\langle C_{D-sis} \rangle$ hem de $C_{L-KOK-sis}$ tek silindirinkinden düşük çıkmaktadır. Burada, çalkantı kaldırma kuvvetini baskılamada M03-11-21 modeli M04-11-21 modelinden, zaman-ortalamalı direnci düşürmede ise M04-11-21 diğerinden bir nebze daha başarılıdır. M03-11-21 ve M04-11-21 modellerinin, tek silindire kıyasla $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerlerindeki düşüşler, sırasıyla %3,8 ve %4,5'tir. M03-11-21 ve M04-11-21 modellerinin, tek silindire kıyasla $C_{L-KOK-sis}$ değerlerindeki düşüşler ise, sırasıyla %41,5 ve %38'dir. Bu modellerin $C_{D-KOK-sis}$ değerleri, tek silindirin en az 13 katı fazla olmalarına rağmen, $C_{L-KOK-sis}$ değerleri $C_{D-KOK-sis}$ değerlerinden oldukça yüksek çalkantıya sahip oldukları için bu şiddetli artış aslında önemsiz kalmaktadır. Kaldırma çalkantılarının dirence göre yüksek olmasının temel sebebi çevri dökülmesi ile ilgilidir. Hücum açısının 30° 'den daha da arttırılmasıyla birlikte $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerleri neredeyse değişmeden

kalırlarken, $C_{L-KOK-sis}$ değerleri, tek silindirinkinin üzerine çıkmaktadır. Hücum açısının $22,5^\circ$ 'den düşürülmesi durumunda ise $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerleri tek silindirinkine yaklaşmakta, $C_{L-KOK-sis}$ değerleri de hafif bir artış gösterse bile yine de tek silindirinkinin altında kalmaktadır.

Şekil 3.4, açıklığın $0,25D$ ve dış kabuk çapının da $2D$ olduğu durumda elde edilen kuvvet değerlerinin hücum açısı ile değişimini sergilemektedir. En şiddetli kuvvet çalkantılarının elde edildiği modeller bu kısımda yer almaktadır. Örneğin, M05-11-20 modeline etkiyen $C_{D-KOK-sis}$ ve $C_{L-KOK-sis}$ değerleri, tek silindirinkinden, sırasıyla, 16,3 kat ve 2,24 kat daha fazladır. M08-11-20 modeline etkiyen $C_{D-KOK-sis}$ ve $C_{L-KOK-sis}$ değerleri ise, tek silindirinkinden, sırasıyla, 5,06 kat ve 2,58 kat daha fazladır. $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerleri, yüksek iki hücum açısı değeri hariç tek silindirinkinin üzerindedir. $\langle C_{L-sis} \rangle$ ise diğer dış çap ve açıklık oranına sahip modellerle aynı eğilime sahiptir.

