

**AYARLANMIŞ SIVILI TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLİ YAPILARIN  
SAYISAL ANALİZİ**

**İLKER VURUŞKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2014**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Osman Eroğul  
Müdüş

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ  
Anabilim Dalı Başkanı

İLKER VURUŞKAN tarafından hazırlanan “Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyicili Yapıların Sayısal Analizi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. M. Bülent Özer  
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Bülent ÖZER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan Osman ÖZGEN  
(ODTÜ Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İlker Vuruşkan

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Yrd. Doç. Dr. M. BÜLENT ÖZER  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Ağustos 2014

**İLKER VURUŞKAN**

## **SIVILI TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLİ YAPILARIN SAYISAL ANALİZİ**

### **ÖZET**

Bu tez çalışmasında ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin performansları, çift yönlü akışkan yapı etkileşimi kullanılarak araştırılmıştır. Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi modeli ANSYS WORKBENCH yazılımı içerisindeki ANSYS MECHANICAL ve FLUENT modülleri yardımıyla oluşturulmuştur. Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile oluşturulan model, literatürde bulunan deneysel çalışmalarla ile doğrulanmış, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin performans incelenmesi giriş ve bloktan oluşan basit bir yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Performans belirlenmesinde, yapının aynı zorlama yükü altındaki ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicisiz ve ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicili cevapları arasındaki farktan yararlanılmıştır. Performans karşılaştırması, geçici hal ve durağan hal cevapları ile iki adımda, farklı zorlama genlikleri ve frekansları ile iki farklı kütle oranındaki ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerden alınan çözümler ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kütle oranının, geçici hal cevaplarında yapının genliklerindeki azalma üzerinde etkisinin olmadığı fakat durağan hal cevaplarında kritik rol oynadığı görülmüştür. Durağan hal cevaplarında %3 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin performansı en fazla %15 iken bu durum %6 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicide %42'lere çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çift Yönlü Akışkan Yapı Etkileşimi yöntemi, Ayarlanmış Sıvılı Sönümleyiciler, Volume of Fluid (VOF) Metodu

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Program** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Assist. Prof. Dr. M. BULENT OZER  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – August 2014

**İLKER VURUŞKAN**

**COMPUTATIONAL ANALYSIS OF STRUCTURES WITH TUNED LIQUID DAMPERS**

**ABSTRACT**

In this study, the performance of the Tuned Liquid Dampers (TLD) is investigated by using two way fluid structure interaction method. The two way fluid structure interaction model is created by the help of ANSYS MECHANICAL and FLUENT moduls existing in ANSYS WORKBENCH. The model, created by the help of two way fluid structure interaction method is verified with the experimental studies existing in the literature and carried out with a simple structure with an aluminum beam and concrete blok on the beam. Performance comparison is carried out by using the deformation data of the structure with TLD and without TLD. Performance comparison is carried out in two step, transient and steady state deformation and the simulation is performed with different amplitude and frequency input parameters with two different mass ratio of TLD. The effect of the mass ratio can not be recognized in transient performance but it is seen that mass ratio has a significant effect on steady state solutions. While with the mass ratio of 0.03, the maximum damping of the structure in steady state condition is 15%, it increases to 42% with the mass ratio of 0.06.

**Keywords:** Two way Fluid Structure Inteaction, Tuned Liquid Dampers, Volume of Fluid Method (VOF),

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, sahip olduğu bilgi birikiminden sonuna kadar faydalanmamı sağlayan hocalarım Yrd. Doç. Dr. M. Bülent ÖZER ve Yrd. Doç. Dr. Cüneyt SERT'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Yapmış olduğum çalışmalar boyunca kıymetli tecrübelerinden yararlandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Doğduğum günden beri beni her konuda destekleyen, yetiőtiren ve en iyi şekilde eğitim almamı sağlayan aileme ve özellikle hayatımın sonuna kadar saygıyla anacağım babam Celal VURUŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Çalışmaları	3
2. MATEMATİKSEL MODELLEME	18
2.1 Ayarlanmış Kütleli Titreşim Sönümleyicilerin Çalışma Prensipleri	18
2.2 Akışkan Yapı Etkileşimi Prensipleri	22
2.2.1 Yekpare Yaklaşım	22
2.2.2 Bölümlenmiş Yaklaşım	23
2.3 Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği	26
2.3.1 Çok Fazlı Problemleri Çözüm Yöntemleri	29
2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yapısal Model	34
2.4.1 Zamana Bağlı Dinamik Model	34
2.5 Sistem Bağlanması	35
3. SIVILI TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN SAYISAL MODELLENMESİ	38
3.1 Çalkalanma Modellenmesi	38

3.1.1	Yapısal Model	38
3.1.2	Akışkan Model	39
3.1.3	Sistem Bağlanması	43
3.1.4	Çalkalanma Modellemesi Karşılaştırmaları	45
3.2	Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Modellenmesi	60
3.2.1	Yapısal Model	64
3.2.2	Akışkan Model	71
3.2.3	Akışkan Yapı Etkileşimi	78
3.2.4	Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Modellemesi Sonuçları	79
4.	TARTIŞMALAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR	98
	KAYNAKLAR	
	ÖZGEÇMİŞ	



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2-1 Çok Fazlı Problemlere ait Sınıflandırma.....	29
Çizelge 3-1 : Akışkan Fazlarına ait Malzeme Özellikleri.....	40
Çizelge 3-2 : Kap Yüzeylerine Ait Sınır Koşulları .....	42
Çizelge 3-3 : Akışkan Model Zamansal ve Boyutsal Ayırıştırma Algoritmalarına Ait Özellikler.....	43
Çizelge 3-4 : Sınır Koşuluna Ait Parametreler .....	56
Çizelge 3-5 : Yapı Modeline Ait Parametre Değerleri .....	63
Çizelge 3-6 : Modal Analiz Doğal Frekans Çözüm Ağı Karşılaştırması.....	66
Çizelge 3-7 : Yapısal Modele ait Malzeme ve Özellikleri.....	70
Çizelge 3-8 : Akışkan Model Zamansal ve Boyutsal Ayırıştırma Yöntemlerine Ait Özellikler.....	77
Çizelge 3-9 : Performans Karşılaştırması Çözümlerine ait Parametreler .....	80
Çizelge 3-10 %3 Kütle Oranlı ASTS Sönümlenme Performans Değerleri .....	82
Çizelge 3-11 %6 Kütle Oranlı ASTS Sönümlenme Performans Değerleri .....	84
Çizelge 3-12: Farklı Etki Frekansı Çalışmasına Ait Parametreler .....	87
Çizelge 3-13 : %3 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Performans Sonuçları .....	89
Çizelge 3-14 : %3 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Performans Sonuçları .....	91
Çizelge 3-15 : %3 Kütle Oranlı ASTS Genişletilmiş Frekans Aralığı Performans Sonuçları .....	92
Çizelge 3-16 : %6 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Performans Sonuçları .....	94
Çizelge 3-17 : %6 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Performans Sonuçları .....	96

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2-1 : Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Frekans Yanıtı.....	18
Şekil 2-2 : Tek Serbestlik Dereceli Sistemin ve Sönümleyicinin Yanıtı .....	19
Şekil 2-3 : Sönümlü ve Sönümsüz bir AKTS'nin Frekans Yanıtı .....	20
Şekil 2-4: Kütleli ve Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Kavramları.....	21
Şekil 2-5 : Yekpare Yaklaşım Akış Şeması.....	23
Şekil 2-6 : Bölümlenmiş Yaklaşım Akış Şeması.....	24
Şekil 2-7 : Tek Yönlü Etkileşim Akış Şeması [46].....	25
Şekil 2-8 : Çift Yönlü Etkileşim Akış Şeması [46].....	26
Şekil 2-9 : Sistem Bağlanması Akış Şeması .....	35
Şekil 2-10 : Genel Ağ Arayüzü Algoritması Akış Şeması.....	36
Şekil 2-11 : Akıllı Buket Algoritması Akış Şeması.....	37
Şekil 3-1 : Yapısal Model Sınır Koşulları.....	39
Şekil 3-2 : Akışkan Çözüm Hacmi Sınır Yüzeyleri.....	41
Şekil 3-3 : Çift Yönlü Akışkan Yapı Etkileşim Modeli.....	44
Şekil 3-4 : Sığ Su Şiddetli Çalkalanma Tank Geometrisi ve Deplasman Verisi .....	46
Şekil 3-5 : Sığ Su Şiddetli Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri .....	47
Şekil 3-6 : Derin Su Şiddetli Olmayan Çalkalanma Geometri ve Deplasman Verisi	49
Şekil 3-7 : Derin Su Şiddetli Olmayan Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri.....	50
Şekil 3-8 : Derin Su Şiddetli Çalkalanma Geometri ve Deplasman Verisi .....	52
Şekil 3-9 : Derin Su Şiddetli Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri .....	53
Şekil 3-10 : Kuvvet Karşılaştırması Tank Geometrisi .....	54

Şekil 3-11: Tank Duvarına Etkiyen Net Kuvvet Verileri .....	57
Şekil 3-12 : Boyutsuzlaştırılmış Kuvvet Karşılaştırması.....	59
Şekil 3-13 : ASTS Performans Çalışması Yapı Geometrisi .....	62
Şekil 3-14 : Modal Analiz Çözüm Ağı ve Sınır koşulları.....	65
Şekil 3-15 : Sönümleyicisiz Yapı Geometrisi ve Çözüm Ağı .....	67
Şekil 3-16 : Yapısal Model Çözüm Ağı Çalışması Deplasman Verileri .....	68
Şekil 3-17 : Yapısal Model Zaman Adımı Çalışması Deplasman Verileri.....	69
Şekil 3-18 : Akışkan Modele ait Sınır Koşulları ve Çözüm Ağı .....	72
Şekil 3-19 : Akışkan Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması Kuvvet Verileri .....	73
Şekil 3-20 : Akışkan Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması Deplasman Verileri.....	74
Şekil 3-21 : Akışkan Çözücü Zaman Adımı Çalışması Kuvvet Verileri .....	75
Şekil 3-22 : Akışkan Model Zaman Adımı Çalışması Deplasman Verileri.....	76
Şekil 3-23 : Akışkan Yapı Etkileşimi Veri Aktarım Yüzeyleri .....	78
Şekil 3-24 %3 Kütle Oranlı ASTS için Performans Sonuçları .....	81
Şekil 3-25 : %6 Kütle Oranlı ASTS için Performans Sonuçları .....	83
Şekil 3-26 Farklı Çalkalanma Doğal Frekansına Sahip ASTS'lerin Performans Karşılaştırması .....	85
Şekil 3-27 : %3 Kütle Oranlı Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Geçici Cevap Sonuçları .....	88
Şekil 3-28 : %3 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Sonuçları .....	90
Şekil 3-29 : %6 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Sonuçları.....	93
Şekil 3-30 : %6 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Sonuçları .....	95
Şekil 3-31 : Farklı Etki Frekansı Altında ASTS'lerin Performans Karşılaştırması..	97

## KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>BEM</b>	<b>Boundary Element Method</b>
<b>CPH</b>	<b>Consistent Particle Method</b>
<b>HAD</b>	<b>Hesaplamaalı Akışkanlar Dinamiği</b>
<b>SEY</b>	<b>Sonlu Elemanlar Yöntemi</b>
<b>SPH</b>	<b>Smooth Particle Hydrodynamics</b>
<b>ASTS</b>	<b>Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici</b>
<b>VOF</b>	<b>Volume of Fluid</b>

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya nüfusunun artması ve özellikle sanayi devriminden sonra büyük şehirlerde istihdam olanaklarının oluşması ile birlikte; taşradan kentlere göçün artışı sonucu başgösteren konut ve ofis sıkıntılarını çözmek için binaların mimarilerinde değişikliklere gidilmiştir. Minimum inşaat arazisinden maksimum verimi almak için, binaların genişliği azalmış ve boylarında artış olmuştur. Bu durumla birlikte binaların tasarım parametrelerinin yanı sıra yapı malzemeleri de değişmiş ve dayanım sağlayan ek sistemler kurulmaya başlanmıştır. Yapıların ağırlıkları azalmış buna bağlı olarak yüklemeler altında yapılar üzerinde meydana gelebilecek deformasyonlar artmıştır. Böylece özellikle yüksek binalarda rüzgar karşısındaki bina salınımları, insanları rahatsız edecek düzeye kadar artmıştır. Bu sorunların önüne geçebilmek amacıyla, binaların aerodinamik tasarımlarında, rüzgarın etkisinin azaltılması amacıyla çalışmalar yapılmış, bina tasarımlarında sivri köşeler yuvarlatılmış ve rüzgar olukları açılmıştır. Aerodinamik parametrelerin dışında binaların ağırlıklarının arttırılması ya da binanın doğal frekansını arttırıcı geometrik parametreler ile çalışmalar yapılmıştır. [1] Fakat bütün bu çalışmaların maliyeti arttırması nedeniyle farklı çözüm yolları araştırılmış ve binaların salınım genliklerinin azaltıcı ek sistemler önerilmiştir.

Önerilen ek sistemler arasında en çok kullanılan, ayarlanmış kütleli sönümleyicilerdir. Ayarlanmış kütleli sönümleyiciler, inşa edilen bir binanın genellikle en üst katına binanın rezonans frekansına sahip yeterli ağırlıkta bir kütlenin yerleştirilmesi esasına dayanmakta ve ilerlenen bölümlerde açıklandığı üzere harmonik yükler karşısında binanın salınımını azaltmaktadır.

Ayarlanmış kütleli sönümleyicilere alternatif olarak özellikle son yıllarda üzerinde yoğun çalışmalar başlatılmış ve literatürde ayarlanmış sıvılı titreşim yutucular ya da ayarlanmış çalkalanmalı yutucular olarak da adlandırılan ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyiciler (ASTS) vardır. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyiciler bir tank içerisine konulmuş belirli bir miktar sıvının, binanın maksimum salınım yaptığı yüksek katlarına yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Binaların üst katlarına sarkaç şeklinde yeterli ağırlıkta kütlenin yerleştirilmesi ile kütlenin, binanın salınımları

sırasında binanın salınımına ters yönde kuvvet uygulaması ile birlikte binanın salınımlarını azaltması prensibinde olduğu gibi, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerde de tank içerisindeki sıvının binanın salınımlarına verdiği tepki ile binanın salınımlarında azalma hedeflenmiştir. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin, kütleli sönümleyicilere oranla daha az maliyetli ve kontrol edilebilir olması nedeniyle son yıllarda çalışmalar bu tip sönümleyiciler üzerinde yoğunlaşmıştır.[2]

Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerde, dış etkenlere karşı yapıdaki deformasyonların azaltılması için, tank içerisindeki sıvının yapılaraya etkileyen kuvvetlere karşı cevabının doğru bir şekilde bilinebilmesi gerekmektedir. Harmonik yükleme altındaki bir akışkan hacminin cevabının bulunabilmesi için hareket halindeki akışkanları konu alan akışkanlar dinamiği denklemlerinden yararlanılmalıdır. Akışkanlar dinamiği denklemlerinin analitik olarak henüz sadece kısmen çözülebiliyor olması, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin tasarımını zorlaştırır da son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte hesaplama kabiliyetinin artmış ve sayısal yöntemlerin geliştirilmiş olması ile, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin önümüzdeki yıllarda oldukça yaygın bir biçimde kullanılacağını tahmin edilmektedir.

## **1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı**

Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin çalışma prensibi, tank içerisinde bulunan sıvı kütlelerinin, binanın hareketine ters yönde tepki göstermesine dayanmaktadır. Tank içerisindeki sıvı, bina titreşimi karşısında çalkalanma hareketi ile binanın hareketine ters yönde tepki göstererek, salınımını azaltmaktadır. Sıvının, binanın hareketine cevabının ne olacağını tahmin edilebilmesi için çalkalanma fiziğinin çözülmesi gerekmektedir.

Çalkalanma, referans bir geometri içerisinde serbest yüzeye sahip sıvının, referans geometrinin hareketinden etkilenecek dinamik hale geçmesi anlamına gelmektedir. Çalkalanma dinamiğinde sıvı, serbest yüzeyde farklı bir akışkan ile, sınır yüzeylerinde ise referans bir geometri ile etkileşim halindedir. Bunun dışında çalkalanmanın arttığı durumlarda ise akışkan hacminde kopmalar meydana

gelmektedir. alkalanma problemleri ile Şimdiye kadar genellikle roket, uzay gemilerindeki yakıt tankları ve yakıt taŐımacılıđı yapan araçların tasarım aŐamalarında çalışılmış fakat son yıllarda çalışma alanı içerisinde ASTS'lerde girmiŐtir. [3]

Yapılan tezin ana amacı, ASTS'lerin, harmonik yükleme altındaki yapıların salınımına etkisini incelemek amacıyla sayısal olarak modellenmesidir. Konu kapsamında öncelikle çalkalanma dinamiğinin anlaşılabilmesi amacıyla referans bir geometri içerisinde bulunan sıvının harmonik hareket altındaki cevabı ve sıvının referans geometri yüzeylerine etkidiği kuvvet incelenmiş ve çözümün doğruluğu araştırılmıştır. Ardından sıvının referans geometri yüzeylerine uyguladığı kuvveti etkileyen parametreler ve parametrelerin kuvvetler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Daha sonra, ayarlanmış ASTS'leri, yapı üzerine yerleŐtirilerek modellemeler yapılmış ve harmonik kuvvetler altındaki yapının maksimum salınım noktasının yer değiştirmesine bakılmıŐtır. Farklı frekans ve genliklerde zmler tekrarlanmış, yapıya etkileyen kuvvetlerin yapı salınımına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karŐılaŐtırılmıŐ ve oluşturulan sayısal zmn doğruluğu incelenmiştir.

## 1.2 Literatür alıŐmaları

Modern mimarinin etkisi ile birlikte inşa edilen binaların boylarının uzaması, binaların rüzgar yükü karşısında dayanımlarını azaltmıŐ ve salınımlarını arttırmıŐtır. Bu durum, insanlar üzerinde huzursuzluk, korku, baŐdönmesi, baŐađrısı veya mide bulantısı gibi olumsuz etkilerin gözlemlenmesine neden olmuş ve binalarda konforun geliştirilmesi amacıyla titreşim sönümleyiciler üzerinde çalışmalar baŐlatılmıŐtır. İnsanların sorunsuz bir Şekilde yüksek katlarda yaŐabilmesi amacıyla, binaların maruz kalacağı salınım ivmelerinin limitleri belirlenmiş ve bu konu hakkında standartlar geliştirilmiştir.

Ayarlanmış titreşim sönümleyiciler ile ilgili ilk çalışmayı 1900'l yılların baŐında Hermann Frahm [4] yapmış ve icadını patentleŐtirmiŐtir. İlerleyen yıllarda sönümleyici kavramı ile ilgili ilk teorik çalışma, 1928 yılında Ormondroyd ve Den Hartog [5] tarafından yapılmıştır. Ayarlanmış titreşim sönümleyicilerin çalışma

prensipleri matematiksel olarak birbirlerinden farklı olmasa da fiziksel özellikleri nedeniyle çeşitlere ayrılmıştır. Günümüzde binalarda, ayarlanmış titreşim sönümleyici çeşitleri arasında en çok kullanılanı ayarlanmış kütleli titreşim sönümleyicilerdir.

Ayarlanmış kütleli sönümleyiciler, herhangi bir yükleme altındaki sisteme, ana sistemin kütlesinden daha düşük kütle ve direngenlik elemanı bağlanması ile ana sistemin cevabının belirli bir frekansta tamamen sıfırlanması ya da sıfıra yakın olması ile elde edilmektedir. Ayarlanmış kütleli sönümleyiciler üzerinde ilk detaylı çalışmayı, Ormondroyd ve Den Hartog gerçekleştirmiş, tek serbestlik dereceli sönümleyicisiz bir sisteme ayarlanmış kütleli sönümleyici ekleyerek sistem frekans cevabının rezonans genliğini sıfırlamış, fakat sönümleyicinin eklenmesi ile iki yeni rezonans frekansı gözlemlemişlerdir. Sisteme sönümleyicinin eklenmesi ile birlikte ana sistemin tepe noktasından bağımsız olarak oluşan tepe noktalarının kaybolduğu anlaşılmıştır. İlerleyen yıllarda bu yaklaşımdan esinlenilerek çok serbestlik dereceli sistemler üzerinde de ayarlanmış kütleli sönümleyiciler için çalışmalar yapılmıştır. Ayarlanmış kütleli sönümleyiciler, günümüzde binaların sönümlemesinde en çok tercih edilen sönümleyici çeşididir ve birçok uygulamaları bulunmaktadır. New York'ta bulunan 297 m uzunluğundaki Citicorp gökdeleninde 410 ton, Tayvan'da bulunan 509 metre boyundaki Taipei 101 gökdeleninde 660 ton, [6] ağırlıklarındaki sönümleyiciler ayarlanmış kütleli sönümleyicilerin uygulamalarına birkaç örnek olarak gösterilebilir.

Ayarlanmış kütleli sönümleyicilerin günümüzde oldukça fazla uygulaması olmasına rağmen, üretim ve kurulum maliyetlerinin fazla olması, kütleli sönümleyicilere alternatif arayışlarının başlamasına neden olmuştur. Bu süre zarfında sıvıların sönümleme etkileri üzerinde araştırmalar yoğunlaştırılmış ve kütleli sönümleyicilerin çalışma prensibi ile benzer fakat kurulum ve maliyet konularında daha avantajlı olan ASTS'ler geliştirilmiştir. ASTS'ler, genellikle dikdörtgenler prizması yada silindir şeklindeki tanklara belirli bir miktarda sıvı doldurulması ile, tank içerisindeki sıvının dış kuvvetler karşısında çalkalanma hareketi yaparak sistemin hareketini sönümlemesi esasına dayanmaktadır.



Ayarlanmış ASTS'lerin, mevcut binalara uygulamasının oldukça kolay olması, binalarda mevcut halde bulunan yangın koruma tanklarının aynı zamanda ASTS olarak da kullanılabilmesiyle bina üzerine gelecek ek kütlelerin, üretim ve kurulum maliyetinin diğer titreşim sönümleyicilere oranla oldukça az olması ve sönümleyici parametrelerinin sürekli değiştirilebilir olması nedeniyle önümüzdeki yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir.

Ayarlanmış ASTS'lerin 1950'li yıllardan bu yana denizaltı ve uzay sanayisinde kullanılmasına rağmen, yapılarda kullanılması ilk olarak 1980 yılında Bauer [7] tarafından önerilmiştir. İlerleyen zamanlarda ayarlanmış ASTS'lere olan ilgi artmış ve birçok çalışmacı bu konu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalar ilk zamanlarda genellikle çeşitli varsayımlar ile düşük genlikli salınımlarda dalga denklemlerinin kullanılması ile yapılmış olup, elde edilen sonuçlar düşük genlikli salınımlar için kabul edilebilir düzeylerde olmuştur. Binaların salınım genlikleri arttıkça kullanılan çözümler yetersiz kalmış, araştırmacılar farklı alanlarda sayısal metodlar geliştirmeye çalışmıştır. Geliştirilen metodlar tank içerisindeki sıvının hareketinin tahmininde yeteri kadar başarılı olamamış ve son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte akışkanlar dinamiğinden sayısal yöntemlerle yararlanılmaya çalışılmıştır.

Akışkanlar dinamiğinde çalkalanma problemleri, bir referans hacmin hareketine bağlı olarak sıvının hareketi olarak tanımlanabilir. Çalkalanma problemleri diğer akışkanlar dinamiği problemlerine göre bünyesinde serbest yüzey hareketi ve farklı iki akışkanın karşılıklı etkileşimini bulundurması, çalkalanma probleminin zamana bağlı olması ve çalkalanma hareketi sırasında olası kopmaların yaşanması ve çözüm ağının dinamik olması gibi zorlukları içermesinden dolayı üzerinde oldukça çalışılmış ve çözüm için özel yöntemler geliştirilmiş problemlerdendir. Geçmişte çalkalanma problemlerinin çözümü amacıyla genellikle analitik ve deneysel yöntemlerin kullanılmasına rağmen, günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber ağırlık sayısal yöntemler üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle geçtiğimiz son birkaç yılda çalkalanma üzerine yapılan sayısal çalışmalara oldukça yoğun bir ilgi olduğu aşikârdır.

Akışkanların çalkalanma dinamiklerinin karmaşıklığı nedeniyle olayın anlaşılabilmesi amacıyla çalışmacılar öncelikle deneysel çalışmalar üzerinde yoğunlaşmışlardır.

Stranberg [8] yaptığı çalışmada, dönel hareket yaparak çalkalanma yaratan makinelerin içerisindeki sıvı miktarlarının çalkalanma şiddetine etkisinin incelenmesi amacıyla deney düzeneği tasarlamıştır. Yapılan çalışma sonucunda tank içerisindeki sıvının tankın toplam kapasitesinin yarısını aştığı durumlarda çalkalanma şiddetinde azalma gözlemlenmiştir.

