

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SIVI İÇERİSİNE DALDIRILMIŞ KATI CİSİMLERLE AKIŞ
ALANININ ETKİLEŞİMİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
İNCELENMESİ**

Emir Taha EREN

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Galip TEMİR

Eş Danışman
Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

Mart, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SIVI İÇERİSİNE DALDIRILMIŞ KATI CİSİMLERLE AKIŞ
ALANININ ETKİLEŞİMİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Emir Taha EREN tarafından hazırlanan tez çalışması 10.03.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Galip TEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Galip TEMİR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Düriye BİLGE, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ebru MANÇUHAN, Üye
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Kenan KAYA, Üye
İstanbul Aydın Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Galip TEMİR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Bir Sıvı İçerisine Daldırılmış Katı Cisimlerle Akış Alanın Etkileşiminin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emir Taha EREN

İmza

Aileme

ve

arkadaşılarım

TEŞEKKÜR

İvmeli bir şekilde hızla değişen günümüz teknolojisine paralel olarak, mühendislik çözümlerindeki yaklaşımlar da değişmektedir. Mühendisliğin temeli olan optimum sonuçlar elde edebilmek hedefi gözetilirken bunların canlılara ve çevreye olan etkilerinin de hesap edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden, ekolojik dengenin korunmasına yönelik ulusal ve uluslararası birçok yeni düzenlemeler yapılmaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında yukarıda bahsi geçen ilkeler ışığında, Bir Sıvı İçerisine Daldırılmış Katı Cisimlerle Akış Alanın Deneysel ve Sayısal İncelenmesi yapılmıştır.

Tez çalışması sırasında değerli eleştirileri ve önerileri ile hem tez sürecini yöneten hem de yön veren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN'a ve Prof. Dr. Galip TEMİR'e içten teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca manevi katkıda bulunan kıymetli aileme de göstermiş oldukları büyük sabır ve anlayışlarından dolayı özellikle teşekkür ederim.

Emir Taha EREN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	8
1.3 Hipotez	9
2 BİRİNCİ ÇALIŞMA ÜÇ BOYUTLU SIVI YAPI ETKİLEŞİMİ İÇİN ELASTİK KİRİŞ ÜZERİNDE ÖRNEK DURUMU ÇALIŞMASI	10
2.1 Malzemeler ve Yöntemler / Deney Düzeni Analiz Metodolijisi	10
2.2 Deney Düzeni	10
2.3 Veri Analizi	13
2.4 Sayısal Yöntemler	14
2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)	14
2.6 Hesaplamalı Yapı Dinamiği (CSD)	15
2.7 CFD – CSD Eşleşme	17
2.8 Hesaplamalı Model Geometrisi, Sınır Koşulları ve Ağ Oluşturma	18
2.9 Deneysel ve Sayısal Sonuçlar Arasında Karşılaştırma	21
2.10 Deformasyon ve Gerilme Çalışması.....	23
2.11 Sayısal Çalışmanın Çizgi Eğrileri	27
2.12 Sürüklenme Katsayılarının Çalışılması.....	30
3 İKİNCİ ÇALIŞMA BİR TEKİL DALGA İLE BİR HAREKETLİ SİLİNDİR ARASINDAKİ ÇARPIŞMANIN SAYISAL İNCELENMESİ	32
3.1 Sayısal Yöntem / Korunum Denklemleri	32
3.2 Sayısal Dalga Tankı (NWT).....	33
3.3 Uzamsal ve Zamansal Ayırıklaştırma.....	35

3.4 Tekil Dalganın Oluşturulması ve Doğrulanması	36
3.5 Bir Hareketli Silindirin Hidrodinamik Kuvvetleri ve Doğrulanması.....	38
3.6 Hidrodinamik Kuvvetler	40
3.7 Serbest Yüzeyin Deformasyonu	52
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKÇA	57
TEZDEN ÜRETİLMİŐ YAYINLAR	62

SİMGE LİSTESİ

A	Alan (m^2)
P	Basınç (Pa)
C	Courant sayısı (-)
D	Çap (m)
h	Derinlik (m)
μ	Dinamik viskozite (kg/m_s)
ε_e	Eşdeğer gerinim (m/m)
Fr	Froude sayısı (-)
S	Gerçek mesafenin ölçeği (gerçek mesafe/piksel mesafe)
U – V	Hız (m/s)
D	Karakteristik uzunluk (m)
F	Kuvvet (N)
α ve σ	Newmark integrasyon parametreleri
ν	Poisson oranı (-)
Re	Reynolds sayısı
C_d	Sürüklenme katsayısı (-)
F_D	Sürüklenme kuvveti
k	Türbülans kinetik enerji (J)
L – M	Uzunluk - Mesafe (m)
U _{x,y,z}	x,y veya z yönünde bileşen deformasyonu (m)
R	Yarıçap (m)
ε	Yayılım oranı
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
E	Young's modülü (MPa)
H	Yükseklik (m)
t	Zaman (s)

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy Condition (Courant-Friedrichs-Lewy Koşulu)
CPM	Consistent Particle Method (Sürekli Parçacık Yöntemi)
CSD	Computational Structural Dynamics (Hesaplamalı Yapı Dinamiği)
DPIV	Digital Particle Image Velocimetry (Dijital Parçacık Görüntülemeli Hızölçüm)
DEM	Discrete Element Method (Ayrık Elemanlar Yöntemi)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Elyaf Takviyeli Polimer)
FSI	Fluid-Structure Interaction (Sıvı-Yapı Etkileşimi)
HSC	High-Speed Camera System (Yüksek-Hızlı Kamera Sistemi)
IBM	Immersed Boundary Method (Daldırılmış Sınır Yöntemi)
LBM	The Lattice Boltzmann Method (Boltzmann Kafes Yöntemi)
LEM	Large-Eddy Turbulance Model (Büyük Girdaplı Türbülans Modeli)
LES	Large-Eddy Simulations (Büyük Girdap Simülasyonları)
NF	Negative Force (Negatif Kuvvet)
NWT	Numerical Wave Tank (Sayısal Dalga Tankı)
PF	Positive Force (Pozitif Kuvvet)
PIV	Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntülemeli Hızölçüm)
RAM	Random Access Memory (Rastgele Erişilebilir Bellek)
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
UDF	User Define Function (Kullanıcı Tanımlama Fonksiyonu)
VOF	Volume Of Fluid (Sıvı Hacmi)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kirişin boyutlarını gösteren şema	11
Şekil 2.2	Deney düzeninin şeması	12
Şekil 2.3	Standardizasyon testi	13
Şekil 2.4	Görüntü işleme programının akış şeması	14
Şekil 2.5	System coupling'in sayısal adımları	18
Şekil 2.6	Hesaplama alanına ve sınır koşullarına ilişkin ayrıntılar	19
Şekil 2.7	Sıvı alanın hesaplamalı ağı	20
Şekil 2.8	$Re = 42,500$ ve $t = 6$ s için esnek T kirişindeki toplam deformasyonun karşılaştırılması	22
Şekil 2.9	$t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin toplam deformasyonundaki değişim	24
Şekil 2.10	$T = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin azami Von Mises gerilmesindeki değişim	25
Şekil 2.11	$T = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin azami / orta / asgari asal gerilmesindeki değişim	26
Şekil 2.12	$T = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin eşdeğer gerinimindeki değişim	27
Şekil 2.13	$t = 10$ s'de esnek T kirişinin deformasyonu	28
Şekil 2.14	$T = 10$ s'de esnek T kirişinin gerilmesi	28
Şekil 2.15	$T = 10$ s'de esnek T kirişinin basınç dağılımı	29
Şekil 2.16	$T = 10$ s'de esnek T kirişinin akım çizgisi	29
Şekil 2.17	$T = 6$ s ve $t = 10$ s için Reynolds sayılarıyla beraber sürüklenme katsayısındaki değişim	31
Şekil 3.1	Sayısal dalga tankının (NWT) şematik diyagramı	34
Şekil 3.2	Modellerin ayrıntıları (silindirin yakın plandan görünümü)	34
Şekil 3.3	(a) Çözüm alanının hesaplamalı ağı; (b) silindir yüzeyinin büyütülmüş bir görünümü	35
Şekil 3.4	Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [35] çalışması (daire) arasında $x = 10.0$ m konumunda serbest yüzey yükselmesine ait zaman akışının karşılaştırması	37
Şekil 3.5	Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [35] çalışması (daire) arasında $x = 52.7$ m konumunda serbest yüzey yükselmesine ait zaman akışının karşılaştırması	37
Şekil 3.6	Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [34] çalışması (x) arasında silindire etkiyen sıvı kuvvetlerine ait zaman akışlarının karşılaştırması	39
Şekil 3.7	Hareketli silindirin bir serbest yüzey akışıyla etkileşiminin anlık görüntüleri	39
Şekil 3.8	Model 1 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi	42
Şekil 3.9	Model 2 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi	42
Şekil 3.10	Model 3 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi	43

Şekil 3.11	Model 4 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi.....	43
Şekil 3.12	Model 5 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişim	44
Şekil 3.13	Tüm modeller için yatay kuvvetlerin pozitif / negatif tepe noktaları	44
Şekil 3.14	Model 1 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi	47
Şekil 3.15	Model 2 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi	47
Şekil 3.16	Model 3 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi	48
Şekil 3.17	Model 4 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi	48
Şekil 3.18	Model 5 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi	49
Şekil 3.19	Model 1 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi	49
Şekil 3.20	Model 2 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi	50
Şekil 3.21	Model 3 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi	50
Şekil 3.22	Model 4 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi	51
Şekil 3.23	Model 5 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi	51
Şekil 3.24	Model 2 için hareketsiz silindirle etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü	53
Şekil 3.25	Model 2 için hareketli silindirle $U_c = 0.1$ m/s etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü.....	53
Şekil 3.26	Model 4 için hareketsiz silindirle etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü	54
Şekil 3.27	Model 4 için hareketli silindirle $U_c = 0.1$ m/s etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü.....	54

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Sayısal ve deneysel yöntemlerde sıvı ve katı karakteristikleri.....	11
Tablo 2.2	Hızlar ile uygulanan modeller arasındaki ilişkiyi göstermektedir..	20
Tablo 2.3	Hesaplama alanı için ağ yakınsaklık çalışması	21
Tablo 2.4	$Re = 42,500$, $t = 6$ s ve $t = 10$ s için esnek T kirişindeki azami deformasyonun karşılaştırılması	22
Tablo 2.5	$t = 6$ s ve $t = 10$ s için Reynolds sayılarıyla beraber sürüklenme kuvvetindeki değişim	30
Tablo 3.1	Bu çalışmada yapılan sayısal simülasyonlar	35
Tablo 3.2	Hesaplama zamanı ve ağ elemanlarının sayısı	36
Tablo 3.3	Yatay kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanları	44
Tablo 3.4	Hareketsiz ve hareketli silindirler arasında azami hidrodinamik kuvvetin yüzdeleri.....	45
Tablo 3.5	Dikey kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanları	51

Bir Sıvı İçerisine Daldırılmış Katı Cisimlerle Akış Alanın Etkileşiminin Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi

Emir Taha EREN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Galip TEMİR

Eş-Danışman: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

Bu doktora çalışmasında akış iki başlık altında çalışılmıştır.

Birinci çalışmada, model deneyler ve sayısal simülasyonlar kullanılarak üç boyutlu esnek bir T kirişinin deformasyonu incelenmiştir. Deneyde girişinden sabit ve düzgün su akışının sağlandığı bir devridaim su kanalının içine bir kiriş yerleştirilmiştir. Çapraz akış yönünde esnek T kirişinin deformasyonunu kaydetmek için yüksek hızlı bir kamera sistemi kullanılmıştır (HSC). Bundan başka, esnek T kirişinin deformasyonunu simüle etmek üzere iki yönlü sıvı-yapı etkileşimi (FSI) için bir sayısal yöntem uygulanmıştır. Sıvı ve katı alanı bağlaştırmak için bir "system coupling" kullanılmıştır. Ağın oluşturulmasında dinamik ağ yöntemi kullanılmıştır. Üç boyutlu sayısal ve esnek katı T kirişi HSC sonuçlarıyla doğrulandıktan sonra farklı Reynolds sayıları için deformasyon ve gerilme hesaplanmıştır. Bu çalışma hız 0.25 m/s'den 0.35 m/s'ye yükseldiğinde esnek T kirişindeki deformasyonun neredeyse %90 arttığını, buna karşılık hız 0.25 m/s'den 0.15 m/s'ye düşürüldüğünde esnek T kirişindeki deformasyonun neredeyse %63 azaldığını göstermiştir. İkinci çalışma da ise, bir tekil dalga ile bir

hareketli silindir arasındaki etkileşimi çözmek için bir 2-D sayısal dalga tankı (NWT) kullanılmıştır. Silindir, tankın taban zeminine göre çeşitli pozisyonlarda yerleştirilmiştir. Silindir sabit bir yatay hızda tekil dalgaya doğru hareket edebilmektedir. Toplam ondört örnek durum incelenmiştir. Beş batıklık derinliği ve iki farklı hareket hızı da dahil olmak üzere on farklı sayısal simülasyon kullanılmıştır. Hareketli ve hareketsiz silindirler arasındaki silindirler arasındaki dalga-yapı etkileşiminin sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla silindir, NWT içinde hareketsizken beş farklı simülasyon daha incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, Reynolds ortalaması alınmış Navier-Stokes (RANS) denklemleri ve sıvı hacmi (VOF) denklemleri hesaplanarak elde edilmiştir. NWT içinde bir dalga pedalını ve silindiri hareket ettirerek bir tekil dalganın oluşturulması için iki farklı kod (Kullanıcı Tarafından Tanımlana Fonksiyon-UDF) kullanılmıştır. Ağın oluşturulmasında dinamik ağ yöntemi kullanılmıştır. İlk, CFD kodlarının dalga pedalı hareketi kullanılarak bir tekil dalga oluşturabilmesi ve hareketli bir silindirin hidrodinamik kuvvetleri sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Ardından çeşitli koşullarda serbest yüzey değerlendirmesi yapılmış ve hidrodinamik kuvvetler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıvı-yapı etkileşimi, esnek giriş, dalga-yapı etkileşimi, tekil dalga, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD)

Experimental and Numerical Investigation of Interaction Between Solid Bodies Immersed In a Fluid and the Flow Field

Emir Taha EREN

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Galip TEMİR

Co-advisor: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

In this Ph.D. thesis, flow is studied under two titles.

At first study, a three-dimensional T-shaped flexible beam deformation was investigated using model experiments and numerical simulations. In the experiment, a beam was placed in a recirculating water channel with a steady uniform flow in the inlet. A high-speed camera system (HSC) was utilized to record the T-shaped flexible beam deformation in the cross-flow direction. In addition, a two-way fluid structure interaction (FSI) numerical method was employed to simulate the deformation of the T-shaped flexible beam. A system coupling was used for conjoining the fluid and solid domain. The dynamic mesh method was used for recreating the mesh. After the validation of the three-dimensional numerical T-shaped flexible solid beam with the HSC results, deformation and stress were calculated for different Reynolds numbers. This study exhibited that the deformation of the T-shaped flexible beam increases by nearly 90% when the velocity is changed from 0.25 to 0.35 m/s, where as deformation of the T-shaped

flexible beam decreases by nearly 63% when the velocity is varied from 0.25 to 0.15 m/s

At second study, a 2-D numerical wave tank (NWT) was applied for solving the interaction between a solitary wave and a moving circular cylinder. The cylinder was placed at various positions from the tank bed floor. The cylinder can move at a constant horizontal velocity towards the solitary wave. A total of fifteen cases were studied. Ten different numerical simulations were used, including five submergence depths and two different moving velocities. The other five different numerical simulations were studied when the cylinder was unmoved in the NWT for comparing wave-structure interaction results between the moving and unmoved cylinders. The numerical were obtained by calculating Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the volume of fluid (VOF) equations. Two different codes (User-Define-Function-UDF) were used for the generation of a solitary wave by moving a wave paddle and traveling cylinder in the NWT. The dynamic mesh method was applied for recreating mesh. First, the ability of CFD codes to generate a solitary wave by using wave paddle movement and the hydrodynamic forces of a moving cylinder were validated by numerical results. Further, the free-surface elevation and hydrodynamic forces were considered at various conditions.

Keywords: Fluid-structure interaction, flexible beam, wave-structure interaction, solitary wave, computational fluid dynamics(CFD)

1.1 Literatür Özeti

Birinci çalışmada, üç boyutlu sıvı-yapı etkileşimi için elastik kiriş üzerinde örnek durum çalışması yapıldı. Yapıların deformasyonu mühendisliğin hep bir ilgi alanı olmuştur. Çünkü sıvıyla yapı arasında bağlaştırma işlemi pek çok mühendislik alanında önemli bir rol oynamaktadır. Su altı esnek kirişlerinde sıvı-yapı etkileşimi endüstriyel uygulamalarda karmaşık bir sorundur. Sıvı-yapı etkileşimini (FSI) incelemek için deneysel ve sayısal araştırma gerçekleştirilmiştir. Önceki araştırmalardan bazıları bu bölümde özetlenmiştir.

Önemli FSI sorunları Chimakurthi v.d. [1] tarafından sayısal olarak simüle edilmiştir [1]. Örneğin salınım yapan bir katı yapıda ve denizaltı nakil borularının titreşimlerinde FSI gibi multifiziğin bağlaştırdığı çeşitli sorunlara Ansys Workbench system coupling modülünü ve iki yönlü sıvı-yapı etkileşimini uygulamışlardır. Bu çalışma önemlidir çünkü Ansys Workbench system coupling modülünün, multifiziğin bağlaştırdığı sorunlara son derece uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çalışma sonuçları diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla doğrulanmıştır. Gluck v.d. [2], dikey veya L-levhalar gibi farklı levha şekillerinde sıvı-yapı etkileşimini sayısal olarak araştırmışlardır. Biri akış yönü için sonlu hacimler yöntemini, diğeri katı taraf için sonlu elemanlar yöntemini kullanmak üzere simülasyon akış ve yapısı için iki kod örneği kullanılmıştır. Dhavalikar v.d. [3], gemi gövdesine çarpan dalgaların etkisini simüle etmek üzere tek yönlü sıvı-yapı etkileşim yöntemini kullanmışlardır. Gemi gövdesinin katı bir gövde olduğu varsayılmış ve bir katı gövde için dalga yükleri simüle edilmiştir. Narayanan v.d. [4], bir silindirin önünden geçen akışın davranışını esnek bir iplikle incelemişlerdir. Korunum denklemlerinin çözülmesinde ticari yazılım STAR-CCM+ kullanılmıştır. Hassani v.d. [5], esnek bir çubuğun sıvı akışı içindeki büyük deformasyonunu sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Bir esnek çubuğu test etmek için bir rüzgar tüneli uygulanmış, Kirchhoff çubuk kuramıyla bağlaştırılan matematiksel bir model geliştirilmiştir. Dalga periyotlarının farklı

kombinasyonları altında bitkilerin deformasyonu Juan v.d. [6] tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada bir salınım tüneli ve parçacık görüntülemeli volumetrik hız ölçüm sistemi kullanılmıştır. Sonuçlar bitkilerin etrafındaki hız dağılımını göstermiştir. Mantecon v.d. [7], aksenal akış koşullarında nükleer yakıt levhalarının sıvı-yapı etkileşimini sayısal olarak incelemişlerdir. Sıvı akışını modellemek için Ansys CFX ticari yazılımını ve katı levhaları modellemek için Ansys Mechanical'ı kullanılmıştır. Sonuçlar levhalardaki azami sapmanın ön kenarda meydana geldiğini göstermiştir. Dört köşe bir seren yelkeninin sıvı-yapı etkileşimi deneysel ve sayısal olarak Ghelardi v.d. [8] tarafından incelenmiştir. Dört köşe seren yelkeni önce bir rüzgar tüneline çeşitli hızlarda test edilmiş, ardından aynı koşullar altında sayısal simülasyon için ADINA ticari programı kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir genel uyum elde edilmiştir. Liu v.d. [9], farklı giriş hızlarında tek bir esnek silindirin aksenal akıştaki FSI'ini araştırmışlardır. Akış sahası için Ansys Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Silindirin deformasyonu için kullanıcı tarafından tanımlanan bir fonksiyon (UDF) kodu örneği kullanılmıştır. Sonuçlar, titreşimin artmasının veya azalmasının akış hızına bağlı olduğunu göstermiştir. Xu v.d. [10], sıvı-yapı etkileşimini çözmek için yeni bir yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde Lattice Boltzmann Yöntemi (LBM) ve gömülü sınır yöntemi (IBM) kombine edilmiştir. Yüksek Reynolds sayıları için büyük girdaplı türbülans modeli (LEM) kullanılmıştır. Bu yeni yöntem farklı referanslarla test edilmiştir. Sonuçlar yöntemin doğruluğunun iyi olduğunu göstermiştir. Wang v.d. [11], sıvı-yapı etkileşim yöntemini kullanarak Girdap Kaynaklı Titreşimler (VIV) için üç farklı kolon (bir çelik kolon ve iki kompozit kolon) araştırmışlardır. Ansys Fluent ticari yazılımını kullanılarak 2D ve 3D modeller simüle edilmiştir. Modellerin deformasyonları elde edilmiştir. Sonuçlar, Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozit kolonların yer değiştirmelerinin, diğer modellerinkinden önemli ölçüde daha fazla olduğunu göstermiştir. Yan yana iki esnek levhanın sıvı-yapı etkileşim sorunları Dong v.d. [12] tarafından da sayısal olarak araştırılmıştır. Sürüklenme kuvvetinin ve enerji yakalama performansının sonuçları bir üç boyutlu modelde sunulmuştur. Wang v.d. [13], büyük bir yapının sıvı-yapı etkileşimini simüle etmek için iki boyutlu bir gömülü sınır yöntemi kullanılmıştır. Sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemlerini çözmek için bir sonlu farklar yöntemi uygulanmıştır. Hipersonik bir akışta esnek bir levha kullanarak

sonuçları doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki uyumun iyi olduğu bulunmuştur. Turek v.d. [14], sıvı-yapı etkileşimi sorunlarına yönelik çeşitli yöntemleri karşılaştırmak için yeni bir referans tanımlanmıştır. Elastik bir cismi sıkıştırılamaz laminar kanal akışına yerleştirilmiştir. Bu yeni referans çalışmasında iyi bir karşılaştırma elde edilmiştir. Wang v.d. [15], esnek bir ayırıcı levhayla dairesel bir silindirin önünden geçen akışı incelemiştir. İki farklı Reynolds sayısı kullanılarak sıvı-yapı etkileşiminin simülasyonu için iki boyutlu bir model kullanılmıştır. Ayrıca bir levhayla, silindir ile levha arasında bir boşlukla bir dairesel silindiri çalışılmıştır. Zheng v.d. [16], seslendirme esnasında ses kirliliğinin akış kaynaklı titreşimlerini çalışmak üzere bir sonlu elemanlar yöntemi ile gömülü sınır yöntemini (IBM) bağlaştıran yeni bir sıvı-yapı etkileşim yöntemini kullanılmıştır. Wang v.d. [17], esnek sualtı bitki saplarını ve kinetik türbin kanatçıklarını simüle etmek üzere bir sıvı-yapı etkileşim (FSI) metodolojisi sunulmuştur. Yapısal dinamik çözücü, kombine sonlu elemanlar yöntemi ile ayrık elemanlar yöntemine (FEM-DEM) dayandırılmıştır ve gömülü sınır yönteminde (IBM) yinelemeli algoritma kullanılarak katı ve sıvı çözücüler bağlaştırmıştır. Akış çözücü, Mittal v.d. [18] tarafından tarif edilen hayalet hücreye dayalı, keskin arayüzlü bir gömülü sınır yöntemi (IBM). Zamana bağlı, sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemleri çözülmüş; bütün uzaysal türevler için ikinci derece merkezi farklar şeması kullanılmıştır. Üç boyutlu esnek bir membranın sıvı-yapı etkileşimi Nestola v.d. [19] tarafından araştırılmıştır. Laminer, geçişli ve türbülans akışlara gömülü karmaşık yapıları çözmek için gömülü sınır yöntemi kullanmıştır. Peskin [20], gömülü sınır yöntemini sıvı-yapı etkileşiminin bilgisayarlı simülasyonuna uygulamıştır. Bu yöntemde Euler ve Lagrange değişkenleri bağlaştırmıştır. Gömülü sınır (IB) yönteminde, özellikle biyolojik akışkanlar dinamiğinde, Euler değişkenleri için sabit bir Kartezyen ağ ve Lagrange değişkenleri için hareketli eğrisel ağ kullanılmıştır. Laminer sıkıştırılamaz viskoz akışta bir sıkıştırılamaz elastik nesnenin sıvı-yapı etkileşimi için bir monolitik FEM/çoklu ızgara yöntemi Hron ve Turek [21] tarafından sunulmuştur. Griffith ve Luo [22], Lagrange ve Euler değişkenlerini birbirine bağlamak üzere gömülü sınır yöntemi için bir bağlaştırma şeması araştırmışlardır. Bu yöntemi FSI sorunlarını çözmekte kullanmışlardır. Bu yöntemle sol kalp karıncığı simüle edilmiştir. Rastgele Lagrange-Euler sonlu elemanlar yöntemi Nassiri [23] tarafından uygulanmıştır. Yüksek hızda darbeleri

kaynak esnasında dalgalı arayüz morfolojisini sayısal olarak simüle edip deneysel olarak araştırmak üzere bu yöntemi kullanılmıştır. Tabatabaei v.d. [24], asimetrik kalamaların hidrodinamik davranışını sayısal olarak araştırılmıştır. Simülasyon için SST k-w türbülans modelini uygulanmıştır. Farklı yüzme hızları için çeşitli incelik oranları, jetle sürüş ve sürüklenme kuvveti incelenmiştir. Kalamaların akış karakteristikleri Olcay v.d. [25] tarafından sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Deney bölgesinde hız çizgileri elde etmek için dijital parçacık görüntülemeli hız ölçümü (DPIV) kullanılmıştır. Akış sahasında korunum denklemlerini çözmek için Ansys Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Sayısal sonuçların deneysel verilere çok yakın oldukları gösterilmiştir. Bir hareketli silindir ile sabit silindirin hidrodinamik kuvvetleri Eren v.d. [26] tarafından incelenmiştir. Sıkıştırılamaz akışta ağ oluşturmak ve bir silindiri hareket ettirmek için dinamik ağ yöntemini kullanılmıştır.