3.2. Akış Desenleri ve Konturları

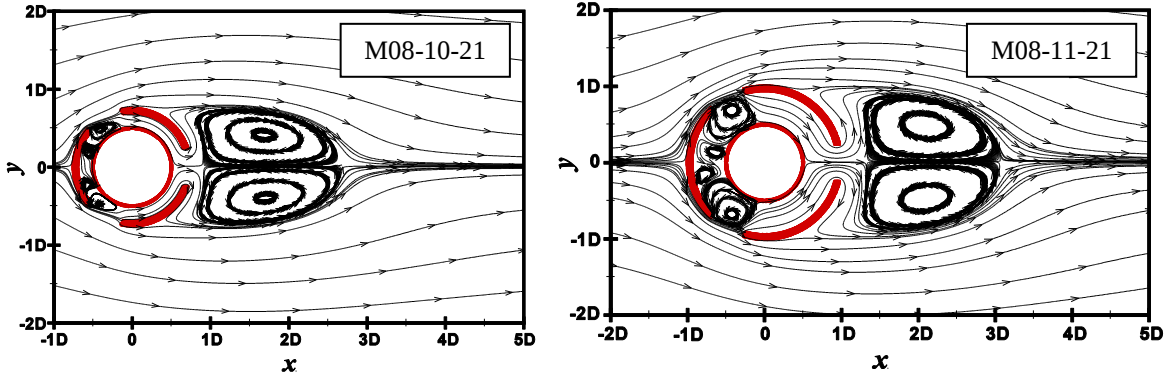
Önceki altbölümde ilgili modellere ait zaman-ortalamalı ve KOK kuvvet katsayılarının α 'ya bağlı değişimleri incelenmişti. Tüm modellerde saptanan bazı durumlar bu kısımda aydınlatılmaya çalışılacaktır. Bu durumlardan ilki, $D_K=1,5D$ olduğu durumda hücum açısının artmasıyla $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerlerinde gözlemlenen hafif azalmadır. Aşağıda, $a=0,5$ olduğu durumda tek silindir, M00-10-21, M04-10-21 ve M08-10-21 modelleri etrafındaki akışa ait zaman-ortalamalı akım çizgileri sunulmuştur (Şekil 3.5). Şekilde, modellerin arka kısmında gözlemlenen iki adet eliptik şekil bizlere modellerden çevri dökülmesi gerçekleştiğini göstermektedir. Özellikle bu eliptik şekillerin model ile temasta oldukları yüzeyler art izinde kaldıklarından düşük basınç bölgelerine sahiptirler. Bu da direncin basınç bileşenini arttırmaktadır. M00-10-21'e bakıldığında, açıklıktan giriş yapan akışın içteki silindir üzerinde bir durma noktası oluşturduğu görülmektedir. Sonrasında iki kısma ayrılan akış üst ve alt açıklıklardan çıkarak modeli terk etmektedir. Bu durumda hem silindir arka kısmında hem de kabuk arka kısmında düşük basınç bölgesi bulunmaktadır. M04-10-21 modelinde ise kabuktan içeri giren akış büyük oranda arka alt açıklıktan çıkmakta ve burada bulunan eliptik şekillerin simetrik dağılımını bozmaktadır. Bu durum bize arka kısımdaki düşük basınç bölgesine bir miktar akışın gittiğini ve buradaki basınç seviyesini biraz arttırdığını göstermektedir.



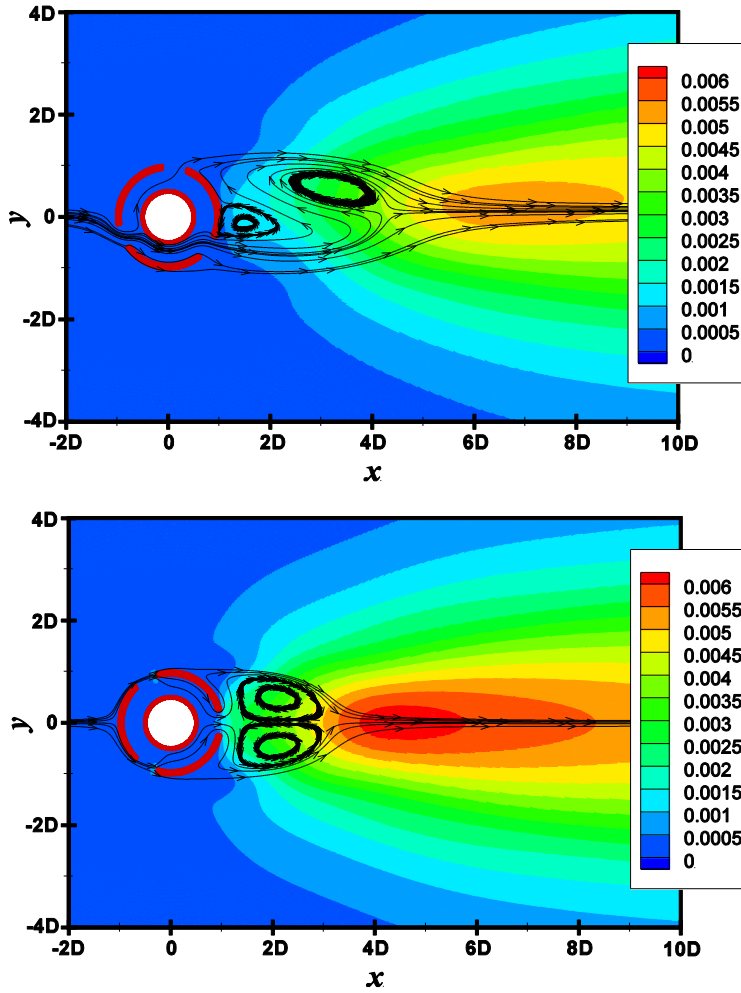
Şekil 3.5. Tek silindir, M00-10-21, M04-10-21 ve M08-10-21 için zaman-ortalamalı akım çizgisi desenleri