Wang ve ark. [9] yaptıkları çalışmada, silindirik bir tankın salınmasını çalkalanma rezonansında deneysel olarak incelemiştir. Çalkalanma sırasında oluşan dalgalar gözlemlenmiş ve sınıflandırılmıştır.

Akyıldız ve Ünal [10] yaptıkları çalışmada; sayısal tekniklerin verimliliğini görmek amacıyla, özellikle uçak yakıt tankları ve sıvı yük taşıyan gemilerde görülen eksenel dönmeden kaynaklı çalkalanmaların küçük ölçekli dikdörtgen tanklarla deneysel çalışmalarını gerçekleştirmiş ve farklı lokasyonlarda tank duvarlarına uygulanan basınç değerlerindeki varyasyonları elde etmişlerdir.

Deneysel çalışmaların gerçek boyutlu geometriler üzerinde yapılmasının maddi ve zaman olarak uygun olmaması ve ölçekli deneysel çalışma sonuçlarının gerçek boyutlara uyarılma zorluğu olması nedeniyle belirli varsayımlar yapılarak gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir. ASTS'lerin boyutlarının deneysel çalışmalara elverişli olacak kadar küçük olamaması nedeniyle ASTS tasarımı sırasında sayısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Analitik modellemeler çalkalanma olayına etki eden parametrelerin detaylı ve daha hızlı şekilde araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı araştırmacılar analitik çalışmalar üzerinde oldukça fazla çalışma yapmış, çalkalanma dinamiğini anlamaya çalışmışlardır. Çalkalanma olayının analitik olarak modellenmesi amacıyla, ASTS'ler içerisinde bulunan sıvıların sıkıştırılmaz, viskoz olmayan ve irrotasyonel ve küçük genlikli gibi birtakım varsayımları yapılmakta ve bu varsayımlar ile çalkalanma problemlerinde genel olarak doğru sonuçlar elde edilememektedir.

Kim ve ark. [11] yaptıkları çalışmada, kısmen sıvı dolu dikdörtgen kesitli bir tankın yatay konumda ivmelendirilmesi ile tankta oluşan çalkalanmanın çözümünü, tank içerisindeki sıvının tankın duvarları ile etkileşimini de hesaba katarak, analitik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda iki boyutlu hesaplamada ve düşük ivmeler altındaki sistemin cevabının doğru tahmin edildiği, yüksek ivmelerde ise sonucun doğru tahmin edilemediği gözlemlenmiştir.

Faltinsen ve ark. [12] kare kesitli bir tank içerisindeki sıvının çalkalanmasını üç boyutlu yüklemeler altında frekans alanı içerisinde analitik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda serbest yüzey yükselmesini çalkalanmanın rezonans frekansı dışındaki frekanslarda kısmen doğru tahmin etmişlerdir.

Koh, Mahatma ve Wang [13] yaptıkları çalışmada; hali hazırda var olan bir köprünün rüzgar, deprem yada trafikten kaynaklanan salınımlarının azaltılması amacıyla çok modlu ayarlanmış ASTS tasarımı gerçekleştirmiş ve optimum parametreleri belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada Shimizu ve Hayama [14] tarafından önerilen, Sun ve ark. [15] tarafından da geliştirilen analitik yöntem yardımıyla, “derin olmayan su dalga denklemleri “ ve modal analizlerde kullanılan süperpozisyon yöntemi birleştirilerek çözüm gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda tasarlanan çok modlu ASTS’lerin, tek modlu ASTS’lere oranla daha geniş frekans aralığında daha verimli çalıştığı belirtilmiştir.

Pinot ve Geneves, [16] yaptıkları çalışmada harmonik bir yük altındaki ayarlanmış sıvılı sönümleyicinin çift sarkaç sisteminin sönümleme davranışını incelemek için, Lagrangian formülasyonu ile analitik bir model geliştirmiş ve MATLAB ile çözümlenmişlerdir. Çalışma sonucunda, hazırlanan model sarkacın salınım frekansları ölçülerek doğrulanmaya çalışılmış, modelde bazı akışkan özelliklerinin ihmal edilmesi dolayısıyla elde edilen cevap yüksek doğrulukta tahmin edilememiş fakat optimizasyon için yeterli düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

Banerji [17] yaptığı çalışmada; ASTS’lerin performansının incelenmesi amacıyla çoklu serbestlik derecesi altındaki sistem için hareket denklemi oluşturarak, basitleştirilmiş bir analitik model geliştirmiş ve geliştirdiği modelden elde ettiği çözümleri deneysel çalışmalarla kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda oluşturulan

modelin ASTS'lerin yapılar üzerine etkisinin tahmini hakkında olumlu sonuçlar verdiği, ASTS'lerin performansını etkileyen en önemli parametrelerin ise ASTS'lerin sıvı kütlelerinin yapının toplam kütesine oranı ile ASTS'lerin içerisindeki sıvı yüksekliği olduğu gözlemlenmiştir.

Sıvıların düzgün geometrilerdeki tank içerisindeki hareketinin analitik olarak modellenmesi amacıyla şimdiye kadar yapılan çalışmalar özellikle yüksek genlikli ve dalga kırılmalı çalkalanma olayı dışında düşük frekanslı çalkalanma olayları ve sığ sıvılar için kabul edilebilir düzeyde sonuçlar vermiştir. Literatürde, lineer dalga denklemleri ve sınır koşulları yardımıyla oluşturulan diferansiyel denklemlerin çözümü karmaşık geometri tanklarda oldukça zor ve dalga kırılmalı çalkalanmalarda sıvıda oluşan kopmaların çözümde ıraksamaya neden olması nedeniyle ASTS'lerin tasarımında analitik yöntemlerin verimli olarak kullanılmadığı gözlemlenmektedir. Analitik metodların dalga kırılmalı çalkalanmalar için yeterli olamaması ve serbest yüzey hareketini belirleyememesi nedeniyle, yüksek genlikli çalkalanmanın sayısal olarak modellenmesi için sayısal metodların gerekliliği vardır.

Grilli ve Svedensen [18] yaptıkları çalışmada; yüksek dereceden Boundary Element Metodu (BEM) ile yüksek dereceli ıraksak zaman adımı tekniği kullanarak yüksek dereceden lineer olmayan dalga denklemi çözümü için model oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda sınır element metodunun lineer olmayan yüksek dereceli denklemlerin çözümünde kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Gedikli ve Ergüven [19] yaptıkları çalışmada çalkalanma problemleri için varyasyonel BEM kullanılarak, akış hareketinde belirli kabuller yaparak model geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda varyasyonel sınır element metodu kullanılarak hazırlanan model, simetrik matrislerden oluştuğu için modelin sonlu elemanlar metodu gibi simetrik matrislerden oluşan metodlarla beraber kullanımının oldukça kolay olacağı belirtilmiştir.

Huang ve ark. [20] yaptıkları çalışmada; çalkalanma problemleri için Green fonksiyonu tabanlı BEM kullanılarak model geliştirilmiş ve modelden elde edilen sonuçlar deneysel datalarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda oluşturulan

modelin şiddetli çalkalanmalarda lineer olmayan serbest yüzey çalkalanmalarını tam olarak yakalamadığı gözlemlenmiştir.

Chen ve Chiang [21] yaptıkları çalışmada; zamandan bağımsız sonlu farklar metodu kullanarak, harmonik yükleme altında içerisinde sıvı olan bir dikdörtgen tankın dinamik cevabını incelemek amacıyla model oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda oluşturulan model yardımıyla yapılan hesaplamalarda tank içerisinde meydana gelen çalkalanmanın tankın dinamik cevabının azalmasına neden olduğu, geliştirilen yöntemin ise tankın hareketi ile çalkalanmanın etkileşimini gerçekleştiremediği gözlemlenmiştir.

Kim ve ark. [22] yaptıkları çalışmada iki ve üç boyutlu prizmatik tanklarda yüksek genlikli çalkalanma problemlerini sonlu fark metodunu kullanarak çözümlenmeye ve hazırladıkları modeli deneysel çalışmalarla doğrulamaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda oluşturdukları modelden elde ettikleri çözüm ile deneysel elde ettikleri çözüm arasında tank içerisinde engellerin olması durumunda farklılıklar gözlemlenmişler, iki boyutlu çözümde üç boyutlu çözüme göre daha doğru sonuçlar almışlardır. Hazırlanan modelin üç boyutlu şiddetli çalkalanmalar için geliştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Chen ve Nokes [23] yaptıkları çalışmada, zamandan bağımsız sonlu fark metodunu kullanarak iki boyutlu çalkalanma problemlerinin çözümü için model oluşturmuş Reynolds sayısının ve çalışma frekansının çalkalanmaya etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sabit frekansta Reynolds sayısı ile tank duvarlarındaki serbest hareket yüzeyi lineer olarak değişmekte, sabit Reynolds sayısında ise frekansa bağlı olduğunu gözlemlenmiştir. Oluşturulan modelin şiddetli çalkalanma durumları için pek başarılı olamadığı gözlemlenmiştir.

Lee ve ark [24] yaptıkları çalışmada gemi hareketi ile geminin içerisinde bulunan sıvı taşıyıcı tankın etkileşimini incelemek amacıyla sonlu farklar metodu kullanılarak her zaman adımında birbirlerinden alınan kuvvet moment veya yerdeğiştirme gibi sonuçların tekrar birbirlerine başlangıç koşulu olarak verilmesi esasına dayanan model geliştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, tanker gemilerinde taşınan sıvının geminin denizdeki hareketinde sönümleyici bir etki yarattığı gözlemlenmiştir.

Celebi ve Akyıldız [25] yaptıkları çalışmada dikdörtgen şeklindeki bir su tankının cevabını Volume of Fluid (VOF) metodu kullanarak ve laminar akış varsayımı yapılarak oluşturdukları iki boyutlu bir model yardımıyla elde ettikleri sonuçları deneysel olarak doğrulamaya çalışmışlardır. Akışkan Hacmi metodu çalkalanma sırasında serbest yüzey hareketinin doğru bir şekilde hareket edilebilmesi amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, oluşturdukları modelin hava ile sudan oluşan çift fazlı akış içermesi gerektiğini vurgulamışlar, üçüncü boyutun etkisinin araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Wu ve Chen [26] yaptıkları çalışmada zamandan bağımsız sonlu fark metodu kullanarak üç boyutlu tank içerisinde çalkalanma problemleri için model oluşturmuş, farklı çalkalanma frekanslarında çözümler almış ve deneysel verilerle hazırladıkları modeli doğrulamaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, farklı frekanslarda çalkalanan bir tank içerisinde, frekansa bağlı olarak farklı özelliklerde dalgalar belirlenmiştir. Çalkalanma frekansı ilk mod frekansına eşit olduğunda tank içerisindeki sıvıda, dönme hareketi ile birlikte düzensiz ve dikdörtgenimsi dalga, çalkalanma frekansı rezonans frekansına yaklaştığında ise dikdörtgenimsi dalgaların yerini üçgenimsi dalgayla bıraktığı gözlemlenmiştir.

Wu ve Taylor [27] yaptıkları çalışmada iki boyutlu lineer olmayan serbest yüzey akış probleminin çözümü için sonlu elemanlar metodu yardımıyla model oluşturmuş ve analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda oluşturulan modelin analitik sonuçlarla karşılaştırması yapılmış ve enerji sönümlenme oranlarında benzerlik gözlemlenmiştir ve hazırlanan modelin gerçek fiziksel sonuçlarla karşılaştırılması gereği üzerinde durulmuştur.

Wang ve ark. [28] yaptıkları çalışmada; sönümlenme tahminli sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çalkalanma problemleri için model oluşturmuş, hazırladıkları modeli deneysel çalışmalarla doğrulamaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda hazırladıkları modelden elde ettikleri sonuçlar yaptıkları deneysel çalışmaların bir bölümü ile uyumlu olmuş, çalkalanan sıvının viskozitesinin yüksek ve çalkalanma gerçekleşen tank boyutları küçük olduğunda modelden elde ettikleri sonuçların deneysel çalışmalarla uyumlu olmadığı gözlemlenmiştir.

Pal ve ark. [29] yaptıkları çalışmada çalkalanma problemlerine çalkalanan sıvıyı taşıyan tankın elastik deformasyonun çalkalanmaya ve serbest yüzey hareketine etkisini incelemek amacıyla, Eulerian-Lagrangian yaklaşımı ile sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanarak model geliştirmiş ve çözümler yapmışlar ve yapılan hesaplamaları akışkan katı etkileşimi yapılmamış çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, elastik deformasyonun gerçekleştiği durumlarda serbest yüzey hareketlerinde elastik deformasyon hesabı yapılmayan çalışmalara göre büyük oranda farklılıklar tespit edilmiştir.

Biswal ve ark. [30] yaptıkları çalışmada çalkalanan bir sıvı tankı içerisine rijit ve elastik engeller yerleştirerek, ekledikleri engellerin tank içerisindeki sıvının doğal frekansına etkisini SEY kullanarak oluşturdukları bir model yardımıyla incelemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda tank içerisine konulan elastik ve elastik olmayan engellerin sıvının doğal frekansını farklı şekillerde etkilediği, engellerin kalınlığının ise sıvının doğal frekansını etkilemediği gözlemlenmiştir.

Wu ve ark. [31] yaptıkları çalışmada, üç boyutlu bir tank içerisinde çalkalanmadan kaynaklanan dalgaları inceleyebilmek için lineer olmayan potansiyel dalga teorisi kullanarak SEY yardımıyla model oluşturmuş ve bu model yardımıyla çözümler yapmışlardır. Çalışma sonucunda hazırladıkları modelin, üçüncü boyutun yeterli miktara indirgenmesiyle iki boyutlu hale gelmesiyle düzgün sonuçlar verdiği, fakat üç boyutlu problemler için yeteri kadar doğru sonuçlar elde edemediği gözlemlenmiştir.

Modi ve Akıntürk [32] yaptıkları çalışmada; yüksek binalar, kontrol kuleleri, köprüler gibi dik ve uzun yapıların aerodinamik kuvvetler altındaki salınımının azaltılması için dikdörtgen şeklindeki ASTS'lerin performansını dikdörtgen tank içerisine yerleştirilen farklı yapılarıdaki ketler yardımıyla parametrik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda içerisine ket yerleştirilmiş dikdörtgen şeklindeki ASTS'nin boş haldeki ASTS'ye göre enerji sönümleme oranında önemli bir miktarda avantajlı olduğu, dikdörtgen tank içerisine yerleştirilmiş ketlerin yüzey pürüzlülükleri arttıkça ASTS'nin enerji sönümleme oranında artış olduğu ve son olarak çalışmada dikdörtgen şeklindeki ASTS'lerin aerodinamik yükler altında hem girdaplardan oluşan rezonans hemde diğer etkilerden kaynaklı kararsızlıkları sönümlemede oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Modi ve Munshi [33] yaptıkları çalışmada dikdörtgen şeklinde ve içerisinde sıvı barındıran bir tankın enerji sönümlenme verimliliğini incelemek amacıyla, parametrik serbest titreşim çalışması yaparak optimum tank boyutları ve tank içerisine konulacak engellerin lokasyonu gibi parametreleri belirlemek için bir prosedür oluşturmaya çalışmışlar ve hesapladıkları optimum parametreleri rüzgar tüneli yardımıyla deneysel olarak doğrulamaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda tank içerisinde bulunan sıvının %60 oranına kadar enerji sönümleyebildiği, tank içerisine konulan engellerin sönümlemede oldukça fazla etkisi olduğu, hazırladıkları prosedür yardımıyla optimum tank boyutları ve engel konumlarının belirlenebildiği ve gerçek kullanımlarda yapılacak optimum parametre çalışması ile daha az kütle oranı ile yapılarda salınım genliklerinin daha da azaltılabildiği gözlemlenmiştir.

Modi ve ark. [34], ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin sönümleme kapasitesinin artırılması amacıyla tank içerisine çeşitli eklemeler yaparak parametrik çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda tank içerisine yerleştirilen ketler yardımıyla ASTS'nin kapasitesinde % 20'lere varan bir artış gözlemlenmiştir. Ketler dışında, tank içerisine sıvıda yüzen parçacıklar atarak sönümleme kapasitesini arttırmayı amaçlamış ve sönümleme oranında %30 oranında artış sağlamıştır. Daha sonra tank içerisine, atılan parçacıklar ile yerleştirilen ketlerin sönümlemeye etkisi birlikte incelenmiş ve sönümleme kapasitesini %40 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

Fediw ve ark. [35] yaptıkları çalışmada, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin sönümleme kapasitesinin artırılması amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada tank içerisine yerleştirilen ketlerin sayısı ve lokasyonu ile ilgili optimizasyon çalışması yapılmış, tank içerisine yerleştirilen ketlerin sayısının arttıkça ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin sönümleme kapasitesinde artış gözlemlenmiştir.

Bucchignani [36] yaptığı çalışmada, iki boyutlu serbest yüzeyli viskoz olmayan ve sıkıştırılmaz akışkan kabulü ile harmonik yük altındaki cevabını bulmak amacıyla, Laplace denklemlerini lineer olmayan sınır koşulları ile sonlu hacim metodu yardımıyla bir model oluşturmuş ve farklı frekanslarda sistemin cevabını incelemiştir. Çalışma sonucunda, hazırladığı modelin, küçük genlikli yüklemelerde,



başarılı sonuçlar elde ettiğini, uzun süreli simülasyonlarda ise kütlelin korunumunu sağlayamadığını gözlemlenmiştir.

Tamura ve ark. [37] yaptıkları çalışmada, gerçekte ASTS'lerin performansını incelemek için var olan bir yapının üst katına ASTS'leri yerleştirerek rüzgâr yükü altında ASTS'li ve ASTS'siz ölçümler yapmış, binaların rüzgâr yüküne cevaplarını inceleyerek karşılaştırmalar yapmıştır. Çalışma sonrasında inceleme yapılan yapılarda rüzgar yüküne karşı sadece verimli bir sönümleme aracı olarak değil, binalarda insanları rahatsız eden salınımları oldukça düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda gelen rüzgar yükünün etkisini %50-%33 arasına indirdiği gözlemlenmiş, binalarda kurulum sonrasında sıvılı sönümleyiciler ile ilgili herhangi bir şikayet alınmamıştır.

Yan ve ark. [38] yaptıkları çalışmada; dikdörtgen şeklindeki tank için farklı seviyelerde su ile farklı frekanslarda tank içerisine yerleştirilen engeller ve engelsiz testler gerçekleştirmiş, yanal ve boyuna ivmelenme, kuvvet ve momentleri ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda tank içerisine yerleştirilen engellerin yanal kuvvetlere ve yanal rezonans frekansına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu, boyuna rezonans frekansını arttırdığı, boyuna kuvvetleri ise azalttığı gözlemlenmiştir.

Li ve ark. [39] yaptıkları çalışmada uzunluğu 340 metre civarında olan mevcut bir yapının, rüzgârdan kaynaklanan titreşiminin kontrolünü, ayarlanmış ASTS'ler kullanarak yapmaya çalışmışlardır. Titreşim kontrolünün modellenmesi için üç boyutlu bina modeli, onlarca serbestlik derecesi altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Binaya etkiyen rüzgar kuvvetinin modele dâhil edilebilmesi için binanın gerçekte maruz kaldığı rüzgar kuvvetleri ölçülerek Davenport modeli kullanılmıştır. Binanın titreşiminin sönümlenmesini sağlayacak ASTS'nin modellenmesi için ise sığ ve derin su dalgası modelleri kullanılmış ve farklı tank boyutları ve su yükseklikleri altında hesaplamalar yapılmıştır. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyici uygulanmamış ve uygulanmış modeller karşılaştırıldığında, içerisinde az miktarda su bulunan sığ su tankı modelin, içerisinde daha fazla miktarda su bulunan derin su tankı modeline göre binanın salınımı ve binada bulunan insanların konforu açısından daha verimli olduğu gözlemlenmiştir.

Corbi [40] yaptığı çalışmada ASTS'lerin performansının artırılması için ASTS'lerin dinamik karakteristiğinin belirlenmesi gerektiğini vurgulayarak ASTS'ler ile hareketli platformların karşılıklı etkileşimlerini incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışma sonucunda farklı geometrilerde su tankları ve farklı su seviyeleri ile denemeler yapılmış, doğru parametre seçimleri ile sönümleme anlamında efektif sonuçlar alınabileceği gözlemlenmiştir.

Jin ve ark. [41] yaptıkları çalışmada binaların deprem yükü altında dinamik cevaplarının ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerle sönümlemesi için sonlu elemanlar metodu kullanılarak model oluşturulmuş, çözümden elde edilen sonuç, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan model, mevcutta bulunan bir yağ tankı platformuna uyarlanmış ve tasarlanan ayarlanmış ASTS'nin performansı modal testlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma deprem verisi altındaki platformun, tabanının hareketi ve akışkan cevabının karşılıklı etkileşimi dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin yapının salınımlarını azalttığı, kullanılan ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin doğal frekansının deprem frekansına yakın olduğu durumlarda ve ayarlanmış ASTS'nin kütlelerinin, yapının kütlelerinin %1'i ile %5'i arasında olması durumunda verimli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Zdravko ve ark. [42] yaptıkları çalışmada; sınır interpolasyon metodu yardımıyla oluşturulan yeni bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli ile yüksek genlikli çalkalanma problemlerini ele almışlar ve hazırladıkları modelden elde edilen sonuçları yaptıkları deneysel çalışmalarla doğrulamaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada dikdörtgen şeklindeki bir kabın farklı yükseklikteki sıvılar ve farklı frekanslarda çalkalanmalarını yüksek hızlı kamera yardımıyla kayıt altına almışlar ve oluşturdukları modelden elde ettikleri zamana bağlı sıvı yükseklikleri yardımıyla karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda; sadece sınır interpolasyon metodu ile oluşturulan modelin, serbest yüzey hareketlerini tam olarak yakalayamadığı gözlemlenmiş, hazırlanan modelde interfaz yakalama metodlarından yararlanılmasıyla birlikte, simulasyondan elde edilen serbest yüzey hareketinin deneysel çalışmalarla uyduğu gözlemlenmiştir. Sadece sınır interpolasyon metodu yardımıyla hazırlanan modelin keskin tepe noktası basınç değerlerini yakalamakta

yetersiz olduğu gözlemlenmiş, geliştirilen modelin ise bu sorunu giderdiği gözlemlenmiştir. Oluşturulan modelin iki boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilmiş olması sebebiyle, aynı yöntemle hazırlanacak üç boyutlu bir modelin deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla çok daha uyumlu sonuçlar vereceği tahmin edilmektedir.

Reed ve ark. [43] yaptıkları çalışmada ASTS'lerin yüksek genliklerdeki dış yüklemeler altında davranışının incelenmesi amacıyla, lineer olmayan sığ su dalga denklemlerini kullanarak sayısal bir model oluşturmuş, modelden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla da deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada, çalkalanma sırasında tank içerisindeki sıvıdan anlık görüntüler alınmış, tankın alt tarafına yerleştirilen yük hücresi yardımıyla sıvının tank duvarlarına uyguladığı toplam kuvvet bulunmuş ve tankın üst tarafına farklı lokasyonlara yerleştirilmiş seviye sensörleri yardımıyla da tank içerisindeki maksimum sıvı yüksekliği belirlenmiştir. Çalışma sadece düşük genlikteki problemler ile sınırlı kalmamış, farklı çalkalanma genliği ile farklı frekans aralıklarında çözümler geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda sığ su dalga denklemleri yardımıyla oluşturulan modelin, çalkalanma sırasında dalga kırılması gözlemlenen durumlar, yüksek genlik ve yüksek frekans dışındaki durumlarda oluşturulan modelin doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yüksek frekanslı çalkalanmalarda deneysel çalışmalarda gözlemlenen sıvı kopmalarının sayısal yöntemlerle elde edilememiş olması ve yüksek genliklerdeki çalkalanmaların dalga kırılmasına neden olması bu tür problemlerinin çözümlerinin yeterli doğrulukta yapılamamasına neden olarak gösterilmiştir.

Marsh ve ark. [44] yaptıkları çalışmada; yapıların titreşim cevabını azaltmak amacıyla tasarlanan ASTS'lerin optimum parametrelerini belirlemek amacıyla, parçacık ve Lagrange metodu algoritması tabanlı düzeltilmiş partikül hidrodinamiği metodu ile dikdörtgen şeklindeki konteyner ile iki boyutlu model oluşturmuşlar, modelden elde ettikleri numerik çözümü karşılaştırmak amacıyla da deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada çalkalanan sıvının serbest yüzey hareketinin takip edilebilmesi için yüksek hızlı kamera yardımıyla video kaydı alınmış ve görüntüler aynı zamanda adımlarda numerik modelden elde edilen

görüntü ile karşılaştırılmıştır. Numerik ve deneysel çalışmalar farklı konteyner boyutları, farklı sıvı derinlikleri ve farklı frekanslar altında yapılmıştır. Çalışma sonucunda; çalkalanma dinamiğinde dalga-dalga ve dalga-duvar olmak üzere iki farklı etkileşim ve bu etkileşimleri yaratan duran ve hareket eden iki farklı dalga tipi gözlemlenmiştir. Duran dalga tipi çalkalanma sırasında oluşan kayma gerilmesinden sorumlu olmakta olup, hareket eden dalga tipi ise hız vektörlerinden sorumludur. Serbest yüzey hareketinin oluşmasını sağlayan dalga tipi ise yine hareket eden dalga tipidir. Oluşturulan modelin ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyici parametrelerinin belirlenmesinde çalkalanma dinamiğinin anlaşılması hususunda oldukça kullanışlı olduğu gözlemlenmiş, ASTS'nin verimli bir şekilde çalışabilmesi için konteyner içerisinde bulunan sıvının yüksekliğinin belirli bir değerin üstüne çıkmaması gerektiği gözlemlenmiştir.