Bir esnek kirişin önünden geçen akışa yönelik sıvı-yapı etkileşim metodolojisini daha iyi anlamak amacıyla tekil bir esnek kiriş için sıvı-yapı etkileşimini deneysel ve sayısal olarak araştırıldı. Kirişin deformasyonunu elde etmek için yüksek hızlı kamera (HSC) sistemi kullanıldı. Üç boyutlu esnek kiriş modeli üç farklı hızda sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal simülasyon için iki yönlü FSI yöntemi uygulanmıştır, ayrıca bir doğrulama testi yapılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, esnek kiriş deformasyonlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bölüm 2, deney düzenini, hesaplama alanı için korunum denklemlerini ve sayısal yöntemleri, esnek T kirişinde deformasyonun doğrulanmasını, sayısal sonuçları ve tartışmaları sunmaktadır.

İkinci çalışmada ise, bir tekil dalga ile bir hareketli silindir arasındaki çarpışmanın sayısal incelenmesi yapıldı. Dalganın bir hareketli cisimle etkileşimini sayısal olarak çözmek, dalgalara karşı hareket eden gemiler veya denizaltıları için olduğu gibi deniz mühendisliği uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Dalga-yapı etkileşiminin incelenmesi bir dalga ile bir hareketli cisim arasındaki hidrodinamik kuvvetleri anlamamıza yardımcı olabilir. Dalga-yapı etkileşimiyle ilgili araştırmalar, gemilerin ve denizaltıların tasarımı ve deniz yapıları bakımından pek çok yarara sahiptir. Lin [34], serbest yüzey akışının hareketli bir cisimle etkileşiminin simülasyonu için iki boyutlu, sabit ızgaralı yeni bir model

araştırmıştır. Cisimlerin hareketi için Lagrange yöntemini ve hareketli bir cismin etrafındaki sıvı hareketini çözmek için Euler yöntemini kullanmıştır. Bir tekil dalganın oluşturulması, su çıkışı ve su darbesi gibi deniz mühendisliğindeki bazı önemli sorunları simüle etmiştir. Sonuçlar, yeni modelin, karmaşık sorunları iyi bir doğrulukla çözebildiğini göstermiştir. Çoklu katman içeren bir koordinat modeli Lin [35] tarafından geliştirilmiştir. Model, dalga-yapı etkileşiminin sorunlarını çözmekte uygulanmıştır. Bu modelde tekil dalganın dikdörtgen bir engelle etkileşimi üç farklı batıklık derinliğinde test edilmiştir. Dalga pedalının hareketiyle tekil dalganın oluşturulması Wu v.d. [36] tarafından deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Durgun su derinliği ve pedal hızı gibi farklı koşullar altında tekil dalgaların davranışlarını incelenmiştir. Tekil dalgalarla ilgili çeşitli çözümler Wu v.d. [37] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Boussinesq, Rayleigh, Grimshaw ve Fenton da dahil dört tekil dalga çözümünü test edilmiştir. Bu modeller kullanılarak çeşitli dalga pedalı hareketleri oluşturulmuştur ve sayısal tekil dalgalar bir 2-D NWT içinde simüle edilmiştir. Luo v.d. [38] bir tekil dalganın deniz seddine çarpmasını araştırmak üzere Tutarlı Parçacık Yöntemini (CPM) kullanılmıştır. Çalışma, geometrinin ve dalga yüksekliğinin parametrik bir çalışmasıydı. Dalga çarpması ve aşması çeşitli geometrilerle ve dalga yükseklikleriyle test edilmiştir. Tekil dalganın dibe monteli bir bariyerle etkileşimini modellemek için Wu v.d. [39] tarafından yeni bir sayısal yöntem kullanılmıştır. Sıvı hacmi (VOF) modeli, bir k-epsilon türbülans modeliyle Reynolds ortalaması alınmış Navier-Stokes (RANS) denklemlerinde çözülmüştür. Model, 2-D sayısal sorunlarını çözebilmiştir. Resif gerisindeki yamaçlar üzerinde tekil dalganın tırmanması alanının simülasyonu için bir Boussinesq Modeli, Liu v.d. [40] tarafından uygulanmıştır. Bu çalışmada yamaç açısının, resif düzlüğüne ait genişliğin ve su derinliğinin, resif düzlüğü üzerindeki etkileri sunulmuştur. Ren v.d. [41], Tutarlı Parçacık Yöntemini (CPM) kullanarak tekil dalganın batık dalgakıranla etkileşimini araştırmışlardır. Bir tekil dalga bir batık dalgakırana etki ettiğinde dalganın profilleri elde edilmiştir. You v.d. [42], tekil dalgalar ile batık bir düz levha arasındaki etkileşimi düz levhanın üç farklı batıklık derinliğinde ve dört tekil dalga yüksekliğinde incelenmiştir. Bu çalışmada hidrodinamik kuvvetler ile diğer parametreler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Seiffert v.d. [43], bir 2-D NWT içinde tekil dalganın bir düz levhayla etkileşimini

incelenmiştir. Bu çalışmada Open-FOAM ticari yazılımı kullanılarak yatay ve dikey kuvvetler elde edilmiştir. Bir tekil dalga ile batık bir yatay levha arasındaki ilişki Lo v.d. [44] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Batık yatay levha üzerine etkiyen dikey kuvvet iki farklı derinlikte hesaplanmıştır. Bir tekil dalga ile batık bir ince levha arasındaki etkileşim Chang v.d. [45] tarafından araştırılmıştır. Batık levhanın çeşitli eğimleri sayısal ve deneysel olarak sunulmuştur. Deneysel yöntem ve sayısal model için parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) ve serbest yüzeyle birlikte akım fonksiyonu-girdap formülasyonları (SVFS) modeli kullanılmıştır. Bir tekil dalga ile bir kıyı köprüsü arasındaki ilişki Hayatdavoodi v.d. [46] diğerleri tarafından sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Su derinliği, batıklık derinliği ve dalga genliği gibi pek çok farklı parametre incelenmiştir. Dalga kaynaklı kuvvetleri çözmek için CFD programı Open-FOAM kullanılmıştır. Kirişli kıyı köprüsünün güvertesi Xu v.d. [47] tarafından sayısal olarak araştırılmıştır. Bu sayısal çalışmada k-omega türbülans modeliyle RANS denklemlerini çözmek için Ansys ticari yazılımını kullanılmıştır. Bir kıyı köprüsü güvertesi üzerine etkiyen tekil dalga kuvvetleri Moideen v.d. [48] tarafından incelenmiştir. Kiriş mesafesinin ve kiriş derinliğinin kıyı köprüsü güvertesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar tepe noktadaki dikey tepe çarpma kuvvetinin bu parametrelere bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Dalgalar ile bir batık silindir arasındaki etkileşim Tian v.d. [49] tarafından deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Bir 3-D sayısal dalga tankı (NWT) içinde silindirin hidrodinamik kuvveti Ansys-Fluent ticari yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Loh v.d. [50], dalgalar ile yarı-batık bir yatık silindir arasındaki etkileşimi simüle etmek için Open-FOAM ticari yazılımını kullanılmıştır. Farklı türlerdeki dalga koşullarında yarı-batık bir yatay silindir için hidrodinamik kuvvetler incelenmiştir. Hu v.d. [51], batma sürecinde dalgalar ile bir dairesel silindir arasındaki etkileşimi araştırılmıştır. Sıvı hacmi yöntemi bir 2-D NWT içinde Ansys-Fluent ticari yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Dairesel silindire etkiyen hidrodinamik kuvvetler batma sürecinde hesaplanmıştır. Suyun yarı derinliğine yerleştirilmiş yatay dairesel silindire çarpan tekil dalgayı analizlemek için düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiğine (SPH) dayalı sayısal model, Aristodemo v.d. [52] tarafından uygulanmıştır. Batık bir yatay silindir üzerine etkiyen yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetleri hesaplanmıştır, sonuçları diğer sayısal ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tripepi v.d. [53], tsunami benzeri tekil dalganın sert

deniz tabanına yerleştirilen yatay bir dairesel silindirle etkileşimini incelenmiştir. Deney düzeni kullanılarak yatay dairesel silindirlere etkiyen yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetler elde edilmiştir. Bir dalga kanalında 30 laboratuvar testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, pozitif yatay tepe noktaları ile pozitif dikey tepe noktalarının yüksekliğinin A/d değerine bağlı olduklarını göstermiştir.

$A/d < 0.105$ ise pozitif yatay tepe noktaları, pozitif dikey tepe noktalarından büyüktür. $A/d > 0.105$ ise pozitif dikey tepe noktaları, pozitif yatay tepe noktalarından büyüktür. Aristodemo v.d. [54] tekil dalgalar ile bir dairesel silindir arasındaki etkileşimi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Sert bir yatay tabana yakın yerleştirilmiş yatay dairesel silindirler üzerine etkiyen yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetleri araştırılmıştır. Bu çalışmada boşluk-çap oranlarının etkileri incelenmiştir. Zhao v.d. [55], denizaltı nakil borularının hidrodinamiği hakkında iki boyutlu bir sayısal çalışma sunmuştur. Dalga yüksekliğinin, su derinliğinin ve nakil boru çapının denizaltı nakil borularının hidrodinamik özellikleri üzerindeki etkileri gerçek bir tsunami dalgası ve bir tekil dalga kullanılarak incelenmiştir. Ong v.d. [56], yarı batık iki yatay dairesel silindiri art arda geçen dalgaların 2-D sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Sayısal tanktaki türbülans akışını çözmek için k-w türbülans modeli kullanılmıştır. İki silindir arasında farklı mesafelerde bulunan silindirler üzerindeki dikey hidrodinamik kuvvetler incelenmiştir. Olcay v.d. [25] sayısal ve deneysel koşullar altında kalamarın ileri hareketini araştırılmıştır. Hidrodinamik kuvvet ve basınç dağılımı elde edilmiştir. Deneysel modeller için DPIV ölçümlerini, sayısal model için de hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Ansys Fluent'i kullanılmıştır. Suda gezinen kalamarın hareketini simüle etmek için Tabatabaei-Malazi v.d. [24] tarafından bir sayısal çalışma yapılmıştır. Kalamarın çeşitli ileri hareket hızlarında sürüklenme kuvvetleri ve sürüklenme katsayıları elde edilmiştir. Sıvı alanını çözmek için SST k-w türbülans modelini kullanılmıştır. Kalamarın su altındaki ileri hareketi Olcay v.d. [28] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıyla kalamarın bir 3-D modeli simüle edilmiş, ayrıca simülasyon için realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Farklı saldırı açıları, hortum organının çapları ve Reynolds sayıları için sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri elde edilmiştir. Tabatabaei-Malazi v.d. [57] kalamarın hareket ivmesini sayısal olarak simüle etmiştir. Hareket için iki farklı hız programı

kullanılmıştır. Ansys Fluent hesaplamalı akışkan dinamiği yazılımında UDF programları kullanılmıştır. İvmenin hidrodinamik kuvvetler üzerindeki etkisi tüm cisimlerde hesaplanmıştır. Bir duvar yakınındaki bir dairesel silindirin hidrodinamik kuvvetleri Tong v.d. [58] tarafından incelenmiştir. Bir duvar yakınında bulunan bir 3-D dairesel silindir üzerindeki akışı simüle etmek için büyük girdap simülasyonları (LES) yöntemini kullanılmıştır. Silindir üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetleri ve basınç dağılımları elde edilmiştir.

Çeşitli pozisyonlarda ve iki farklı yatay hareket hızında silindir üzerine etkiyen yatay ve dikey kuvvetleri anlamak için bu çalışmada NWT içinde hareketli ve hareketsiz iki boyutlu bir silindir incelenmiştir. 2D NWT'yi modellemek için Fluent yazılımında ticari CFD kodu kullanılmıştır. Bir tekil dalga oluşturmak için alanın sol tarafına yerleştirilmiş piston benzeri bir dalga oluşturucu kullanılmıştır. NWT içindeki dalga oluşturucunun ve silindirin hareketi için iki farklı UDF kodu kullanılmıştır. İlk olarak, dalga oluşturan sayısal kodlar ve NWT içindeki silindirin hareketleri, bu kodların doğruluğunu ve becerilerini kontrol etmek üzere diğer sayısal çözümler karşısında doğrulanmıştır. Bundan başka, iki farklı hareket hızında beş farklı silindir pozisyon modeli belirlenip çözülmüştür. Bir tekil dalga oluşturulmuş, dalga-yapı etkileşimi esnasında serbest yüzey değerlendirilmiş ve silindire etki eden yatay ve dikey kuvvetler elde edilmiştir. Bölüm 3, korunum denklemlerini, sayısal yöntemleri, bir tekil dalganın oluşturulmasını, bir tekil dalganın doğrulanmasını ve hidrodinamik kuvvetlerin doğrulanmasını, sayısal sonuçları ve tartışmaları sunmaktadır.

Bölüm 4 sonuçları içermektedir.

1.2 Tezin Amacı

Mühendislikte çok önemli bir yere sahip olan akışkanlar konusu, günümüzün gelişen teknolojisine rağmen hala kompleks bir konu olarak bir çok dalda incelenmektedir. Bu tezde sıvılar içinde en bilinen akışkan olan suyu iki ana çalışma ile ele alıp incelenmiştir. Birinci çalışmada üç boyutlu sıvı-yapı etkileşimi için elastik kiriş üzerinde örnek durum incelenirken, İkinci çalışmada bir tekil dalga ile bir hareketli silindir arasındaki çarpışmanın sayısal incelenmesi yapıldı.

Burada spesifik olarak incelenen suyun, özellikle denizaltı ve sualtı araçlarının tahrik etkilerine olan verimlilikleri dikkate alınabilir. Diğer bir yandan bu gelişmeler deniz araçlarının gene fiziksel yapılarından dolayı sınırlı kalmıştır. Tüm teknolojik gelişmelerde doğadan alınan ilhamın göz ardı edilemeyeceği gerçeği ile, bu noktada da deniz canlıların sudaki hareketleri referans olarak alınmıştır. Örneğin sadece Nautilus Balığının hareketi ile ilgili onlarca çalışmalar yapılmıştır. Pratikten teoriğe ve/veya teorikten pratiğe yapılan bu çalışmalarda klasik matematiksel denklemler ile hesaplamalı (CFD) akışkanlar mekaniğinden de faydalanmıştır. Burada amaçlanan hedef doğruya yaklaşırken en ideali tanımlayabilmektir.

1.3 Hipotez

Birinci çalışmada, deneysel ve sayısal yöntemler arasındaki azami deformasyon için yüzde yanılğı yaklaşık %4-%5'tir. Çalışma ayrıca system coupling yönteminin sıvı-yapı etkileşim uygulamalarında kullanılabileceğini, iki yönlü bir FSI coupling yönteminin verimliliğinin yüksek olduğunu, bu nedenle bu yöntemin makine, inşaat ve deniz mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

İkinci çalışmada, bir tekil dalga ile bir hareketli silindir arasındaki etkileşimi simüle etme becerisine sahip NWT yöntemiyle dalga-yapı etkileşiminin doğru şekilde modellenebileceği mevcut sayısal çalışmada ortaya çıkmıştır.

BİRİNCİ ÇALIŞMA ÜÇ BOYUTLU SIVI YAPI ETKİLEŞİMİ İÇİN ELASTİK KİRİŞ ÜZERİNDE ÖRNEK DURUMU ÇALIŞMASI

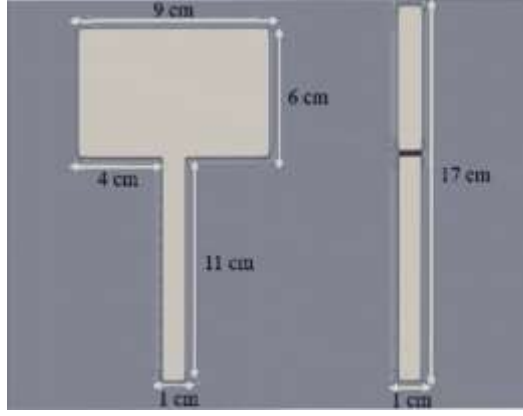
2.1 Malzemeler ve Yöntemler / Deney Düzeni Analiz

Metodolijisi

Deney düzeneğinin ayrıntıları Bölüm 2.2 ve 2.3 içinde açıklanmıştır. Bölüm 2.2, su kanalını, yüksek hızlı kamerayı ve yüksek hızlı görüntüleme yönteminin tekniğini sunmaktadır. Bölüm 2.3, deney sonuçlarının veri analizini açıklamıştır.

2.2 Deney Düzeni

Deneyler, Çin'deki Sichuan Üniversitesi'nin (SCU) Hidrolik ve Dağ Irmağı Mühendisliği Devlet Ana Laboratuvarında (SKLHMRE) bir devridam su kanalında gerçekleştirilmiştir. 12 m (uzunluk) X 0.5 m (genişlik) X 0.6 m (yükseklik) boyutlarında test kesimine sahip su kanalında ortalama akış hızı 0.25 m/s'ye ulaşabilmektedir. Deneyler esnasında su seviyesi 0.5 m'de tutulmuştur, kanal içine akışın hızını ölçmek için pervaneli hızölçer kullanılmıştır. Froude sayısı 0.11 ($Fr = 0.11$) olduğundan bu çalışmada akış, kritik altı akıştır. Hızı uzun bir sürede ölçmek için kanalın aynı dikey düzleminde farklı derinliklerde birden çok ölçüm noktası seçilmiştir; ortalama akış hızı, zaman ortalaması ve mesafe ortalamasıyla hesaplanmıştır. Poliüretandan imal edilmiş esnek T kiriş, yaklaşan akışa dönük olarak düşey bir düzlemde sabitlenmiştir. Esnek T kirişinin boyutları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Sıvı kısım için su, katı kısım için poliüretan kiriş kullanılmıştır. Deney iç mekanda yapılmıştır; seçilen malzemelerin oda sıcaklığındaki temel fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

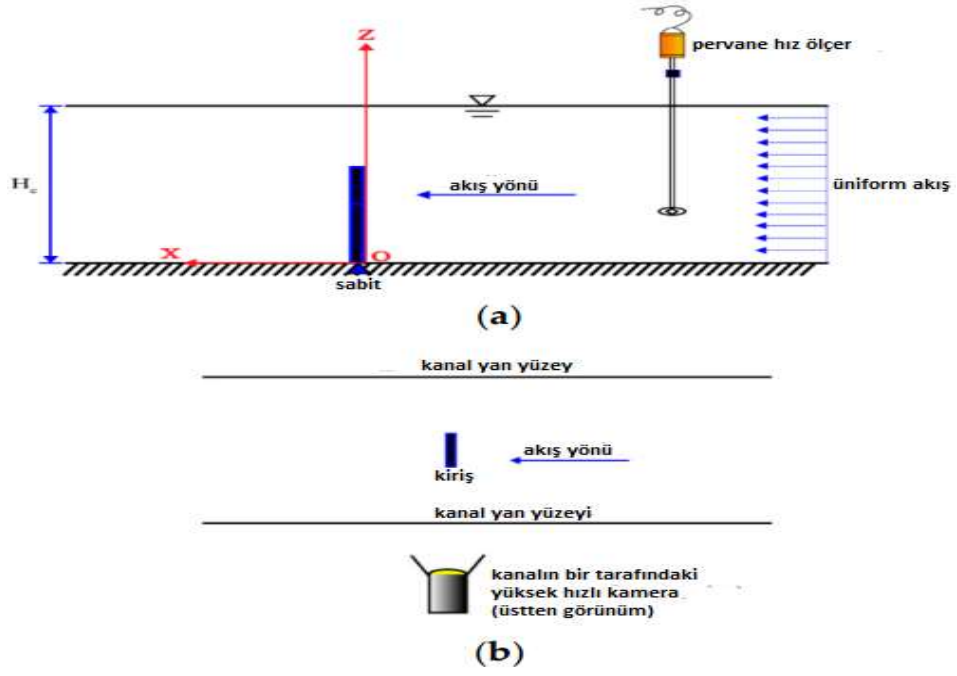


Şekil 2.1 Kirişin boyutlarını gösteren şema

Tablo 2.1 Sayısal ve deneysel yöntemlerde sıvı ve katı karakteristikleri

Su	
Yoğunluk (ρ)	1000 kg/m ³
Dinamik viskozite (μ)	0.001 kg/m_s
Esnek Kiriş	
Yoğunluk (ρ_s)	1.17 g/cm ³
Young's modülü (E)	18 MPa
Poisson oranı (ν)	0.3

Kiriş hareketi ve görüntü tanıma işlemi için aydınlatma bir LED ışık paneliyle sağlanmıştır ve kiriş siyah olarak işaretlenmiştir. Bu çalışmada esnek kirişin deformasyonunu kaydetmek için yüksek hızda görüntüleme yönteminin temassız bir tekniği kullanılmıştır. Görüntüler yüksek hızlı bir kamera (Fastcam Mini UX100, Photron Inc., Chiyoda-Ku, Tokyo, Japonya, azami çekim hızı: 4000 fps, çözünürlük: 1280 X 1024 piksel) kullanılarak 1000 kare/saniye'de (fps) çekilmiştir. Görüntülerin çözünürlüğü, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, sadece kirişin bulunduğu alanı kapsamak üzere kameranın bellek alanından tasarruf sağlamak için 616 piksel x 1024 piksel'e düşürülmüştür.



Şekil 2.2 Deney düzeninin şeması: (a) devridaim su kanalında deney düzeni; (b) kanalın bir tarafındaki yüksek hızlı kamera; (c) ve (d) yandan görünüm

Piksel başına gerçek mesafeyi bulmak üzere durgun suda standardizasyon testleri yapılmıştır (Şekil 2.3). Yaklaşık 12.07 cm x 20.07 cm'lik görüş alanı, piksel başına 0.0196 cm'lik bir uzamsal çözünürlük sağlamıştır.