M08-10-21 modelinde ise üst ve alt açıklıktan giriş yapan akışkan direkt model arka kısmında bulunan eliptik iki şekle yönelmekte ve bunları kabuk yüzeyinden daha geriye doğru itmektedir. Bu durumda, M04-10-21 modeline göre kabuk arka kısmındaki basınçta daha fazla bir artış sağlamaktadır.

İkinci durum ise $a=0,5D$ durumunda D_K 'nin $1,5D$ 'den $2D$ 'ye artırılması sonucu $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerlerinde elde edilen düşüştür. Bu durum özellikle $\alpha=60^\circ$ hücum açısında çok belirgindir. Bu durumu incelemek için M08-10-21 ve M08-11-21 modelleri etrafındaki zaman-ortalamalı akım çizgileri incelenmiştir. İki model art izindeki eliptik şekillerin kabuklara yakınlığına bakıldığında, daha düşük dirence sahip M08-11-21'in art izindeki eliptik şekillerin, cisim iç kısmında dışa akan akış tarafından daha ileriye iteklendiği görülmektedir. Bu da, modele yakın yerde düşük basınç bölgesinin oluşumunu dolayısıyla da yüksek basınç direnci oluşumunu engellemiştir. Bu duruma, model içerisine giren akışkan debisinin fazla olmasının da katkısı bulunmaktadır.



Şekil 3.6. M08-10-21 ve M08-11-21 modelleri için zaman-ortalamalı akım çizgisi desenleri