Marsh ve ark. [45] yaptıkları çalışmada; ASTS tasarımı için geliştirilmiş ve Consistent Particle Hydrodynamics (CPH) yöntemiyle oluşturulmuş modeli kullanarak, yumurtaların embriyoyu korumak için şekil itibariyle enerji sönümleyici özelliklerinin olduğu fikrinden yola çıkarak, yumurta şeklindeki bir geometrinin sönümleyici etkisini incelemek istemişlerdir. Çalışma farklı sıvı seviyelerinde tekrarlanarak sıvı seviyesinin etkisinde incelenmesi sağlanmıştır. Çalışma sonucunda yumurta geometrisi şeklindeki ASTS'nin performansının daha önceki çalışmalarında olduğu gibi, sıvı seviyesi belirli bir değerin üstüne çıktıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Geometrinin duvar kalınlığının ASTS'nin performansına etkisi olacağı tahmin edilmesine rağmen, çalışma sonrasında bu durumun performansda herhangi bir etki yaratmadığı gözlemlenmiştir.

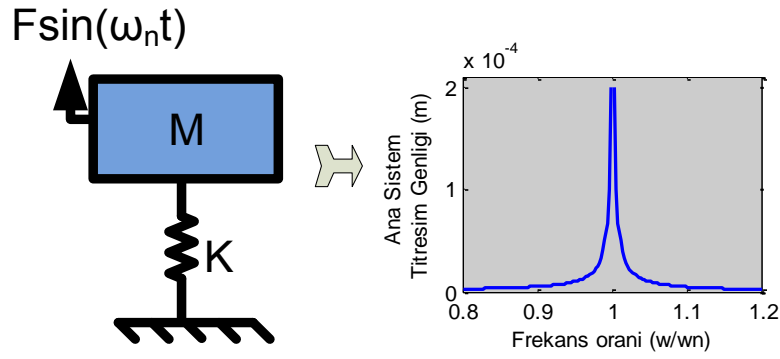
Yukarıda yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genellikle iki boyutlu yapılmış olduğu gözlemlenmekte olup, ayarlanmış ASTS'nin tasarım parametrelerine üçüncü boyutun etkisinin incelenmediği gözlemlenmektedir. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerde sıvı kütesinin de bir tasarım parametresi olacağını düşündüğümüzde üçüncü boyutun etkisinin araştırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak oluşturulan modellerden elde edilen sonuçların düşük frekansta çalkalanan sınırlı problemlerde başarılı olduğu, yüksek frekansta çalkalanma durumunda doğru sonuçların elde edilmediği gözlemlenmiştir. Yapılan

deneysel çalışmalarda sıvının hareketi incelenmiş olup sıvının tank duvarına uyguladığı kuvvet ile ilgili çalışmaların eksikliği gözlemlenmiştir. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin çalışma prensibi düşünöldüğünde tank içerisindeki sıvının tepki kuvvetinin sönümleme yarattığı ve sönümleyici tasarımı sırasında bu kuvvetlerin bilinmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayarlanmış ASTS'nin kullanım amacının, dış kuvvetler altındaki bir sistemin titreşim salınımının azaltılması olduğu düşünölrse, salınan sistem ile sönümleyicinin karşılıklı etkileşiminin incelenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yukarıdaki çalışmalara bakıldığında deneysel çalışmaların dışında sistem ile sönümleyicinin etkileşimini konu alan çalışmaların sayısında eksiklik görölmektedir.

## 2. MATEMATİKSEL MODELLEME

### 2.1 Ayarlanmış Kütleli Titreşim Sönümleyicilerin Çalışma Prensibi

Ayarlanmış kütleli titreşim sönümleyiciler (AKTS), bir sisteme uygulanan dış zorlama nedeniyle oluşan sistemin cevabının azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. AKTS'nin çalışma prensibi, tek serbestlik dereceli ve sönümsüz basit bir sistem üzerinde açıklanabilir. Sistem üzerine sistemin doğal frekansında dış bir kuvvetin etkimesi durumunda, sistem rezonans yanıtı verir. Tek serbestlik dereceli rezonans frekansında zorlama altında olan bir sistemin frekans cevabı Şekil 2-1'de bulunabilir.



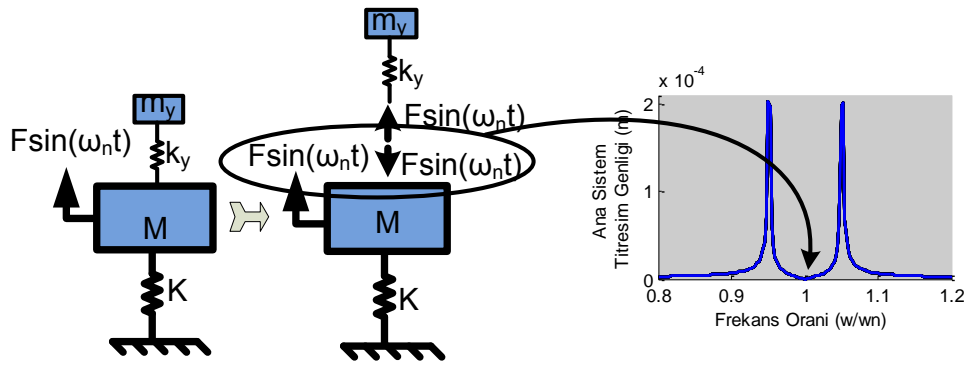
Şekil 2-1 : Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Frekans Yanıtı

Sistemin, doğal frekansındaki bu yüksek genlikli yanıtını düşürebilmek amacıyla sisteme, sistemin doğal frekansı ile aynı doğal frekansa sahip,  $m_a$  eş değer kütleli ve  $k_a$  eşdeğer direngenlikli ek bir sönümleyici sistem eklenebilir. Ana sistemin direngenliği ihmal edilirse sönümleyici için en iyi performansı sağlayacak direngenlik seçimi için Denklem 2.1'de verilen bağıntıdan yararlanılabilir.

$$k_y = \frac{K}{M} m_y \quad (2.1)$$

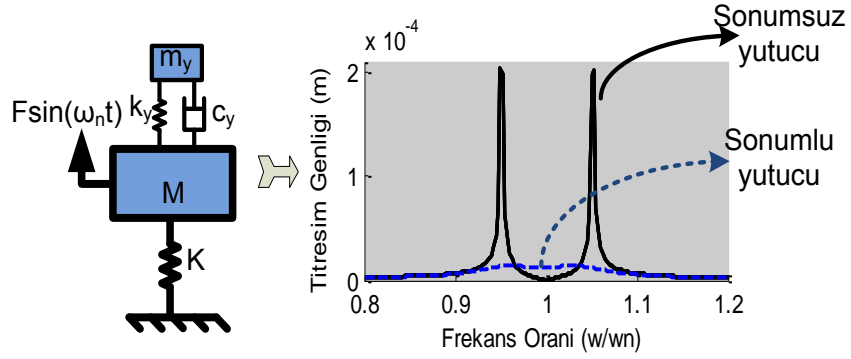
Yukarıdaki denklemde  $k_y$ , sönümleyici sistem eşdeğer direngenliğini,  $K$ , ana sistem eşdeğer direngenliğini,  $M$ , ana sistem eşdeğer kütlelerini,  $m_y$  ise sönümleyici sistem eşdeğer kütlelerini temsil etmektedir.

Yukarıda Şekil 2-1'de bulunan sisteme, sistem ile aynı doğal frekansa sahip  $m_a$  eşdeğer kütleli ve  $k_a$  eşdeğer direngenlikli ek sönümleyici sistemin eklenmesi ile elde edilen ana sistemin cevabı Şekil 2-2'de verilmiştir.



Şekil 2-2 : Tek Serbestlik Dereceli Sistemin ve Sönümleyicinin Yanıtı

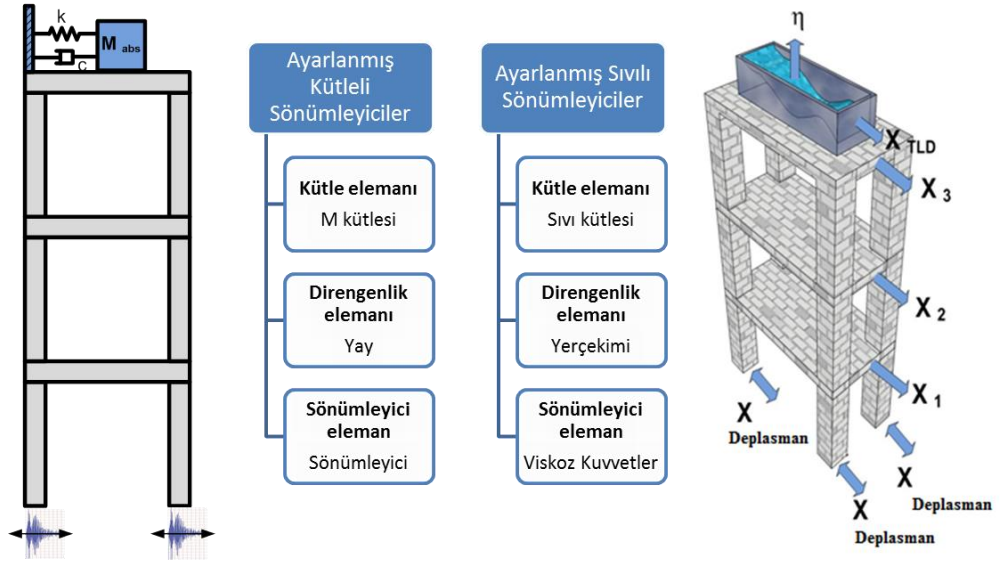
Uygun eşdeğer sönümlenme katsayısı ve eşdeğer kütle değerleri ile sistemin frekans yanıtı hesaplanırsa orijinal sistemin doğal frekansında yanıtın sıfır olduğu gözlemlenir. Bu durum, rezonans frekansında titreşen ana sistem ile sönümleyici sistemin aynı genlikte fakat zıt yönde titreşmesi sonucunda meydana gelmektedir. Sistemin doğal frekansında sönümleyici sistem rezonans kuvvetinin etkisini yok eder. Bu durum doğal frekans dışındaki frekanslar için geçerli değildir. Sistemin rezonans frekansına yakın frekans bölgelerinde sistemin yanıtının genlikleri yine fazladır. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla sisteme uygun bir sönümlenme eklenmesi gerekmektedir. Böylece üzerine sönümleyici sistem eklenmiş ana sistemin yanıtı tamamen sıfır olmaz fakat geniş bir frekans aralığında sönümlenme sağlanmış olur. Sönümleyici sistem eklenmiş durum için farklı frekans aralığına sistem cevabı aşağıda Şekil 2-3'te verilmiştir.



Şekil 2-3 : Sönümlü ve Sönümsüz bir AKTS'nin Frekans Yanıtı

AKTS'nin çalışma prensibi dirençlik elemanları tarafından dış kuvvete ters fazda bir kuvvet uygulanması ve sönümleyici elemanlar yardımı ile de sistemin enerjisinin atılması olarak genelleştirilebilir. Binalarda kullanılan titreşim sönümleyicilerden, mekanik sönümleyiciler, binanın üst katlarına kütlesi, dirençliği ve sönümleme elemanları bulunan bir sistemin eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Yine binalarda kullanılan sıvılı sönümleyiciler de mekanik sönümleyicilerle aynı çalışma prensibi ile binaların üst katlarına içerisinde belirli bir miktarda su bulunan bir tankın yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 2-4'de binalarda kullanılan mekanik sönümleyiciler ile sıvılı sönümleyicilerin benzerlikleri bulunmaktadır.





Şekil 2-4: Kütleli ve Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Kavramları

Yukarıda şekil 2-4’de ana sistem olan bina modeli üzerine yerleştirilen ek mekanik sistem ile ek sıvılı sistem karşılaştırıldığında, AKTS’ler ile ASTS elemanları arasında Şekil 2-4’de ki gibi bir benzetim kurulabilir. [45]

Sönümleyici sistem tasarımında sönümleyici sistemin doğal frekansının ana sistemin doğal frekansına eşit olması esas olduğundan, ilk olarak sönümleyici ve ana sistemin doğal frekanslarının bulunması gereklidir. Mekanik sistemler için sistemin doğal frekanslarının hesaplanmasını gösteren ifade Denklem 2.2 de verilmiştir.

$$[K]\varphi_i = \omega_n^2 m[M]\varphi_i \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemde  $k$  sistemin direngelik matrisini,  $\varphi_i$  i modundaki titreşim biçimini (eigen vector),  $\omega_n$  doğal frekansı,  $m$  ise sistemin kütle matrisini temsil etmektedir.

Denklem-2.2 de verilen ifade mekanik sistemlerin doğal frekansını hesaplamak için kullanılmakta olup akışkan sistemlerin doğal frekanslarının hesaplanması için kullanılması uygun değildir. Tez kapsamında sönümleyici sistem içerisinde akışkan olarak su kullanılacağı için, sönümleyici sistem doğal frekansının hesaplanması amacıyla doğrusal (düşük genlikli) çalkalanma ve sığ su seviyeleri için geliştirilmiş bağıntı [43] Denklem 2.3’de gösterilmiştir.

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h_0}{L}\right)} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemde  $f_w$  suyun Hz cinsinden çalkalanma doğal frekansı,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $L$  çalkalanma eksen boyunca su tankının uzunluğu ve  $h_0$  tank içerisindeki su yüksekliğini temsil etmektedir.

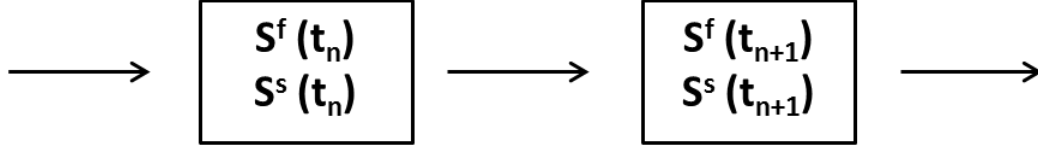
## 2.2 Akışkan Yapı Etkileşimi Prensipleri

Akışkanlar dinamiği ve yapı dinamiği gibi, birden fazla fiziksel çözüm gerektiren problemler çoklu fiziksel problemler olarak adlandırılmaktadır. Bu tür problemlerin çözümü, içerisinde birden fazla fiziksel yapı barındırdığından karmaşık olmaktadır. Analitik yöntemlerin bu tür problemlerin çözümünde yetersizliği sebebiyle, özellikle son yıllarda bilgisayarların hesaplama kapasitesindeki artıştan da faydalanılarak sistematik yaklaşımlar geliştirilmiş ve sayısal çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen yöntemler Yekpare (Monolithic) ve Bölümlenmiş (Partitioned) yaklaşım olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

### 2.2.1 Yekpare Yaklaşım

Yekpare yaklaşım, farklı fiziksel alanlardaki problemleri tek bir ana denklemde toparlayıp çözme esasına dayanmaktadır. Genellikle bölümlenmiş yaklaşımlara göre daha çabuk ve doğru sonuçlar vermektedir. Farklı problem türleri için farklı formülasyonların hazırlanması gerektiğinden ticari analiz programları tarafından

tercih edilmemektedir. Yekpare yaklaşımların akış şeması aşağıda Şekil 2-5'deki gibidir.

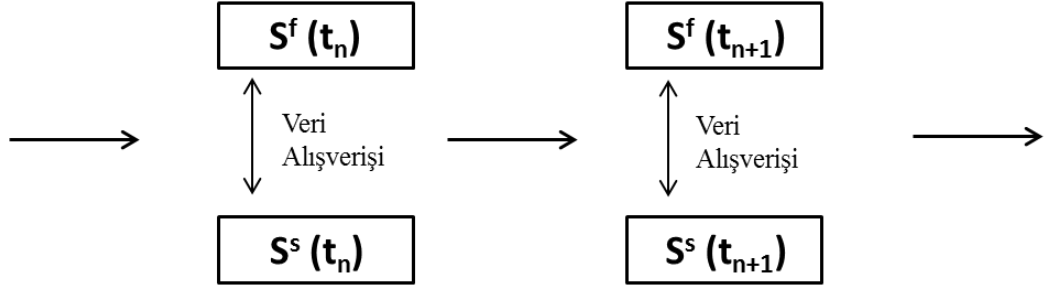


Şekil 2-5 : Yekpare Yaklaşım Akış Şeması

Şekil 2-5'te kutu içerisinde verilen her bir ifade bir denklem takımını temsil etmekte olup,  $S^f(t_n)$ , oluşturulan modelde n zaman adımındaki akışkan çözüm hacmine ait denklemleri,  $S^s(t_n)$ , n zaman adımındaki yapısal çözüm denklemlerini,  $S^f(t_{n+1})$ , n+1 zaman adımındaki akışkan çözüm hacmine ait denklemleri,  $S^s(t_{n+1})$  ise n+1 zaman adımındaki yapısal çözüm denklemlerini ifade etmektedir. Problem çözümü için yapılan çözümler tek bir denkleme indirgenerek karşılıklı veri paylaşımı olmadan gerçekleştirilir.

### 2.2.2 Bölümlenmiş Yaklaşım

Bölümlenmiş yaklaşımda, problemin farklı fiziksel alanlarındaki bölümleri için ayrı çözüm gerçekleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Herhangi bir fiziksel alanda çözüm yapılırken, diğer fiziksel alanda herhangi bir değişiklik olmaz, elde edilen sonuçlar bir sonraki zaman adımında her iki fiziksel alana sınır koşulu olarak uygulanır. Bölümlenmiş yaklaşıma ait akış şeması aşağıda Şekil 2-6'da belirtilmiştir.

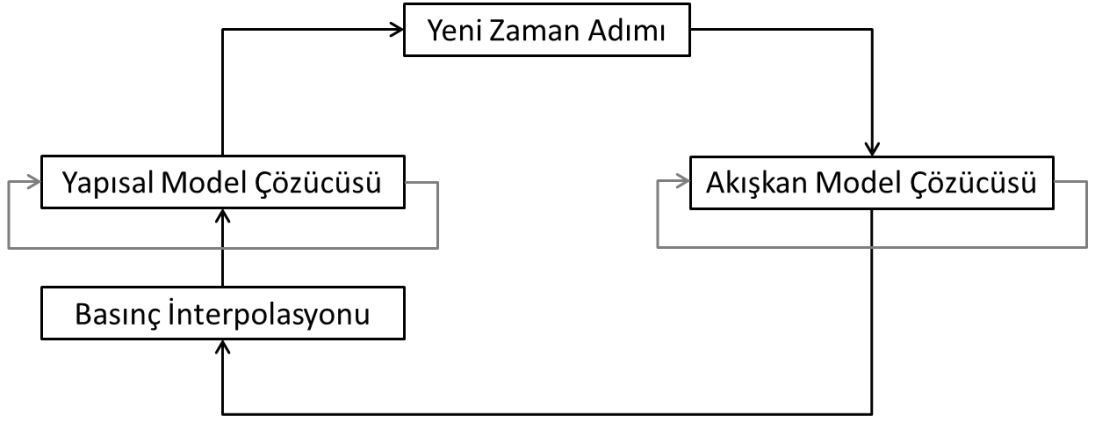


Şekil 2-6 : Bölümlenmiş Yaklaşım Akış Şeması

Şekil 2-6’da kutu içerisinde verilen her bir ifade bir tek denklem takımını temsil etmekte olup,  $S^f(t_n)$ , oluşturulan modelde n zaman adımındaki akışkan çözüm hacmine ait denklemleri,  $S^s(t_n)$ , n zaman adımındaki yapısal çözüm denklemlerini,  $S^f(t_{n+1})$ , n+1 zaman adımındaki akışkan çözüm hacmine ait denklemleri,  $S^s(t_{n+1})$  ise n+1 zaman adımındaki yapısal çözüm denklemlerini ifade etmektedir. Farklı fiziksel alanlarda hesaplanan çözümlere ait veriler her zaman adımında birbirleri arasında karşılıklı değişilmektedir. Bu bilgi değişimi işlemi tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki kategoride toplanmaktadır.

### 2.2.2.1 Tek Yönlü Etkileşim

İçerisinde farklı iki fiziksel alan barındıran problemlerde, fiziksel alanlardan birisi üzerinde diğer fiziksel alanın herhangi bir etkisinin bulunmadığı, bilgi paylaşımının sadece etkilenmeyen fiziksel alandan diğerine doğru olduğu varsayımı yapıldığı durumlarda tek yönlü etkileşim tercih edilmektedir. Tek yönlü etkileşim problemlerine örnek olarak boru içinde akışkan madde taşınması sırasında borunun deformasyona uğrayarak akışkan çözüm hacmini değiştirmesinin ihmal ile akışkanın borunun yüzeyine yaptığı basınç sonucunda borudaki gerilmelerin bulunması gösterilebilir. Tek yönlü akışkan yapı etkileşimine ait akış şeması aşağıda Şekil 2-7’de sunulmuştur.

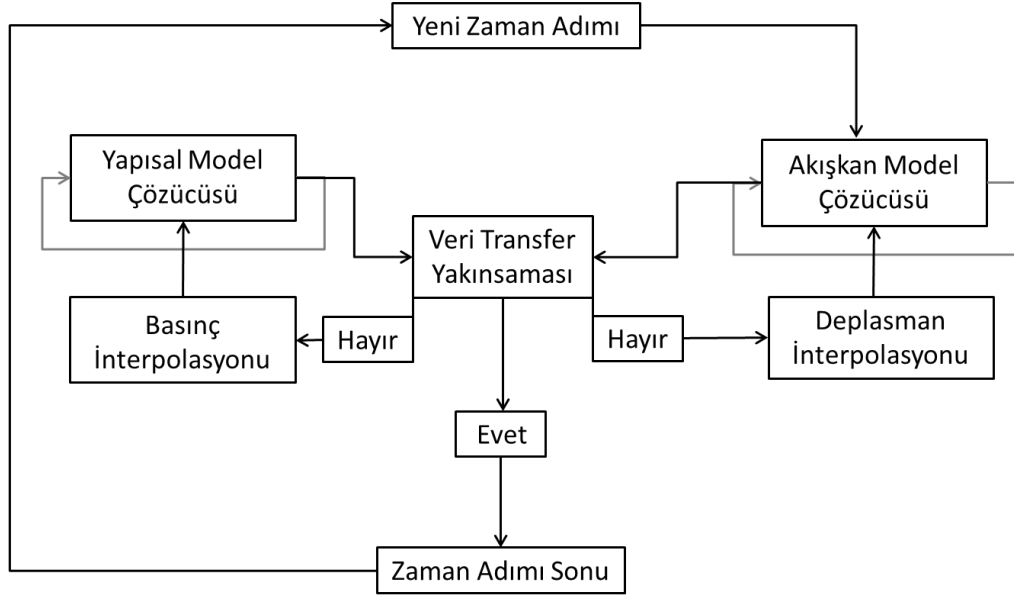


Şekil 2-7 : Tek Yönlü Etkileşim Akış Şeması [46]

Yukarıdaki tek yönlü akışkan yapı etkileşimine ait şemaya bakıldığında, akışkanlar dinamiği modelinde yakınsama sağlanana kadar çözüm yapıldıktan sonra elde edilen basınç verileri yapı dinamiği modeline sınır koşulu olarak gönderilir ve yapı dinamiği kendi içerisinde yakınsama sağlanana kadar çözüm yapılır. Yapı üzerinde deformasyon olmadığı varsayımı yapıldığı için akışkan hacminde herhangi bir değişiklik olmaz. Yakınsama sağlandıktan sonra ise yeni bir zaman adımına geçilir.

#### 2.2.2.2 Çift Yönlü Etkileşim

Çift yönlü etkileşim, içerisinde farklı fiziksel alan barındıran problemlerde her iki alandan elde edilen çözümün de birbirleri etkilemesi durumunda kullanılmaktadır. Çift yönlü etkileşim problemlerine örnek olarak, rüzgâr türbini kanatlarının rüzgar yükü altında deforme olmasıyla birlikte akışkan çözüm hacminde meydana gelen değişikliklerin rüzgar türbini performansına etkisinin incelenmesi verilebilir. Çift yönlü akışkan yapı etkileşimine ait akış şeması aşağıda Şekil 2-8’de sunulmuştur.