Şekil 2.3 Standardizasyon testi

2.3 Veri Analizi

Esnek T kirişindeki deformasyonu takip etmek amacıyla deneyde alınan görüntülerden nicel veriler elde etmek üzere görüntü tanımayla yönelik bir Python kodu geliştirilmiştir. Çift taraflı (bilateral) bir filtre görüntü gürültüsünü azaltmanın temel bir aracıdır ve kenarların korunmasında diğer filtrelerden daha iyidir, bu nedenle deney görüntülerinin gürültüsünü azaltmak için çift taraflı bir filtre kullanılmıştır. Ardından, deney görüntülerinde kirişin kenarlarını saptamak için çok aşamalı bir algoritma kullanan ve bir kenar tanıma operatörü olan Canny kenar detektörü kullanılmıştır. Görüntü binarizasyonu, pikselin görüntü üzerindeki gri ton değeri 0'a veya 255'e ayarlanarak yapılmıştır; bu, belirgin bir siyah-beyaz efektiyle tüm resmi sunma işlemidir. Aşındırma (erosion), kapatma (closing operation) ve genişletme (dilation), görüntü özelliklerini iyileştiren morfolojik işlemlerdir. Canny kenar detektörünün algıladığı kenarları daha netleştirmek için erozyon, kapatma ve genişletme işlemlerini uyguladık, ardından kenarların piksel koordinatlarını kaydettik. Bir resmin piksel büyüklüğü saptanabilir. Böylece, gerçek mesafenin ölçeği S ve piksel mesafesi Şekil 2.3 aracılığıyla hesaplanabilir. S , $S = \text{gerçek mesafe/piksel mesafesi}$ ile belirlenmektedir. Bu yüzden, takip noktasının gerçek yer değiştirme miktarı D , $D = S \cdot L$ ile hesaplanmaktadır; burada L , takip noktasının güncel ve başlangıç konumu arasındaki piksel mesafesidir. Görüntü işlemeyle ilgili ayrıntılar Howes tarafından örneklerle anlatılmıştır.



Şekil 2.4 Görüntü işleme programının akış şeması

2.4 Sayısal Yöntemler

İki yönlü sıvı-yapı etkileşimi (FSI) için sayısal yöntem 2.5-2.8 Bölümlerinde açıklanmıştır. Üç boyutlu sıvı alanının çözümü Bölüm 2.5'te açıklanmıştır. Esnek T kirisinin yapı dinamiği Bölüm 2.6'da açıklanmıştır. Bölüm 2.7, sıvı ve katı alan arasında sistem system coupling'i sunmaktadır. Hesaplama alanına ve sınır koşullarına ilişkin ayrıntılar Bölüm 2.8 içinde ele alınmıştır.

2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

Üç boyutlu sıvı alanında türbülans akış simülasyonu için, realizable k- ϵ türbülans modeli uygulanmıştır [Olçay v.d. [28] ve ANSYS Fluent Theory Guide [29]]. Sürekliliği belirten korunum denklemleri ve momentum formülleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_i \quad (2.2)$$

burada ρ , yoğunluk; u_i ve u_j , sıvının ortalama hız bileşenleridir. P , basınç; S_i , momentum denklemi için kaynak terim; μ , dinamik viskozite; μ_t , girdap viskozitesidir ve $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ile tanımlanmaktadır. k ve ε için transport denklemi, realizable k - ε modeli için aşağıdaki verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.4)$$

burada k , türbülans kinetik enerji, ε ise yayılım oranıdır. G_k , ortalama hız gradyanlarından ileri gelen türbülans kinetik enerjisi üretimidir; G_b , kaldırma kuvvetinden ileri gelen türbülans kinetik enerjisi üretimidir ve Y_M , dalgali genleştirmenin genel yayılım oranına katkısıdır. Realizable k - ε türbülans modeli için model sabitleri $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $C_\mu = 0.09$, ve $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 'tür

2.6 Hesaplamalı Yapı Dinamiği (CSD)

Üç boyutlu esnek bir katı yapının deformasyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilen hareket denklemiyle belirtilmiştir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2.5)$$

burada $[M]$, yapı kütlelerinin matrisi; $[C]$, yapının sönüm matrisi; $[K]$, yapının rijitlik matrisi ve $\{F\}$, sıvının yol açtığı ve yapı üzerine etkiyen uygulama yükünün vektörüdür. $\{\ddot{u}\}$, düğümün ivme vektörü; $\{\dot{u}\}$, düğümün hız vektörü ve $\{u\}$, düğümün yer değiştirme vektörüdür. (2.5) Denkleminin çözümü için, geliştirilmiş bir algoritmayla (HHT) Newmark zaman integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Kapalı geçici hal (transient) analizleri için Newmark yöntemi ve HHT yöntemi uygulanmıştır. Newmark yöntemi ve HHT yöntemi Δt zaman aralığında sonlu fark açılımlarını uygulamaktadır.

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (2.6)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}\right]\Delta t^2 \quad (2.7)$$

olduğu varsayılmıştır (Bathe [30]). Burada α ve σ , Newmark integrasyon parametreleri; $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, $\{u_n\}$, t_n zamanında düğümün yer değiştirme vektörü; $\{\dot{u}_n\}$, t_n zamanında düğümün hız vektörü; $\{\ddot{u}_n\}$, t_n zamanında düğümün ivme vektörü; $\{\ddot{u}_{n+1}\}$, t_{n+1} zamanında düğümün hız vektörü ve $\{u_{n+1}\}$, t_{n+1} zamanında düğümün yer değiştirme vektörüdür.

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F\} \quad (2.8)$$

Asıl amaç $\{u_{n+1}\}$ yer değiştirmesini hesaplamak olduğundan korunum Denklemi (2.5), t_{n+1} zamanında şöyle hesaplanabilir

t_{n+1} zamanında yer değiştirmenin çözümü (2.6) ve (2.7) Denklemlerinin ilk yeniden düzenlenmesiyle elde edilebilir; öyle ki

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_n\} - a_3\{\ddot{u}_n\} \quad (2.9)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + a_6\{\ddot{u}_n\} + a_7\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (2.10)$$

Burada $a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$, $a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$, $a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$, $a_6 = \Delta t(1 - \delta)$, $a_7 = \delta\Delta t$.

$\{u_{n+1}\}$ için bir çözüm elde edildikten sonra hızlar ve ivmeler (2.9) ve (2.10)

Denklemlerinde belirlendiği gibi hesaplanır. Hızın veya ivmenin elde edildiği düğümler için bir yer değiştirme sınırlaması (2.7) Denkleminden hesaplanır. HHT zaman integrasyon yöntemi tam geçici hal analizinde sayısal sönüm için istenen özelliğin elde edilmesine yardım edebilir.

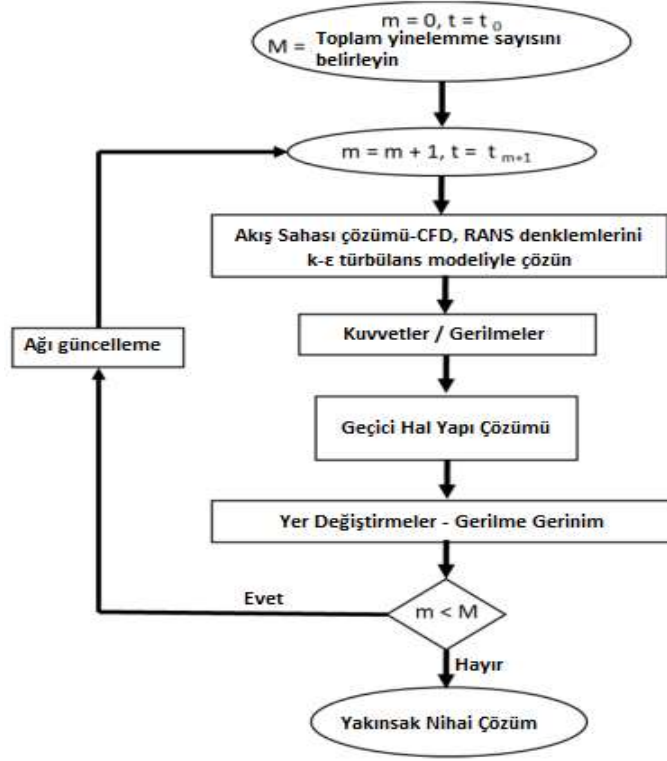
HHT yönteminin temel formu (2.11) Denklemiyle tanımlanmıştır.

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1-\alpha_m}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1-\alpha_f}\} + [K]\{u_{n+1-\alpha_f}\} = \{F_{n+1-\alpha_f}\} \quad (2.11)$$

burada α_m ve α_f , ivmenin, yer değiştirmenin ve hızın entorsplasyonu ile yükler için iki ekstra integrasyon parametresidir. Ayrıca HHT yönteminde göz önünde bulundurulmuş geçici hal dinamik denge denkleminin, (2.5) ve (2.11) Denklemleri karşılaştırıldıktan sonra n ve $n + 1$ 'in iki ardışık zaman adımının bir doğrusal kombinasyonu olduğu görülmüştür.

2.7 CFD-CSD Eşleşme

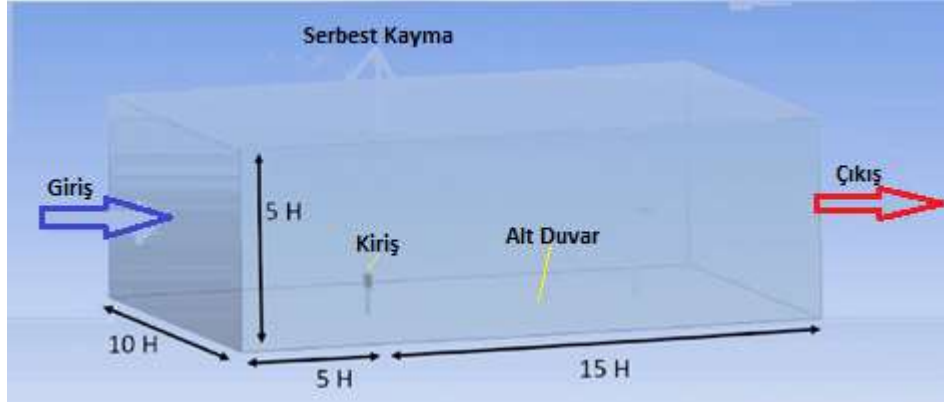
İki yönlü sıvı-yapı etkileşimlerinin simülasyonu için Ansys Workbench system coupling modülünü kullandık (Chimakurthi v.d. [1]). Sıvı Akışı (Ansys Fluent) ve Geçici Hal Yapı Sistemleri (Ansys Mechanical), system coupling modülünde bağlanmışlardır. realizable k- ϵ türbülans modeli için Reynolds ortalaması alınmış Navier-Stokes (RANS) denklemleri, CFD çözücü (Fluent) kullanılarak hesaplama alanında çözülmüştür; ayrıca aynı yüklerin etkisi altında esnek T kirişinin deformasyonunu çözmek için geçici hal yapı analizi kullanılmıştır. System coupling yönteminde arayüzün sıvı tarafındaki kuvvetler veya gerilmeler katı tarafa aktarılmaktadır, ayrıca arayüzün katı tarafındaki yer değiştirmeler veya hızlar sıvı tarafa aktarılmaktadır. Bu system coupling modülünde transfer etme, ağırlıkların hesaplanmasını ve ardından verilerin enterplasyonunda bunların kullanılmasını içermektedir. Yüzeyden yüzeye, hacimden hacme, noktadan hacme, yüzeyden hacme veya bunların tersi gibi topolojik bakımdan benzer ve/veya farklı eleman türleri, dağıtımlar ve boyutlar arasında gerçekleşebilir. Şekil 2.5'te hesaplama yöntemi ve bölümlenmiş system coupling'ine ayrıntılı bir genel bakış verilmiştir. Ansys Fluent'ten CFD çözücü kullanılarak akış sahası hesaplandıktan sonra kiriş üzerine etkiyen kuvvet elde edilmiştir. Ardından, kirişin yer değiştirmesi, Ansys Mechanical'dan bir yapının geçici hali kullanılarak çözülmüştür. System coupling'inde yakınsaklık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilmektedir.



Şekil 2.5 System coupling'in sayısal adımları

2.8 Hesaplamalı Model Geometrisi, Sınır Koşulları ve Ağ Oluşturma

Esnek T kiriş kanalın alt duvarına sabitlenmiştir. Şekil 2.6, hesaplama alanını ve sınır koşullarını şematik olarak göstermektedir. Esnek T kirişinin yüksekliği (H) 0.17 m'dir. Kiriş, küp biçimindeki hesaplama alanına yerleştirilmiştir. Alanın yüksekliği, uzunluğu ve derinliği sırasıyla 5 H, 20 H ve 10 H olarak belirlenmiştir. Hız giriş sınır koşulu, akış yönünün tersinde kirişin 5H seviyesinde konumlandırılmıştır; basınç çıkış sınır koşulu, esnek T kirişinin akış yönünde 15 H seviyesinde konumlandırılmıştır. Duvarlar (alt duvar ve esnek T kiriş) için kaymama sınır koşulu uygulanmıştır. Hesaplamanın üst tarafına ve yan taraflarına serbest kayma sınır koşulu (simetri) uygulanmıştır. Esnek T kirişinin boyutları ve malzeme özellikleri ile bütün simülasyonlarda kullanılan akış özellikleri deney durumundakiyle aynı gerçekleşmiştir, Tablo 2.1



Şekil 2.6 Hesaplama alanına ve sınır koşullarına ilişkin ayrıntılar

Bu çalışmada akış karakteristiklerini belirlemek için boyutsuz Reynolds sayısı kullanılmıştır. Reynolds sayısı (2.12) Denklemiyle tanımlanmıştır.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.12)$$

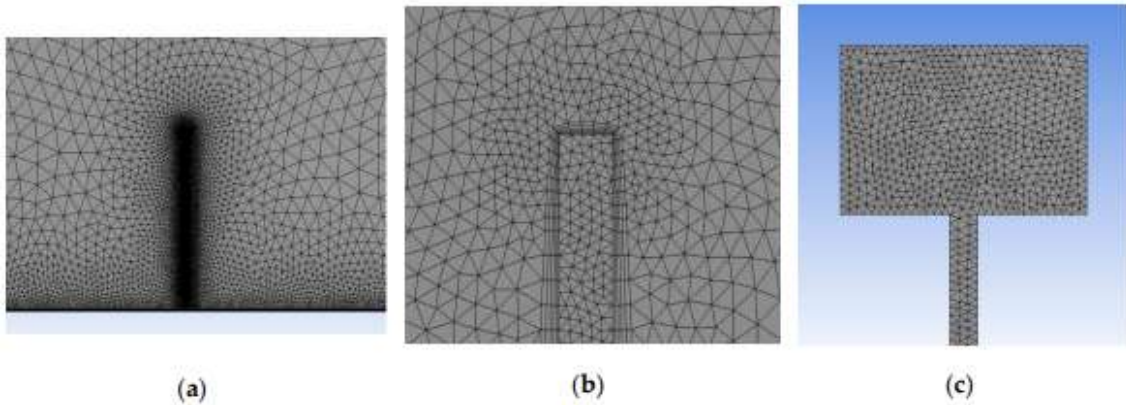
burada ρ , yoğunluk; μ sıvının dinamik viskozitesi; U serbest akış hızı ve L ise karakteristik uzunluktur (başka deyişle kiriş yüksekliğidir). Kapalı devre su kanalı, kanal boyunca en yüksek su hızını 0.25 m/s olarak sağlayabildiğinden deney düzenindeki en yüksek su hızı 0.25 m/s olarak gerçekleşmiştir. Sayısal çalışmada kirişin farklı hızlardaki davranışını anlamak için üç farklı hız seçilmiştir. Doğrulamanın ardından sayısal simülasyonlar için $U = 0.15, 0.25$ ve 0.35 m/s seçilmiştir. $U = 0.15, 0.25$ ve 0.35 m/s için Reynolds sayıları 25,500, 42,500 ve 59,500 olarak belirlenmiştir, Tablo 2.2 Akış alanını ve katı kısmı çözmek üzere hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodu için ticari Ansys Fluent ve Ansys Mechanical programları kullanılmıştır. Akış alanı ile katı kısım arasında bağlantı sağlamak amacıyla bir system coupling modülü kullanılmıştır. Beş adet basınç-hız bağlaştırma algoritması arasında bağlaştık şema seçilmiştir. Transport denklemlerinin advectif terimlerini ayırtlaştırmak için ikinci derece upwind şeması seçilmiştir. Süreklilik ve momentum denklemleri için yakınsaklık kriterleri 10^{-6} değerine ayarlanmıştır. Yakınsaklık kriterlerine ulaşıncaya kadar süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümüne devam edilmiştir.

Tablo 2.2 Hızlar ile uygulanan modeller arasındaki ilişkiyi göstermektedir

Hız (m/s)	Reynolds Sayısı	Uygulanan
0.15	25,500	Sayısal model
0.25	42,500	Sayısal ve deneysel model
0.35	59,500	Sayısal model

Yüksek yoğunluktaki ağa yakın duvarlarla birlikte akış çözüm alanı ağının oluşturulması için üçgen temel elemanlarının yanı sıra tetrahedron ve prizma belirlenmiştir; katı alanı için tetrahedron ağ kullanılmıştır. Esnek T kirişinin deformasyonunu simüle etmek için dinamik ağ yöntemi uygulanmıştır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, sıvı alanını çözmek için toplamda 800,000-1,200,000 eleman, katı alanı çözmek için 21,210-73,000 eleman kullanılmıştır. Sıvı alanındaki tüm modeller için ağ yoğunluğuna yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.3, 0.25 m/s'lik giriş hızında çeşitli eleman sayılarıyla birlikte toplam deformasyon çeşitliliğini göstermektedir. Çalışmamızda azami hızda iyi sonuçlar elde etmek üzere sıvı çözüm alanı için 1,200,000 elemanın ve katı alan için 72,425 elemanın gerektiği saptanmıştır.

0.01, 0.001 ve 0.0001 değerlerinde üç farklı bağlaştırma zaman adımları incelenmiştir. Bu çalışmada bütün simülasyonlar toplamda 10 saniyeliğine yapılmıştır. Ağ iyileştirme çalışmalarının ardından bütün simülasyonlar için 0.001'lik bir zaman adımı seçilmiştir



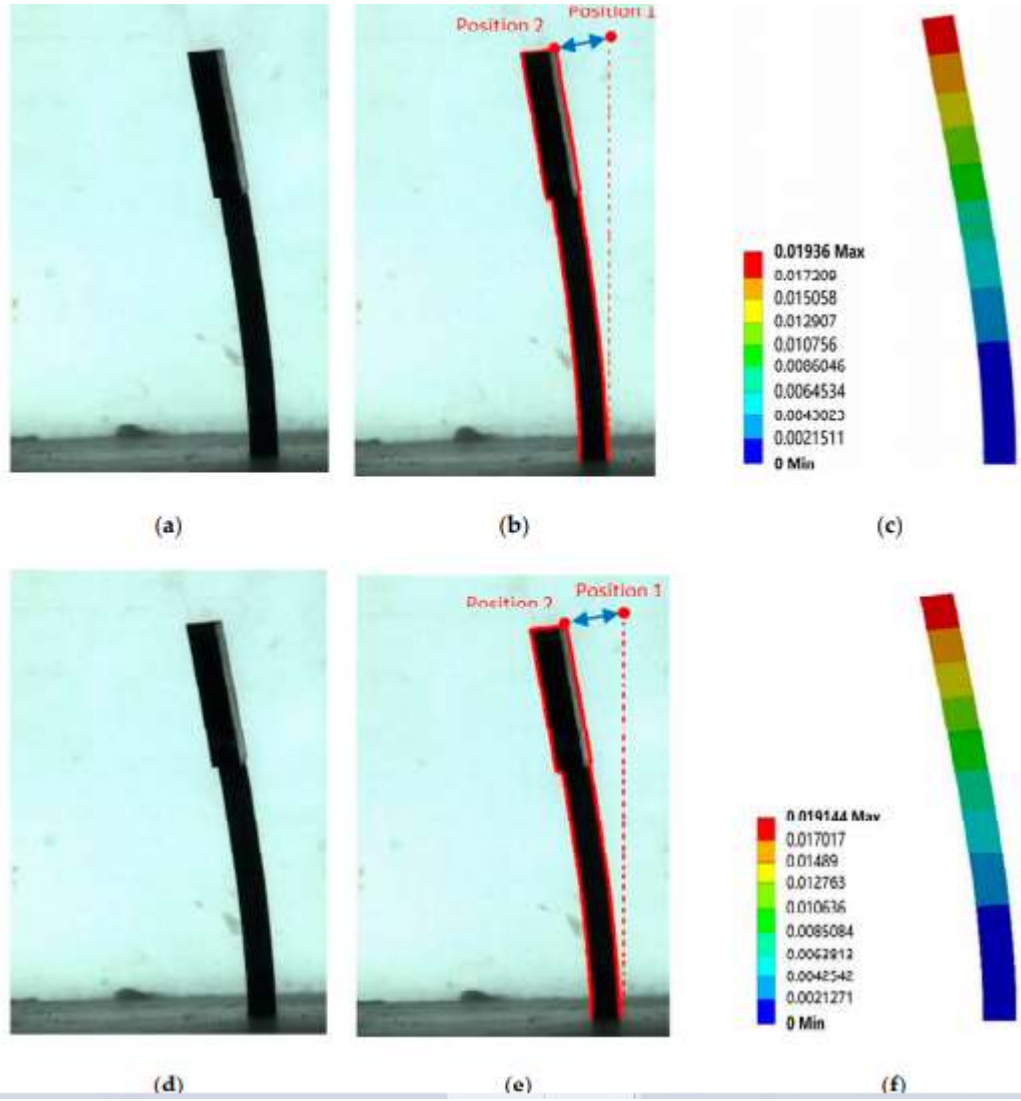
Şekil 2.7 (a) Sıvı alanının hesaplamalı ağı, **(b)** kiriş yüzeyi çevresinin büyütülmüş görünümü ve **(c)** kirişin sayısal ağı

Tablo 2.3 Hesaplama alanı için ağ yakınsaklık çalışması

Ağ Çözünürlüğü	t = 10s'de deformasyon
810,000	0.022400
890,000	0.01989
920,000	0.01934
1,020,000	0.019147
1,040,000	0.019144

2.9 Deneysel ve Sayısal Sonuçlar Arasında Karşılaştırma

Bir Reynolds sayısında (42,500) üç boyutlu esnek kiriş modeli için yüksek hızlı kamerayla (HSC) ölçümler yapılmıştır. Kapalı devre su kanalının en yüksek hız beslemesi 0.25 m/s olduğundan bu deney çalışmasında esnek kiriş için en yüksek Reynolds sayısı 42,500 olarak gerçekleşmiştir. Sayısal simülasyon deneyde kullanılan aynı koşullarda yapılmıştır. Sayısal ve deneysel verilerin sonuçları toplam deformasyon bakımından karşılaştırılmıştır, Şekil 2.8 Sayısal modelin toplam deformasyon biçimi 42,500'lik bir Reynolds sayısı için HSC ölçümlerinden elde edilen deformasyonla iyi örtüşmektedir. Esnek T kirişine ait azami yer değiştirmenin takip edilmesi için esnek T-kirişinin tepesinde bir nokta (kırmızı nokta) seçilmiştir. Esnek T kirişi dikey konuma geldiğinde kırmızı nokta 1 konumunda bulunmaktadır. Deformasyondan sonra kırmızı nokta konum 1'den konum 2'ye geçmektedir. Azami yer değiştirme konum 1 ile konum 2 arasındaki mesafedir. Tablo 2.4, sayısal ve deneysel modeller için $t = 6$ s ve $t = 10$ s iken esnek T kirişinin azami deformasyonunu göstermektedir.