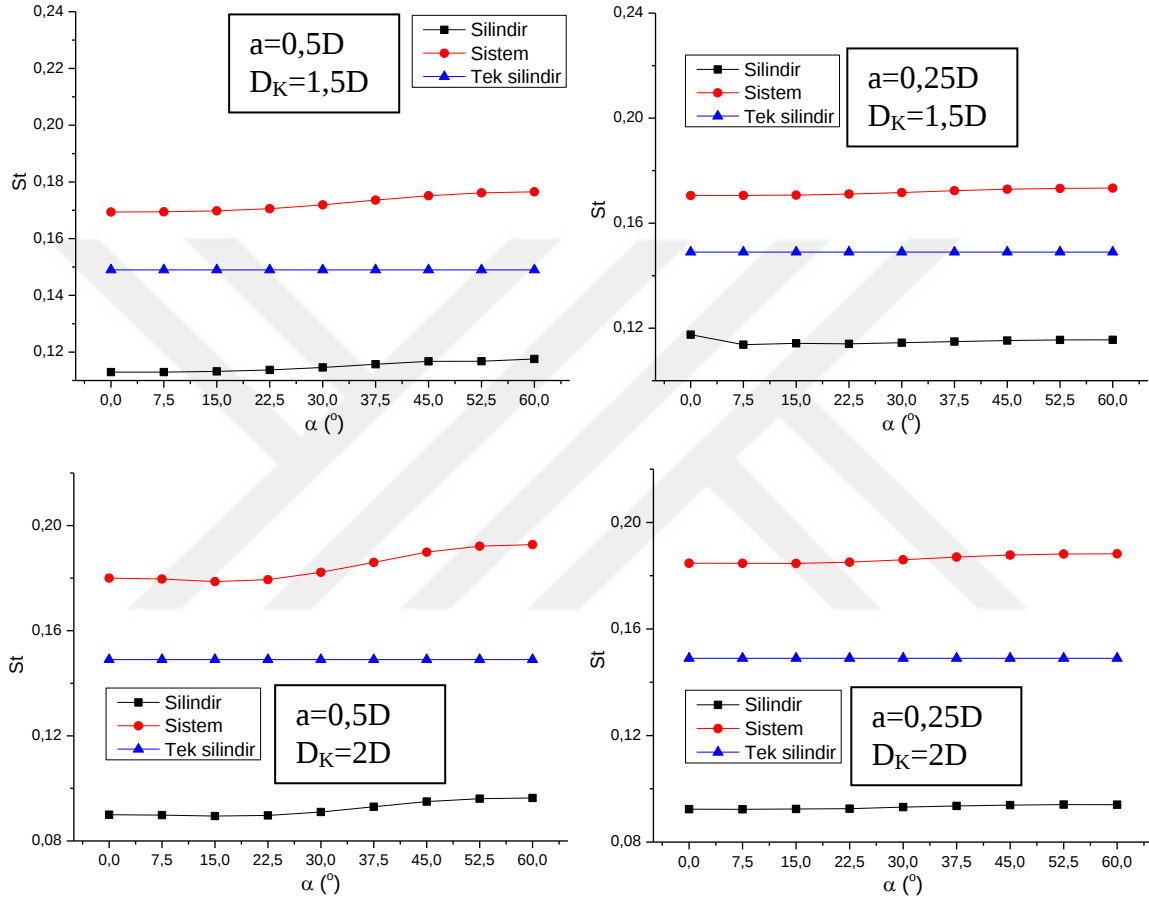
Şekil 3.7. M03-11-21 ve M08-11-21 modelleri için zaman-ortalamalı akım çizgisi desenleri ve arka kısma eklenmiş hızın v bileşeninin KOK konturları

Üçüncü durum ise sistem parametrelerinin $a=0,5D$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda α 'nın $22,5^\circ$ 'den 60° 'ye artması durumunda $C_{L-KOK-sis}$ değerlerinde gözlemlenen ciddi artıştır. Bu durumu aydınlatabilmek için hem akım çizgilerine bakılmış hem de hızın v bileşeninin KOK'sinin (v_{KOK}) konturları incelenmiştir (Şekil 3.7). Burada v_{KOK} özellikle art izinde düşey yönlü hız çalkantısının şiddetini verebilmektedir. Bu çalkantının azalması, model art izinde oluşan çevrilerin zayıfladığını işaret etmektedir. Burada ilk göze çarpan durum, v_{KOK} değerlerinin M03-11-21 için daha düşük değerlerde olduğu ve maksimum v_{KOK} değerinin bulunduğu konumun M03-11-21'te modelden daha uzakta olduğudur. Burada ikinci göze çarpan durum zaman-ortalama akım çizgilerinde gözlemlenen farklılıklardır. M08-11-21 arka kısmında gözlemlenen iki adet eliptik şeklin yatay eksene göre tamamen simetriktir. M03-11-21 art izinde ise hem bu eliptik şekillerin boyutlarında hem de konumlarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu da simetrikliği bozmuştur. Bu bizlere, çevri dökülmesi sürecinde aksaklıklar olduğunu göstermektedir. Şekle bakıldığında bu aksaklığa, ön açıklıktan girip arka alt açıklıktan çıkan akışın sebep olduğu görülmektedir. Son durum ise kabuk içindeki silindirin $\langle C_D \rangle$ değerlerinde, tüm a/D ve D_K/D değerleri için, hücum açısının artmasıyla birlikte gözlemlenen düşüştür. Bu düşüş, ön kısımdaki açıklıktan girerek silindir ön yüzeyine çarpan akışın, hücum açısının artması ile birlikte silindir alt kısmına yönlendirilmesi ile alakalıdır. Silindir alt kısmına yönlendirilen akış ise, silindir alt ve üst yüzeyleri arasında oluşan basınç farkını belirli bir hücum açısı değerine kadar arttırmakta sonrasında ise aynı değerine düşürmektedir. Bundan dolayı, kabuk içindeki silindirin $\langle C_L \rangle$ değerleri belirli bir hücum açısına artmış sonrasında ise düşmüştür.