Şekil 2-8 : Çift Yönlü Etkileşim Akış Şeması [46]

Yukarıdaki çift yönlü akışkan yapı etkileşimi şemasına bakıldığında, akışkanlar dinamiği modelinde başlangıç koşulu olarak belirtilmiş basınç verisi yapı dinamiği modeline sınır koşulu olarak gönderilir ve yakınsama sağlanana kadar çözüm yapılır. Yapı dinamiğinden elde edilen deplasman verisi ise akışkanlar dinamiği modeline sınır koşulu olarak uygulanır. Bu durum sonucunda akış alanındaki ağ yapısı deformasyona uğrar ve yapı dinamiğindeki deplasmanlar akışkanlar dinamiği modeline uygulanmış olur. Çözüm süreci bitene kadar bu durum tekrarlanır.

### 2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde kullanılan kütle korunumu denklemi, akışkan elemandaki kütle artışının zamana ve konuma göre değişimi ile ilgilenmektedir. Hesaplamalarda kullanılan kütle korunumu denklemi aşağıda Denklem 2.4'te belirtilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (2.4)$$

Korunum denkleminde t zamanı,  $\rho$  yoğunluğu,  $u_i$   $x_i$  yönündeki mutlak hızı,  $x_i$   $i=1, 2, 3$  için Kartezyen koordinatı,  $S_m$  ise kütle için kaynak terimi temsil etmektedir. Kütle için kaynak terimi tez kapsamında oluşturulan çalkalanma modelinde hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Denklemin ilk terimi akışkanın yoğunluğunun zamana bağlı değişimini ifade etmekte, ikinci terimi ise akışkanın kütesinin akışkanın hızına bağlı değişimini ifade etmektedir.

Newton'un ikinci yasası sonlu boyuttaki akışkan hacminin momentumundaki değişimin, sonlu büyüklükteki akışkan hacmine uygulanan kuvvetlerin toplamına eşitliği ile ilgilidir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan momentum denklemleri aşağıda Denklem 2.5'te verilmiştir.

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial (x_j)} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2.5)$$

Momentum denkleminde,  $\tau$  stress tensörünü,  $p$  basıncı,  $S_i$  ise momentum için kaynak terimi ifade etmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada çalkalanma olayı incelendiğinden çözüm serbest yüzey akış problemleri kapsamına girmektedir. Serbest yüzey akış problemleri, serbest yüzeyin anlık değişen sınır koşuluna, değişken hesaplama alanlarına sahip olması ve bunun yanı sıra serbest yüzeyin hızlarının ve konumlarının zamana bağlı olarak değişmesi nedeniyle sayısal olarak oldukça zorlayıcı problemlerdendir. Problem çözümünde yukarıda sayılan zorlukların yanı sıra serbest yüzeyde, etkinin şiddetine bağlı olarak kopmaların görülebilmesi ve ardından kopan parçaların serbest yüzeyi yaratan alanla birleşebilmesi gibi olasılıkların var olması çözümü oldukça zorlaştırmaktadır.

Serbest yüzey hareketine sahip problemlerin sayısal çözümlerinde yukarıdaki zorluklar ile başa çıkabilmek için başta hücresel tabanlı ve parçacık tabanlı olmak üzere farklı sayısal algoritmalarından yararlanılmış ve farklı varsayımlar yapılmıştır.

Parçacık tabanlı sayısal çözüm algoritmaları içinde en çok kullanılan yöntem Gingold ve Monaghan tarafından 1977 yılında geliştirilen SPH yöntemi [47] olup, serbest yüzey hareketini içeren çift fazlı problemlerde kullanımı oldukça yaygındır. SPH yönteminin çözüm algoritması içerisinde parçacık tabanlı olmasından kaynaklı kütle korunumunu ayrıca herhangi bir denklem sistemi kullanmadan sağlaması ve serbest yüzey hareketini hassas bir şekilde yakalayabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. SPH yönteminin kullanılabilmesi için, ticari yazılım programlarının çözüm algoritmalarında SPH yöntemini tercih etmemesi nedeniyle kişisel kodların oluşturulması, bu yöntemi hücresel tabanlı algoritmalara göre kullanım açısından zor kılmaktadır.

Tez kapsamında çalkalanma problemlerinin çözümü için FLUENT ticari yazılımı kullanıldığından, problemlerin çözümünde yazılım bünyesinde bulunan hücresel tabanlı algoritmalarından Sonlu Hacim Metodu (Finite Volume Method) kullanılmıştır. Sonlu Hacim Metodu modellemesinin ana ve önemli bir adımı hesaplama alanını bölerek küçük kontrol hacimleri ya da hücreleri oluşturmaktır. Hesaplama ile ilgili tüm gerekli bilgiler bu merkezlerde toplanarak yine çözüme bu merkezler aracılığı ile gidilmektedir. Fluent yazılımı, genel taşınım denklemlerinin çözümünde sistematik bir algoritma oluşturmak için sonlu hacim yöntemini kullanmakta ve farklı iteratif yöntemler ile çözümü gerçekleştirmektedir.

Tez kapsamında oluşturulan çalkalanma modelinin serbest yüzey hareketini içermesinden dolayı akışkan çözüm hacmi içerisine hava ve su olmak üzere iki farklı akışkan tanımlanmalıdır. Çalkalanma problemleri gibi bünyesinde birden fazla akışkan bulunduran problemlere çok fazlı problem adı verilmektedir. Çok fazlı problemlerinin çözümünde problem fiziğine bağlı olarak birçok çözüm yöntemi geliştirilmiştir.



### 2.3.1 Çok Fazlı Problemleri Çözüm Yöntemleri

Akışkanlar dinamiği alanında birden fazla madde fazının birbirleri ile etkileşim içerisinde olduğu durumlar oldukça fazladır. Çok fazlı akış sistemlerinde akışkan çözüm hacmi içerisindeki herhangi bir maddenin faz olarak kabul edilebilmesi için maddenin, akış hacmi üzerinde etkisinin olması yeterlidir. Çok fazlı akış problemlerine ait genel sınıflandırma aşağıda Çizelge 2-1’de verilmiştir.

Çizelge 2-1 Çok Fazlı Problemlere ait Sınıflandırma

<b>Çok Fazlı Problemler</b>
Gaz-Sıvı & Sıvı-Sıvı
Gaz-Katı
Sıvı-Katı
Üç fazlı

Yukarıda sınıflandırılan problem türlerinden gaz-sıvı & sıvı-sıvı çok fazlı problemlere sıvı içerisinde bulunan baloncukların ya da birbiri içerisinde çözünemeyen farklı iki sıvının akışı, gaz- katı çok fazlı problemlerine, gaz akış hacmi içerisinde katı parçacıkların taşınması, sıvı-katı çok fazlı problemlere sıvı akış hacmi içerisinde katı parçacıkların taşınması ve üç fazlı problemlere diğer üç çok fazlı problemlerinin birleşimi örnek olarak gösterilebilir. Çok fazlı akış problemlerinin sayısal çözümü için geliştirilen yöntemler Euler-Lagrange Yaklaşım ve Euler-Euler Yaklaşım olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır.

#### 2.3.1.1 Euler-Lagrange Yaklaşım

Euler-Lagrange yaklaşımına göre, akışkan hacmi içerisindeki fazlar öncelikle ana faz ve dağılık faz olmak üzere iki gruba ayrılır. Ana faz akışkan hacmi içerisindeki baskın faz olup, dağılık faz ana faz içerisindeki parçacıkları temsil eder. Euler-

Lagrange yaklaşımında, akışkan hacmi içerisindeki ana akışkan faz Navier Stokes denklemleri kullanılarak, dağılık faz ise parçacık dinamiği denklemleri kullanılarak çözümlenmektedir. Akışkan hacmi içerisindeki dağılık faz, ana faz ile momentum, kütle ve enerji geçişi yapabilmektedir.

Euler-Lagrange yaklaşımında akışkan hacmi içerisinde bulunan dağılık fazın akışkan hacminin kütleli olarak büyük bölümünü kapsasa da hacimsel olarak küçük bir bölümünü kaplaması kabulü yapılmıştır.

Partikül denklemleri çözümleri, Navier Stokes denklemleri çözümü esnasında belirlenen aralıklarda çözümlenmektedir. Bu durum Euler-Lagrange Yaklaşımının sprey modellerde oldukça başarılı sonuçlar vermesine yol açmaktadır. Fakat Euler-Lagrange Yaklaşımı akışkan-akışkan karışımlarda ve dağılık fazın hacminin, çözüm hacmine göre ihmal edilemeyeceği durumlarda kullanılmaması tavsiye edilmektedir. [48]

### **2.3.1.2 Euler-Euler Yaklaşım**

Euler-Euler yaklaşımda çözüm hacmi içerisindeki farklı fazlar için Euler-Lagrange yaklaşımdan farklı olarak tek bir çözüm alanında çözüm yapılmaktadır. Akışkan hacmi içerisindeki farklı fazlara hacim fraksiyonları tanımlanır. Bu hacim fraksiyonları uzayda ve zamanda sürekli fonksiyon olarak kabul edilir ve toplamları bire eşittir. Euler-Euler yaklaşımda problem çözümlerinde kullanılan yöntemler, Karışım (Mixture) Model, Eulerian Model ve Volume of Fluid Modeli olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır.

Karışım (Mixture) model, akışkan hacmi içerisinde bulunan farklı fazların farklı relatif hızlara sahip olduğu durumlarda kullanılabilir. Mixture model problem çözümünde momentum korunumu ve enerji denklemleri, akışkan hacmi içerisindeki fazlar için hacim fraksiyon denklemleri ve relatif hızların belirlenmesi için geliştirilen matematiksel denklemleri kullanmaktadır. Bu durum Karışım Modelin, tortulaşma, siklon ayırıcıları gibi problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar vermesini sağlamaktadır.

Eulerian Model, akışkan hacmi içerisinde çok sayıda etkileşim gösteren farklı fazların olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu fazlar sıvı, katı ve gaz olabilirler.

Akışkan hacmi içerisinde ana fazdan ayrı birden çok sayıda faz belirlenebilir. Fakat belirlenen fazların sayısı çözücüye sağlanan bilgisayar belleği ile sınırlıdır. Eulerian Model çözüm hacmi içerisindeki sıvı-sıvı ve sıvı-katı çok fazlı akışlar arasında ayırım yapmaz. Eulerian Model çözüm sırasında momentum korunumu, süreklilik, enerji, hacim fraksiyon denklemlerinin kullanılmaktadır. Çözüm sonucunda çözüm hacmi içerisindeki katı parçacıkların üzerlerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplanmasına da olanak sağlar. Eulerian Model, üç fazlı çok fazlı akış problemlerinin çözümlerinde oldukça başarılıdır.

Volume of Fluid metodu iki veya daha fazla karıştırılamaz akışkanı tek bir momentum denklem seti ile modellemeyi amaçlayan ve çözüm hacmindeki farklı faz akışkanları hacim fraksiyonu diye adlandırılan katsayılar ile ayırmaya çalışan bir yöntemdir. VOF yöntemi genellikle zamana bağlı problemlerin çözümünde kullanıldığı gibi aynı zamanda çözümün başlangıç koşullarından bağımsız olduğu ve akış hacminde farklı akışkanlarda belirgin sınırların olduğu zamandan bağımsız problemlerin çözümlerinde de kullanılabilir. VOF modeli, sıvı içerisinde baloncuk oluşumu, kapalı çözüm hacmi içerisindeki sıvının hareketi ve sıvı gaz etkileşimi gibi problemlerin çözümlerinde oldukça başarılıdır. [48]

Tez kapsamında çalkalanma modellemesinde yukarıda listelenen yöntemlerden VOF metodu serbest yüzey akış problemlerindeki başarısı nedeniyle tercih edilmiş ve kullanılmıştır.

### **2.3.1.2.1 Volume Of Fluid (VOF) Metodu**

VOF formülasyonu iki ve daha fazla akışkanın birbiri içerisine karışmaması esasına dayanmaktadır. Bunun dışındaki her bir farklı akışkan fazı için çözüm hacmine yeni bir hacim oranı adı verilen parametre tanımlanmış olur. Her akışkan hacminin toplam hacim oranı katsayıları her zaman adımında sabittir. Hacim oran katsayılarının akışkan hacmi içerisindeki lokasyonlarda değerinin bilinmesi ile akışkan fazlarının her alandaki değişkenleri ve özellikleri hesaplanabilmektedir. Hacim oran katsayılarının bilinmesi, her bir hücrede ne kadar hangi akışkan fazının olduğunun hesaplanabilmesinde olanak sağlamaktadır. [49] Başka bir deyişle akışkan hacminde bulunan “q” akışkan fazının hacim oran katsayısı ( $\alpha$ ) 1 olarak verilir;

- $\alpha = 0$ : Hücre içerisinde q akışkan fazı hiç yok
- $\alpha = 1$ : Hücre içerisi tamamen q akışkan fazı ile dolu
- $0 < \alpha < 1$ : Hücre içerisinde belirli bir oranda q akışkan fazı var

anlamına gelmektedir.

Akışkan hacmindeki her bir akışkan fazlarının hesaplanabilmesi amacıyla süreklilik denklemlerinden faydalanılmaktadır. Akışkan hacminde bulunan q ve p fazlarından q fazının hacim oranı katsayısının hesaplanabilmesi için aşağıdaki Denklem 2.6 kullanılmaktadır.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.6)$$

Denklem 2.7 deki  $\dot{m}_{pq}$  p fazından q fazına kütle transfer debisini,  $\dot{m}_{qp}$  q fazından p fazına kütle transfer debisini,  $S_{\alpha_q}$  ise kullanıcı tarafından tanımlanan sabit ya da değişken kütle kaynağını belirtmektedir.

Hacim oranı katsayısı denklemini kullanıcı tarafından belirlenen her faz için ayrı ayrı çözülmemektedir. “p” ve “q” akışkan fazlarının olduğu bir sistemde q akışkanı için Denklem 2.7 yardımıyla çözüm yapıldıysa, “p” akışkanı için aşağıda belirtilen Denklem 2.7’ye göre hesaplama yapılmaktadır.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.7)$$

Hacim oranı katsayısı denklemleri hem açık (explicit) hemde kapalı (implicit) modeller yardımıyla çözülebilir. Kapalı VOF modeller yardımıyla zamana bağlı ve zamandan bağımsız problemler çözülebilirken, Açık VOF modellerinde, kapalı modellerden farklı olarak, sadece zamana bağlı VOF problemleri çözülebilmektedir.

Tez kapsamında oluşturulan çalkalanma modeli zamana bağlı bir problem olduğundan açık VOF modeli kullanılmıştır. Açık VOF modeline ait denklem aşağıda Denklem 2.8’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V \\ & + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) \\ & = \left[ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \end{aligned} \quad (2.8)$$

- $n + 1$  : Yeni zaman adımı  
 $n$  : Bir önceki zaman adımı  
 $\alpha_{q,f}$  : q akışkan fazına ait hesaplanmış hacim oranı değeri  
 $V$  : Hücre hacmi  
 $U_f$  : Normal hıza bağlı yüzeyin hacimsel akısı

VOF metodunda hareket denklemlerinde kullanılan ve zamana bağlı değişebilen parametreler her hücrenin hacim oranı katsayılarının bulunması ile hesaplanabilmektedir. İçerisinde “q” ve “p” akışkan fazlarının olduğu bir modelde herhangi bir hücredeki k parametresine ait toplam değer hesaplanabilmesi için Denklem 2.9’dan faydalanılmaktadır.

$$k = \alpha_q k_q + (1 - \alpha_q) k_p \quad (2.9)$$

Denklem 2.9’da verilen  $k$  hücrede hesaplanmak istenen toplam parametre değeri,  $\alpha_q$  “q” fazına ait hacim oranı katsayısı,  $k_q$  “q” fazına ait parametre değeri,  $k_p$  “p” fazına ait parametre değerini temsil etmektedir.

## 2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yapısal Model

### 2.4.1 Zamana Bağlı Dinamik Model

Yapı dinamiği, yapıların yüklemeler altındaki davranışlarını çalışmaktadır. Yüklemeler yapılara iki farklı şekilde etkimektedirler. Durağan yükleme zamana bağlı olarak değişmez ve yapıya sabit hal durumunu alması için yeterli zamanı sağlar. Zamana bağlı yüklemeler ise belirlenen zaman adımıdaki anlık yüklemeler olup, yapının durağan hal almasına yeterli süreyi tanımadan bir sonraki zaman adımıdaki yüklemeyi uygulamaktadırlar. Tez kapsamında katı bir modelin sinüzoidal yer değiştirmesine bağlı olarak içerisindeki sıvının hareketi incelendiğinden, zamana bağlı sinüzoidal bir yükleme yapılacaktır. Bütün bu yüklemeler sonucunda yapıdan gerilme, gerinim ve kuvvet sonuçları hesaplanabilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan ana hareket denklemi aşağıda Denklem 2.10’da verilmiştir.

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = p(t) \quad (2.10)$$

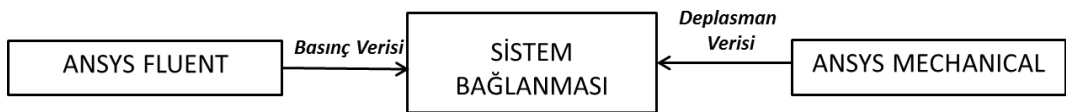
Denklem 2.10’da verilen hareket denkleminde  $[M]$  yapının kütle matrisini,  $\ddot{u}$  ivmelenme vektörünü,  $[C]$  yapının sönümlenme matrisini,  $\dot{u}$  hız vektörünü,  $[K]$  yapının stiffness matrisini,  $u$  yerdeğiştirme vektörünü,  $p(t)$  ise zamana bağlı kuvvet vektörünü temsil etmektedir.

Genel hareket denkleminin çözümü için aşağıda listelenmiş çözüm adımları kullanılmaktadır.

- Katı modeli oluşturulan yapının sonlu elemanlar sistemine düğüm noktalarının belirlenerek çevrilmesi ve bu noktaların serbestlik derecelerinin belirlenmesi.
- Sonlu elemanların kütle, sönümlenme ve stiffness matrisleri ile uygulanan kuvvetin belirlenmesi
- Dönüşüm matrislerinin oluşturulması
- Genel hareket denkleminin çözülmesi

## 2.5 Sistem Bağlanması

ANSYS Workbench içerisinde akışkan yapı etkileşiminin gerçekleştirilebilmesi için akış model çözücüsü (FLUENT) ile yapısal model çözücüsü (ANSYS Mechanical) arasında bilgi alışverişini sağlamak amacıyla Sistem Bağlanması (System Coupling) adı altında ek bir tamamlayıcı sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Aşağıda Şekil 2-9'da akışkan yapı etkileşiminin sağlanması için çağırılan ek sistemin de var olduğu akış şeması bulunmaktadır. Akış şemasına göre sistem bağlanması modülü FLUENT ve ANSYS Mechanical çözücülerinden çözüm verilerini akışkan yapı etkileşimini gerçekleştirmek amacıyla toplar ve ilgili çözücüye yönlendirir. Yakınsama her iki çözücü içinde sağlanana kadar bu işlem devam eder ve yakınsama sağlandıktan sonra bir sonraki zaman adımına geçilir.



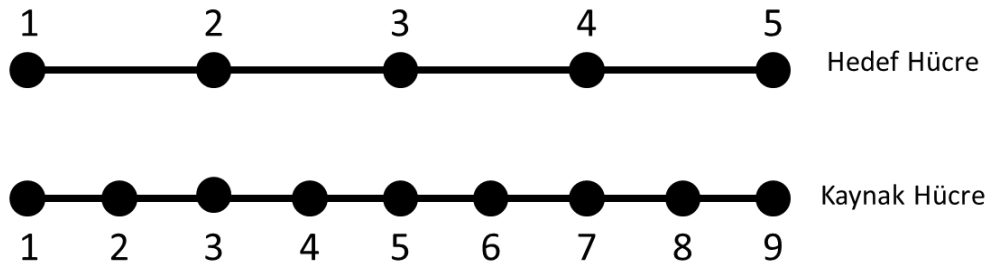
Şekil 2-9 : Sistem Bağlanması Akış Şeması

Akışkan yapı etkileşim problemlerinde diğer önemli bir bölüm de her iki fiziksel alan arasında veri transferinin düzgün bir şekilde sağlanmasıdır. Her iki fiziksel alan arasındaki etkileşim yüzeylerinde veri alışverişi, farklı model ve boyutlardaki ağ

yapısı arasında gerçekleşmektedir. Bu durum sistematik bir sürece ihtiyaç duymaktadır.

Veri transferinin ilk adımı kaynak ve hedef hücreleri eşleştirmektir. Kaynak hücreden hedef hücreye veri transfer edilmesi verinin özelliğine göre iki farklı algoritma ile yapılmaktadır.

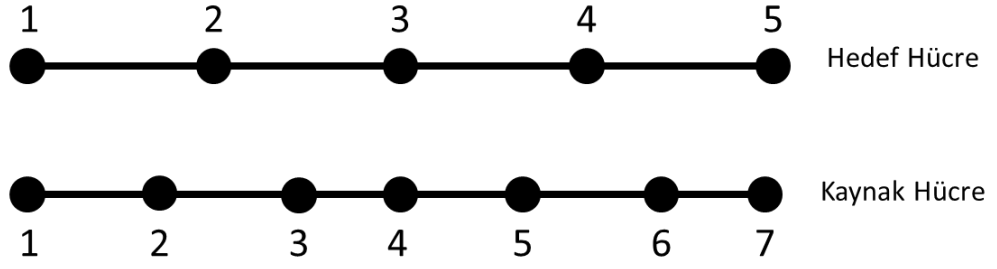
Genel ağ arayüzü adı verilen ilk algoritma veri transferi gerçekleşecek kaynak ve hedef hücreleri içeren her iki alanı eşit sayıda birleşme noktalarına böler. Bu algoritma ANSYS tarafından kuvvet, kütle ve momentum gibi korunumu sağlanan değişkenler için çözüm sırasında kayıp olmaması amacıyla kullanılmaktadır. Genel ağ arayüzüne ait algoritma Şekil 2-10'da sunulmuştur.



Şekil 2-10 : Genel Ağ Arayüzü Algoritması Akış Şeması

Akıllı buket algoritması adı verilen diğer yöntem ise öncelikle hedef hücreleri üzerinde birleşme noktaları belirler. Hedef hücreler üzerindeki birleşme noktaları belirlendikten sonra kaynak hücreler üzerinde daha önceden belirlenen birleşme noktalarına göre birleşme noktaları belirlenir. Akıllı buket algoritması ile kaynak ve hedef hücreleri içeren veri alışverişinin yapılacağı yüzeylerde birbirine eşleşme olmayabilir. Kaynak hücrelerde birden fazla birleşme noktası hedef hücrelerdeki bir birleşme noktası ile veri alışverişi yapabilir. Akıllı buket algoritması deplasman, sıcaklık ve gerilme gibi korunumu olmayan değişkenler için kullanılmaktadır. Aşağıda Şekil 2-11'de akıllı buket algoritmasına ait akış şeması verilmiştir.





Şekil 2-11 : Akıllı Buket Algoritması Akış Şeması

### **3. SIVILI TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN SAYISAL MODELLENMESİ**

Yapılan tez kapsamında ASTS'lerin, harmonik yükleme altındaki yapıların salınımlarına etkisi incelenmektedir. ASTS'lerin Bölüm 2.1'de anlatılan çalışma prensiplerine bakıldığında, kap içerisinde bulunan bir sıvının dış kuvvetler altında çalkalanması ile bağlı olduğu yapının salınımlarını azaltması esasına dayandığı anlaşılmaktadır. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin performansının içerisindeki sıvının çalkalanma derecesi ile doğrudan bağlantılı olması nedeniyle, problem çözümü için öncelikle herhangi bir kap içerisindeki sıvının dış kuvvetler karşısındaki çalkalanmasının doğru modellenmesi gereklidir. Bu kapsamda problem çözümünün bu aşamasında öncelikle literatürde bulunan deneysel ve sayısal çalkalanma sonuçları ile "ANSYS WORKBENCH" ticari modelleme programı yardımıyla ve "Çift Yönlü Etkileşim" özelliği kullanılarak hazırlanan modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

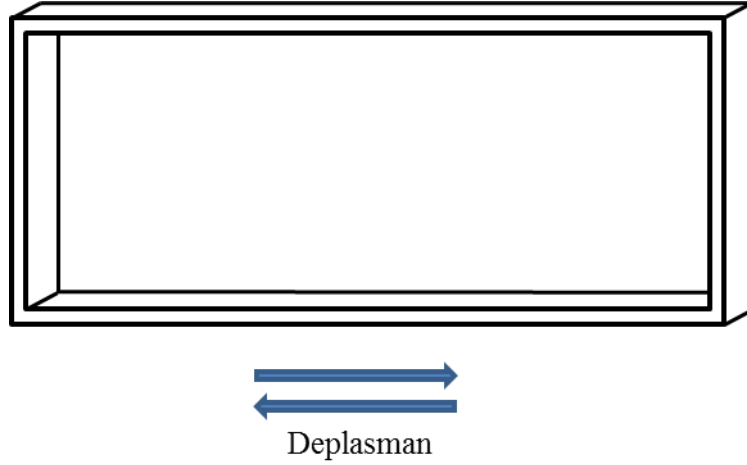
#### **3.1 Çalkalanma Modellenmesi**

Literatürde bulunan çalkalanma analizlerinde, genellikle akışkan hacminin kopma veya birleşme olduğu zamanlarda serbest yüzey resimlerinin deneysel çalışmalarda elde edilen fotoğraflar ile karşılaştırarak çözümün doğruluğunu anlamaya çalışmışlardır. Çalışma kapsamında literatürde çalışılmış, sığ su şiddetli çalkalanma, derin su şiddetli olmayan çalkalanma ve derin su şiddetli çalkalanma karakteristiğine sahip üç farklı problem serbest yüzey hareketlerinin, sığ su çalkalanma özelliğine sahip bir diğer problem ise farklı çalkalanma frekanslarında, tank yüzeylerine etkileyen boyutsuz kuvvetlerin belirlenmesi amacıyla incelenmiş ve çalışmalarda yer alan deneysel verilerle karşılaştırmalar yapılmıştır.