Şekil 2.8 $Re = 42,500$ ve $t = 6$ s için esnek T kirişindeki toplam deformasyonun karşılaştırılması **(a)** Deney (yüksek hızlı kamera sistemi (HSC)), **(b)** görüntü takip programıyla deney (HSC) ve **(c)** sayısal (CFD) $Re = 42,500$ ve $t = 10$ s için esnek T kirişindeki toplam deformasyonun karşılaştırılması **(d)** Deney (HSC), **(e)** görüntü takip programıyla deney (HSC) ve **(f)** sayısal (CFD)

Tablo 2.4 $Re = 42,500$, $t = 6$ s ve $t = 10$ s için esnek T kirişindeki azami deformasyonun karşılaştırılması

$Re = 42,500$	$t = 6$ s (Şekil a-c)	$t = 10$ s (Şekil d-f)
Deneysel model deformasyonu (m)	0.0205 ± 0.001	0.0202 ± 0.001
Sayısal model deformasyonu (m)	0.0193	0.0191

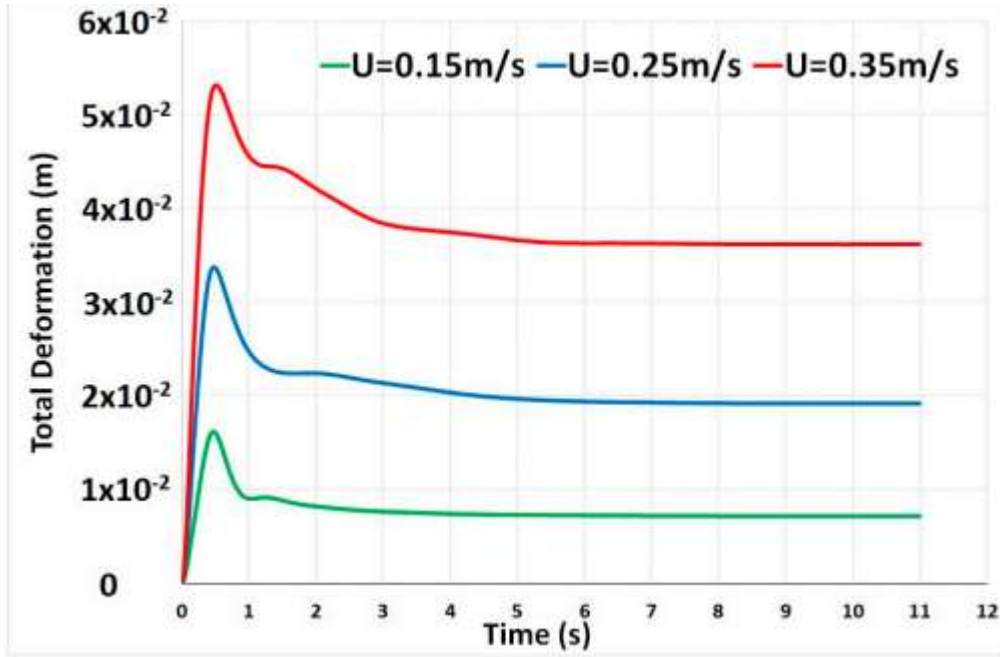
2.10 Deformasyon ve Gerilme Çalışması

Esnek T kirişi 42,500'lük ($U = 0.25$ m/s) bir Reynolds sayısında doğrulanmıştır, ardından 25,500 ($U = 0.15$ m/s) ve 59,500 ($U = 0.35$ m/s) olmak üzere iki farklı Reynolds sayısında incelenmiştir.

Esnek T kirişi bütün halde üç farklı Reynolds sayısında sayısal olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada toplam deformasyon sayısal olarak hesaplanmıştır. Toplam deformasyon (2.13) Denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (2.13)$$

Burada U_x , x yönünde bileşen deformasyonu; U_y , y-yönünde bileşen deformasyonu ve U_z , z yönünde bileşen deformasyonudur. Şekil 2.9, 0.15, 0.25 ve 0.35 m/s'lik üç farklı hızda $t=0$ s'den $t=10$ s'e kadarki toplam deformasyon kaydını göstermektedir. Esnek T kirişinin deformasyonu tüm hızlarda zamanla artmış, ardından azalmış ve sonunda sabit bir değere ulaşmıştır. Esnek T kirişinin deformasyonu hız artışıyla beraber artmıştır. Dış yük de hızla beraber değişmiştir. Hız arttıkça esnek T kirişi giderek bükülmüştür. Azami hız için azami deformasyon değerine erkenden ulaşıldığı görülmektedir. Hız $U = 0.15$ m/s olduğunda $t = 0.47$ s'de ve hız $U = 0.35$ m/s olduğunda $t = 0.511$ s'de azami deformasyon değerine ulaşıldığı belirtebilir. Esnek T kirişinin azami gerilmesi (Von Mises gerilmesi) üç farklı giriş hızları arasında azami giriş hızında meydana gelmiştir.

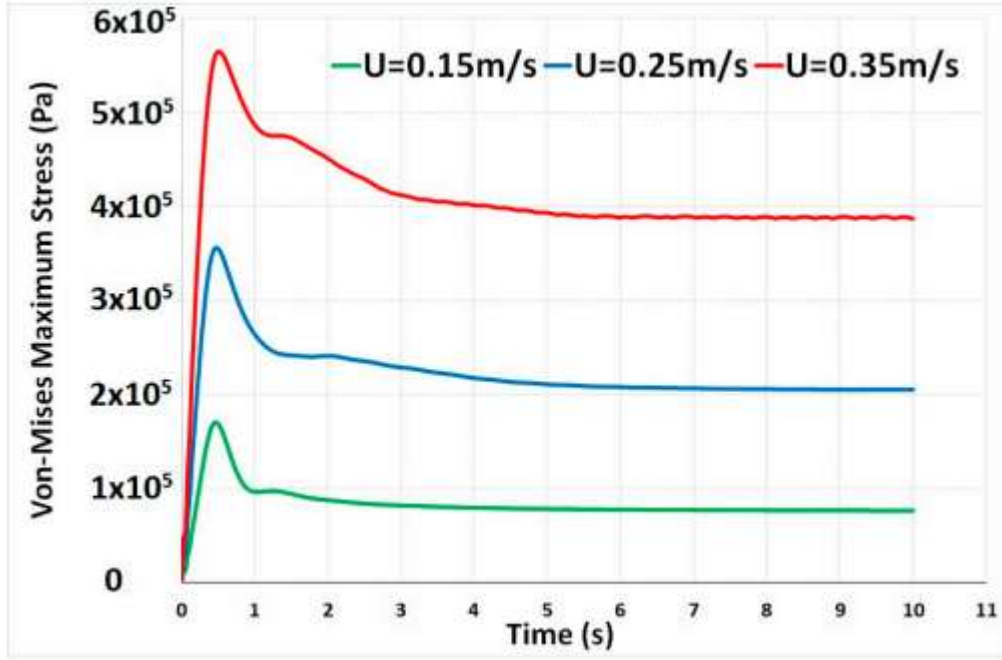


Şekil 2.9 $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin toplam deformasyonundaki değişim

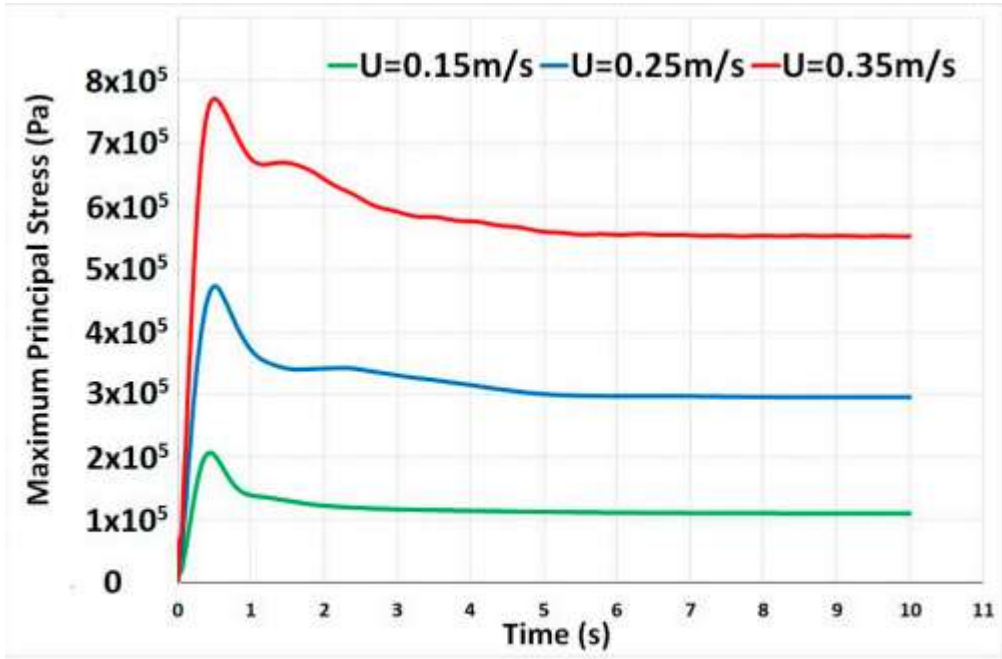
Bu çalışmada Von Mises gerilmesi sayısal olarak hesaplanmıştır. Von Mises gerilmesi (2.14) Denklemi kullanılarak hesaplanabilir

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

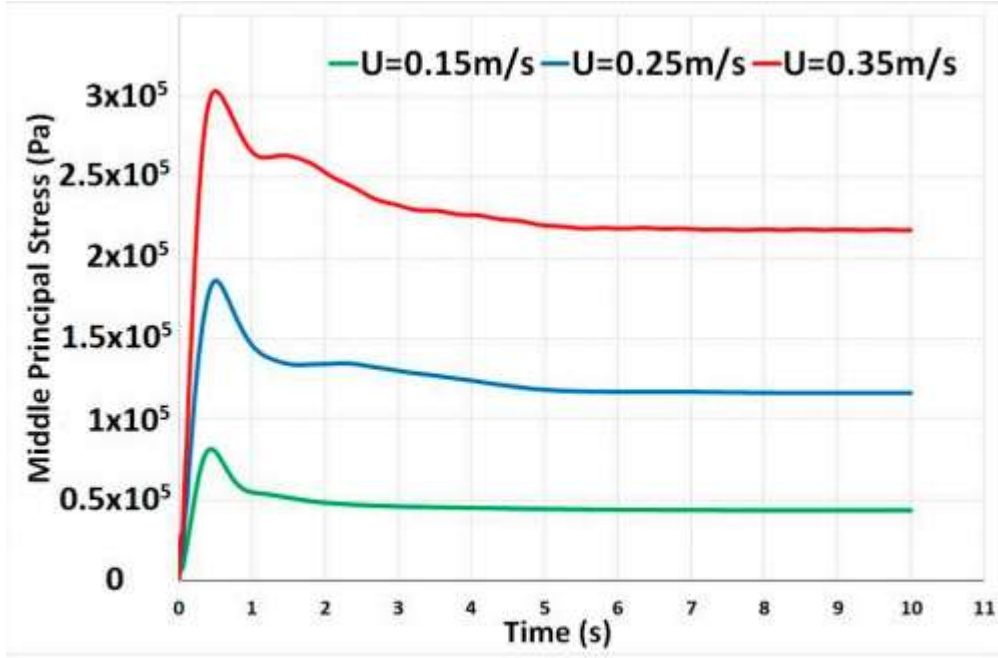
Burada σ_1 , x yönündeki gerilim, σ_2 , y yönündeki gerilim ve σ_3 , z yönündeki gerilmedir. Kirişin azami gerilimi ve azami deformasyonu benzer davranış sergilemektedir, bu yüzden gerilmenin deformasyon gibi tüm hızlarda değiştiği sonucuna varabiliriz. Şekil 2.10, kirişin azami gerilmesinin zamanla değiştiğini göstermektedir; azami gerilmenin kirişin alt tarafında meydana geldiği görülmektedir. Şekil 2.14, kirişin zamanla değişen azami asal gerilmesini, orta asal gerilmesini ve asgari asal gerilmesini göstermektedir



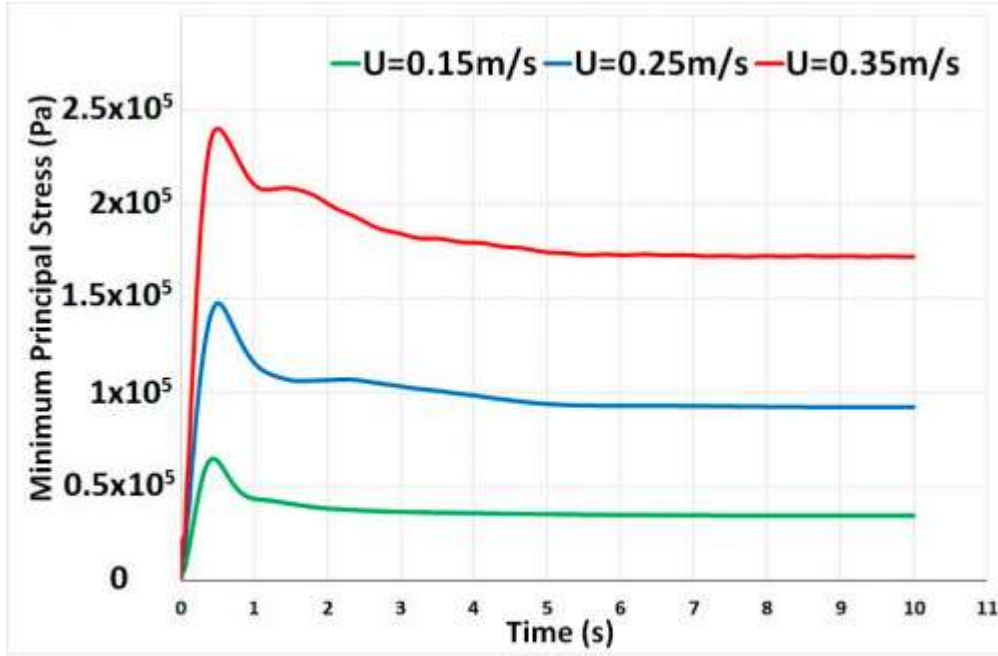
Şekil 2.10 $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin azami Von Mises gerilmesindeki değişim



(a)



(b)



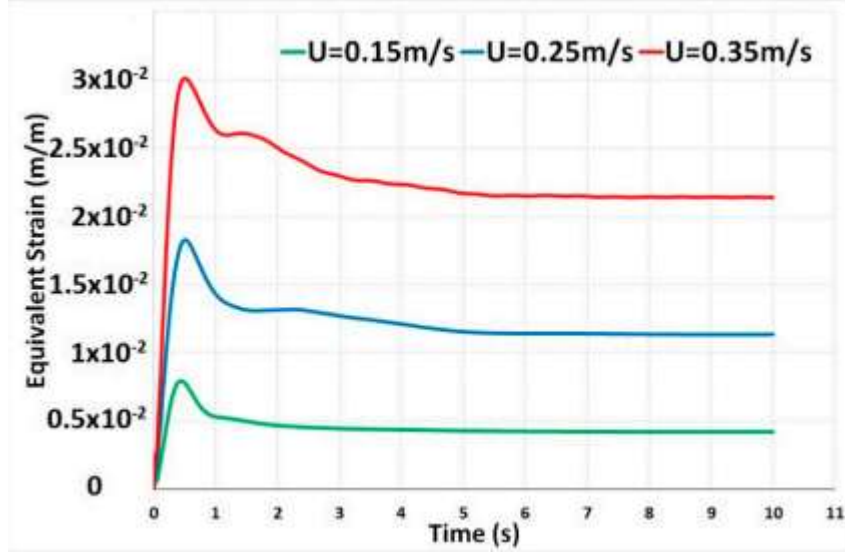
(c)

Şekil 2.11 (a) $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin azami asal gerilmesindeki değişim **(b)** $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin orta asal gerilmesindeki değişim **(c)** $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin asgari asal gerilmesindeki değişim

Bu çalışmada eşdeğer gerinim sayısal olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer gerinim (2.15) Denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1 + \nu'} \left(\frac{1}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

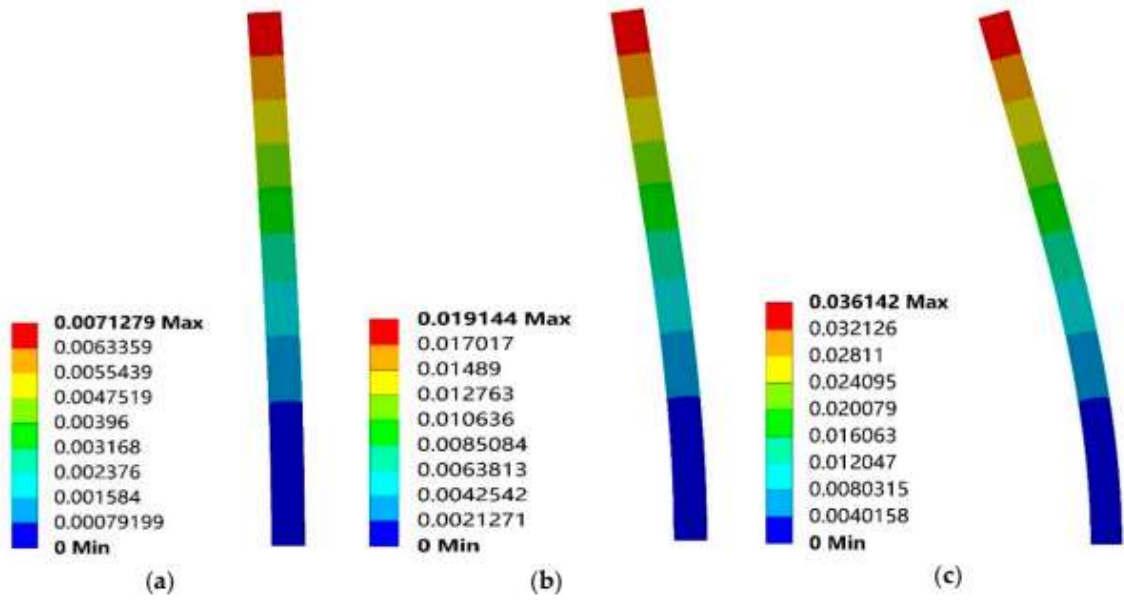
Burada ε_1 , x yönündeki asal gerinim; ε_2 , y yönündeki asal gerinim ve ε_3 , z yönündeki asal gerinim ve ν' , geçerli Poisson oranıdır. Şekil 12, kirişin zamanla değişen eşdeğer gerinimin göstermektedir.



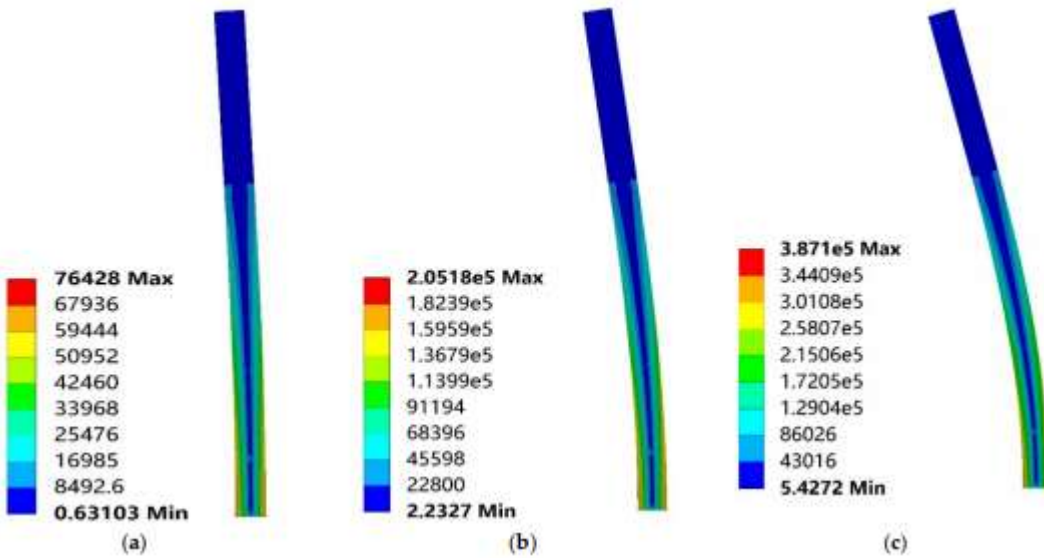
Şekil 2.12 $t = 0$ s ve 10 s arasında esnek T kirişinin eşdeğer gerinimindeki değişim

2.11 Sayısal Çalışmanın Çizgi Eğrileri

$t = 10$ s iken 25,500 ($U = 0.15$ m/s), 42,500 ($U = 0.25$ m/s) ve 59,500 ($U = 0.35$ m/s) olmak üzere üç farklı Reynolds sayısı için esnek T kirişinin deformasyonu Şekil 2.13'te gösterilmiştir. $t = 10$ s iken 25,500, 42,500 ve 59,500'lük üç farklı Reynolds sayısı için esnek T kirişinin gerilmesi Şekil 14'te gösterilmiştir. Esnek T kirişi ön yüzeyde büyük bir basınca sahip olduğundan azami deformasyonun ve gerilmenin en büyük Reynolds sayısında gerçekleştiği görülmüştür.



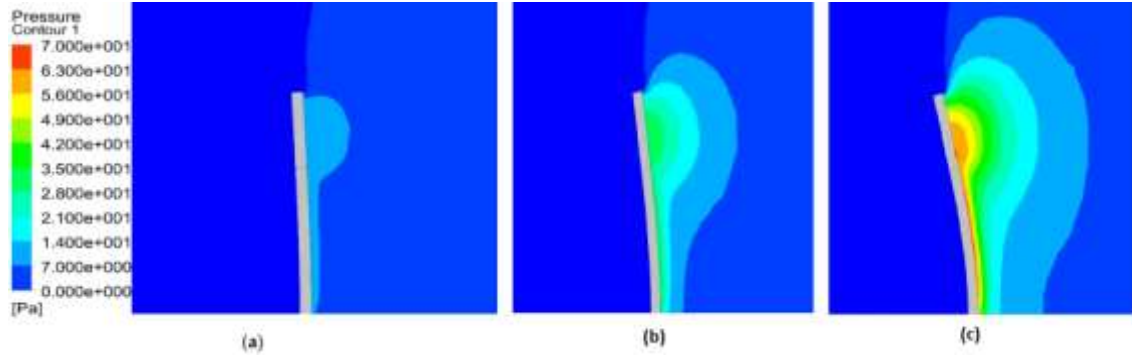
Şekil 2.13 $t = 10$ s'de esnek T kirişinin deformasyonu (m) (a) $Re = 25,500$, (b) $Re = 42,500$ ve (c) $Re = 59,500$



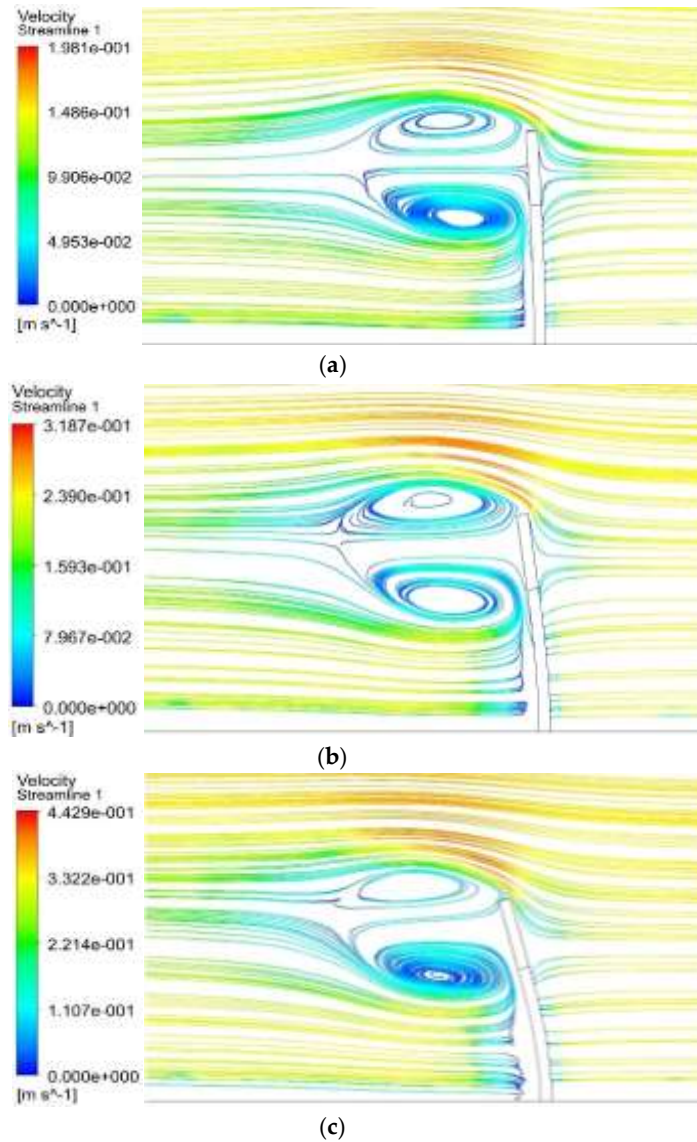
Şekil 2.14 $t = 10$ s'de esnek T kirişinin gerilmesi (Pa) (a) $Re = 25,500$, (b) $Re = 42,500$ ve (c) $Re = 59,500$

$t = 10$ s için çözüm alanında basınç çizgileri Şekil 2.15'te çizilmiştir. Esnek bir T kirişinin çevresindeki akış incelenerek esnek T kirişlerinin ön yüzeylerinde büyük bir basınç saptanmıştır. Şekil 2.16, ayrıca esnek T kirişinin üst kısmında akış ayrılmasına işaret eden daha düşük basınç bölgelerini göstermektedir. Esnek T kirişlerinin ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkının büyük olduğu kaydedilmiştir. Basınç çizgilerine ek olarak, $t = 10$ s için akım çizgileri Şekil 2.16'da çizilmiştir. Esnek T kirişlerinin arkasında devridaim bölgelerinin olduğu ortaya

çıkmiştir. Akış ayrılması esnek T kirişinin üst tarafına yakın gerçekleştiği için devridaim bölgeleri de esnek T kirişinin üst bölgesine yakın yerde oluşmuştur.