3.3. Akış Yapıları

Akış yapılarında bir değişiklik olup olmadığını anlamak için Strouhal sayısının (St) α 'ya bağlı değişimleri incelenmiştir (Şekil 3.8). Kıyaslama yapabilmek adına hem tek silindire ait, hem kabuk iç kısmındaki silindire ait hem de sisteme ait St 'ler grafikte sunulmuştur. Burada ilk göze çarpan durum, silindir ile kabuk arası mesafenin dar olduğu $a=0,5D$ olan sistemlerin St 'leri (St_{sis}) hücum açısı ile birlikte neredeyse değişmeden kalmıştır. Bunun temel sebebi, açıklık mesafesinin dar olmasından dolayı akışkanın yeterli miktarda iç bölgeye girememesi ve dolayısıyla çıkışta da yeterince hızlı çıkamaması, bunun sonucunda da ne iç ne de dış akışta yeterli değişiklik yaratamamasına bağlanmıştır.

Diğer yandan, St_{sis} 'de α 'ya bağlı olarak en belirgin değişim $a=0,5D$ ve $D_K=2D$ durumunda gerçekleşmiştir. Özellikle, α 'nın belirli bir oranda artması sonucu arka kısma bir ön kısma iki adet açıklık denk gelmeye başlamıştır. Bu durumda iç kısma giren akışkanın debisi artmış ve şiddetli bir jet şeklinde tek bir açıklıktan art izi bölgesine doğru oluşan akış, burada değişiklik yaratmıştır.



Şekil 3.8. Farklı sistem parametreleri için St 'nin hücum açısı ile değişimi

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), özellikle laminar rejimin hakim olduğu akışlar hakkında ayrıntılı bilgi edinebilmek için kullanılan en ucuz ve en etkili yöntemdir. Bu çalışmada da, bir silindir ve onun dışına yerleştirilmiş ince bir kabuktan oluşan sistem etrafındaki akış yapısı laminar rejim için analiz edilmiştir. Temel parametreler olarak kabuk dış çapının silindir çapına oranı (D_K/D), kabuk üzerine açılan üç adet eş mesafeli açıklığın silindir çapına oranı (a/D) ve hücum açısı (α) kullanılmıştır. Akışı laminar rejimde tutabilmek adına, Reynolds sayısı (Re) hem kabuk hem de silindir için 49 ile 190 değer aralığında seçilmiştir. Yani, silindir çapına ve maksimum kabuk dış çapına dayalı Re'ler, sırasıyla, 75 ve 150'dir. Kıyaslama yaparak değişiklikleri daha rahat görebilmek adına tek silindir (kabuksuz durum) etrafındaki akış durumunun da benzetimi yapılmıştır. Akışın benzetimi Fluent® ticari paket programının öğrenci versiyonu ile gerçekleştirilmiştir (Ansys® Academic Research CFD, Release 19.1). Sayısal çalışma sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Silindir etrafında yerleştirilen kabuk, silindir ve kabuktan meydana gelen sistemin zaman-ortalama direncini, $\langle C_{D-sis} \rangle$, test edilen parametre aralığı için düşürmede istenilen başarıyı gösterememiştir. Tek silindirinkine kıyasla $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerlerindeki maksimum düşüşü M04-11-21 modeli sağlamıştır. Bu düşüşün değeri %4,5'tir.