##### **3.1.1 Yapısal Model**

ANSYS WORKBENCH ticari yazılım programı ile akışkan yapı etkileşimi özelliği kullanarak çalkalanma problemlerinin modellenmesi amacıyla daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere yapısal ve akışkanlar dinamiği çözücü algoritmalarından beraber yararlanılmalıdır. Problem kapsamında çalkalanmanın modellenmesi incelendiğinden yapısal modelde herhangi bir deformasyon

istenmemektedir. Bu sebeple yapısal modelde oluşturulan tank çerçevesinin rijit olması önemlidir. Tank çerçevesinin rijitliğinin sağlanabilmesi amacıyla çerçeve malzemesi, yapı çeliği olarak seçilmiş, çerçeve üzerine Şekil 3-1 de belirtilen deplasman sınır koşulu uygulanmış ve analizler buna göre yapılmıştır.



Şekil 3-1 : Yapısal Model Sınır Koşulları

### 3.1.2 Akışkan Model

Akışkan hacim modellemesi kapsamında tank içerisindeki sıvının çalkalanma hareketi incelenmiştir. Çalkalanma sırasında serbest yüzey hareketinin, akışkan hacmindeki kopmalar ve birleşmelerin belirlenmesi amacıyla çok fazlı modelleme algoritmalarından Volume of Fluid (VOF) metodu ile çözümler gerçekleştirilecektir. Volume of Fluid metoduna ait genel bilgi, hacim fraksiyon katsayısı ve kullanılan çözüm algoritmaları Bölüm 2.2 de verilmiştir.

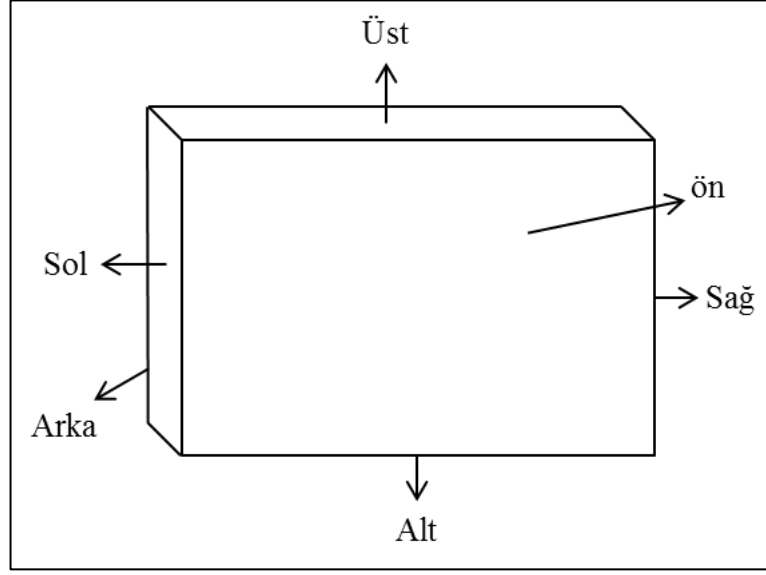
Problem kapsamında akışkan çözüm hacmi içerisinde herhangi bir enerji geçişi veya enerji kaynağı olmadığından çözüm algoritmasında enerji denklemleri kullanılmamıştır.

VOF çok fazlı metodunda akışkan hacmi içerisinde en az iki farklı akışkan faz bulunması esastır. Problem kapsamında akışkan çözüm hacmi içerisinde hava ve su olmak üzere iki farklı akışkan fazı tanımlanmış ve tanımlanan akışkanlara ait malzeme özellikleri aşağıda Çizelge 3-1 de verilmiştir.

Çizelge 3-1 : Akışkan Fazlarına ait Malzeme Özellikleri

<b>Akışkan Fazı</b>	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dinamik Viskosite (kg/ms)</b>
Hava	1,225	1,789 10 <sup>-5</sup>
Su	998,2	1,003 10 <sup>-3</sup>

Çözüm kapsamında dikdörtgenler prizması şeklinde bir tank içerisindeki sıvının dış etkiler karşısında çalkalanması modellenmektedir. Akışkan çözüm hacmine ait sınır yüzeyleri aşağıda Şekil 3-2’de verilmiştir.



Şekil 3-2 : Akışkan Çözüm Hacmi Sınır Yüzeyleri

Yukarıdaki şekilde sol, alt, sağ ve sol yüzeyler çift yönlü etkileşimde akışkan ile yapısal model arasında veri alışverişinin sağlandığı yüzeylerdir. Şekil 3-2 de bulunan kap yüzeylerine ait sınır koşulları Çizelge 3-2’de verilmiştir.

Çizelge 3-2 : Kap Yüzeylerine Ait Sınır Koşulları

<b>Sınır Yüzeyi</b>	<b>Sınır Koşulu Tipi</b>
Sağ	Duvar
Alt	Duvar
Sol	Duvar
Üst	Duvar
Ön	Simetri
Arka	Simetri

Çalkalanma modellenmesinin çift yönlü etkileşim kullanılarak yapılması nedeni ile yapısal ve akışkan çözücü modüllerinin her zaman adımında veri paylaşımı sağlanması gerekmektedir. Akışkan çözüm hacmine sınır koşulları yapısal çözüm modelinde hesaplanan deplasman verileri ile sağlanmaktadır. Dolayısı ile akışkan çözüm hacminde zamana bağlı olarak yerdeğiştirmeler gözlemlenmektedir. Bu durum çözüm hacminde oluşturulan çözüm ağını etkilemekte ve çözüm ağının, her zaman adımında yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle akışkan çözücü hacminde dinamik çözüm ağı özelliğinden yararlanılmıştır.

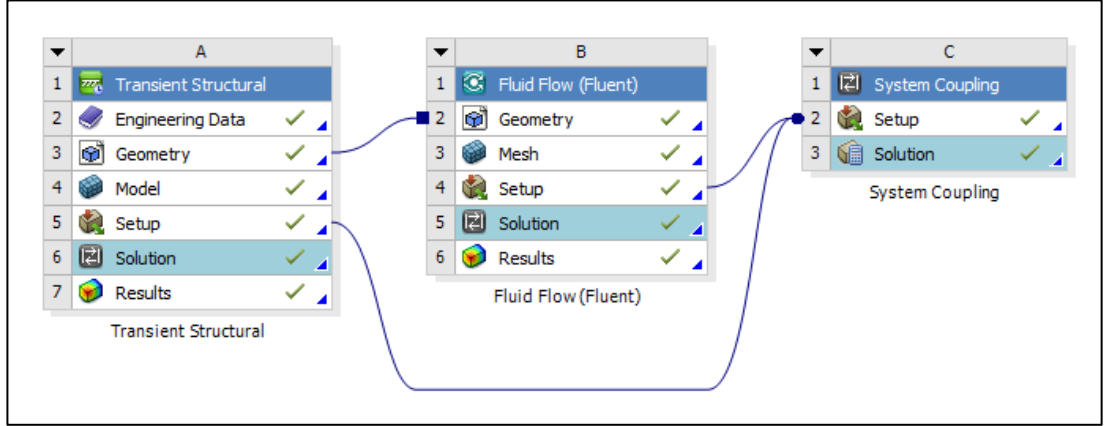
Hazırlanan modelin çözüm basamağında sayısal hataların en aza indirgenmesi için zamansal ve boyutsal ayrıştırma yöntemlerine ait parametrelerin doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Zamansal ve boyutsal ayrıştırma yöntemlerine ait seçilmiş algoritmalar Çizelge 3-3 'de verilmiştir.

Çizelge 3-3 : Akışkan Model Zamansal ve Boyutsal Ayrıştırma Algoritmalarına Ait Özellikler

<b>Basınç-Hız eşleşme</b>	PISO
<b>Zamansal Ayrıştırma</b>	First Order İmplicit
<b>Uzaysal Ayrıştırma</b>	
Basınç	PRESTO
Momentum	Second Order Upwind
Hacim Fraksiyonu	Geo-Reconstruct
Gradient	Least Squares Cell Based

### 3.1.3 Sistem Bağlanması

Sistem bağlanması modülü, çift yönlü etkileşim problemlerinde her iki modülden diğerine verilerin sağlıklı bir biçimde aktarılmasından sorumludur. Sistem bağlanması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.3 de verilmiştir. Problem kapsamında çift yönlü etkileşim kullanılarak tank içerisindeki sıvının çalkalanma olayının incelenmesi için oluşturulan modele ait ANSYS WORKBENCH görünümü aşağıda Şekil 3-3’de verilmiştir.



Şekil 3-3 : Çift Yönlü Akışkan Yapı Etkileşim Modeli

Şekil 3-3'e baktığımızda yapısal ve akışkan çözücü modellerine ait kurulum dosyaları ile sistem bağlanması modülü arasında bağlantı kurulmuş olup, bu bağlantı sayesinde yapısal ve akışkan çözüm hacimlerinden birbirlerine veri aktarımı ve veri aktarımı yapacak yüzeylerin belirlenmesi sağlanmaktadır.

Sistem bağlanması modülü içerisinde zaman adımı, çözüm bitiş zamanı, minimum ve maximum iterasyon sayısı ve çift yönlü etkileşim yüzeylerinin belirlenmesi gibi ayarlamalar mevcuttur. Zaman adımı ve çözüm bitiş zamanı belirlenmesi sırasında, akışkan ve yapısal çözüm içerisinde birbirlerine uygun biçimde belirlenmiş parametreler sistem bağlanması içinde belirlenmelidir. Aksi halde veri paylaşımı sağlıklı bir şekilde gerçekleşemez. Minimum ve maksimum iterasyon sayısı akışkan ve yapısal çözücülerde belirlenen iterasyon sayılarının dışında veri aktarımı yapıldıktan sonra her iki çözücü için yakınsama sağlamak amacıyla belirlenmelidir. Belirlenen iterasyon sayıları ile akışkan ve yapısal çözücüler kendi içlerinde yaptıkları iterasyonlara ek olarak sistem bağlanması iterasyonları da yapmaktadır. Çift yönlü etkileşim yüzeylerinin belirlenmesi sırasında etkileşim yapacak yüzeyler karşılıklı olarak belirtilmelidir. Çift yönlü etkileşim sırasında her bir yüzey eşleştirmesinde deplasman ve kuvvet veri aktarım yolu olmak üzere iki farklı yol belirlenmektedir.



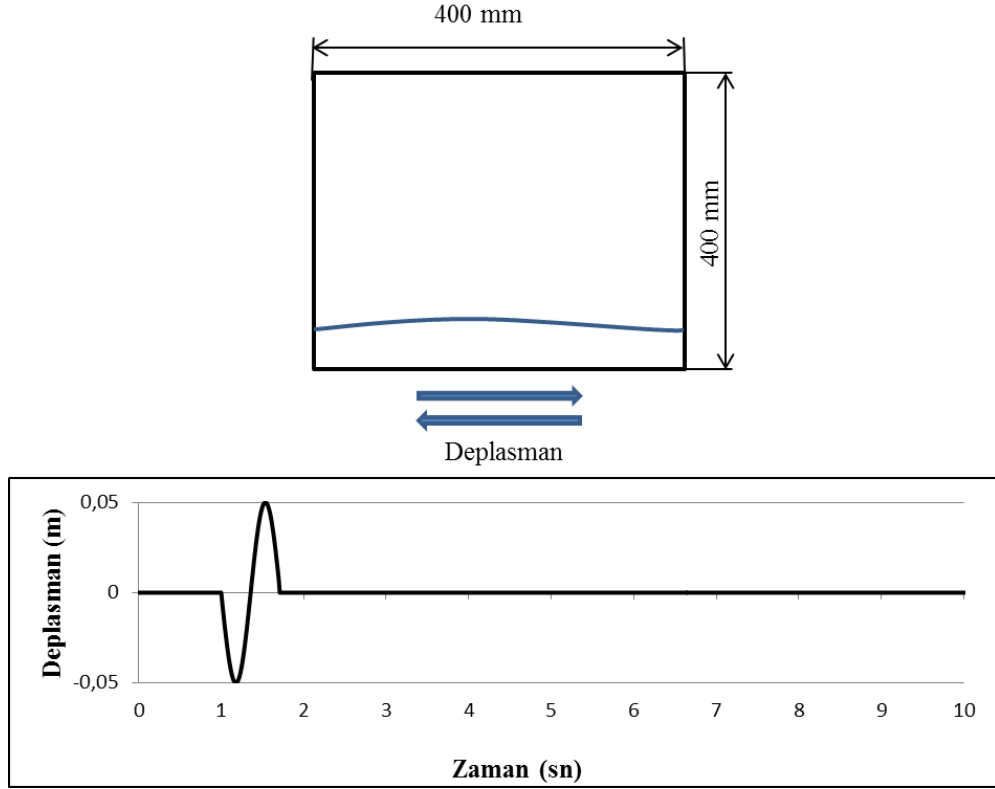
### **3.1.4 Çalkalanma Modellemesi Karşılaştırmaları**

Tez kapsamında çalkalanma modeli karşılaştırmaları iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım çözümlerden alınan serbest yüzey hareketlerinin anlık resimlenmesi ile yapılmış olup, serbest yüzey şekillerinin birbirlerine benzerliği incelenmiştir. Serbest yüzey hareketi karşılaştırmasında ilk olarak sığ su-yüksek genlikli çalkalanma, ikinci olarak derin su-düşük genlikli çalkalanma ve son olarak derin su-yüksek genlikli çalkalanma olayları incelenmiştir. İkinci bölümde ise çalkalanma olayı sırasında çalkalanan kap içerisindeki suyun, kap duvarlarına çalkalanma eksenine boyunca etkideği toplam kuvvetler karşılaştırılmıştır.

#### **3.1.4.1 Sığ Su-Yüksek Genlikli Çalkalanma Serbest Yüzey Karşılaştırması**

Tez kapsamında ilk olarak dikdörtgenler prizması şeklindeki bir su tankı ile sığ su şiddetli çalkalanma olayı incelenmiştir. Karşılaştırma verisi olarak literatürde Marsh ve ark. tarafından çalışılan [43] Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) metodu ile sayısal modelleme yapılmış bir durum ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, tank içerisindeki su hacminin, çözüm hacmine oranı düşük olan bir durum, yüksek genlikte ve tank içerisindeki suyun çalkalanma rezonans frekansında çalkalanması sağlanarak tank içerisindeki suyun serbest yüzey hareketleri belirlenmiştir.

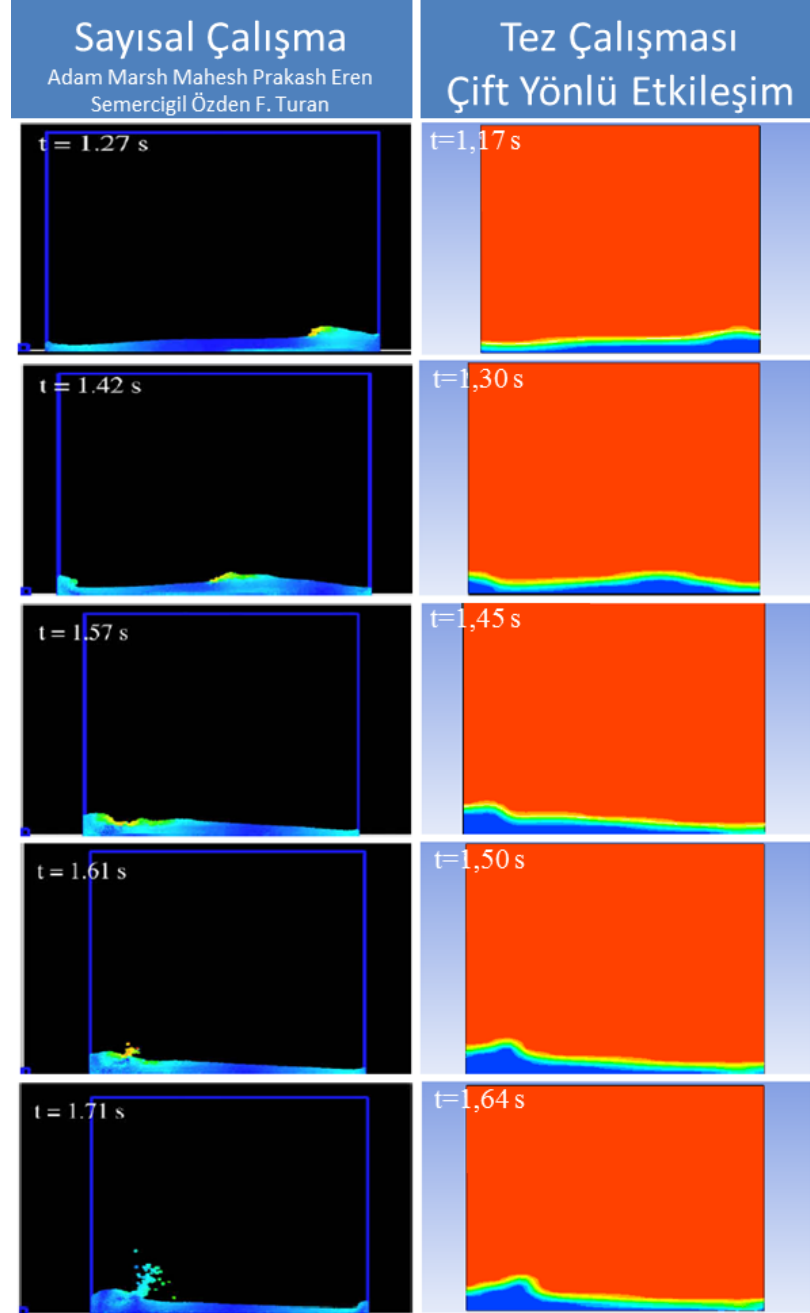
Çalışmada kullanılan tank geometrisine ve tanka uygulanan dış kuvvete ait bilgiler aşağıda Şekil 3-4'te verilmiştir.



Şekil 3-4 : Sığ Su Şiddetli Çalkalanma Tank Geometrisi ve Deplasman Verisi

Çalışmada 400 mm genişliğinde ve 400 mm yüksekliğinde bir tank içerisine 20 mm yüksekliğinde su konularak 1.4 Hz frekans ile sadece 1 çevrim sinüzoidal hareket verilmiş ve 10 saniye boyunca tank içerisindeki suyun, farklı çözüm zamanlarındaki serbest yüzey görüntüsü alınarak çalkalanma sırasında meydana gelen kopmalar ve birleşmeler gözlemlenmeye çalışılmıştır. Deplasman sınır koşulunda kap içerisindeki suyun, çözümleme başlangıcında sıfır enerjiye sahip olması istendiğinden, yerdeğiştirme girdisinin başlamasından önce 1 saniye kadar beklenmiştir. Çalkalanma olayının SPH yöntemi ile modellenmesinde iki boyutlu geometri kullanılmış, akışkan yapı etkileşimi yöntemi ile hazırlanan modelde ise, model algoritmasının iki boyutlu çözüme izin vermemesi nedeniyle iki boyutlu çalkalanma varsayımı yapılabilmesi için tank geometrisine ve akışkan hacmine küçük bir derinlik verilmiştir. Ön ve arka yüzeylerde simetri sınır şartı kullanılmıştır.

Oluşturulan modelde tank çerçevesi üzerine Şekil 3-4'te bulunan deplasman sınır koşulu uygulanması ile sığ su şiddetli çalkalanma çözümünden elde edilen serbest yüzey hareketi sonuçları Şekil 3-5'te verilmiştir.

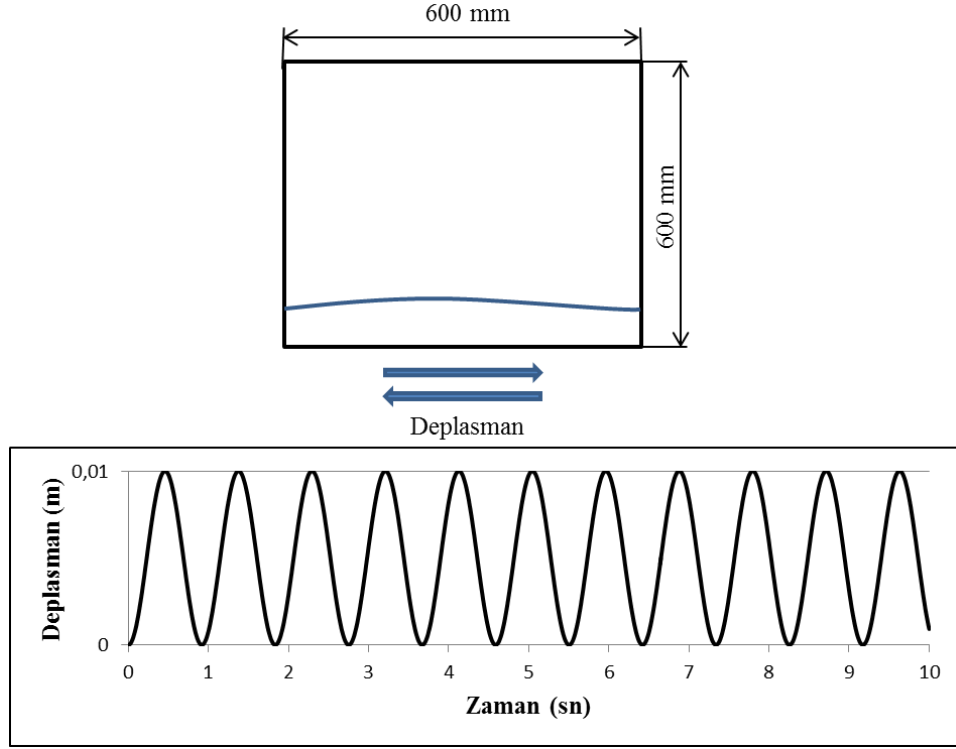


Şekil 3-5 : Sığ Su Şiddetli Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri

Şekil 3-5’de farklı çözüm zamanları için serbest yüzeye ait resimlere bakıldığında SPH yönteminden alınan serbest yüzey şekilleri ile akışkan yapı etkileşimi yardımıyla VOF metodundan alınan serbest yüzey şekillerinin birbirlerine oldukça benzemekte olduğu görülmektedir. Serbest yüzey şekillerinin alındığı çözüm zamanları karşılaştırıldığında ise zamanlar arasında yaklaşık 0.1 saniye fark vardır. Çözümler arasında küçük zaman farkları her iki çözümün de sayısal olduğu göz önüne alınırca ihmal edilebilecek düzeydedir.

#### **3.1.4.2 Derin Su-Düşük Genlikli Çalkalanma Serbest Yüzey Karşılaştırması**

Tez kapsamında çalkalanma modeli serbest yüzey şekli karşılaştırmasında ikinci olarak derin su ve şiddetli olmayan çalkalanma durumu incelenmiştir. Çalışmada dikdörtgenler prizması şeklindeki bir tank içerisine bir önceki çalışmadakinin aksine toplam akış hacmine oranla daha fazla su konulmuş, tank geometrisi üzerine düşük genlikte deplasman sınır koşulu uygulanarak, derin su-şiddetli olmayan çalkalanma olayının oluşması hedeflenmiştir. Mimi [50] tarafından deneysel olarak çalışılan durumda, çalkalanma sırasında akışkan hacmindeki sıvının serbest yüzey hareketlerinin incelenmesi için Bölüm 3.1’de anlatıldığı üzere çift yönlü etkileşim kullanılarak ve akış çözüm hacminde VOF metodu kullanılarak model hazırlanmıştır. Hazırlanan modele ait geometrik bilgiler ve katı modele uygulanan deplasman sınır koşulu Şekil 3-6’da verilmiştir. Deneysel çalışma sırasında tank geometrisine ait üçüncü boyut, derinlik ihmal edilebilecek düzeyde olup iki boyutlu olarak düşünülebilir. VOF metodu ile oluşturulan modelde de deneysel çalışmaya benzer bir şekilde çözüm hacmine ve tank geometrisine ihmal edilebilecek kadar küçük bir derinlik verilmiştir.