Şekil 2.15 $t = 10$ s'de esnek T kirişinin basınç dağılımı (Pa)(a) $Re = 25,500$, (b) $Re = 42,500$ ve (c) $Re = 59,500$



Şekil 2.16 $t = 10$ s'de esnek T kirişinin akım çizgisi (m) (a) $Re = 25,500$, (b) $Re = 42,500$ ve (c) $Re = 59,500$

2.12 Sürüklenme Katsayılarının Çalışılması

Gövde, sıvı akışına daldığı zaman belirli bir miktarda sürüklenme kuvvetine maruz kalabilir (Olcaç v.d. [28], Batchelor [32] ve Vasudev v.d. [33]). Sürüklenme kuvveti şu denklemle verilmiştir.

$$F_D = F_{D_pressure} + F_{D_viscous} = \oint P \hat{n} \cdot \hat{e}_d dS + \oint \tau_w \hat{t} \cdot \hat{e}_d dS \quad (2.16)$$

Burada $F_{D_Pressure}$ ve $F_{D_Viscous}$, BASINÇ ve viskozite etkileri nedeniyle x yönündeki sürüklenme kuvvetleridir. p , esnek T kirişi üzerindeki basınçtır ve τ_w , esnek T kirişinin yüzeyindeki duvar kayma gerilmesidir.

$t = 6$ s ve $t = 10$ s için sürüklenme kuvveti çalışmaları Tablo 2.5'te verilmiştir. Esnek T kirişi için Reynolds sayısı arttıkça sürüklenme katsayısının azaldığı gözlenmiştir.

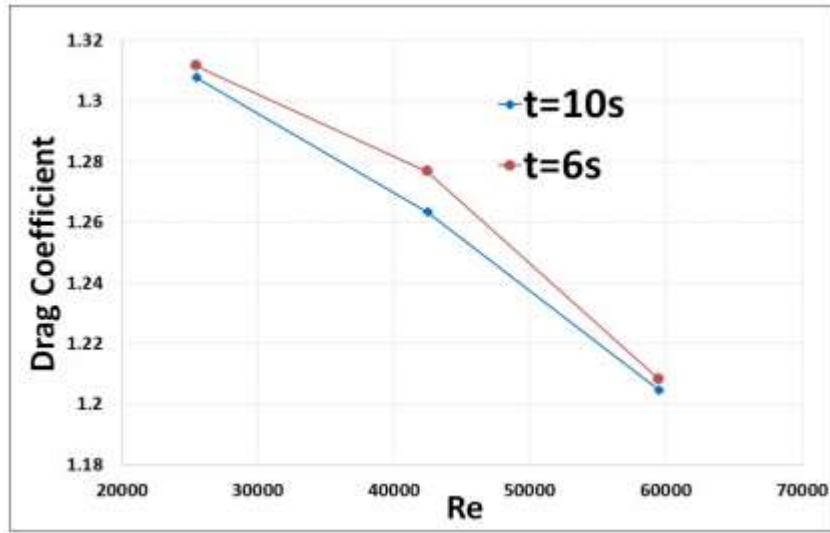
Tablo 2.5 $t = 6$ s ve $t = 10$ s için Reynolds sayılarıyla beraber sürüklenme kuvvetindeki değişim

Reynolds Sayıları	Sürüklenme Kuvveti, $t = 6$ s	Sürüklenme Kuvveti, $t = 10$ s
25,500 ($U = 0.15$ m/s)	0.09591	0.09563
42,500 ($U = 0.25$ m/s)	0.25932	0.25663
59,500 ($U = 0.35$ m/s)	0.48103	0.47961

Sürüklenme kuvveti elde edildikten sonra (2.9) Denklemi kullanılarak sürüklenme katsayısı çalışılmıştır.

$$C_d = \frac{F_{Drag}}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (2.17)$$

Burada C_d , sürüklenme katsayısı; F_{Drag} , sürüklenme kuvveti; ρ , sıvının yoğunluğu; U , sıvının hızı ve A , referans alandır (gövdenin ön alanı). Sürüklenme katsayısının eğrisi Şekil 2.17'de çizilmiştir. Esnek T kirişi için Reynolds sayısı arttıkça sürüklenme katsayısının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.17 $t = 6$ s ve $t = 10$ s için Reynolds sayılarıyla beraber sürüklenme katsayısındaki değişim

İKİNCİ ÇALIŞMA BİR TEKİL DALGA İLE BİR HAREKETLİ SİLİNDİR ARASINDAKİ ÇARPIŞMANIN SAYISAL İNCELENMESİ

3.1 Sayısal Yöntem / Korunum Denklemleri

Bu çalışmada iki boyutlu bir sayısal model kullanılmıştır; bu model, hesaplama alanında suyu ve havayı kapsamaktadır. Su ve hava bir serbest yüzey sınırıyla ayrılmaktadır. Türbülans akış simülasyonu için RNG k - ϵ türbülans modeli kullanılmıştır (Tian [49] v.d. ve ANSYS Fluent Theory Guide[59]). Sürekliliği belirten korunum denklemleri ve momentum formülleri aşağıdaki gibi verilmiştir

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \quad (3.2)$$

Burada p , yoğunluk; u_i ve u_j , sıvının ortalama hız bileşenleridir. P , basınç; S_i , momentum denklemi için kaynak terim; μ , dinamik viskozitedir. k ve ϵ için transport denklemi, RNG k - ϵ türbülans modeli için:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3.4)$$

Burada k , türbülans kinetik enerjisi; ϵ , yayılım oranı; G_k , ortalama hız gradyanlarından ileri gelen türbülans kinetik enerjisi üretimi; G_b , kaldırma kuvvetinden ileri türbülans kinetik enerjisi üretimi; Y_M , dalgali genleştirmenin genel yayılım oranına katkısı; S_ϵ , kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terim ve R_ϵ , ϵ denkleminde bir terimdir. RNG k - ϵ türbülans modeli için model sabitleri $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, ve $C_\mu = 0.09$ 'dur.

Serbest yüzey deformasyonunu çözmek için VOF yöntemi kullanılmıştır. α fazının hacim oranı, hesaplama hücresinde belirlenmiştir. Bu, $\alpha = 0$ için hücrenin sıvıdan yoksun olduğunu ifade etmektedir. $\alpha = 1$ ise hücre sıvıyla doludur. $0 < \alpha < 1$ ise hücre, su ve hava arasındaki arayüzü içerir. Birinci faz hacim oranı aşağıdaki sınırlamaya dayalı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.5)$$

Hacim oranı için iki boyutlu süreklilik denklemi (3.6) Denkleminde belirtilmiştir.

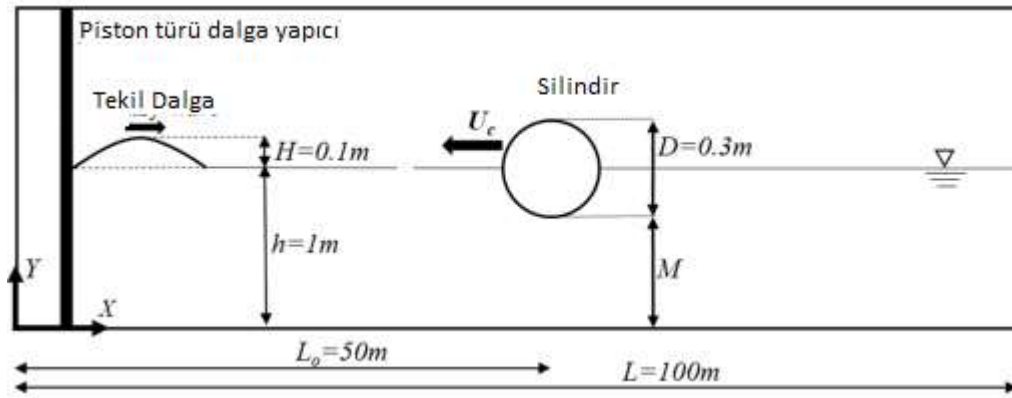
$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} = 0 \quad (3.6)$$

3.2 Sayısal Dalga Tankı (NWT)

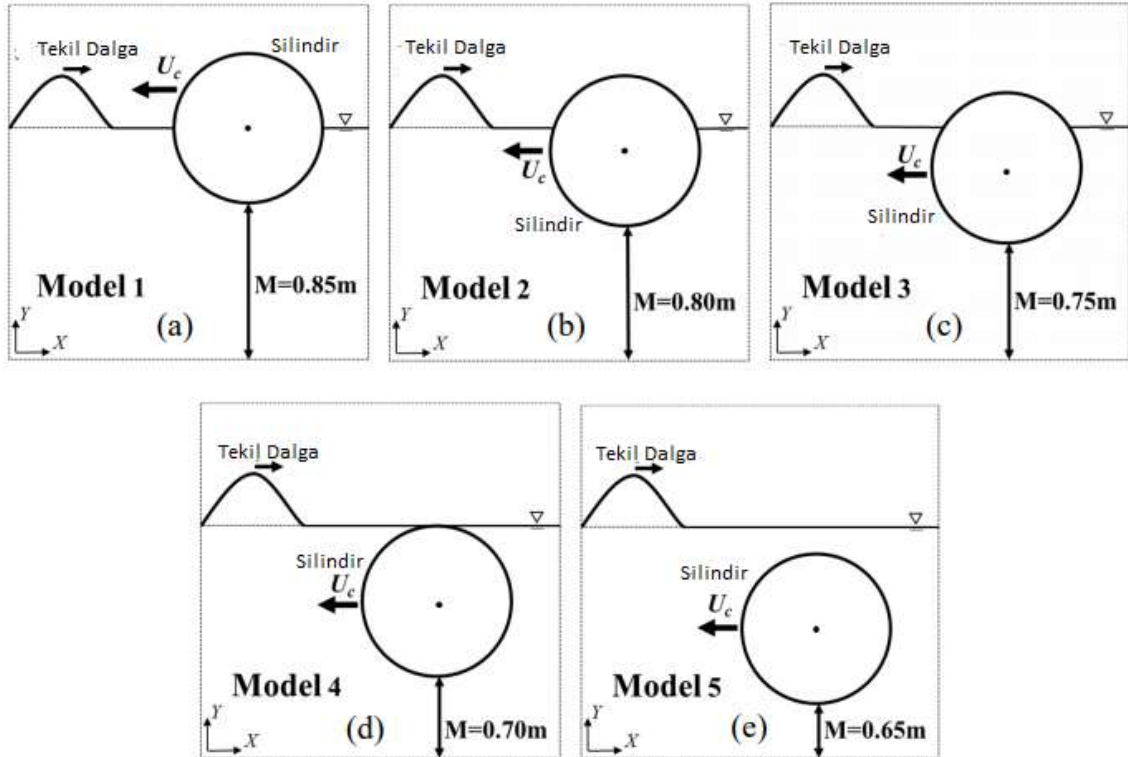
İki boyutlu (2-D) sayısal dalga tankının şematik diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. NWT toplamda 100 m uzunluğunda ve 2m derinliğindedir. Piston türü dalga oluşturunca oluşturulan tekil dalga, sayısal dalga tankının (NWT) sağ tarafında bulunmaktadır. $D = 0.3$ m çapındaki bir silindir, pedaldan yaklaşık 50 m uzaklığa yerleştirilmiştir; silindir, silindirle tankın taban zemini arasındaki beş farklı mesafeyi içermektedir ($M = 0.85$ m, 0.80 m, 0.75 m, 0.70 m ve 0.65 m). Silindir, tankın taban zemininden beş farklı mesafeye sahiptir; bu yüzden beş farklı silindir modeli, $M = 0.85$ m (model 1), $M = 0.80$ m (model 2), $M = 0.75$ m (model 3), $M = 0.70$ m (model 4) ve $M = 0.65$ m (model 5) olarak tanımlanmıştır. Tekil dalganın dalga yüksekliği $H = 0.1$ m, NWT içindeki sabit su derinliği $h = 1$ m'dir. Tankın taban zemininde ve silindir duvarında kaymaz duvar (no-slip wall) özelliği seçilmiştir. Havanın alana girip çıkabilmesi için üst sınır, basınç girişi olarak tanımlanmıştır. Sağ sınır, basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada iki farklı UDF kodu uygulanmıştır. Biri, piston türü dalga oluşturunca hareketi için, diğeri hareketli silindir için kullanılmıştır. Silindir $U_c = 0.1$ m/s ve 0.05 m/s olmak üzere iki farklı sabit yatay hızda hareket edebilmektedir. Tekil dalga ve hareketli silindir, NWT içinde birbirine çarpacak şekilde (farklı yönlerde hareket etmektedirler) silindir negatif x yönünde ve tekil dalga pozitif x yönünde hareket etmektedir. Mevcut çalışma sadece çeşitli koşullarda bir tekil dalga ile bir hareketli silindir arasındaki etkileşimi anlamaya yoğunlaşmıştır. Sonuçları karşılaştırma

amacıyla bir tekil dalga ile bir hareketsiz silindir arasındaki etkileşim de araştırılmıştır. Sabit bir dalga yüksekliğinde ve su derinliğinde toplam 15 örnek durum çalışılmıştır. Başka deyişle, on sayısal simülasyon iki farklı sabit yatay hızda bir tekil dalga ile bir hareketsiz silindir arasındaki etkileşimi içermektedir; diğer beş sayısal simülasyon ise bir tekil dalga ile hareketsiz silindir arasındaki etkileşimi içermektedir

Silindir modellerinin ayrıntıları sırasıyla Şekil 3.2 içinde açıklanmıştır. Bütün sayısal simülasyonların özeti Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Sayısal dalga tankının (NWT) şematik diyagramı



Şekil 3.2 Modellerin ayrıntıları (silindirin yakın plandan görünümü), (a) Model 1, (b) model 2, (c) model 3, (d) model 4, (e) model 5

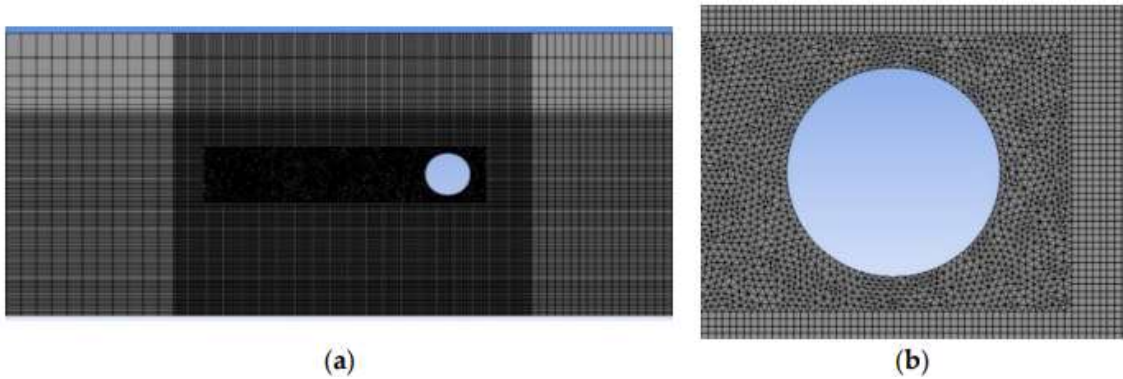
Tablo 3.1 Bu çalışmada yapılan sayısal simülasyonlar

Dalga Yüksekliği $H(m)$	Su Derinliği $h(m)$	Hareketli Silindir $U_c = 0.1 \text{ m/s}$	Hareketli Silindir $U_c = 0.05 \text{ m/s}$	Hareketsiz Silindir $U_c = 0 \text{ m/s}$
0.1	1	Model 1	Model 1	Model 1
0.1	1	Model 2	Model 2	Model 2
0.1	1	Model 3	Model 3	Model 3
0.1	1	Model 4	Model 4	Model 4
0.1	1	Model 5	Model 5	Model 5

3.3 Uzamsal ve Zamansal Ayırıklaştırma

Ağ çözüm alanı için üçgen ve dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Çok bloklu ağ yapılandırma yöntemi kullanılmıştır ve çözüm alanı farklı alt bölgelere ayrılmıştır.

Hareketli silindirin simülasyonu için dinamik ağ kullanıldığından yüksek yoğunluklu ağla silindir etrafına üçgen ağ uygulanmıştır ve hesaplama alanının diğer kısımları için dörtgen ağ kullanılmıştır. Şekil 3.3 içinde gösterildiği gibi, çözüm alanında (hareketli ve hareketsiz) beş farklı model için toplam 130-175 eleman kullanılmıştır.



Şekil 3.3 (a) Çözüm alanının hesaplamalı ağı; (b) silindir yüzeyinin büyütülmüş bir görünümü

İyi bir sayısal yakınsaklık elde etmek üzere Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu kullanılarak asgari zaman adımı hesaplanmıştır. Δt :

$$\frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq C \quad (3.7)$$

ile hesaplanabilir. Burada u , sıvı alanındaki azami karakteristik hız, Δx , asgari hücre boyutu ve C , Courant sayısıdır. VOF modeli için Courant sayısı 0.25 seçilebilir. Bu çalışmada iyi bir sayısal kararlılığa ulaşmak için $\Delta t = 0.005$ s'i seçtik. Bütün simülasyonlar Core İ7-7700 HQ 2.80 GHz CPU, 16 GB RAM özelliklerine sahip, Windows 10 platformlu bir bilgisayarla gerçekleştirilmiştir. Tablo 2, 5000 zaman adımı için modellerin hesaplama zamanını göstermektedir. ($t = 25$ s)

Tablo 3.2 Hesaplama zamanı ve ağ elemanlarının sayısı

Modeller	Hareketsiz Silindir	Hareketli Silindir $U_c = 0.05$ m/s	Hareketli Silindir $U_c = 0.1$ m/s
Model 1	19 saat (129,194 ağ elemanı)	26 saat (151,988 ağ elemanı)	33 saat (172,960 ağ elemanı)
Model 2	19 saat (129,194 ağ elemanı)	26 saat (151,988 ağ elemanı)	33 saat (172,960 ağ elemanı)
Model 3	19 saat (129,194 ağ elemanı)	26 saat (151,988 ağ elemanı)	33 saat (172,960 ağ elemanı)
Model 4	19 saat (129,194 ağ elemanı)	26 saat (151,988 ağ elemanı)	33 saat (172,960 ağ elemanı)
Model 5	19 saat (129,194 ağ elemanı)	26 saat (151,988 ağ elemanı)	33 saat (172,960 ağ elemanı)

3.4 Tekil Dalganın Oluşturulması ve Doğrulanması

Sabit bir su derinliğinde bir dalga pedalının hareketiyle bir tekil dalga oluşturulmuştur. Lin [34,35] içinde bir tekil dalganın oluşturulma performansından bu çalışmada yararlanılmış ve doğrulanması yapılmıştır. Pedal hareketi aşağıdaki gibi verilebilir.

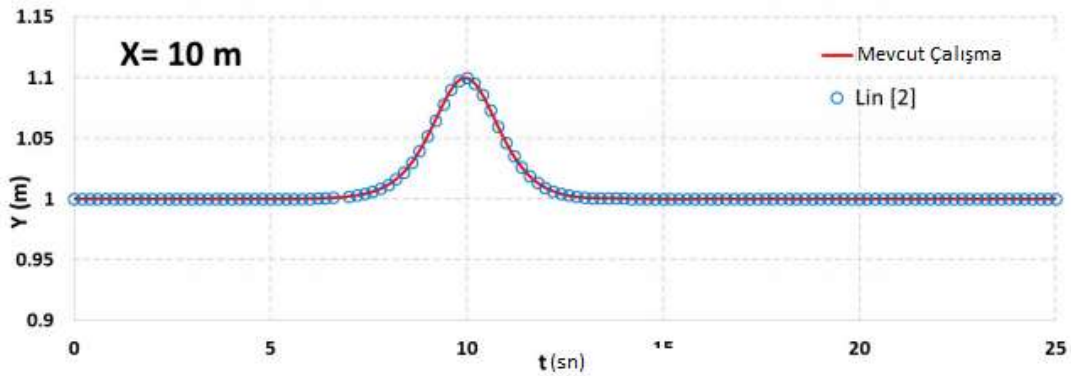
$$u[x(t), t] = \frac{c\eta}{h + \eta} \quad (3.8)$$

Burada w , pedal hızı ve q , aşağıda tanımlandığı gibi serbest yüzey yer değiştirmesidir

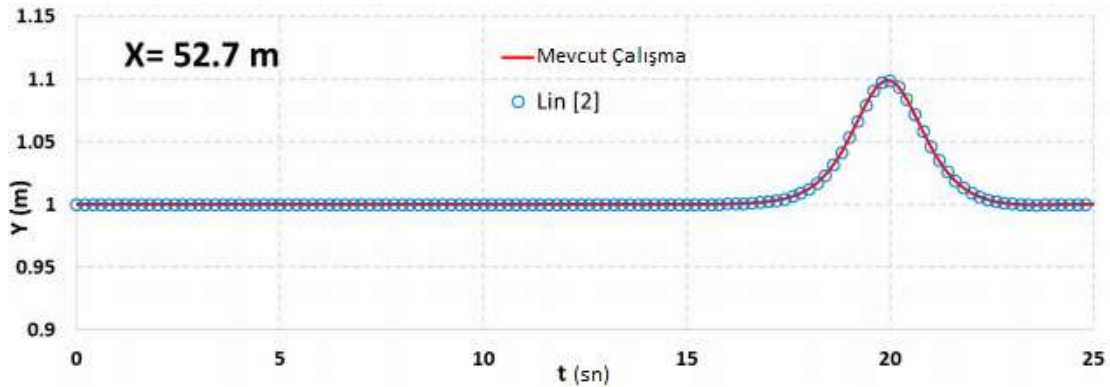
$$\eta[x(t), t] = H \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} [x(t) - ct + x_0] \right\} \quad (3.9)$$

Burada H , dalga yüksekliğidir; h , durgun su derinliğidir; x_0 , $t = 0$ için başlangıç ve dalga tepesi arasındaki mesafedir; $x(t) = \int_0^t u dt$, t zamanındaki pedalın yeridir; $c = \sqrt{g(h + H)}$, dalganın faz hızıdır ve g , yerçekimi ivmesidir.