- Sistem içerisinde yer alan silindire etkiyen ortalama direnç, hücum açısının yükselmesi ile birlikte sıfır değerine doğru yaklaşım göstermektedir. Özellikle, kabuk ile silindir arasında bir bağlantı yoksa iç kısımda yer alan silindirin direnci bu kabuk ile düşürülebilir.

- Sistem üzerine etkiyen zaman-ortalama direnç katsayısını ve KOK kaldırma katsayısını en etkili şekilde düşürebilen iki model M03-11-21 ve M04-11-21'dir. KOK kaldırma katsayısını düşürmede M03-11-21 modeli M04-11-21 modelinden, zaman-ortalama direnç katsayısını düşürmede ise M04-11-21 diğerinden daha başarılıdır. M03-11-21 ve M04-11-21 modellerinin $\langle C_{D-sis} \rangle$ değerlerindeki düşüşler, tek silindire kıyasla, sırasıyla, %3,8 ve %4,5'tir. M03-11-21 ve M04-11-21 modellerinin, $C_{L-KOK-sis}$ değerlerindeki düşüşler ise, tek silindire kıyasla, sırasıyla, %41,5 ve %38'dir.

- Sistem parametrelerinin $a=0,25D$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda, KOK kuvvet katsayıları maksimum düzeyde artış sergilemişlerdir. Bu grupta yer alan M05-11-20 modeline etkiyen $C_{D-KOK-sis}$ ve $C_{L-KOK-sis}$ değerleri, tek silindirinkinden, sırasıyla, 16,3 kat

ve 2,24 kat daha fazladır. Yine aynı grupta yer alan M08-11-20 modeline etkiyen $C_{D-KOK-sis}$ ve $C_{L-KOK-sis}$ değerleri ise, tek silindirinkinden, sırasıyla, 5,06 kat ve 2,58 kat daha fazladır. Özellikle titreşimden gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için bu modeller test edilen tüm modeller içerisinde en uygunlarıdır.

- Sistem parametrelerinin $a=0,5D$ ve $D_K=2D$ olduğu durumda α 'nın $22,5^\circ$ den 60° 'ye artması durumunda $C_{L-KOK-sis}$ değerlerinde meydana gelen ciddi artışın, hücum açısının artması sonucu oluşan çevrilerin daha şiddetli olması ile ilişkilendirilmiştir.

- Akış yapısında tespit edilen en belirgin değişim $a=0,5D$ ve $D_K=2D$ durumunda gerçekleşmiştir. Özellikle, α 'nın belirli bir oranda artması sonucu arka kısımda bulunan iki açıklıktan biri ön kısma biri de tam arka durma noktasına doğru kaydığından, iki girişli bir çıkışlı sistem meydana gelmiştir. Bu durum, iç kısma giren akışkanın bir jet şeklinde arka açıklıktan art izi bölgesine doğru nüfuz etmesine bağlanmıştır.

Sayısal çalışma, eldeki hesaplama kaynakları doğrultusunda düşük Re 'de ve iki-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısının aerodinamik katsayılar üzerindeki etkisini inceleyebilmek için üç-boyutlu sayısal çalışmalar gerçekleştirilebilir. İncelenen parametreler açıklık oranının sadece iki değeri için gerçekleştirilmiştir. Diğer farklı açıklık oranlarında aerodinamik katsayılar farklı dağılımlar sergileyebilirler. Benzer şekilde, Kabuk ile silindirin çap oranlarının da iki değeri incelenmiştir. Farklı değerler de incelemeye açık bir durumdur.