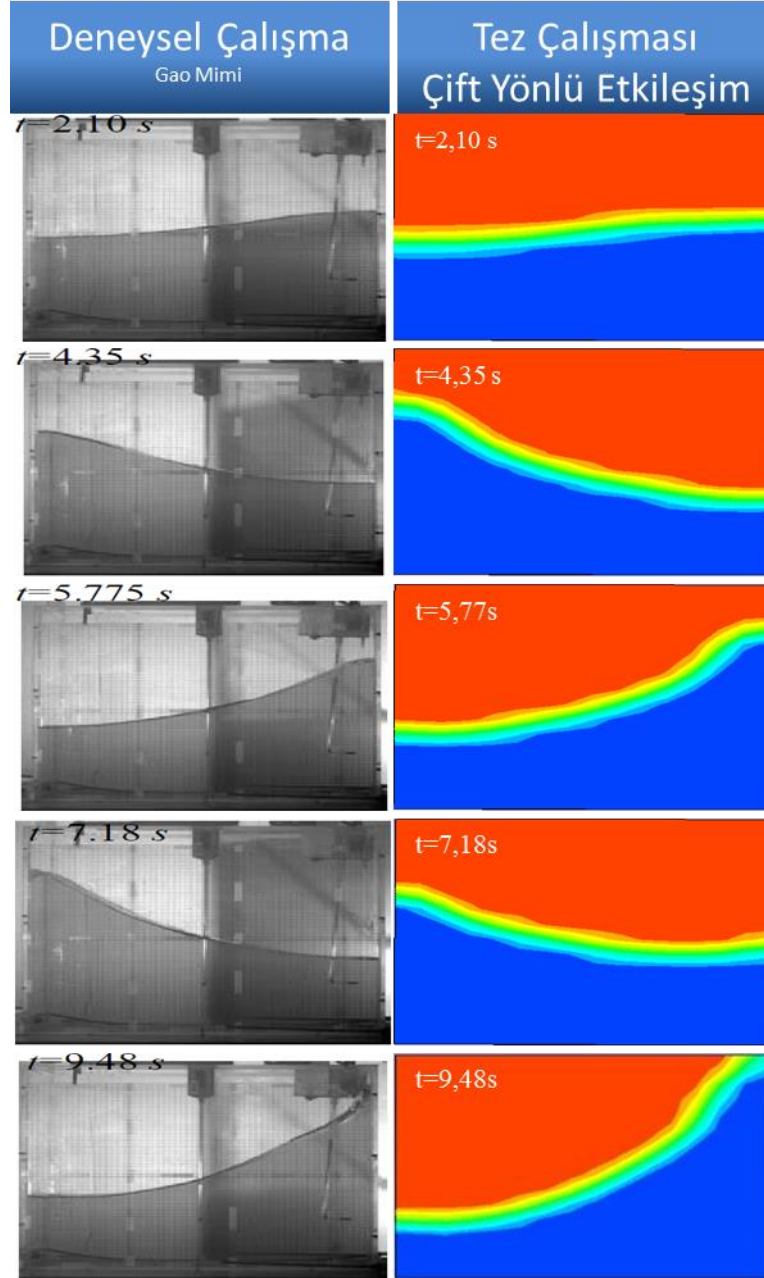
Şekil 3-6 : Derin Su Şiddetli Olmayan Çalkalanma Geometri ve Deplasman Verisi

Çalışmada 600 mm genişliğinde ve 600 mm yüksekliğinde bir su tankı içerisine 300 mm yüksekliğinde su konularak 1.1 Hz frekans altında Denklem 3.1’de verilen fonksiyona göre deplasman sınır koşulu uygulanmıştır.

$$D(t) = 0.01 (1 - \text{Cos}(2\pi ft)) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $D(t)$  kaba uygulanan deplasman sınır koşulu fonksiyonu,  $f$  tank çalkalanma frekansı ve  $t$  zamanı temsil etmektedir.

Referans çalışma kapsamında çalkalanma sırasında yüksek hızlı kamera ile tank içerisindeki suyun çalkalanması kayıt altına alınmış ve çalkalanma olayı sırasında suyun serbest yüzey şekli incelenmiştir. Karşılaştırmadan elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 3-7’de verilmiştir.



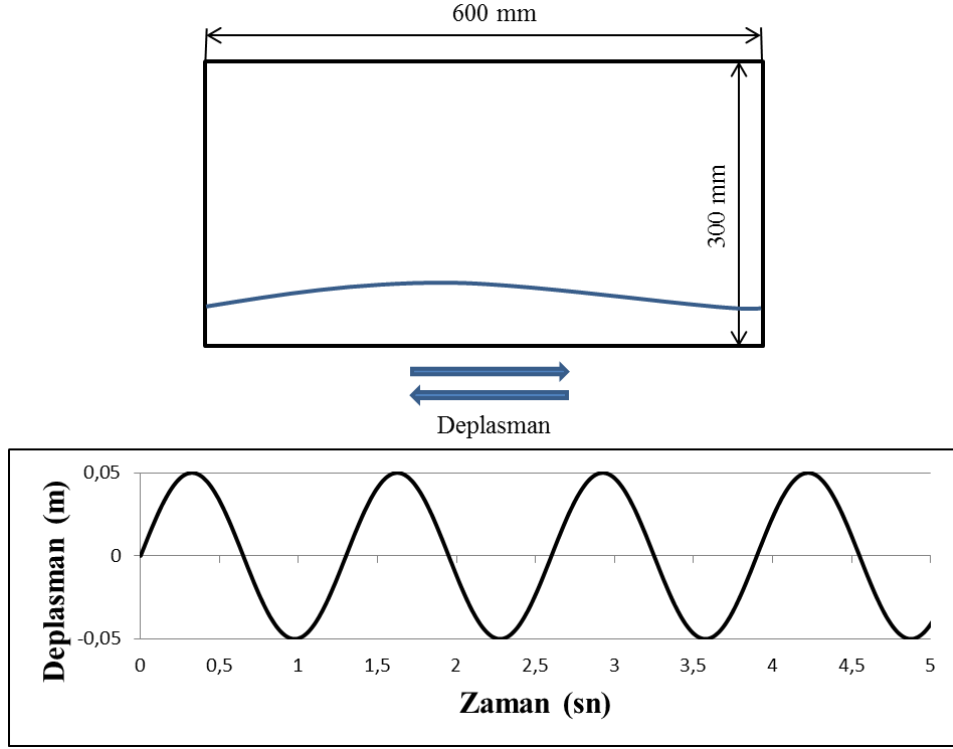
Şekil 3-7 : Derin Su Şiddetli Olmayan Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri

Şekil 3-7’de farklı çözüm zamanlarında, derin su-şiddetli olmayan çalkalanma serbest yüzey şekillerine bakıldığında deneysel çalışma ile çift yönlü akışkan yapı

etkileşiminden elde edilen sonuçların aynı çözüm zamanları için birbirlerine birebir benzerliği söz konusudur. Böylece çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile hazırlanan modelin derin su-şiddetli olmayan çalkalanma problemlerindeki başarısı kanıtlanmış olmaktadır.

#### **3.1.4.3 Derin Su-Yüksek Genlikli Çalkalanma Serbest Yüzey Karşılaştırması**

Serbest yüzey hareketi karşılaştırmalarında son adım olarak derin su-şiddetli çalkalanma durumu ele alınacaktır. Kishev ve ark. [41] hazırladıkları deneysel çalışmada, dikdörtgenler prizması şeklindeki su tankına yüksek genliklerde deplasman sınır koşulu uygulanarak yüksek genlikli çalkalanma oluşması hedeflenmiş ve kurdukları deney düzeneği yardımıyla akışkan hacmi içerisindeki serbest yüzey hareketini incelemiştir. Tez kapsamında oluşturulan modelin çalkalanmanın şiddeti ile birlikte akışkan hacminde bulunan su fazından kopmaların fazla olması ile birlikte model içerisinde herhangi bir kütle kaybı veya kütle artışı olup olmayacağı anlaşılacak istenmiştir. Çalışma kapsamında modellenen su tankına ait geometrik bilgiler ve tank geometrisine uygulanan deplasman sınır koşuluna ait deplasman-zaman grafiği aşağıda Şekil 3-8’de verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında su tankı geometrisinde üçüncü boyut, derinlik ihmal edilebilecek kadar küçük alınmış ve iki boyutlu çalkalanma örneklenmiştir. VOF metodu ile oluşturulan modelde de aynı şekilde tank geometrisine ve akışkan hacmine üçüncü boyut, derinlik ihmal edilebilecek kadar küçük alınmış ve çalışma iki boyuta indirgenmiştir.



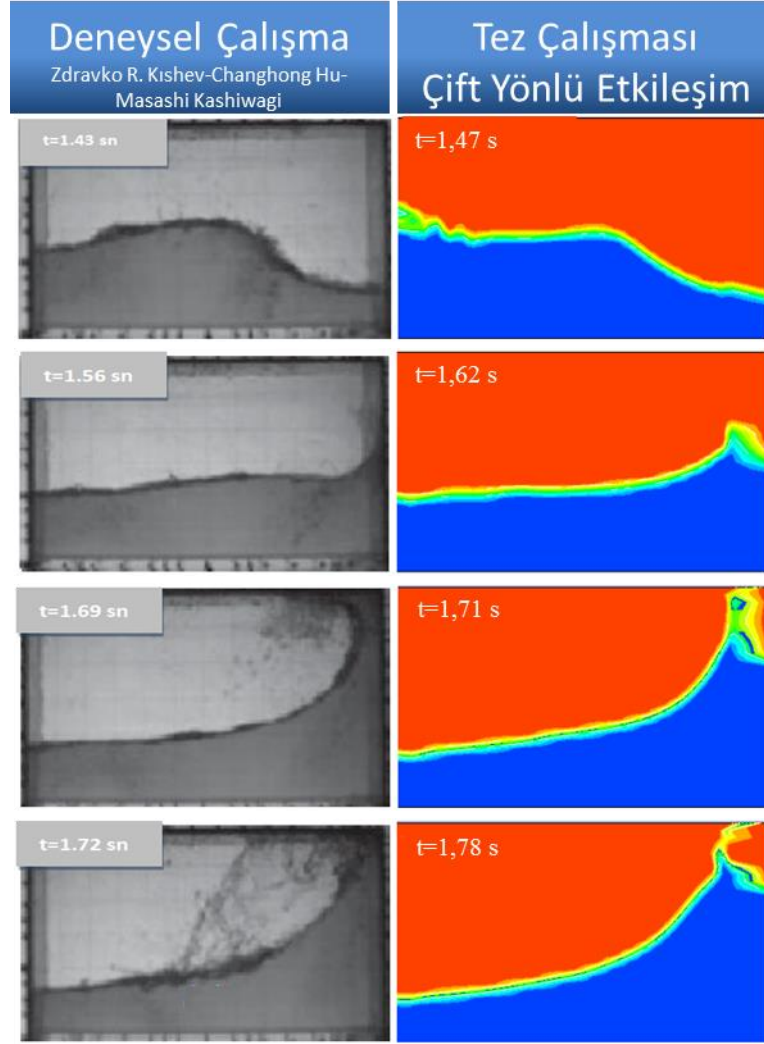
Şekil 3-8 : Derin Su Şiddetli Çalkalanma Geometri ve Deplasman Verisi

Çalışmada 600 mm genişliğinde ve 300 mm yüksekliğinde bir su tankı içerisine 120 mm yüksekliğinde su konularak 0.77 Hz frekans altında Denklem 3.2’de verilen fonksiyona göre deplasman sınır koşulu uygulanmıştır.

$$D(t) = 0.05 \sin(2\pi ft) \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de verilen  $D(t)$  tank geometrisine uygulanan deplasman sınır koşulu fonksiyonunu,  $f$  tank çalkalanma frekansını ve  $t$  zamanı temsil etmektedir. Karşılaştırmadan elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 3-9’da verilmiştir.





Şekil 3-9 : Derin Su Şiddetli Çalkalanma Serbest Yüzey Şekilleri

Şekil 3-9'a bakıldığında farklı çözüm zamanları için deneysel ve çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yöntemiyle hazırlanmış modelden elde edilen serbest yüzey şekilleri karşılaştırıldığında, en fazla 0,06 saniye fark ile benzer serbest yüzey şekillerinin elde edildiği gözlemlenmektedir. Böylece çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yöntemi ile hazırlanan modelin derin su-şiddetli çalkalanma problemlerindeki başarısı kanıtlanmış olmaktadır.

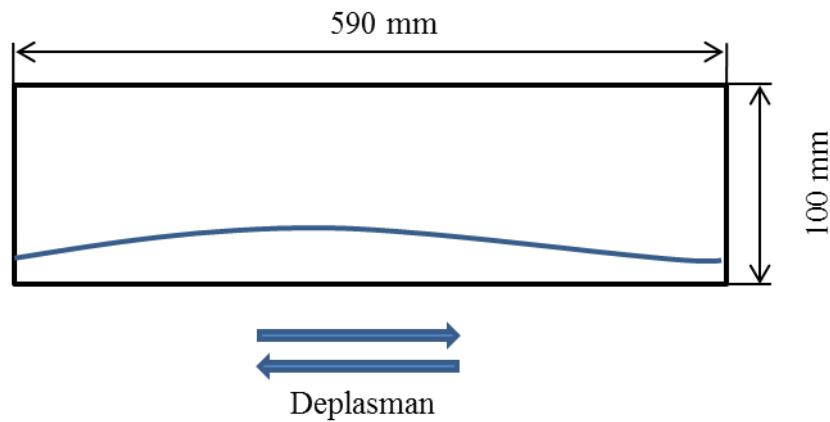
Çalkalanma modeli doğrulamasında ilk adım olan serbest yüzey hareketi karşılaştırmalarında literatürde bulunan sayısal ve deneysel çalışmalarla

karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar sırasında benzer serbest yüzey şeklinin yakalandığı çözüm zamanları arasında deneysel çalışmalar 0.5 sn derecesinde hatalar gözlemlenmiş, fakat serbest yüzey hareketinde fark tespit edilememiştir. Bu durum sonucunda çift yönlü etkileşim algoritması ile oluşturulan çalkalanma modelinden oldukça başarılı sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

ASTS'lerin çalışma prensibine göre, tank içerisinde çalkalanan suyun tank duvarlarına uyguladığı kuvvetin binaya etkiyen dış yüklemeler ile ters fazda olması ile birlikte binanın deformasyonunda iyileştirme yapması beklenmektedir. Bu durumda tank içerisinde çalkalanan sıvının serbest yüzey hareketinden çok, tank duvarlarına uyguladığı kuvvetlerin şiddeti ve periyodu önemlidir.

#### 3.1.4.4 Kap Duvarlarına Etkiyen Kuvvet Karşılaştırması

Çalkalanma modeli doğrulama ikinci adımında çalkalanma sırasında tank geometrisi üzerine sıvı tarafından uygulanan kuvvet incelenmiştir. Reed ve ark. [42] hazırladıkları deneysel çalışmada, dikdörtgenler prizması şeklindeki su tankı, farklı çalkalanma frekanslarında farklı su yükseklikleri ile suyun tank geometrisi üzerine uyguladığı kuvvet kayıt altına alınmış ve boyutsuzlaştırılmıştır. Çalışma kapsamında tank içerisindeki su yüksekliğinin 30 mm olduğu çalkalama olayı seçilmiş olup seçilen durum için tank geometrisine ait boyut bilgileri Şekil 3-10'da verilmiştir.



Şekil 3-10 : Kuvvet Karşılaştırması Tank Geometrisi

Çalışmada 590 mm genişliğinde, 100 mm yüksekliğinde ve 10 mm derinliğinde bir su tankına farklı frekanslarda ve farklı genliklerde deplasman sınır koşulu uygulanarak ve çift yönlü etkileşim kullanılarak çalkalanma modeli oluşturulmuş ve çözümler tamamlanmıştır.

Tank geometrisi üzerine uygulanan deplasman sınır koşulu aşağıda Denklem 3.3'te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D(t) = A \sin(2\pi f_w \beta t) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te,  $D(t)$  tank geometrine uygulanan deplasman sınır koşulu fonksiyonunu,  $A$  tank çalkalanma genliğini,  $f_w$  tank içerisindeki suyun çalkalanma rezonans frekansını,  $\beta$  tank geometrisine uygulanan frekansın, tank içerisindeki 0.458 Hz olan suyun çalkalanma rezonans frekansına oranını ve  $t$  zamanı temsil etmektedir.

Tank geometrisine uygulanan deplasman sınır koşuluna ait farklı genlik ve frekans parametreleri Çizelge 3-4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3-4 : Sınır Koşuluna Ait Parametreler

Çalkalanma Genliği ( $A$ )	Frekans Oranı ( $\beta$ )
0,01 m	1
	1,22
0,04 m	1
	1,55

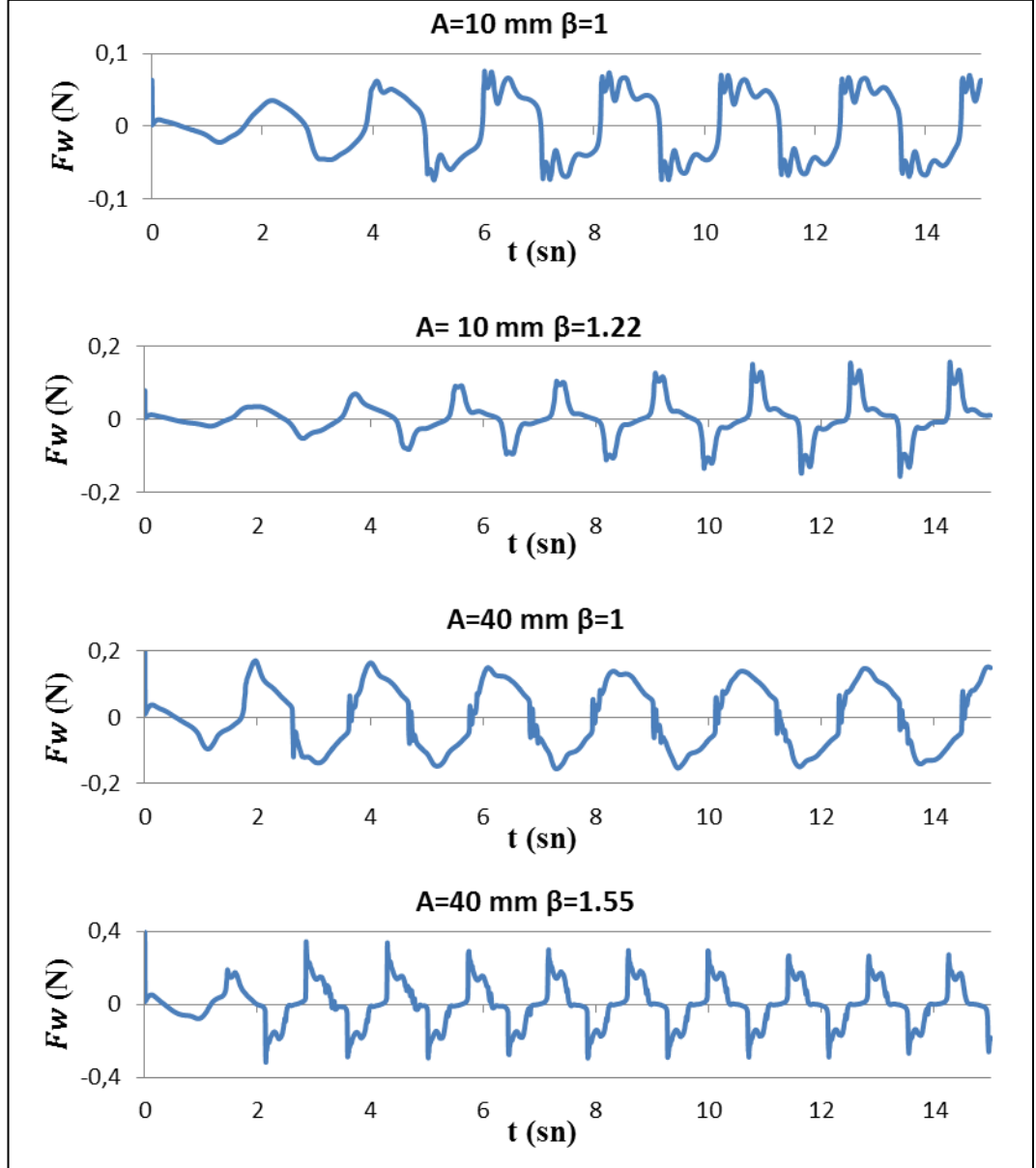
Çift yönlü etkileşim yolu ile oluşturulan çalkalanma modelinde su tankı geometrisinin ait üçüncü boyutuna ait derinlik çözüm süresi düşünülerek 10 mm olarak alınmış olup bu durum deneysel çalışmada 335 mm dir. Elde edilen kuvvet verilerinin karşılaştırılması amacıyla boyutsuzlaştırılmış kuvvet formülasyonundan yardım alınmıştır. Boyutsuzlaştırılmış kuvvet denklemi Denklem 3.4'te verilmiştir.

$$F'_w = \frac{F_w}{m_w \omega^2 A} \quad (3.4)$$

Boyutsuzlaştırılmış kuvvet denkleminde  $F'_w$  tank duvarlarına çalkalanma eksenini boyunca etkileyen boyutsuzlaştırılmış kuvveti,  $F_w$  tank duvarlarına çalkalanma eksenini boyunca etkileyen net kuvveti,  $m_w$  tank içerisindeki toplam sıvı kütlesini,  $\omega$  çalkalanma açısal frekansını ve  $A$  çalkalanma genliğini temsil etmektedir.

Çizelge 3-4'de verilen farklı genlik ve frekans parametreleri ile oluşturulan deplasman sınır koşulu uygulanarak, deneysel ve çift yönlü etkileşim özelliği

yardımıyla oluşturulan modellerden elde edilen tank duvarlarına uygulanan kuvvet verilerine ait grafikler Şekil 3-11’de verilmiştir.

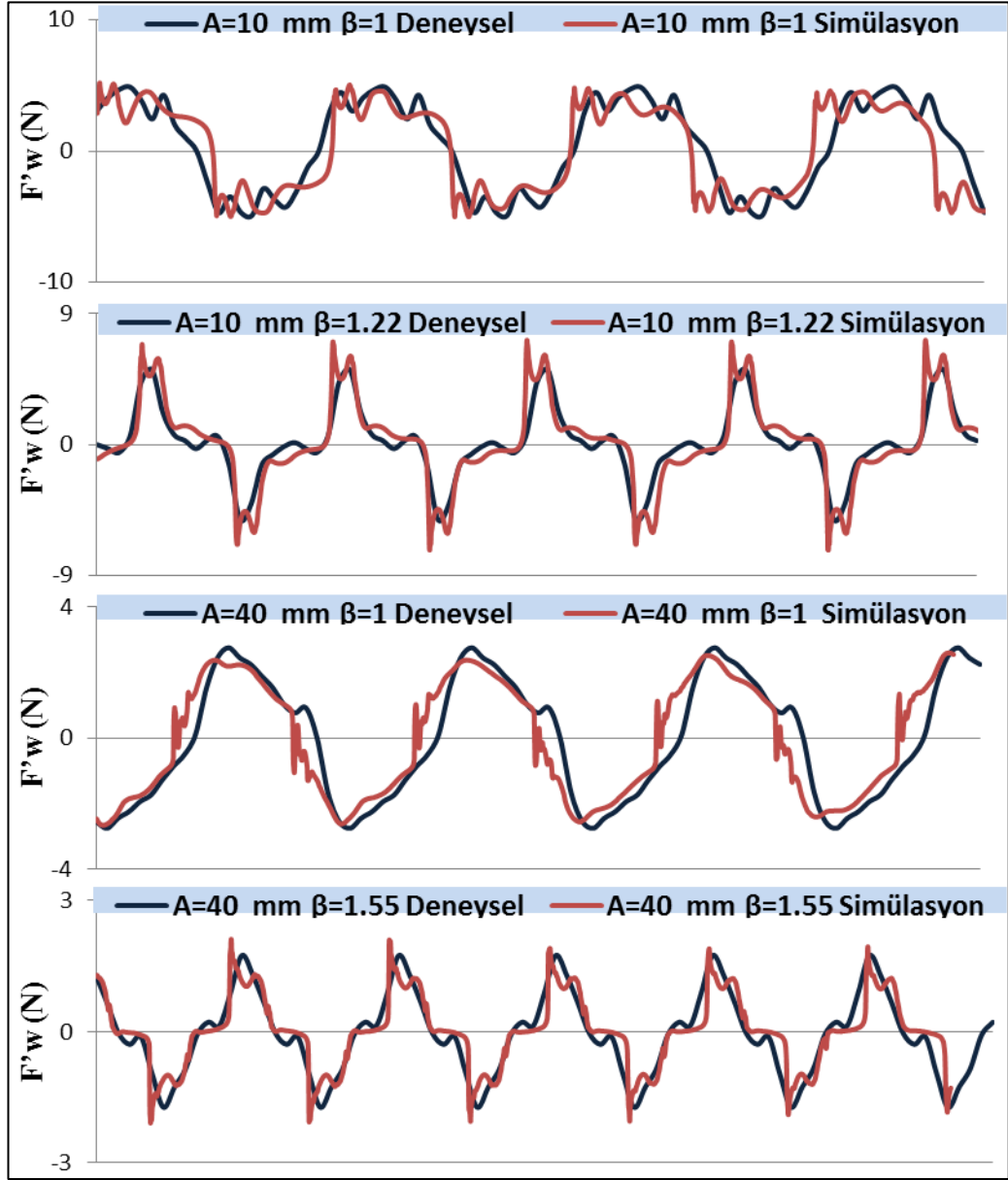


Şekil 3-11: Tank Duvarına Etkiyen Net Kuvvet Verileri

Şekil 3-11’de verilen grafiklere bakıldığında kap geometrisi üzerine uygulanan deplasman sınır koşuluna ait genlik ve frekans değerinin artmasıyla birlikte kap

duvarına etkiyen kuvvetlerde de artış gözlemlenmektedir. Böylece kap içerisindeki çalkalanma olayının şiddetinin artması ile birlikte kap içerisindeki sıvının kap duvarlarına uyguladığı kuvvetin de arttığı söylenebilir.