Yukarıdaki denklemler uyarınca pedal hareketi için bir UDF kullandık ve ağ deformasyonu için dinamik ağ yöntemini uyguladık. Tekil dalga $H = 0.1$ m dalga yüksekliğine ve $h = 1$ m sabit su derinliğine sahiptir. Hesaplama alanı 100 m x 2 m'dir. Sabit bir $\Delta t = 0.02$ s kullanılarak $\Delta x = 0.1$ m ve $\Delta y = 0.01$ m özelliklerinde tekdüzen bir ağ uygulanmıştır. Şekil 3.4 ve 3.5, mevcut çalışma ile Lin [35] arasında çeşitli konumlardaki serbest yüzey yükselmesine ait zaman akışının karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 3.4 Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [35] çalışması (daire) arasında $x = 10.0$ m konumunda serbest yüzey yükselmesine ait zaman akışının karşılaştırması



Şekil 3.5 Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [35] çalışması (daire) arasında $x = 52.7$ m konumunda serbest yüzey yükselmesine ait zaman akışının karşılaştırması

3.5 Bir Hareketli Silindirin Hidrodinamik Kuvvetleri ve Doğrulanması

Bir silindir bir sıvı içinde hareket ettiğinde hidrodinamik kuvvetlere maruz kalabilir (Olçay[28] v.d. Batchelor[32] ve Vasudev[33] v.d.). Silindire etkiyen hidrodinamik kuvvetler aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

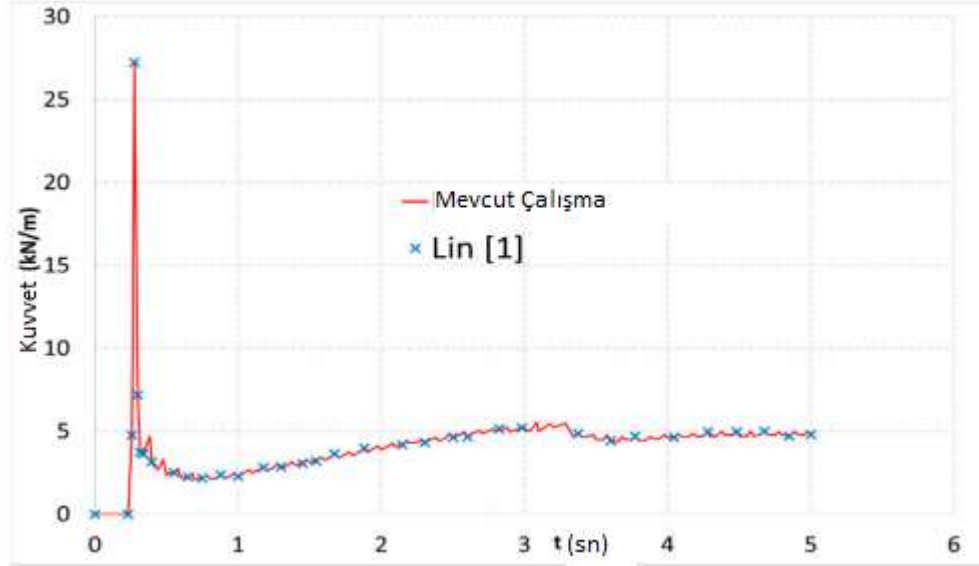
$$F_{Horizontal Force} = F_{D_pressure} + F_{D_viscous} = \oint P \hat{n} \cdot \hat{e}_d dS + \oint \tau_w \hat{t} \cdot \hat{e}_d dS \quad (3.10)$$

$$F_{vertical Forces} = F_{L_pressure} + F_{L_viscous} = \oint P \hat{n} \cdot \hat{e}_l dS + \oint \tau_w \hat{t} \cdot \hat{e}_l dS \quad (3.11)$$

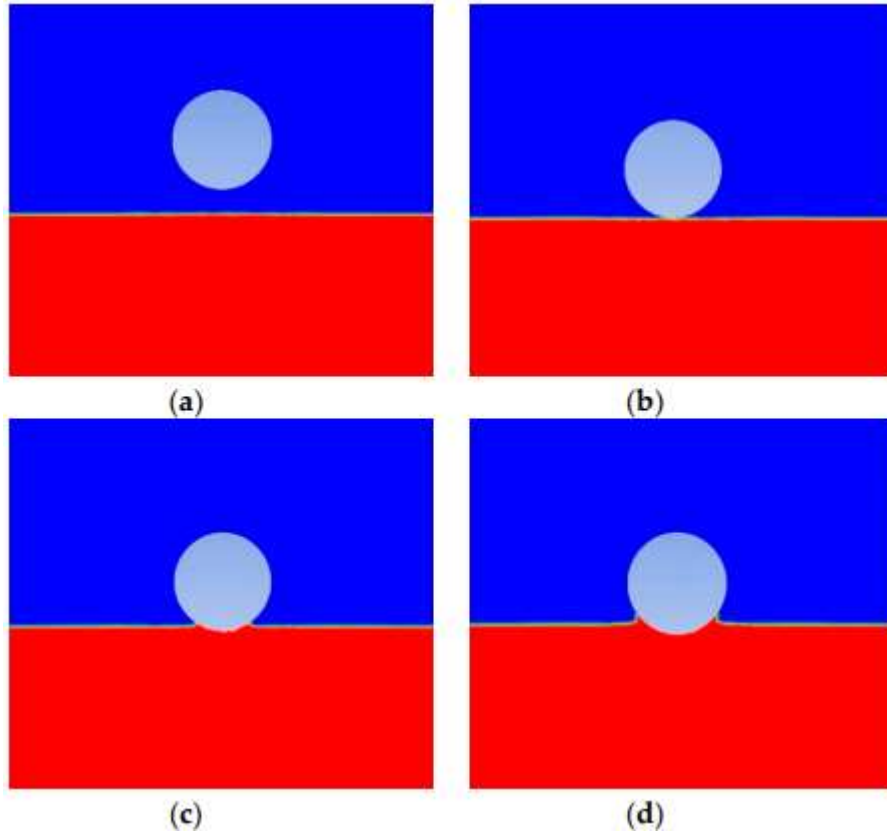
Burada $F_{D_pressure}$ ve $F_{D_viscous}$, sırasıyla basınç ve viskozite etkileri nedeniyle x yönündeki sürüklenme kuvvetleridir. Benzer şekilde, $F_{L_pressure}$ ve $F_{L_viscous}$, sırasıyla basınç ve viskozite etkileri nedeniyle y-yönündeki kaldırma kuvvetleridir. P , silindir üzerindeki basınçtır ve τ_w , silindir yüzeyindeki duvar kayma gerilmesidir.

NWT içinde bir silindiri hareket ettirmek için bir UDF kodu uygulanmıştır. Silindir, yatay ve dikey yönlerde hareket edebilmektedir; silindir çevresinde ağ oluşturmak için dinamik ağ yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal modelin düzeni Lin [34] tarafından kullanılanla aynıdır. Silindirin yarıçap uzunluğu 1 m'dir ($R = 1$ m). Silindir merkezi ile durgun su derinliği arasındaki başlangıç mesafesi 1.25 m'dir. Yerçekimi ivmesi 9.8 m/s^2 dir ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$). Silindir $V = 3.13 \text{ m/s}$ 'lik sabit hızla aşağı doğru hareket etmektedir. Şekil 3.6, silindire etkiyen sıvı kuvvetlerinin zaman akışlarını göstermektedir. Silindir tamamen su içinde olduğu zaman toplam dikey kuvvetin neredeyse sabit olduğu Şekil 3.6'dan görülebilir. Burada, toplam dikey kuvvet, sürüklenme kuvvetini ve kaldırma kuvvetini içermektedir. Silindir dikey doğrultuda hareket ettiğinden ve şekli simetrik olduğundan yatay kuvvet neredeyse sıfırdır. Şekil 3.7, silindir hareket halindeyken serbest yüzey deformasyonunu göstermektedir. Mevcut sayısal modelin sonuçları ile Lin'in sayısal modellerinin sonuçları arasında iyi bir uyum elde edildiği açıkça gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Mevcut çalışma (düz çizgi) ile Lin [34] çalışması (x) arasında silindire etkiyen sıvı kuvvetlerine ait zaman akışlarının karşılaştırması



Şekil 3.7 Hareketli silindirin bir serbest yüzey akışıyla etkileşiminin anlık görüntüleri (a) $t = 0.0$ s, (b) $t = 0.25$ s, (c) $t = 0.375$ s, (d) $t = 0.435$ s

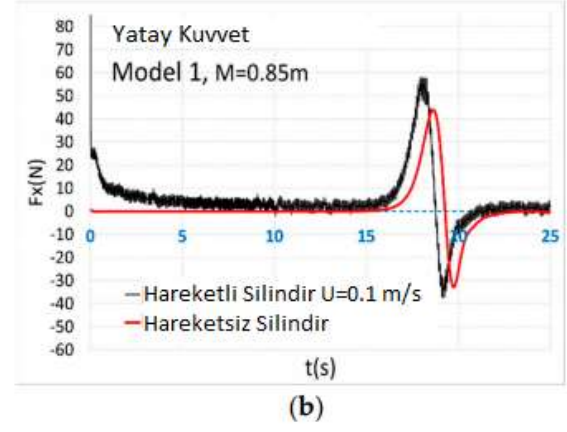
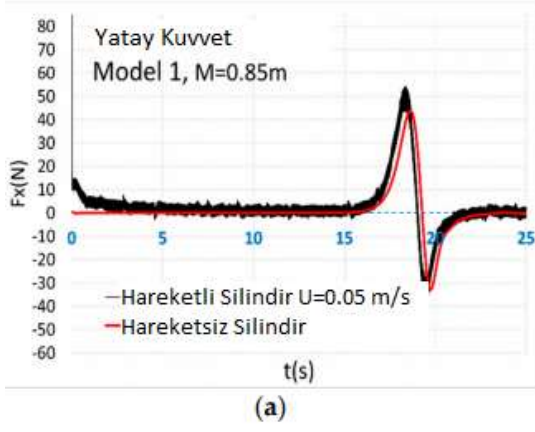
3.6 Hidrodinamik Kuvvetler

Bir tekil dalganın iki farklı hızda bir hareketli silindir üzerine uyguladığı yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetler beş model için de hesaplanabilir. Ayrıca silindir hareketsizken yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetlerin etkisi de incelenmiştir. Hidrodinamik basınç, hidrostatik basınç ve kayma gerilmeleri de dahil olmak üzere, silindir üzerine etki eden yatay ve dikey kuvvetler, basınç ve viskozite etkilerinin yüzey integrasyonundan elde edilmektedir.

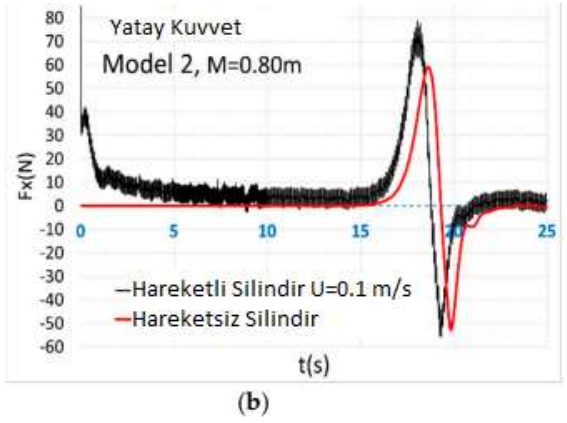
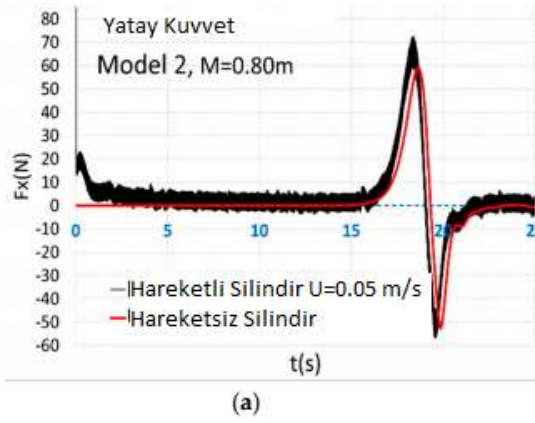
Şekil 3.8 – 3.12'de tüm modeller (model 1, model 2, model 3, model 4 ve model 5) için çeşitli koşullarda yatay kuvvetlere ait zaman akışlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Tüm modeller için iki farklı yatay hızda ($U_c = 0.05$ m/s ve 0.1 m/s) hareket eden hareketli silindirler ile bir hareketsiz silindir arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Bütün simülasyonlarda yatay kuvvetler benzer bir yönetime sahiptir. Tüm modeller için yatay kuvvetin tepe noktaları birbirine benzerdir. Tekil dalganın silindirle etkileşimi esnasında yatay kuvvetlerde iki tepe noktası oluşturulmuştur, bir pozitif tepe noktası ve bir negatif tepe noktası da dahil olmak üzere tepe noktalarının yönleri zıttır. Mevcut çalışmada azami pozitif yatay kuvvet, Pozitif Kuvvettir (PF) ve asgari negatif yatay kuvvet, Negatif Kuvvettir (NF). Tekil dalga silindire ulaştığında tekil dalga enerjisi azalmaktadır. Tekil dalga enerjisinin azalması hareketli silindirin hızına ve silindirle tankın taban zemini arasındaki mesafeye bağlıdır. Her modelde hareketsiz silindire etkiyen yatay kuvvet, hareketli silindire etkiyen yatay kuvvetten her zaman daha küçüktür. Silindir, NWT içinde hareket ederken iki yatay kuvvetin birbiriyle birleştikleri kolayca anlaşılabilir. Biri, tekil dalganın yatay kuvvetleridir ve diğeri, hareketli silindirin yatay kuvvetleridir. Başka deyişle, silindir hareketsizken sadece tekil dalganın yatay kuvveti silindire etki etmektedir. Silindirin su dışında kalan yüksekliği tekil dalganın yüksekliğine eşit olduğundan hareketli ve hareketsiz silindirler için azami yatay kuvvetler model 2'den (Şekil 3.9) elde edilmektedir. Başka deyişle, dalganın silindire etkiyen kısmı dalganın tepesidir, bu yüzden silindir daha fazla dalga enerjisi soğurmaktadır; ayrıca silindir, tekil dalga tepesinin hız sahasına güçlü şekilde engel olabilmektedir. Bundan başka, model 2'deki pozitif kuvvet (PF) ile negatif kuvvet (NF) arasındaki fark diğer modellerdekilerden daha büyüktür. Tamamen serbest yüzey altında olduğu için

asgari yatay kuvvetler model 5'te (Şekil 3.12) meydana gelmiştir. Dalga tepesi hareketli silindiri doğrudan etkilemediğinden silindirin bu koşulda içerdiği dalga enerjisi azdır. Tekil dalga, silindiri geçtiği zaman silindirin önünde basınç gradyanı meydana geldiğinden tüm şekillerde negatif yatay kuvvet gözlenebilir. Tekil dalga, silindiri geçtikten hemen sonra basınç gradyanı kaybolmaz. Su, silindirin arkasındaki negatif basınç bölgesine hareket ederek geri çekilir. Suyun geri çekilmesiyle negatif yönde akış meydana gelir. Negatif akış silindir üzerine etki ettiği zaman negatif yatay kuvvet oluşturulur. Ayrıca, silindir ve tankın taban zemini arasındaki mesafe nedeniyle model 2'deki negatif kuvvetin (NF), model 5'teki negatif kuvvetten (NF) neredeyse üç kat daha büyük olduğu bulunmuştur. Silindir hareket etmeye başlayınca yatay kuvvetlerin daha büyük bir değere sahip oldukları kaydedilmiştir. Bu büyük değer kısa bir süre geçtikten sonra çabucak düşmektedir. Hareketsiz silindirin yatay kuvveti tekil dalgaya etkimesinden önce ve sonra neredeyse sıfırdır. Tekil dalga, silindire ulaştığında hareketsiz silindirin yatay kuvveti artmaktadır. Tekil dalga, silindiri geçtikten sonra hareketsiz silindirin yatay kuvveti dereceli olarak azalmaktadır. Ayrıca yatay kuvvetin, sadece yatay hız tarafından oluşturulan hidrodinamik kuvveti içerdiği görülmüştür. Bundan başka, yatay kuvvetin hareketli silindir üzerindeki etkilerinin, tüm modeller için hareketsiz silindir üzerindeki etkilerinden daha erken meydana geldiği bulunmuştur. Silindir tekil dalgaya doğru hareket etmektedir; öyle ki, tekil dalga ile silindir arasında temas erkenden meydana gelmektedir. Yatay kuvvetlerin pozitif ve negatif tepe noktaları Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Model 2 ve model 3'teki pozitif kuvvetler neredeyse aynıdır ancak model 2'deki negatif kuvvetler, model 3'tekinlerden daha büyüktür. Tablo 3.3, yüzey dalga tepesi silindirin dikey kesitini geçtiğinde yatay kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanlarını göstermektedir. Tablo 3.4, tüm modeller için sabit ve hareketli silindirler üzerine etki eden azami hidrodinamik kuvvetler arasındaki farkın yüzdesini vermektedir.

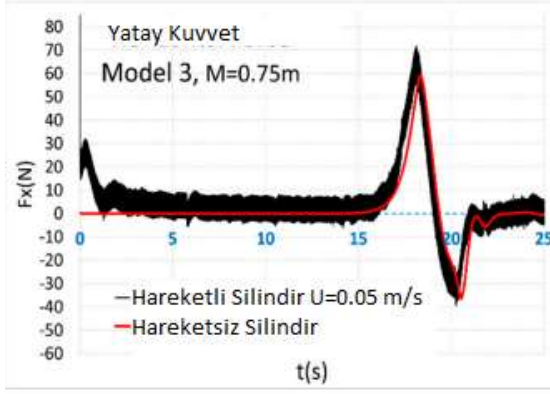
Her modelde $U_c = 0.1$ m/s için hareketsiz ve hareketli silindirler arasındaki farkın yüzdesi, $U_c = 0.05$ m/s için hareketsiz ve hareketli silindirler arasındaki farkın yüzdesinden her zaman daha küçüktür.



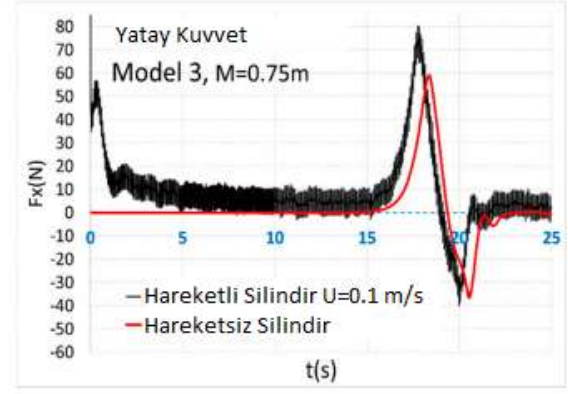
Şekil 3.8 Model 1 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma



Şekil 3.9 Model 2 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma

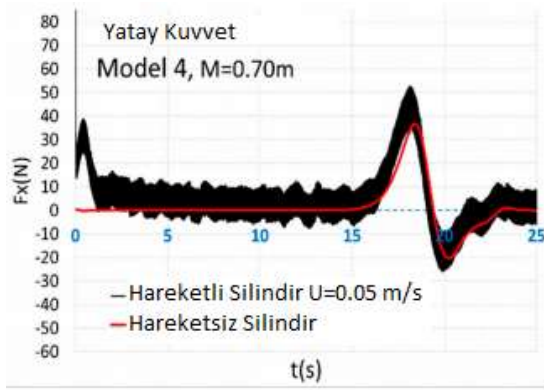


(a)

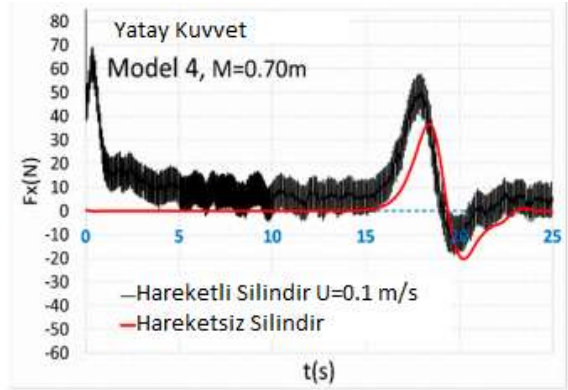


(b)

Şekil 3.10 Model 3 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi (a) $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma (b) $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma

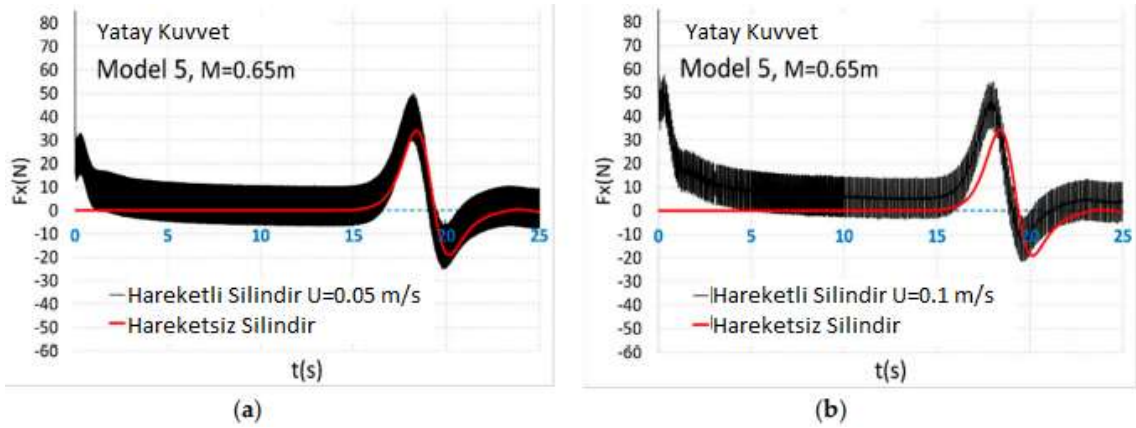


(a)

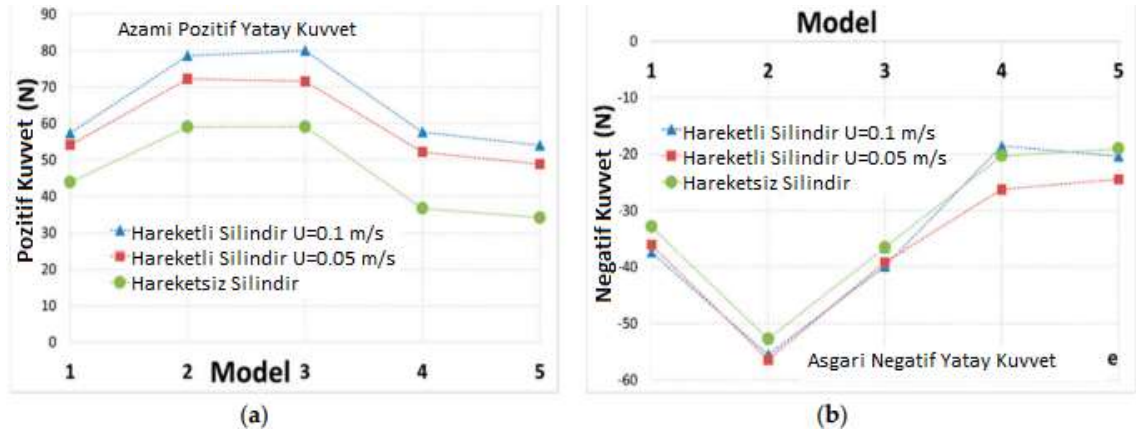


(b)

Şekil 3.11 Model 4 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi (a) $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma (b) $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma



Şekil 3.12 Model 5 için yatay kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında bir karşılaştırma



Şekil 3.13 Tüm modeller için yatay kuvvetlerin pozitif ve negatif tepe noktaları, **(a)** pozitif kuvvet, **(b)** negatif kuvvet

Tablo 3.3 Yatay kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanları

Modeller	Hareketsiz Silindir	Hareketli Silindir $U_c = 0.05$ m/s	Hareketli Silindir $U_c = 0.1$ m/s
Model 1	Zaman = 18.64 sn	Zaman = 18.39 sn	Zaman = 18.11 sn
Model 2	Zaman = 18.60 sn	Zaman = 18.32 sn	Zaman = 18.08 sn
Model 3	Zaman = 18.37 sn	Zaman = 18.03 sn	Zaman = 17.79 sn
Model 4	Zaman = 18.41 sn	Zaman = 18.16 sn	Zaman = 17.92 sn
Model 5	Zaman = 18.31 sn	Zaman = 18.64 sn	Zaman = 17.97 sn