Bu çalışmada açıklık sayısı üçte sabitlenmiştir. Hem açıklık sayısı hem de açıklıkların yerleştirilme konumları incelemeye açık bir konudur.

Kabuk üzerindeki açıklıklar derinlik boyunca düz bir şekilde girmektedir. Bu düz değişim yerine derinlikle değişen açıklık konumları da incelenebilir.

Çalışma, sabit haldeki sistemi incelemiştir. Pratikteki bazı durumlarda, özellikle küt cisim arkasındaki çevriler, model üzerinde farklı genliklerde ve periyotlarda titreşim meydana getirirler. Bunu inceleyebilmek adına salınım yapan sistemin aerodinamik karakteristikleri de incelenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Assi, G.R.S, Orselli, R.M., Silva-Ortega, M.,** 2019. Control of vortex shedding from a circular cylinder surrounded by eight rotating wake-control cylinders at $Re=100$. *Journal of Fluids and Structures*, 89:13-24.
- Baek, H., Karniadakis, G.E.,** 2009. Suppressing vortex-induced vibrations via passive means. *Journal of Fluids and Structures*, 25:848-866.
- Clapperton, B.L., Bearman, P.W.,** 2018. Control of circular cylinder flow using distributed passive jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 848:1157-1178.
- Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G.M., Aksoy, M.M., Akilli, H., Sahin, B.,** 2018. PIV measurement downstream of perforated cylinder in deepwater. *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 72:225-234.
- Gao, D.-L., Chen, G.-B., Huang, Y.-W., Chen, W.-L., Li, H.,** 2020. Flow characteristics of a fixed circular cylinder with an upstream splitter plate: on the plate-length sensitivity. *Experimental Thermal Fluid Science*, 117:110135.
- Kuo, C.-H., Chen, C.-C.,** 2009. Passive control of wake flow by two small control cylinders at Reynolds number 80. *Journal of Fluids and Structures*, 25:1021-1028.
- Lam, K., Lin, Y.F.,** 2009. Effects of wavelength and amplitude of a wavy cylinder in cross-flow at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 620:195-220.
- Liu, Y.-G., Feng, L.-H.,** 2015. Suppression of lift fluctuations on a circular cylinder by inducing the symmetric vortex shedding mode. *Journal of Fluids and Structures*, 54:743-759.
- Posdziech, O., Grundmann, R.,** 2007. A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over a circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 23:479-499.
- Salimipour, E., Salimipour, A.,** 2019. Power minimization and vortex shedding elimination of a circular cylinder by moving surface mechanism. *Ocean Engineering*, 189:106408.
- Tritton, D.J.,** 1959. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 6(4):547-567.
- Williamson, C.H.K.,** 1989. Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 206:579-627.
- Williamson, C.H.K.,** 1996. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28(1):477-539.

- Yang, Z., Zhou, S., Zu, J., Inman, D.,** 2018. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*, 2:642-697.
- Zhang, P.F., Wang, J.J., Huang, L.X.,** 2006. Numerical simulation of flow around cylinder with an upstream rod in tandem at low Reynolds numbers. *Applied Ocean Research*, 28:183-192.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Tuğba SÜDÜPAK

Yabancı Dil: İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı: Ankara/1989

E-posta: tubagnydn_89@hotmail.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2007-2012, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2012-2013, Proje Mühendisi, Fırat LPG Dönüşüm Sistemleri, Kontrol Departmanı
- 2013-2014, Proje Mühendisi, Atabar Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti., Proje ve Çizim Departmanı
- 2014-2016, İmalat Mühendisi, Kırac Galvaniz A.Ş., İmalat Departmanı
- 2017-Devam, Devlet Memurluğu, Nüfus ve Vatandaşlık İşleri Müdürlüğü
- 2018-2020, Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2012, Makine Mühendisleri Odası, Adana.
- 2015, Makine Mühendisleri Odası, Bursa.