Şekil 3-11’de verilen grafiklerde bahsi geçen tank duvarına etkiyen kuvvet boyutsuzlandırılmış kuvvet değildir. Bu sebeple elde edilen bu kuvvet verileri deneysel çalışmalar ile büyüklük olarak karşılaştırılmaz. Denklem 3-2’de verilen bağıntıya göre yapılan hesaplama sonucunda elde edilen kuvvetler boyutsuzlaştırılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Deneysel çalışma ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen boyutsuz kuvvetlere ait karşılaştırma Şekil 3-12’de verilmiştir.



Şekil 3-12 : Boyutsuzlaştırılmış Kuvvet Karşılaştırması

Şekil 3-12’de hem deneysel çalışmada hemde oluşturulan modelden elde edilen verilerde sistemin durağan hale gelmesi beklenmiş olup, grafikteki değerler durağan haldeki boyutsuzlaştırılmış kuvvetleri temsil etmektedir. Grafiklere bakıldığında her iki genlik ve farklı frekanslarda boyuttan bağımsız kuvvetlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Çalkalanma modellemesinde çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yardımıyla oluşturulan modelde farklı çalkalanma karakteristiğine sahip durumlar için serbest yüzey hareketi ile farklı genlik ve farklı frekanslarda tank duvarına etkiyen kuvvet karşılaştırmaları yapılmış ve oluşturulan çalkalanma modelinin her durum için oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile hazırlanan model yardımıyla yapıların üzerine yerleştirilen ASTS'lerin performansları incelenebilirliği ve optimum tasarım parametreleri belirlenebilirliği ortaya konmuştur.

### **3.2 Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Modellenmesi**

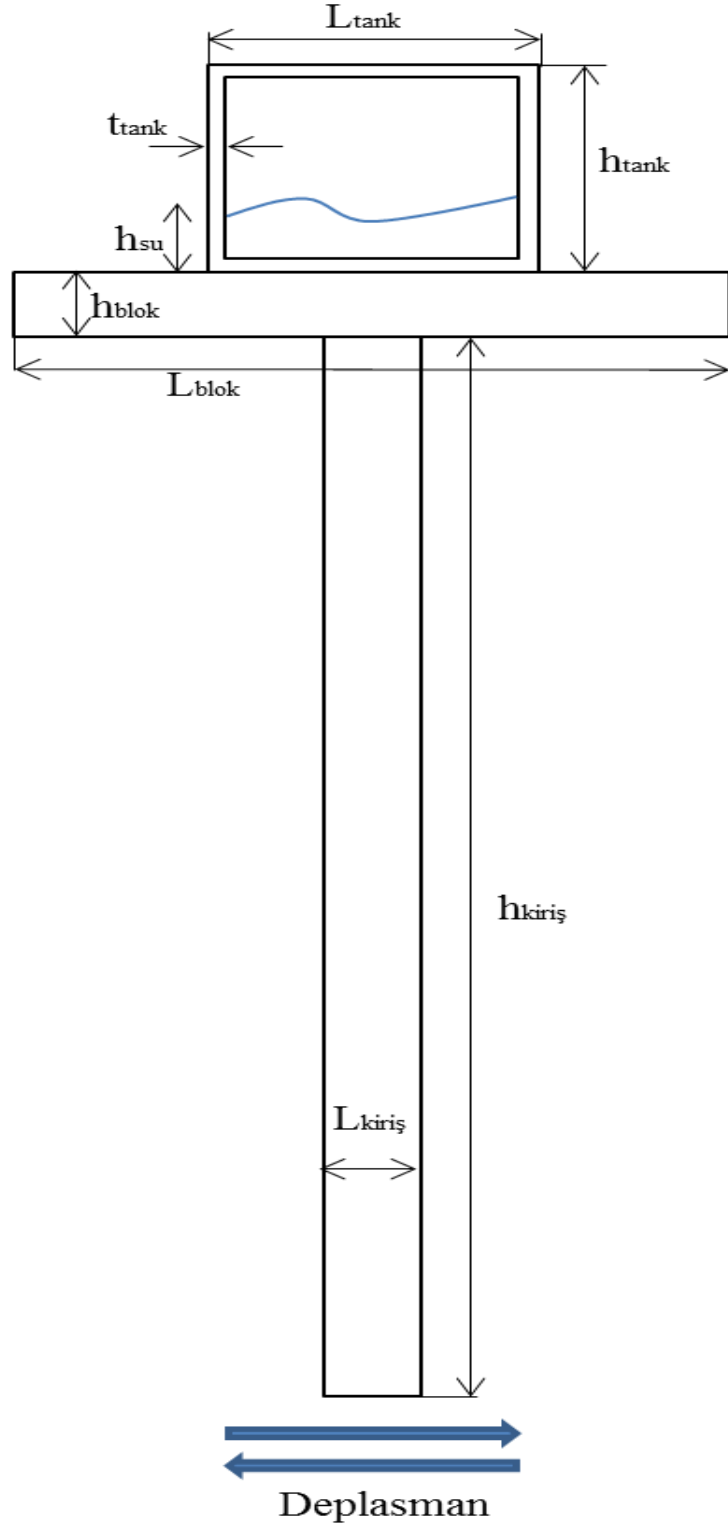
Bölüm 3-1 de çalkalanma sayısal modelinin serbest yüzey hareketinin ve kap içerisindeki sıvının çalkalanma sırasında kap duvarlarına etkidiği kuvvetlerin, literatürde yer alan sayısal ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak, doğruluğunun belirlenmesiyle birlikte, ASTS tasarımı için çift yönlü akışkan yapı etkileşimi metodu ile model oluşturulmuştur. Bir sonraki basamak bu tür titreşim sönümleyiciden oluşan sistemin titreşim performansının belirlenmeye çalışılmasıdır. Performans belirleme çalışması kapsamında, yapı üzerinde bulunan kaptaki suyun kütle oranı, yapının ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicisiz toplam kütle oranı farklı iki ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin hangi frekans oranında daha verimli çalıştığının bulunması amacıyla, kap içerisindeki suyun çalkalanma doğal frekansı, yapının doğal frekansından 0.1 Hz daha düşük ve daha yüksek frekanslarda ayarlanarak yapının salınım genliklerindeki azalmaya etkileri incelenmiştir. Bir sonraki adımda ise çalkalanma doğal frekansı yapının doğal frekansına ayarlanmış durum için iki farklı kütle oranında oluşturulmuş ASTS'nin üç farklı etki frekansında yapının salınım genliklerindeki azalmaya olan etkisi incelenmiştir.

Çalışma kapsamında dikey konumlandırılmış bir kiriş üzerine, binalarda herhangi bir katı temsil eden dikdörtgenler prizması şeklindeki beton bir blok konularak, kirişin tabanından sinüzoidal bir deplasman sınır koşulu uygulanmıştır. Yapının çalkalanma eksenini boyunca deformasyonlarından, sadece yapısal model kullanılarak tank içerisinde sıvı olmadan elde edilen veriler ile aynı sisteme tank içerisinde sıvı



konularak oluşturulan ASTS'li sistemden elde edilen verilerin karşılaştırılması yoluyla performansları incelenmiştir.

Durağan halde bulunan sönümlenme oranı düşük bir yapının üzerine ani yükleme verilmesiyle birlikte lineer olmayan bir cevap ile karşılaşmış ve yapıdan uzunca bir süre durağan cevap alınamamıştır. Yapıya etkiyen ani yükleme sonucunda yapıdan alınan deplasman verilerinin başta oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiş sistem durağan hale geldikten sonra ise yapıdan alınan deplasman verilerinin yaklaşık %50 ile %70 arasında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda yapının ilk birkaç saniye içerisinde hasar alması, durağan rejimde hareket ederken hasar alması kadar olası gözükmemektedir. Bu noktada ASTS'lerin ilk birkaç saniye içerisindeki etkisi incelenmek istenmiş ve binadan alınan deplasman verilerinde ilk 5 saniye içerisindeki tepe noktalarının ASTS'li ve ASTS'siz yüzde farkları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan sisteme ait geometri parametreleri Şekil 3-13'de verilmiştir.



Şekil 3-13 : ASTS Performans Çalışması Yapı Geometrisi

Yapı geometrisi üzerine uygulanan deplasman sınır koşulu aşağıda Denklem-3-5'te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D(t) = A \sin(2\pi f_w t) \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te,  $D(t)$  yapıya uygulanan deplasman sınır koşulu fonksiyonunu,  $A$  tank çalkalanma genliğini,  $f_w$  etki frekansını ve  $t$  zamanı temsil etmektedir.

Şekil 3-13'de verilen geometride kullanılan ve seçilen parametrelere ait değerleri aşağıda Çizelge 3-5'te verilmiştir. Tez kapsamında oluşturulan yapının ve kabın geometrik boyutları, yapının doğal frekansını ve ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyici olarak kullanılacak suyun çalkalanma doğal frekansını 1 Hz olarak sağlayabilmek amacıyla parametrik çalışma yapılarak belirlenmiştir.

Çizelge 3-5 : Yapı Modeline Ait Parametre Değerleri

Parametre	Değeri	
	%3 Kütle Oranı	%6 Kütle Oranı
L <sub>tank</sub>	0.50 m	0.60 m
h <sub>tank</sub>	0.50 m	0.60 m
t <sub>tank</sub>	0.05 m	0.05 m
h <sub>su</sub>	0,120 m	0.205 m
h <sub>blok</sub>	0.20 m	0.20 m
L <sub>blok</sub>	1.50 m	1.50 m
h <sub>kiriş</sub>	4.50 m	4.50 m
L <sub>kiriş</sub>	0.10 m	0.10 m

Çalışma kapsamında, düşük, orta ve yüksek genliklerde olmak üzere üç farklı çalkalanma genliğinde 3 farklı frekans oranı için, çözüm gerçekleştirilmiş ve yapının cevabı incelenmiştir. Çalkalanma modellenmesinde olduğu gibi çift yönlü akışkan yapı etkileşiminin kullanıldığı modelde yapısal ve akışkan olmak üzere iki farklı çözücünden yararlanılmıştır.

### **3.2.1 Yapısal Model**

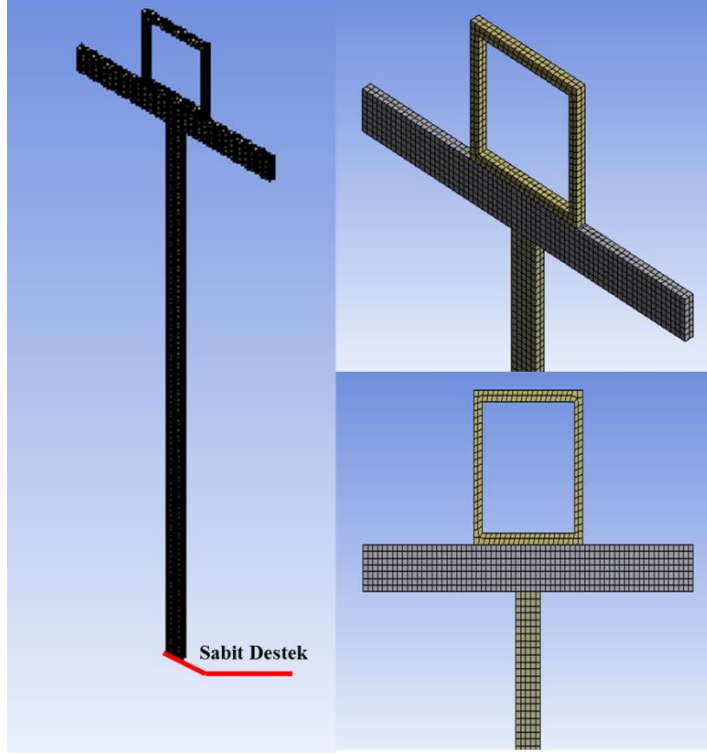
ASTS'lerin çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile modellemesi sırasında yapısal ve akışkan olmak üzere farklı iki çözücünden yararlanılan modelde, yapısal modelin doğruluğu; deplasman sınır koşulu altındaki binanın ve akışkan çözüm hacminin yerdeğiştirmesini belirleyerek ASTS'nin performansının incelenmesinde kritik rol oynamaktadır. Çözümün doğası gereği zamana bağlı olmasıyla birlikte yapısal modelde yapı kararlı hale gelmeden yapıya, bir sonraki zaman adımındaki sınır koşulu uygulandığından çözümlerin doğruluğu için uygun çözüm ağının önemi büyüktür. Sayısal ayrıştırma yöntemleri uzaysal ve zamansal ayrıştırma olarak ikiye ayrılır. İyi bir çözüm ağı oluşturulması uzaysal ayrıştırma ortaya çıkabilecek sayısal hataların en aza indirgenebilmesi ve çözüm hatalarının azaltılması için gerekli olurken çözüm süresinin de gereksiz uzamasını engellemelidir.

#### **3.2.1.1 Yapısal Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması**

Yapıların dış yüklemeler altında salınıminin en kritik olduğu durum, deformasyonların en fazla olduğu rezonans frekansında titreşimiyle meydana gelmektedir. Ayarlanmış sönümleyicilerin çalışma prensibi Bölüm 2'de bahsedildiği üzere ana sistemin rezonans frekansı ile aynı rezonans frekansına sahip ek bir sistemin ana sisteme eklenmesiyle açıklanmaktadır. Bu durumda ayarlanmış ASTS'lerin tasarımı sırasında öncelikle yapının rezonans frekansının bilinmesi gerekmektedir.

Yapının doğal frekanslarının belirlenmesi amacıyla modal analizden yararlanılmış olup, elde edilen sonuçların çözüm ağından bağımsız olduğunun belirlenmesi

amacıyla yapılan çözüm ağı boyutu belirleme çalışmasına ait sınır koşulları ve çözüm ağı Şekil 3-14'te verilmiştir.



Şekil 3-14 : Modal Analiz Çözüm Ağı ve Sınır koşulları

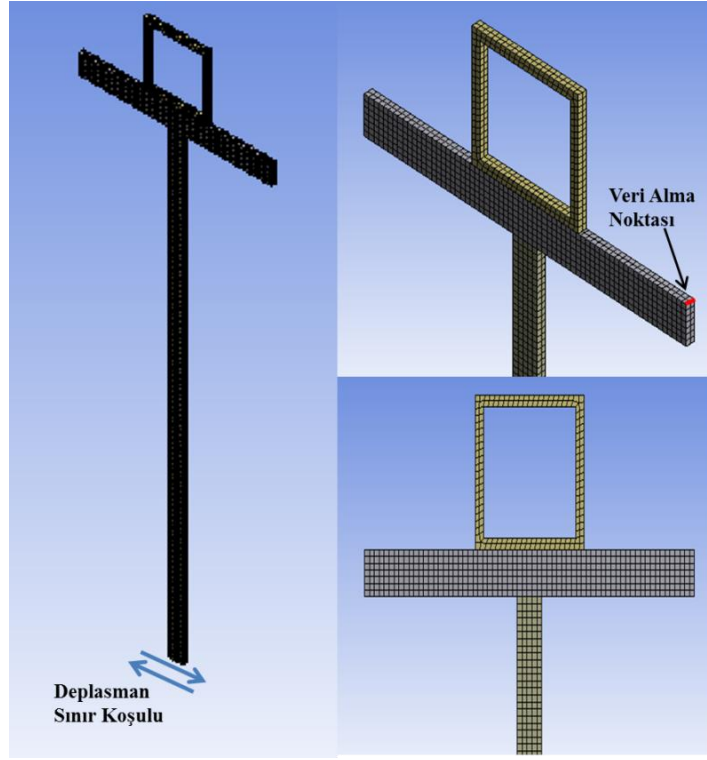
Şekil 3-14'te verilen çözüm ağı quad tipi elemanlardan oluşmuş olup, kaba çözüm ağı için 2852, ince çözüm ağı için ise 9816 eleman kullanılmıştır. Her iki çözüm ağı ile Şekil 3-14'te verilen sınır koşulları ile yapılan analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 3-7'de verilmiştir.

Çizelge 3-6 : Modal Analiz Doğal Frekans Çözüm Ağı Karşılaştırması

	<b>Kaba Çözüm Ağı</b>	<b>İnce Çözüm Ağı</b>
<b>Mod1</b>	0,9952 Hz	0,9952 Hz
<b>Mod 2</b>	2,9149 Hz	2,9147 Hz
<b>Mod 3</b>	6,4309 Hz	6,4262 Hz

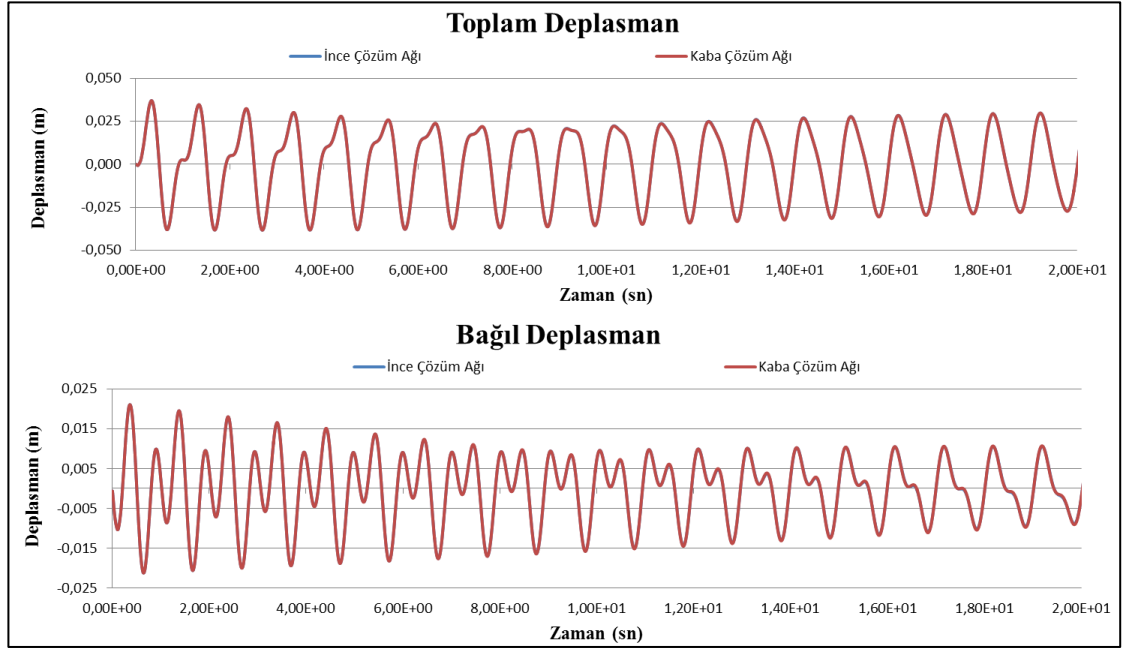
Çizelge 3-6’da verilen sonuçlara bakıldığında, yapının doğal frekansları ilk bir kaç mod için kritik olup daha sonrasında yapıya etkiyebilecek herhangi bir zorlama frekansından uzaklaşmaktadır. İlk 3 mod için kaba çözüm ağı ile ince çözüm ağı arasında sıfıra yakın fark görülmektedir. Çözüm ağı içerisindeki eleman sayısının artmasıyla birlikte çözüm sürelerinin de uzayacağı düşünüldüğünde, hesaplamalarda, istenilen sonuçları elde etmekte başarılı olan kaba çözüm ağı kullanılmıştır.

ASTS’lerin performans karşılaştırmasında yapının üzerinde belirlenen referans bir noktanın sönümleyicisiz ve sönümleyicili deformasyonlarının karşılaştırılması gerekmektedir. Deformasyon referans noktası olarak yapı üzerinde katı temsil eden dikdörtgenler prizması şeklindeki beton bloğun çalkalanma eksenine göre üst köşesi seçilmiştir. Şekil 3-15’te sönümleyicisiz yapının zamana bağlı analizlerinde kullanılan çözüm ağı, sınır koşulları ve veri alma noktası belirtilmiştir.



Şekil 3-15 : Sönümleyicisiz Yapı Geometrisi ve Çözüm Ağı

Oluşturulan yapı modeline, tank içerisinde sıvı olmadan Çizelge 3-6'da modal analiz karşılaştırma sonuçları verilmiş çözüm ağları için 20 saniye boyunca 2 cm genlik ve 1 Hz'lik rezonans frekansı ile Denklem 3.5'teki 'deki bağıntı yardımıyla hesaplanmış deplasman sınır koşulları uygulanmıştır. Çözüm ağı boyutu belirleme çalışması kapsamında zaman adımı 0.01 saniye olarak alınmıştır. Çözüm sonucunda yapının toplam deplasmanı ve yapının hareketine göre bağıl deplasmanına ait sonuçlar aşağıda Şekil 3-16'da verilmiştir.



Şekil 3-16 : Yapısal Model Çözüm Ağı Çalışması Deplasman Verileri

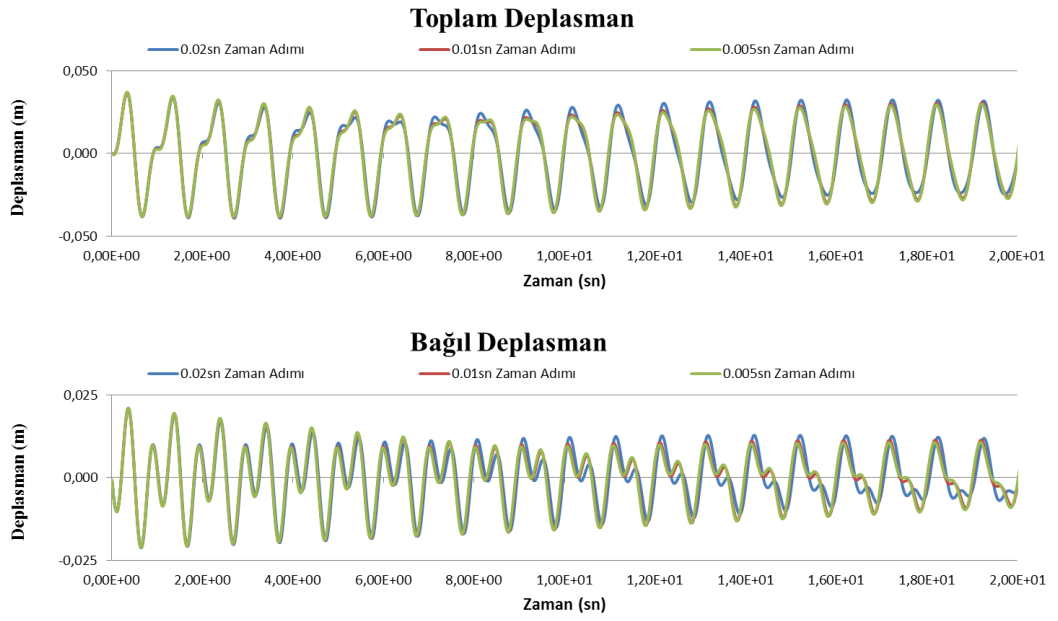
Kalın ve ince çözüm ağı için yapının toplam deplasman ve yapının hareketine bağlı bağıl deplasman verileri şekil 3-16'daki gibidir. İnce çözüm ağı ile kaba çözüm ağı arasında geçici ve sabit hal çözüm genliklerinde en fazla % 1.5 lik bir fark görülmektedir. Sistemin durağan çözümlerindeki bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Çözümler kaba çözüm ağı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.1.2 Yapısal Model Zaman Adımı Çalışması

Çözüm ağı çalışması sonucunda uzaysal ayrıştırma hatalarını azaltacak ve çözüm süresini uzatmayacak çözüm ağı elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğunda çözüm ağındaki eleman sayısının yanı sıra, zamana bağlı çözümdeki zaman adımı da çözüm ağı kadar kritiktir. Zaman adımı çalışması ile birlikte diğer bir sayısal ayrıştırma yöntemi olan zaman ayrıştırmasının çözümler üzerindeki etkisi incelenmiş ve çözümlerin zamandan adımından bağımsız olması sağlanmıştır. Çalışmada 0.02, 0.01 ve 0.005 saniyelik zaman adımları kullanılmış ve zaman adımının küçültülmesi ile birlikte deplasman sınır koşulu altındaki yapının deformasyonları incelenmiş ve



çözüm için çözüm süresini uzatmadan en doğru sonucu veren zaman adımı seçilmiştir. Çalışma kapsamında zaman adımı çalışması kaba çözüm ağı ile yapılmıştır. Şekil 3-17’de zaman adımı çalışmasına ait yapıda meydana gelen deformasyonların grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 3-17 : Yapısal Model Zaman Adımı Çalışması Deplasman Verileri

Şekil 3-17’deki grafiklere bakıldığında her üç zaman adımı çözümlerinde toplam deplasman birbirlerine benzediği görüldüğü gibi bağlı deplasman grafiğinde 0.02 saniye zaman adımlık çözümün diğer 0.01 ve 0.005 sn lik çözümlere göre geçici ve durağan cevaplarının genliğinde yaklaşık % 8 lik fark vardır. 0.01 ve 0.005 sn lik zaman adımlarında ise aralarındaki genlik farkı % 1.5 seviyelerindedir. Bu sonuçlara göre çözüm süresi göz önüne alındığında % 1.5 luk farkın yeterli seviyede olduğu düşünülmüş ve çözümler 0.01 saniyelik zaman adımı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.1.3 Yapısal Model Simülasyonları

Yapısal model için sayısal ve zaman adımı çalışmaları sonucunda hataları en aza indirgeyecek çözüm ağı ve zaman adımı boyutlarının belirlenmesi ile sıvısız yapısal model ve sıvılı çift yönlü akışkan yapı etkileşimi modeli çözümleri gerçekleştirilmiştir. Her iki çözümde yapısal model için kullanılan malzemeler ve malzemelere ait özellikler aşağıda Çizelge 3-7’de verilmiştir.