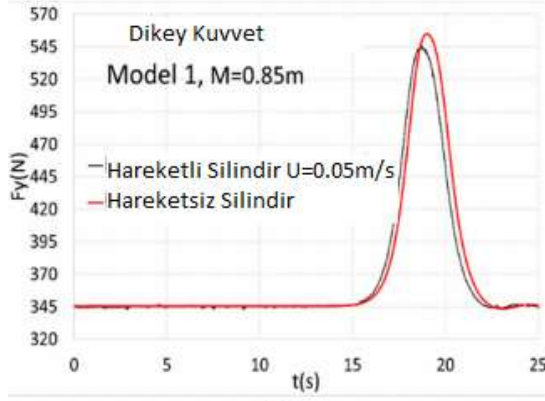
Tablo 3.4 Hareketsiz ve hareketli silindirler arasında azami hidrodinamik kuvvetin yüzdeleri

Modeller	(Hareketli Silindir $U_c = 0,05$ m/s) & (Hareketsiz Silindir)	(Hareketli Silindir $U_c = 0,1$ m/s) & Hareketsiz Silindir
Model 1	%23.49	%18.83
Model 2	%24.85	%18.29
Model 3	%26.09	%17.43
Model 4	%36.37	%29.70
Model 5	%36.71	%30.01

Şekil 3.14 – 3.18, silindire etkiyen dikey kuvvetlere ait zaman akışlarını göstermektedir. Silindirin konumuna bağlı olarak, dikey kuvvetlerin her modelde farklı davranışlar sergiledikleri şekillerden görülebilir. Dikey kuvvet, y-yönünde dikey hidrodinamik kuvveti ve hidrostatik kuvveti içermektedir. Azami dikey kuvvet, silindir ile tankın taban zemini arasındaki mesafeye bağlıdır. Silindir ile tankın taban zemini arasındaki mesafe azaldıkça azami dikey kuvvet artmaktadır. Dikey kuvvet, dalganın geçmesinden önce ve sonra bir hareketli ve hareketsiz silindir için neredeyse sabittir; öyle ki, tekil dalga, silindire ulaştığı zaman dikey kuvvetin büyüklüğü artmaktadır. Silindir yatay yönde hareket ettiği zaman tekil dalga silindire çarpıncaya kadar kaldırma kuvveti sabittir. Tekil dalga silindire ulaştığında tekil dalganın dikey kuvveti ile kaldırma kuvveti birleşmektedir. Silindirin yarısı serbest yüzeyin dışında olduğundan kaldırma kuvveti model 1 (Şekil 3.14) içinde yaklaşık ~ 345 N'dir. Model 1'de kaldırma kuvveti ile tekil dalganın dikey kuvveti birleştikten sonra toplam dikey kuvvet 545 N'ye yükselmektedir. Silindir tamamen su altında bulunduğundan kaldırma kuvveti model 5 için yaklaşık $F_b \approx 690$ N'dir. Model 5'te kaldırma kuvveti ile tekil dalganın dikey kuvveti birleştikten sonra toplam dikey kuvvet 697 N'ye yükselmektedir. Bu, tekil dalganın model 1'deki etkisinin model 5'tekinden büyük olduğunu göstermektedir. Başka deyişle, dalganın silindire etkiyen kısmı dalganın tepesidir, bu yüzden silindir model 1'de daha fazla dalga enerjisi soğurmaktadır Model 5'teki dikey kuvvetler diğer modellerdekilerden büyüktür. Basınç gradyanının hareketli silindirlerdeki etkisi büyük olduğundan hareketsiz silindirin dikey kuvvetinin tüm

modellerde hareketli silindirlerinkinden büyük oldukları görülebilir. Ayrıca, tepe noktası düzenlerinin ve değerlerinin her model için dikey kuvvette farklı oldukları görülmüştür. Tepe nokta değerleri silindir ile tankın taban zemini arasındaki mesafeye bağlıdır. Silindirin su dışında kalan kısmı tekil dalganın yüksekliğinden büyük olduğu için model 1'de tek tepe noktası bulunmaktadır; ayrıca dalga enerjisini azaltmak için model 1, en etkili olanıdır. Model 2'de (Şekil 3.15) dikey kuvvetler tek tepe noktasına sahiptir fakat tepe noktası iki küçük kısma bölünmüştür. Silindirin su dışındaki yüksekliği tekil dalganın yüksekliğine eşit olduğundan tepe noktasında iki küçük kısım meydana getirmektedir. Dikey kuvvetler model 4 (Şekil 3.17) ve model 5'te (Şekil 3.18) üç tepe noktasına sahiptir. Birinci ve ikinci tepe noktası, üçüncü tepe noktasından büyüktür. Başka deyişle, üç tepe noktasının varlığı fiziksel olarak dikey hareketsiz bileşenin etkisine atfedilebilir. Dikey kuvvetin şekli, dikey ivmenin şekline benzemektedir. Dip etkisi zayıftır, kaldırma kuvvetinin bileşenleri neredeyse ihtimal edilebilir seviyelerdedir. Tablo 3.5, yüzey dalga tepesi silindirin dikey kesitini geçtiğinde yatay kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanlarını göstermektedir. Şekil 3.19 – 3.23, silindire dikey yönde etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin zaman akışlarını göstermektedir.

Başka deyişle, değerler, silindire hidrostatik kuvvetler etkimeksizin dikey kuvvetleri temsil etmektedir. Dikey kuvvetin büyük bir kısmı dikey doğrultuda hidrostatik kuvveti içermektedir. Bu çalışmada, genel olarak, dikey kuvvetler ile hidrodinamik kuvvetler benzer bir eğilime sahiptir.

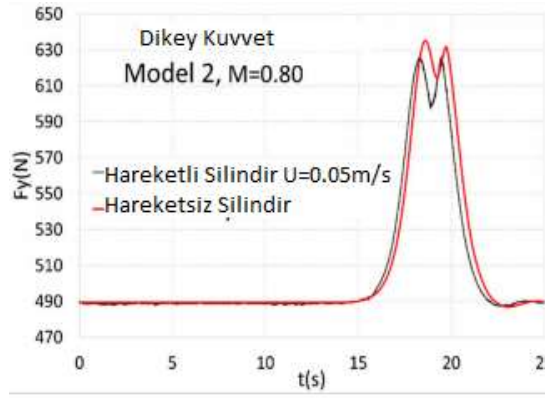


(a)

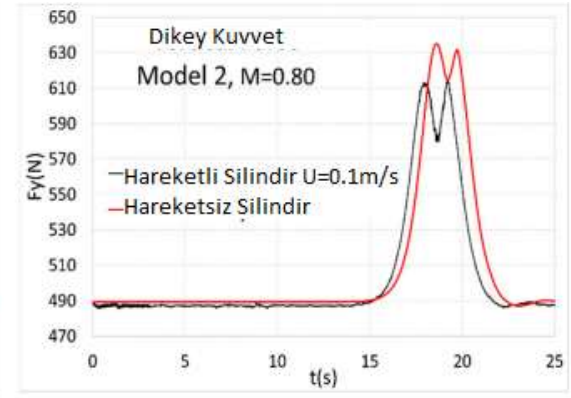


(b)

Şekil 3.14 Model 1 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

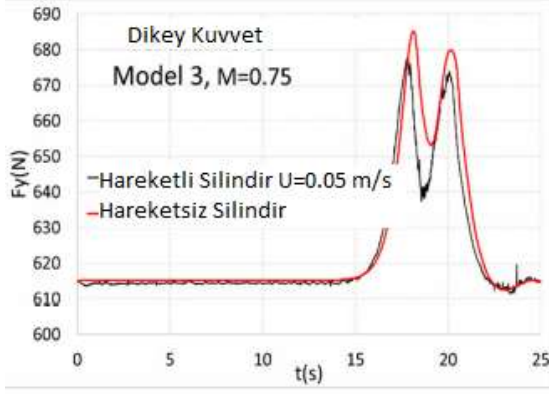


(a)

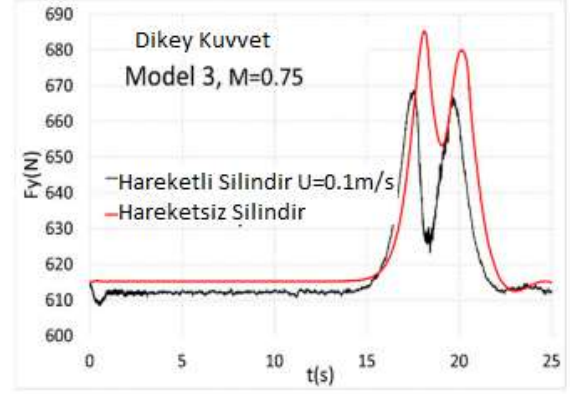


(b)

Şekil 3.15 Model 2 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma



(a)



(b)

Şekil 3.16 Model 3 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

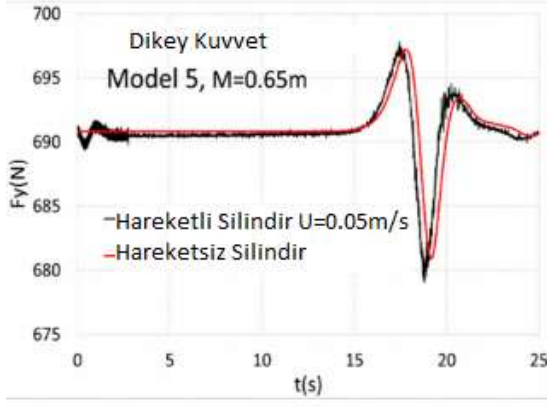


(a)

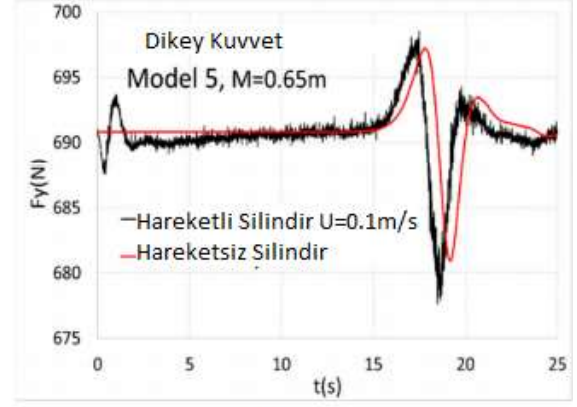


(b)

Şekil 3.17 Model 4 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma



(a)

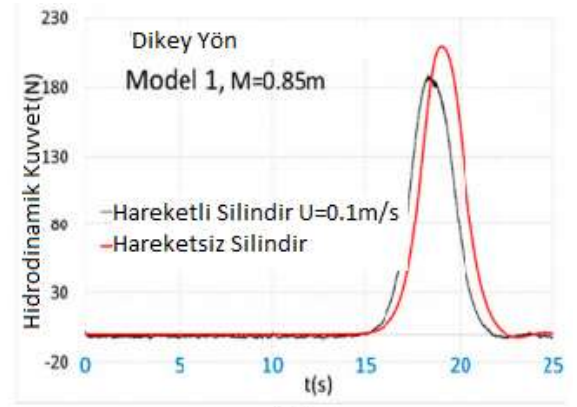


(b)

Şekil 3.18 Model 5 için dikey kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

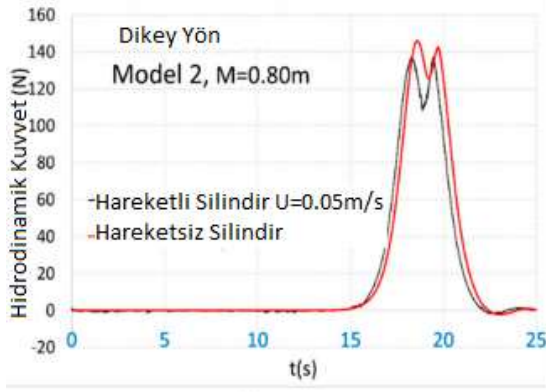


(a)

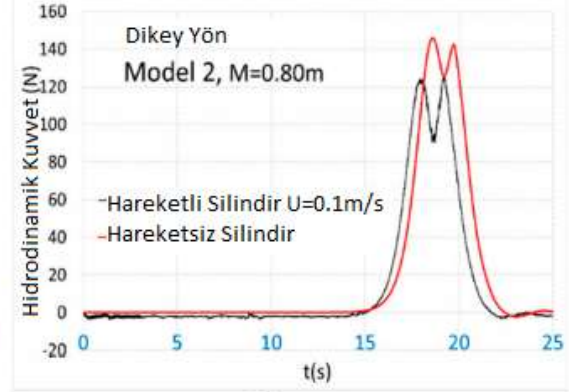


(b)

Şekil 3.19 Model 1 için hidrokinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

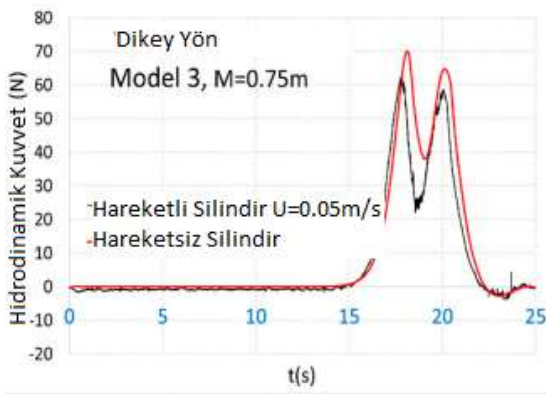


(a)

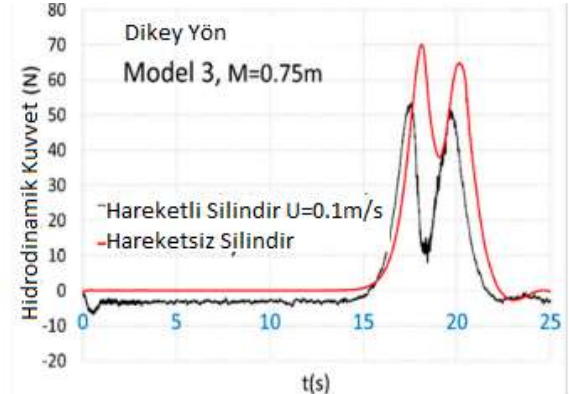


(b)

Şekil 3.20 Model 2 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

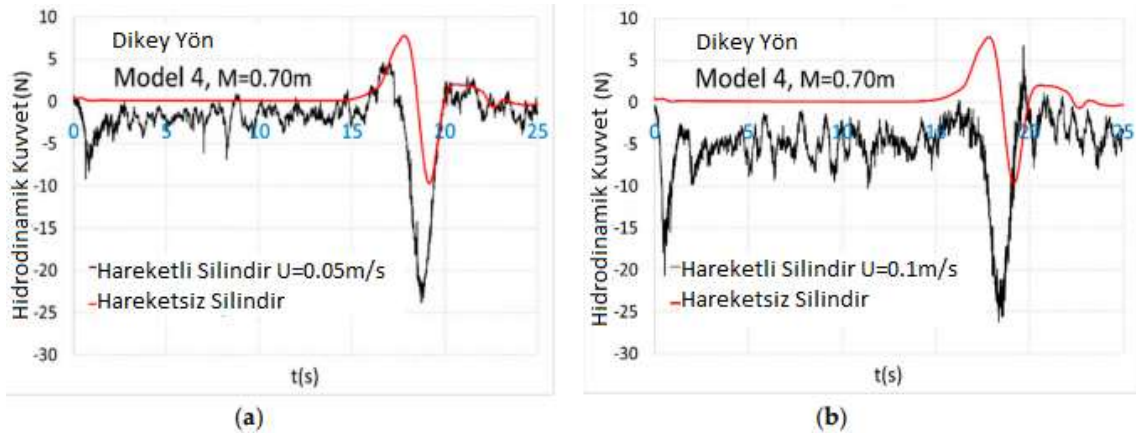


(a)

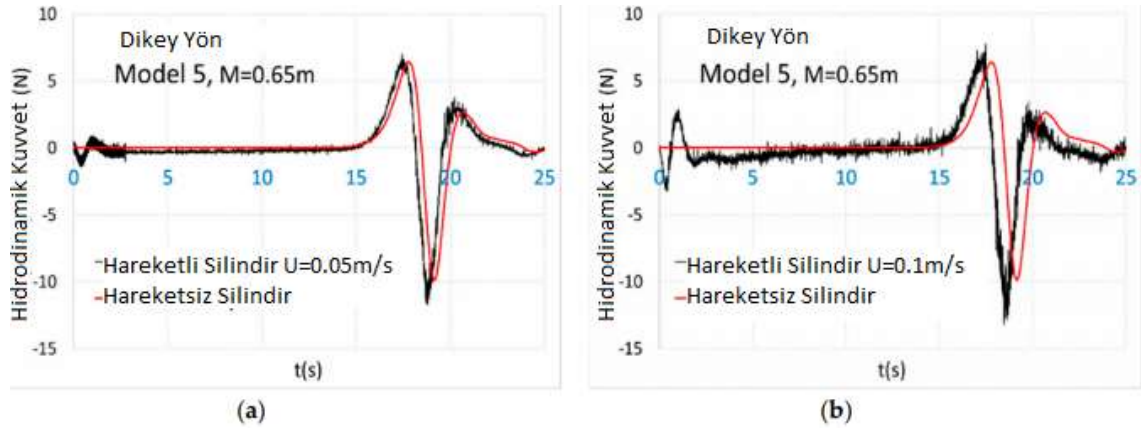


(b)

Şekil 3.21 Model 3 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma



Şekil 3.22 Model 4 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma



Şekil 3.23 Model 5 için hidrodinamik kuvvetlerin zamana göre değişimi **(a)** $U_c = 0.05$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma **(b)** $U_c = 0.1$ m/s iken hareketsiz silindir (kırmızı çizgi) ve hareketli silindir arasında karşılaştırma

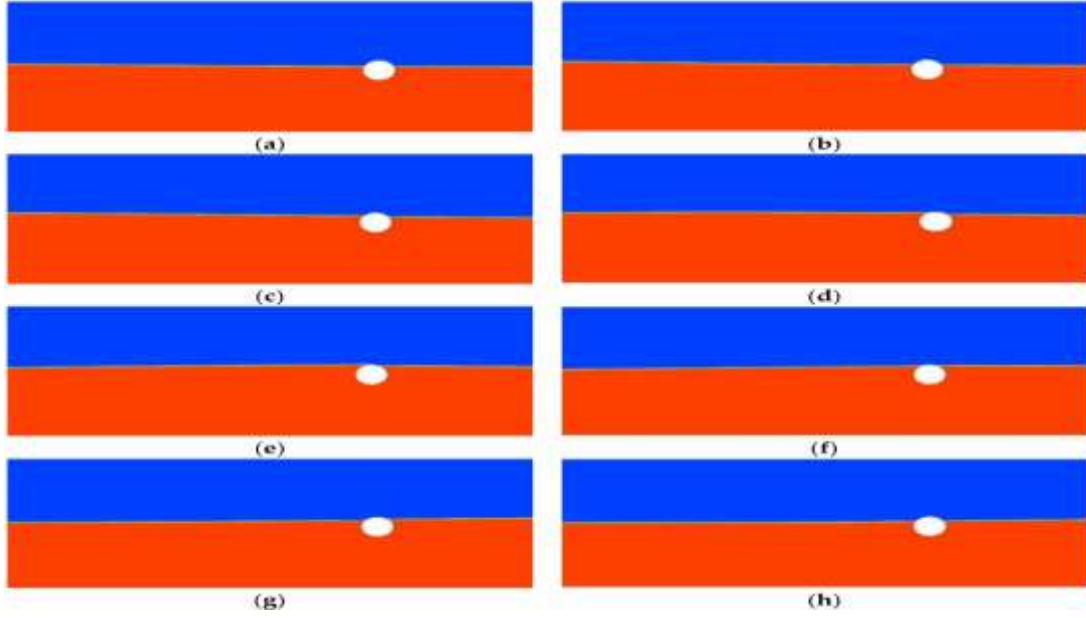
Tablo 3.5 Dikey kuvvetlere ait tepe noktalarının meydana gelme zamanları

Modeller	Hareketsiz Silindir	Hareketli Silindir $U_c = 0.05$ m/s	Hareketli Silindir $U_c = 0.1$ m/s
Model 1	Zaman = 19.00 sn	Zaman = 18.59 sn	Zaman = 18.38 sn
Model 2	Zaman = 18.59 sn	Zaman = 18.27 sn	Zaman = 18.08 sn
Model 3	Zaman = 18.13 sn	Zaman = 17.83 sn	Zaman = 17.49 sn
Model 4	Zaman = 17.86 sn	Zaman = 17.04 sn	Zaman = 16.76 sn
Model 5	Zaman = 17.79 sn	Zaman = 17.51 sn	Zaman = 17.18 sn

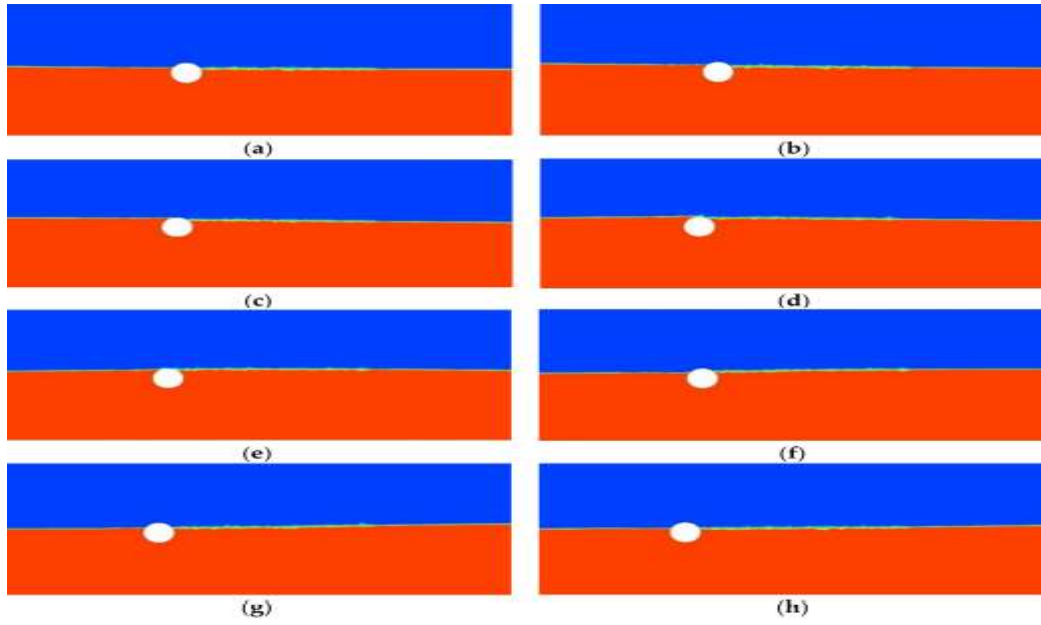
3.7 Serbest Yüzeyin Deformasyonu

Bir tekil dalganın hareketli bir silindir ve hareketsiz bir silindirle etkileşiminin değerlendirmesi Şekil 3.24 – 3.27'de gösterilmiştir. Kırmızı renk su fazını, mavi renk hava fazını belirtmektedir. Şekil 3.24, silindir çeşitli zaman noktalarında hareketsizken (hareketsiz silindir) model 2 için silindir-dalga etkileşiminin anlık görüntülerini sunmaktadır. Şekil 3.24 a-c, tekil dalganın silindire ulaştığı ve tekil dalga ile silindir arasında etkileşimin başladığı zamandaki tekil dalgayı göstermektedir. Ana dalga tepesi iki parçaya ayrılmaktadır. Akışın bir parçası akış yönünün tersinde geri dönerken (geri akış) diğer kısmı akış yönünde hareket etmektedir (ileri akış). Geri akışın yüksekliği artmaktadır ve silindire sürekli şekilde etki etmektedir (Şekil 3.24 d,e), ardından geri akışın yüksekliği azalmaktadır ve ileri akış, silindirle etkileşmektedir (Şekil 3.24 f,g). İki kısım $t = 20.5$ s anında benzer yüksekliğe sahiptir (Şekil 3.24 h). Şekil 25, silindir tekil dalgaya doğru hareket ederken (hareketli silindir $U_c = 0.1$ m/s) model 2 için silindir-dalga etkileşiminin anlık görüntülerini göstermektedir. Hareketli silindir ile hareketsiz silindir benzer bir eğilime sahiptir. Hareketli silindir dalgaya doğru hareket ettiğinden tekil dalgaya, hareketsiz silindirden önce dokunur.

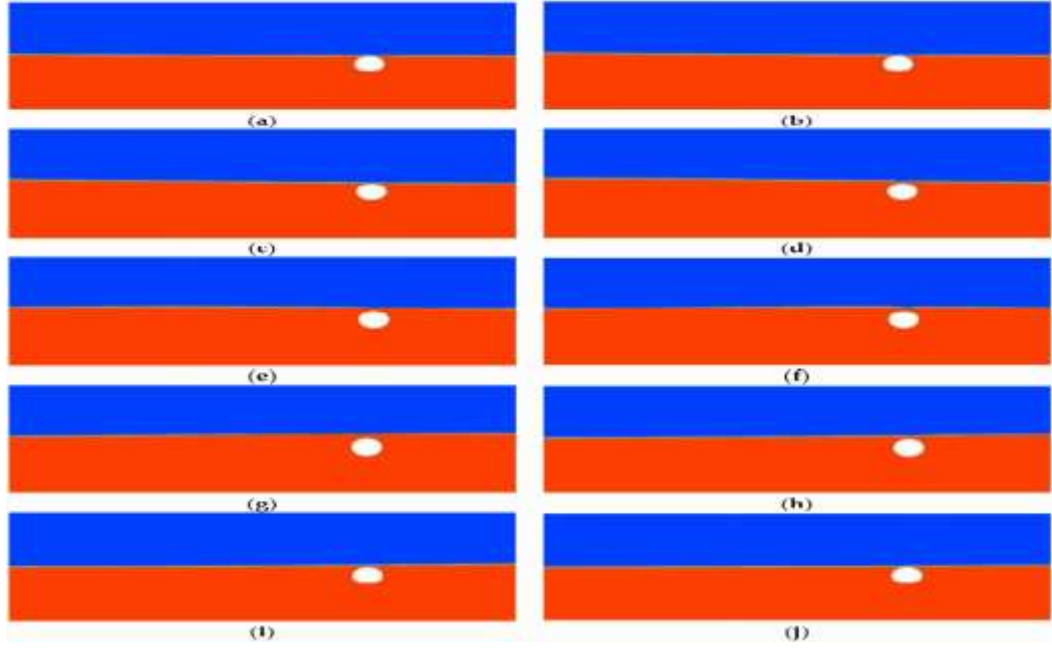
Şekil 3.26, silindir çeşitli zaman noktalarında hareketsizken (hareketsiz silindir) model 4 için silindir-dalga etkileşiminin anlık görüntülerini göstermektedir. Dalga tepesi ayrılmamaktadır fakat tekil dalganın küçük bir deformasyona sahip olduğu görülebilir. Şekil 3.27, silindir tekil dalgaya doğru hareket ederken (hareketli silindir $U_c = 0.1$ m/s) model 4 için silindir-dalga etkileşiminin anlık görüntülerini sunmaktadır. Hareketli silindir ile hareketsiz silindir benzer davranışlar sergilemektedir fakat hareketli silindir, tekil dalgaya hareketsiz silindirden önce ulaşmaktadır; ayrıca hareketli silindirdeki dalga tepesinin deformasyonu hareketsiz silindirinkinden büyüktür. Sonuçlar bir hareketli silindirle etkileşen bir tekil dalganın değerlendirmesini ve hareketsiz bir silindirin benzer davranışlar sergilediğini göstermektedir. Hareketli silindir dalgaya doğru hareket ettiğinden tekil dalga ve hareketli silindir, hareketsiz silindirden önce birbirine ulaşırlar. Ayrıca, bir hareketli silindirle etkileşen tekil dalganın deformasyonu bir hareketsiz silindirle etkileşen tekil dalganıinkinden büyüktür.



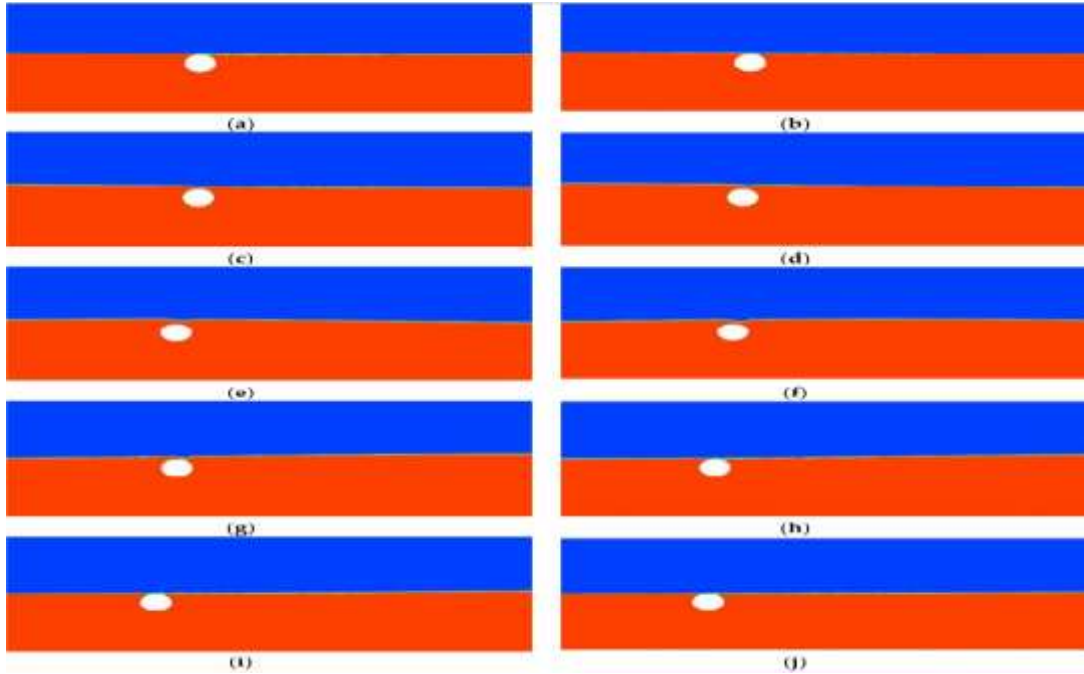
Şekil 3.24 Model 2 için hareketli silindirle etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü; **(a)** $t = 17$ s, **(b)** $t = 17.5$ s, **(c)** $t = 18$ s, **(d)** $t = 18.5$ s, **(e)** $t = 19$ s, **(f)** $t = 19.5$ s, **(g)** $t = 20$ s, **(h)** $t = 20.5$ s



Şekil 3.25 Model 2 için hareketli silindirle $U_c = 0.1$ m/s etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü **(a)** $t = 17$ s, **(b)** $t = 17.5$ s, **(c)** $t = 18$ s, **(d)** $t = 18.5$ s, **(e)** $t = 19$ s, **(f)** $t = 19.5$ s, **(g)** $t = 20$ s, **(h)** $t = 20.5$ s



Şekil 3.26 Model 4 için hareketsiz silindirle etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü **(a)** $t = 16.5$ s, **(b)** $t = 17$ s, **(c)** $t = 17.5$ s, **(d)** $t = 18$ s, **(e)** $t = 18.5$ s, **(f)** $t = 19$ s, **(g)** $t = 19.5$ s, **(h)** $t = 20$ s, **(i)** $t = 20.5$ s, **(j)** $t = 21$ s



Şekil 3.27 Model 4 için hareketli silindirle $U_c = 0.1$ m/s etkileşen bir tekil dalgayı değerlendirme sürecinin anlık görüntüsü **(a)** $t = 16.5$ s, **(b)** $t = 17$ s, **(c)** $t = 17.5$ s, **(d)** $t = 18$ s, **(e)** $t = 18.5$ s, **(f)** $t = 19$ s, **(g)** $t = 19.5$ s, **(h)** $t = 20$ s, **(i)** $t = 20.5$ s, **(j)** $t = 21$ s

Birinci çalışmada, 0.25 m/s'lik giriş hızında esnek T kirişinin deformasyonu incelenmiştir. Üç boyutlu bir esnek T kirişi yüksek hızlı kamera sistemiyle (HSC) ölçümler yapılmak üzere bir kapalı devre su kanalına yerleştirilmiştir. Üç boyutlu bir esnek T kirişinin sonuçları 0.25 m/s'lik giriş hızı için HSC ölçüm sonuçlarıyla iyi örtüşmüştür. Daha sonra esnek bir kiriş için ilave iki giriş hızı gözlenmiştir; bu hızlar, esnek T kirişi için incelenmiştir. Sıvı ve katı kısımları çözmek için iki yönlü bir FSI coupling yöntemi kullanılmıştır. Izgara için dinamik ağ yöntemi kullanılmıştır ve ağ, sıvı ve katı taraflarda her adımda güncellenmiştir. Esnek T kirişinin deformasyonu, azami gerilmesi ve asgari gerilmesi hesaplanmıştır; ayrıca esnek T kirişinin çevresindeki akışın hız dağılımı ile basınç dağılımı sayısal modelde çeşitli hızlarda hesaplanmıştır. Sonuçlar, esnek kirişteki deformasyonun ve gerilmenin, hız artışıyla beraber arttığını ortaya koymuştur. Bundan başka, esnek T kirişinin ön yüzeyinde büyük bir basınç bölgesinin oluştuğu ve esnek T kirişinin üstünde akışın ayrıldığı gözlenmiştir

Düşük hızla karşılaştırıldığında yüksek hızın daha büyük sürüklenme kuvvetine yol açtığı, büyük sürüklenme kuvvetinin de esnek T kirişinde büyük bir deformasyona ve yüksek gerilmeye yol açtığı sonucuna varılmıştır. Bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal yöntemlerin sonuçları mevcut çalışmada karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada deneysel ve sayısal yöntemler arasındaki azami deformasyon için yüzde yanılğı yaklaşık %4-%5'tir. Çalışma ayrıca system coupling yönteminin sıvı-yapı etkileşim uygulamalarında kullanılabileceğini, iki yönlü bir FSI coupling yönteminin verimliliğinin yüksek olduğunu, bu nedenle bu yöntemin makine, inşaat ve deniz mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

İkinci çalışmada, bir tekil dalga ile bir silindir arasındaki etkileşim farklı silindir hızlarında ve silindir ile tankın taban zemini arasındaki farklı mesafelerde hesaplamaya dayalı olarak araştırılmıştır. Tekil dalganın bir silindir üzerine uyguladığı yatay ve dikey hidrodinamik kuvvetler çeşitli koşullar için

hesaplanmıştır. Bir tekil dalga bir hareketli silindirle çarpıştığında yatay ve dikey kuvvetler artmaktadır. Bundan başka, bir tekil dalganın bir hareketli silindirle etkileşiminin yatay kuvvetleri, bir tekil dalganın bir hareketsiz silindirle etkileşiminin yatay kuvvetlerinden büyüktür. Yatay ve dikey kuvvetler hareketli silindirin hızına ve silindirle tankın taban zemini arasındaki mesafeye sıkıca bağlıdır. Hidrostatik kuvvet arttığı için silindir ile tankın taban zemini arasındaki mesafe azaldıkça dikey kuvvet artmaktadır. Sonuçlar model 2'deki yatay kuvvetin diğer modellerdekilerden büyük olduğunu ve model 5'teki dikey kuvvetin diğer modellerdekilerden büyük olduğunu göstermektedir. Silindir ile tankın taban zemini arasındaki mesafe arttıkça tekil dalganın deformasyonu artmaktadır. Serbest yüzeyi elde etmek üzere RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle birlikte sıvı hacmi (VOF) yöntemi kullanılmıştır.

Bir tekil dalga ile bir hareketli silindir arasındaki etkileşimi simüle etme becerisine sahip NWT yöntemiyle dalga-yapı etkileşiminin doğru şekilde modellenebileceği mevcut sayısal çalışmada ortaya çıkmıştır. Sayısal sonuçlar hareketli silindirin hızı ile silindirle tankın taban zemini arasındaki mesafenin, yüzey yer değiştirmesini ve hidrodinamik kuvvetleri önemli ölçüde etkilediklerini göstermektedir.

- [1] Chimakurthi, S.K.; Reuss, S.; Tooley, M.; Scampoli, S. ANSYS workbench system coupling: A state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Eng. Comput.* 2017, .34, 385-411.
- [2] Gluck, M.; Breuer, M.; Durst, F.; Halfmann, A.; Rank, E. Computation of fluid-structure interaction on lightweight structures. *J. Wind Eng. Ind. Aerodt/n.* 2001, 89,1351-1368.
- [3] Dhavalikar, S.; Awasare, S.; Joga, R.; Kar, A.R. Whipping response analysis by one way fluid structure interaction—A case study. *Ocean Eng.* 2015,103,10-20.
- [4] Narayanan, K.V.; Vengadesan, S.; Murali, K. Wall proximity effects on the flow past cylinder with flexible filaments. *Ocean Eng.* 2018,157, 54—61.
- [5] Hassani, M.; Mureithi, N.W.; Gosselin, F.P. Large coupled bending and torsional deformation of an elastic rod subjected to fluid flow. *J. Fluids Struct.* 2016, 62, 367-383.
- [6] Juan, J.S.; Carrillo, G.V.; Tinoco, R.O. Experimental observations of 3D flow alterations by vegetation under oscillatory flows. *Environ. Fluid Meeh.* 2019,19,1497-1525.
- [7] Mantecon, J.G.; Neto, M.M. Numerical methodology for fluid-structure interaction analysis of nuclear fuel plates under axial flow conditions. *Nucl. Eng. Des.* 2018, 333, 76-86.
- [8] Ghelardi, S.; Freda, A.; Rizzo, C.M.; Villa, D. A fluid structure interaction case study on a square sail in a wind tunnel. *Ocean Eng.* 2018,163,136-147.
- [9] Liu, Z.G.; Liu, Y.; Lu, J. Fluid-structure interaction of single cylinder in axial flow. *Comput. Fluids* 2012, 56, 143-151.
- [10] Xu, L.; Tian, F.-B.; Young, J.; Lai, J.C.S. A novel geometry-adaptive Cartesian grid based immersed boundary-lattice Boltzmann method for fluid-structure interactions at moderate and high Reynolds numbers. *J. Comput. Phys.* 2018, 375, 22-56.
- [11] Wang, C.; Sun, M.; Shankar, S.; Xing, S.; Zhang, L. CFD Simulation of Vortex Induced Vibration for FRP composite riser with different modeling methods. *Appl. Sei.* 2018, 8, 684.
- [12] Dong, D.; Chen, W.; Shi, S. Coupling motion and energy harvesting of two side-by-side flexible plates in a 3D uniform flow. *Appl. Sei.* 2016, 6,141.
- [13] Wang, L.; Currao, G.M.D.; Han, F.; Neely, A.J.; Young, J.; Tian, F.B. An immersed boundary method for fluid-structure interaction with compressible multiphase flows. *J. Comput. Phys.* 2017, 346, 131-151. [1]

- [14] Turek, S.; Hron, J. Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow. *Fluid Struct. Interact.* 2006, 53, 371-385.
- [15] Wang, H.; Zhai, Q.; Zhang, J. Numerical study of flow-induced vibration of a flexible plate behind a circular cylinder. *Ocean Eng.* 2018, 163, 419-430.
- [16] Zheng, X.; Xue, Q.; Mittal, R.; Beilamowicz, S. A coupled sharp-interface immersed boundary-finite-element method for flow-structure interaction with application to human phonation. *J. Biomech. Eng.* 2010, 132.
- [17] Wang, M.; Avital, E. J.; Bai, X.; Ji, C.; Xu, D.; Williams, J. J.; Munjiza, A. Fluid-structure interaction of flexible submerged vegetation stems and kinetic turbine blades. *Comput. Part. Meeh.* 2019.
- [18] Mittal, R.; Dong, H.; Bozkurttas, M.; Najjar, F.M.; Vargas, A.; Von Eoebbecke, A. A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries. *J. Comput. Phys.* 2008, 227, 4825-4852.
- [19] Nestola, M.G.C.; Becsek, B.; Zolfaghari, H.; Zulian, P.; Marinis, D.D.; Krause, R.; Obrist, D. An immersed boundary method for fluid-structure interaction based on variational transfer. *J. Comput. Phys.* 2019, 398, 108884.
- [20] Peskin, C.S. The immersed boundary method. *Acta Numer.* 2002, 11, 479-517.
- [21] Hron, J.; Turek, J. A monolithic FEM/multigrid solver for an AEE formulation of fluid-structure interaction with applications in biomechanics. *Fluid Struct. Interact.* 2006, 146-170.
- [22] Griffith, B.E.; Euo, X. Hybrid finite difference/finite element immersed boundary method. *Int. J. Numer. Methods Biomed. Eng.* 2017, 33.
- [23] Nassiri, A.; Chini, G.; Vivek, A.; Daehn, G.; Kinsey, B. Arbitrary Eagrangian-Eulerian finite element simulation and experimental investigation of wavy interfacial morphology during high velocity impact welding. *Mater. Des.* 2015, 88, 345-358.
- [24] Tabatabaei-Malazi, M.; Okbaz, A.; Olcay, A.B. Numerical investigation of a longfin inshore squid's flow characteristics. *Ocean Eng.* 2015, 108, 462-470.
- [25] Olcay, A.B.; Tabatabaei-Malazi, M.; Okbaz, A.; Heperkan, H.A.; Firat, E.; Ozbolat, V.; Gökçen, M.G.; Sahin, B. Experimental and numerical investigation of a longfin inshore squid's flow characteristics. *J. Appl. Fluid Meeh.* 2017, 10, 21-30.
- [26] Eren, E.T.; Tabatabaei-Malazi, M.; Temir, G. Numerical investigation on the collision between a solitary wave and a moving cylinder. *Water* 2020, 12, 2167.
- [27] Howse, J. *OpenCV Computer Vision with Python*; Packt Publishing Ltd.:

Birmingham, UK, 2013.

- [28] Olcay, A.B.; Tabatabaei-Malazi, M. The effects of a longfin inshore squid's fins on propulsive efficiency during underwater swimming. *Ocean Eng.* 2016,128,173-182.
- [29] ANSYS Fluent Theory Guide; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2016; pp. 39-136.
- [30] Bathe, K.J. *Finite Element Procedures*; Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
- [31] Chung, J.; Hulbert, G.M. A time integration algorithm for structure dynamic with improved numerical dissipation: The generalized- α method. *J. Appl. Mech.* 1993, 60, 371.
- [32] Batchelor, G.K. *An Introduction to Fluid Dynamics*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000.
- [33] Vasudev, K.L.; Sharma, R.; Bhattacharyya, S.K. A multi-objective optimization design framework integrated with CFD for the design of AUVs. *Methods Oceanogr.* 2014,10,138-165.
- [34] Lin, P. A fixed-grid model for simulation of a moving body in free surface flows. *Comput. Fluids* 2007, 36, 549-561.
- [35] Lin, P. A multiple-layer r-coordinate model for simulation. *Comput. Fluids* 2006, 35,147-167.
- [36] Wu, N.J.; Hsiao, S.H.; Chen, H.H.; Yang, R.Y. The study on solitary waves generated by a piston-type wave maker. *Ocean Eng.* 2016,117,114-129.
- [37] Wu, N.J.; Tsay, T.K.; Chen, Y.Y. Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker. *Wave Motion* 2014, 51, 240-255.
- [38] Luo, M.; Reeve, D.E.; Shao, S.; Karunarathna, H.; Lin, P. Consistent Particle Method simulation of solitary wave impinging on and overtopping a seawall. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2019,103,160-171.
- [39] Wu, Y.T.; Hsiao, S.C.; Huang, Z.C.; Hwang, K.S. Propagation of solitary waves over a bottom-mounted barrier. *Coast. Eng.* 2012, 62, 31-47.
- [40] Liu, W.; Shao, K.; Ning, Y. A Study of the Maximum Momentum Flux in the Solitary Wave Run-Up Zone over Back-Reef Slopes Based on a Boussinesq Model. *Mar. Sei. Eng.* 2019, 7,109.
- [41] Ren, Y; Luo, M.; Lin, P. Consistent Particle Method Simulation of Solitary Wave Interaction with a Submerged Breakwater. *Water* 2019,11, 261.
- [42] You, R.; He, G.; Wang, J.; Liu, P. CIP-based analysis on strongly nonlinear interaction between solitary waves and submerged flat plate. *Ocean Eng.* 2019,176, 211-221.
- [43] Seiffert, B.; Hayatdavoodi, M.; Ertekin, R.C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: Flat Plate. *Coast. Eng.* 2014, 88,194-209.

- [44] Lo, H.Y.; Liu, P.L.F. Solitary Waves Incident on a Submerged Horizontal Plate. / *Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 2014,140, 3.
- [45] Chang, C.H.; Wang, K.H.; Lin, C.; Jaf, J.M. Vortex transportation and wave deformation after the interaction of a solitary wave with an inclined bottom mounted plate. *Appl. Ocean Res.* 2018, 78, 241-253.
- [46] Hayatdavoodi, M.; Seiffert, B.; Ertekin, R.C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part II: Deck with girders. *Coast. Eng.* 2014, 88, 210-228.
- [47] Xuo, G.; Cai, C.; Deng, L. Numerical prediction of solitary wave forces on a typical coastal bridge deck with girders. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2016,1-20.
- [48] Moideen, R.; Behera, M.R.; Kamath, A.; Bihs, H. Effect of Girder Spacing and Depth on the Solitary Wave Impact on Coastal Bridge Deck for Different Airgaps. *J. Mar. Sei. Eng.* 2019, 7,140.
- [49] Tian, X.; Wang, Q.; Liu, G.; Deng, W.; Gao, Z. Numerical and Experimental Studies on a Three-Dimensional Numerical Wave Tank. *IEEE Access* 2018, 6, 6585-6593.
- [50] Loh, T.T.; Pizer, D.; Simmonds, D.; Kyte, A.; Greaves, D. Simulation and analysis of wave-structure interactions for a semi-immersed horizontal cylinder. *Ocean Eng.* 2018,147, 676-689.
- [51] Hu, X.; Jiang, Y; Cai, D. Numerical Modeling and Simulation of Wave Impact of a Circular Cylinder during the Submergence Process. *Model. Simul. Eng.* 2017,1-14.
- [52] Aristodemo, E; Tripepi, G.; Meringolo, D.D.; Veltri, P. Solitary wave-induced forces on horizontal circular cylinders: Laboratory experiments and SPH simulations. *Coast. Eng.* 2017,129,17-35.
- [53] Tripepi, G.; Aristodemo, E; Veltri, P. On-Bottom Stability Analysis of Cylinders under Tsunami-Like Solitary Waves. *Water* 2018,10, 487.
- [54] Aristodemo, E; Tripepi, G.; Ferraro, D.A.; Veltri, P. An experimental and numerical study on solitary wave loads at cylinders. *Ocean Eng.* 2020,195,106747.
- [55] Zhao, E.; Qu, K.; Mu, L.; Kraatz, S.; Shi, B. Numerical Study on the Hydrodynamic Characteristics of Submarine Pipelines under the Impact of Real-World Tsunami-Like Waves. *Water* 2019,11, 221.
- [56] Ong, M.C.; Kamath, A.; Bihs, H.; Afzal, M.S. Numerical simulation of free-surface waves past two semi-submerged horizontal circular cylinders in tandem. *Mar. Struct.* 2017, 52,1-14.
- [57] Tabatabaei-Malazi, M.; Olcay, A.B. Investigation of a longfin inshore squid's swimming characteristics and an underwater locomotion during acceleration. *Appl. Ocean Res.* 2016, 55, 76-88.
- [58] Tong, F.F.; Cheng, L.; An, H.; Griffiths, T. The hydrodynamic forces on a

circular cylinder in proximity to a wall with intermittent contact in steady current. Ocean Eng. 2017,146,424-433.

- [59] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide; ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA, 2013; pp. 724-746.
- [60] Shen, Y.M.; Ng, C.O.; Zheng, Y.H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation k- ϵ turbulence modeling. Ocean Eng. 2004, 31, 87-95.

Makaleler

1. Tabatabaei-Malazi, M.; Eren, E.T.; Luo J.; Mi S.; Temir G. Three-Dimensional Fluid–Structure Interaction Case Study on Elastic Beam. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020; 8(9):714.
2. Eren, E.T.; Tabatabaei-Malazi, M.; Temir G. Numerical Investigation on the Collision between a Solitary Wave and a Moving Cylinder. *Water* 2020, 12(8), 2167.