Çizelge 3-7 : Yapısal Modele ait Malzeme ve Özellikleri

<b>Kiriş-Alüminyum</b>	
Yoğunluk	2700 kg/m <sup>3</sup>
Akma Dayanımı	70 Gpa
Poisson Oranı	0.33
Sönüm Oranı	0.001
<b>Blok-Beton</b>	
Yoğunluk	2300 kg/m <sup>3</sup>
Akma Dayanımı	25 Gpa
Poisson Oranı	0.20
Sönüm Oranı	0.001
<b>Kap-Cam</b>	
Yoğunluk	1200 kg/m <sup>3</sup>
Akma Dayanımı	3.3 Gpa
Poisson Oranı	0.37

Çizelge 3-5’de verilen yapı boyutları ve Çizelge 3-7’de verilen malzeme özellikleri ile yapıya ait ilk mod rezonans frekansı 1 Hz civarında olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple yapı üzerinde maksimum yüklemelerin 1 Hz civarında gözlemleneceği düşüncesi ile çözümler 1 Hz civarında gerçekleştirilmiştir. Çözümler sırasında yapıya ait deplasman sınır koşulu Şekil 3-13’de görüldüğü üzere alüminyum kirişin

tabanından uygulanmıştır. Çözümler sonucunda ASTS'nin performansını belirleyen deplasman verileri ise beton bloğun üst köşesinden alınmış ve yapının deformasyonunun belirlenmesi amacıyla deplasman sınır koşulu ile aralarındaki farktan yararlanılmıştır.

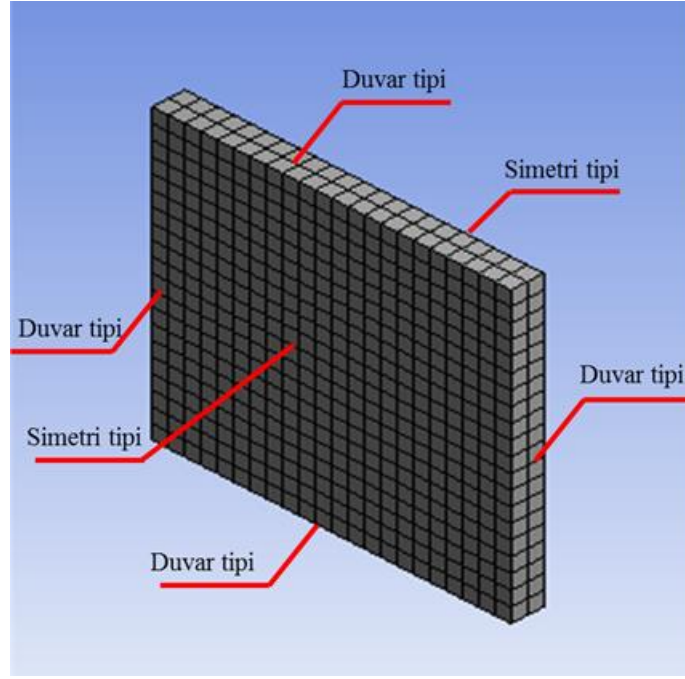
### **3.2.2 Akışkan Model**

Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile oluşturulan ASTS modellemesinde yapının deformasyonunun incelendiği yapısal modelden elde edilen deplasman verisi, her zaman adımında akışkan çözücüye sınır koşulu olarak iletilerek akışkan çözücünün, tank duvarlarına etkiyen kuvvet verilerini hesaplamasını sağlamaktadır. Elde edilen bu kuvvet verileri ise yapısal modele sınır koşulu olarak uygulanarak deformasyona etkisi hesaplanmaktadır. Dolayısıyla sistemden alınan çözümün doğruluğu yapısal modelin doğruluğuna ek olarak akışkan modelin de doğruluğunu gerektirmektedir. Tıpkı yapısal modelde olduğu gibi akışkan modelde de boyutsal ve zamansal ayrıştırma yöntemlerinin doğruluğu sistemden alınan verilerin doğruluğu üzerinde kritik öneme sahiptir.

#### **3.2.2.1 Akışkan Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması**

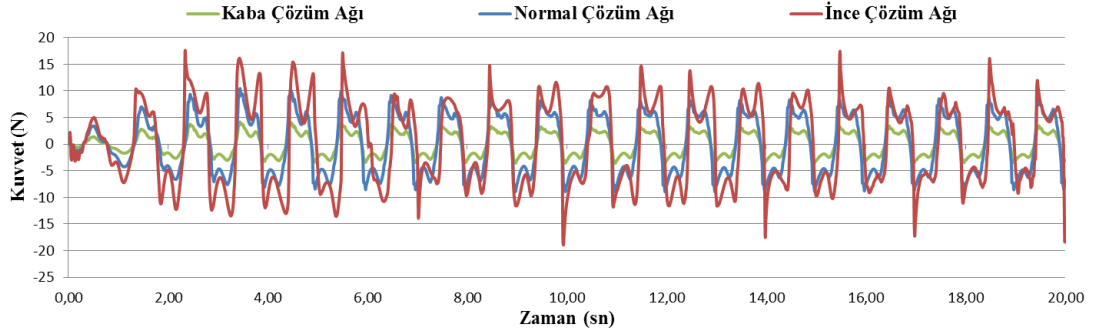
Akışkan modelin sayısal çözüm ağı çalışması kapsamında tank içerisindeki sıvının en kötü senaryo ile çalkalanması sırasında tank duvarlarına etkiyen kuvvetlerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. En kötü senaryo, yaklaşık 5 metre yükseklikteki bir kirişin üzerinde bulunan beton bloğa yerleştirilen su tankının, binanın ve sıvının ortak rezonans frekansı olan 1 Hz frekans ve 2 cm genlik ile deplasman sınır koşulu altındaki durumu olarak belirlenmiştir.

Çalkalanma sırasında akışkan çözüm hacminin kaba, normal ve ince çözüm ağları ile tank duvarlarına etkidiği kuvvetin karşılaştırılması için hazırlanmış modele ait çözüm ağı ve sınır koşulları aşağıda Şekil 3-18'de verilmiştir.



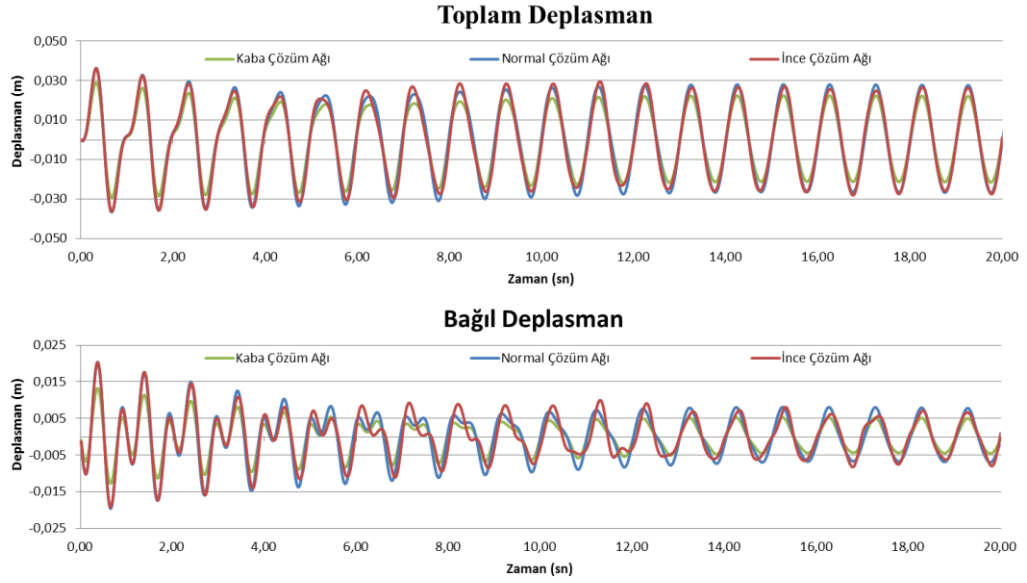
Şekil 3-18 : Akışkan Modele ait Sınır Koşulları ve Çözüm Ağı

Şekil 3-18’de verilen çözüm ağı hexahedral tipi elemanlardan oluşmuş olup, kaba çözüm ağı için 500, normal çözüm ağı için 1200 ince çözüm ağı için ise 1875 eleman kullanılmıştır. Kaba ve ince çözüm ağları için akışkan modelden elde edilen kuvvet verilerinin yapısal modelde hesaplamaya dahil edilip hesaplanan deplasman verilerine etki etmesi sebebiyle kuvvet verileri karşılaştırmasına ek olarak deplasman verileri karşılaştırması da yapılmıştır. Her iki çözüm ağı ile Şekil 3-18’de verilen sınır koşulları ile yapılan çözümden elde edilen kuvvet sonuçları Şekil 3-19’da verilmiştir.



Şekil 3-19 : Akışkan Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması Kuvvet Verileri

Şekil 3-19’da verilen tank üzerine etkiyen net kuvvet verilerine bakıldığında kaba çözüm ağı ile normal çözüm ağı arasında %35’lere varan fark bulunmaktadır. Bu fark normal çözüm ağı ile ince çözüm ağı arasında anlık maksimum ve minimum kuvvet değerlerinde farklar görünse de anlık kuvvet verilerinin dışında yaklaşık %6 lık bir fark görülmektedir. Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yöntemi ile hazırlanan modelde çözümlerin 30 saniye boyunca yapılacağı düşünülürse, çözüm süresinden kazanç sağlamak amacıyla %6 lık kuvvet farkının ihmal edilebilir olduğuna karar verilebilmesi için yapıdaki deplasman verileri incelenmiştir. Kaba, normal ve ince çözüm ağı ile çözümlenen deplasman verilerine ait grafik aşağıda Şekil 3-20’de verilmiştir.



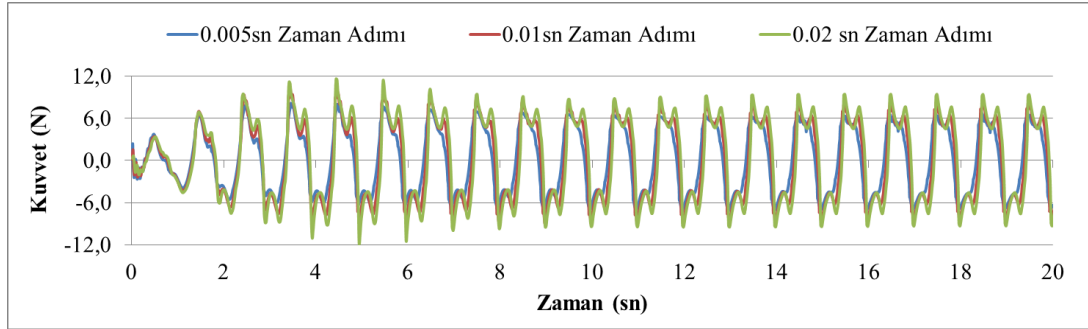
Şekil 3-20 : Akışkan Model Sayısal Çözüm Ağı Çalışması Deplasman Verileri

Kaba, normal ve ince çözüm ağı için yapının toplam deplasman ve yapının hareketine bağlı bağlı deplasmanı şekil 3-20'deki gibidir. Kaba çözüm ağı ile ince çözüm ağı arasında yaklaşık %15'lik bir deplasman farkının olmasına karşın normal çözüm ağı ile ince çözüm ağı arasında geçici ve durağan çözüm genliklerinde % 1.3 lik bir deplasman farkı görülmektedir. Kuvvet verilerindeki %6 lık farkın deplasman üzerinde %1.3 lere düştüğü göz önüne alınırsa, sistemin durağan çözümlerindeki bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Yapılan çözümler normal çözüm ağı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2.2 Akışkan Model Zaman Adımı Çalışması

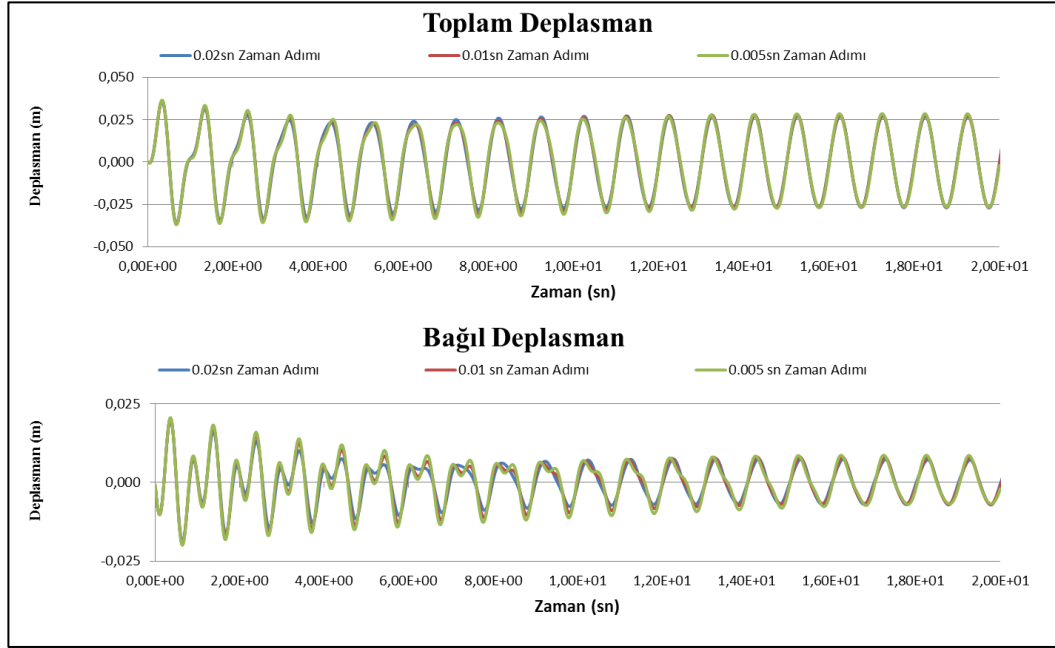
Akışkan modeldeki çözüm ağı çalışması sonucunda uzaysal ayrıştırma hatalarını en aza indirgeyecek ve çözüm süresini uzatmayacak çözüm ağı elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğunda yapısal modelde olduğu gibi çözüm ağındaki eleman sayısının yanı sıra, zamana bağlı çözümdeki zaman adımı da çözüm ağı kadar kritiktir. Zaman adımı çalışması ile birlikte diğer bir sayısal ayrıştırma yöntemi olan zaman ayrıştırmasının çözümler üzerindeki etkisi incelenmiş ve çözümlerin zaman

adımından bağımsız olması sağlanmıştır. Çalışmada 0.02, 0.01 ve 0.005 sn lik zaman adımları kullanılarak akışkan çözüm tarafından hesaplanan tank duvarına etkiyen net kuvvet verileri ve yapının deformasyonları incelenmiştir. Üç farklı zaman adımı için tank geometrisi üzerine etkiyen net kuvvetin zamana bağlı grafiği aşağıda Şekil 3-21’de verilmiştir.



Şekil 3-21 : Akışkan Çözümü Zaman Adımı Çalışması Kuvvet Verileri

Şekil 3-21’deki grafiklere bakıldığında zaman adımının küçülmesiyle birlikte tank içerisindeki suyun tank duvarlarına etkilediği kuvvetin maksimum noktalarında azalma görülmektedir. Tepe noktaları dışında kuvvet verilerinin birbirlerine yakınlığı dikkat çekmektedir. 0.01 saniye ile 0.005 saniye zaman adımları arasında tepe noktaları dışında yaklaşık %3 lük bir fark görülmektedir. Bu fark 0.02 ile 0.005 saniye zaman adımlarında ise %8 lere çıkmaktadır. Çözümlerde kullanılacak zaman adımlarının belirlenmesinden önce her üç zaman adımına ait deplasman verilerinin de incelenmesi doğru olacaktır. Aşağıda Şekil 3-22’de her üç zaman adımına ait deplasman verilerinin karşılaştırması bulunmaktadır.



Şekil 3-22 : Akışkan Model Zaman Adımı Çalışması Deplasman Verileri

Şekil 3-22'deki grafiklere bakıldığında 0.02 saniyelik zaman adımı ile 0.005 saniyelik zaman adımı çözümleri arasında yaklaşık %7, 0.01 saniye zaman adımı ile 0.005 saniyelik zaman adımı çözümleri arasında ise %2 lik bir fark vardır. Bu sonuçlara göre çözüm süresi göz önüne alındığında % 2 lik farkın yeterli seviyede olduğu düşünülmüş ve çözümler 0.01 saniyelik zaman adımı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2.3 Akışkan Model Simülasyonları

Akışkan model için hesaplamalarda sayısal çözüm ağı ve zaman adımından kaynaklı hataları en aza indirgeyecek çözüm ağı ve zaman adımı boyutlarının belirlenmesiyle birlikte akışkan model oluşturularak çift yönlü akışkan yapı etkileşimi modeline dahil edilmiştir. Ayarlanmış titreşim sönümleyicilerin çalışma prensibinde, ek sistemin rezonans frekansının ana sistemin rezonans frekansına yakın değerde olması esas olduğundan, yapının doğal frekansının 1 Hz olarak belirlenmesi ile tank içerisindeki suyun çalkalanma rezonans frekansının da 1 Hz civarında olması gerekmektedir. Tank içerisindeki suyun yüksekliği bu sebepten dolayı, Denklem



3.3'te verilen bağıntı yardımıyla 0.12 m olarak seçilmiştir. Çözümler VOF metodu ile gerçekleştirilmiş olup akışkan çözüm hacmi içerisinde bulunan su ve hava akışkanlarına ait malzeme özellikleri Çizelge 3-1'de verildiği gibidir.

Çözümler, çalkalanma modellemesinin VOF metoduyla yapılması sebebiyle basınç tabanlı gerçekleştirilmiştir. Akışkan çözüm hacmine ait sınır koşulları, veri aktarımı sayesinde yapısal modelden her zaman adımında akışkan çözüm hacmine deplasman sınır koşulu olarak uygulanmaktadır. Yapısal modelden aktarılan deplasman girdileri ile akışkan çözüm hacminde meydana gelen deformasyonlar nedeniyle dinamik çözüm ağı yapısı kullanılmıştır. Dinamik çözüm ağı, parametrelerin doğru seçilmesiyle her zaman adımında çözüm ağı üzerinde değişiklikler yaparak akışkan çözüm hacmini çözüm için hazırlamaktadır. Çalkalanma modellemesinde akışkan çözüm ağı zamana bağlı olarak sürekli yer değiştirdiğinden, dinamik çözüm ağı parametrelerinin belirlenmesi akışkan model için kritik noktalardandır.

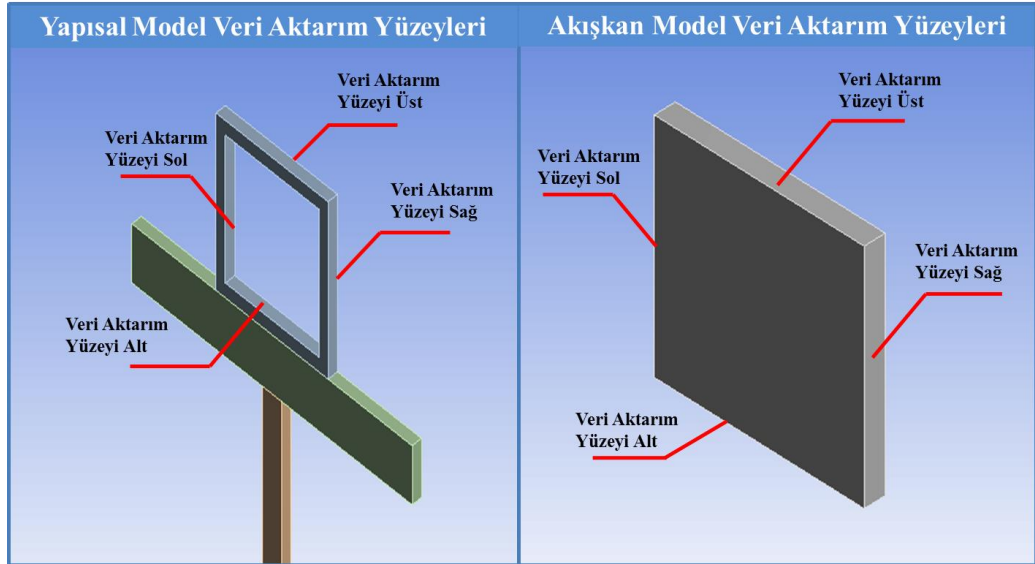
Oluşturulan model kapsamında seçilen zamansal ve uzaysal ayrıştırma yöntemlerine ait özellikler aşağıda Çizelge 3-8'de verildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3-8 : Akışkan Model Zamansal ve Boyutsal Ayrıştırma Yöntemlerine Ait Özellikler

<b>Basınç-Hız eşleşme</b>	PISO
<b>Zamansal Ayrıştırma</b>	Second Order Implicit
<b>Uzaysal Ayrıştırma</b>	
Basınç	PRESTO
Momentum	Second Order Upwind
Hacim Fraksiyonu	Geo-Reconstruct
Gradient	Least Squares Cell Based

### 3.2.3 Akışkan Yapı Etkileşimi

ASTS modellenmesinde kullanılan çift yönlü akışkan yapı etkileşiminin gerçekleşebilmesi amacıyla yapısal ve akışkan model arasında veri aktarım yüzeylerinin doğru belirlenmesi gereklidir. Oluşturulan modelde yapısal ve akışkan modellerde seçilen veri aktarım yüzeylerinin eşleştirilmiş hali Şekil 3-23'te verildiği gibidir.



Şekil 3-23 : Akışkan Yapı Etkileşimi Veri Aktarım Yüzeyleri

Veri aktarım yüzeylerinin doğru belirlenmesi ile her zaman adımında yapısal modelden akışkan modele deplasman verisi, akışkan modelden de yapısal modele ise kuvvet verisi transfer edilir. Yapısal modelde ve akışkan modelde zaman adımından meydana gelebilecek çözüm hatalarını ve çözüm süresini en aza indirmek amacıyla seçilen zaman adımı kullanılarak çözümler tamamlanmıştır.

### **3.2.4 Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Modellemesi Sonuçları**

#### **3.2.4.1 Farklı Çalkalanma Doğal Frekansındaki Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyicilerin Performansı**

Performans çalışmasının ilk adımı, farklı çalkalanma doğal frekansına sahip ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin yapının doğal frekansı değerindeki etki frekansı altında sönümlenmeye olan etkilerinin üç farklı etki genliğinde incelenmesidir. Ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin performanslarının incelenmesi amacıyla yapı üzerinden alınan deplasman verileri ile iki adımdan oluşan bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. İlk adım sinüzoidal yükleme altındaki bir yapının durağan hale gelmeden ilk 5 saniye içindeki deplasman verilerinin tepe noktalarının karşılaştırılması, ikinci adım ise sistemin durağan hale gelmesi ile birlikte deplasman genliklerinin karşılaştırılmasıdır. Çizelge 3-9'da farklı çalkalanma doğal frekansındaki ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin sönümleme performansı kapsamında seçilen durumlar için detaylı bilgi verilmiştir.

Çizelge 3-9 : Performans Karşılaştırması Çözümlerine ait Parametreler

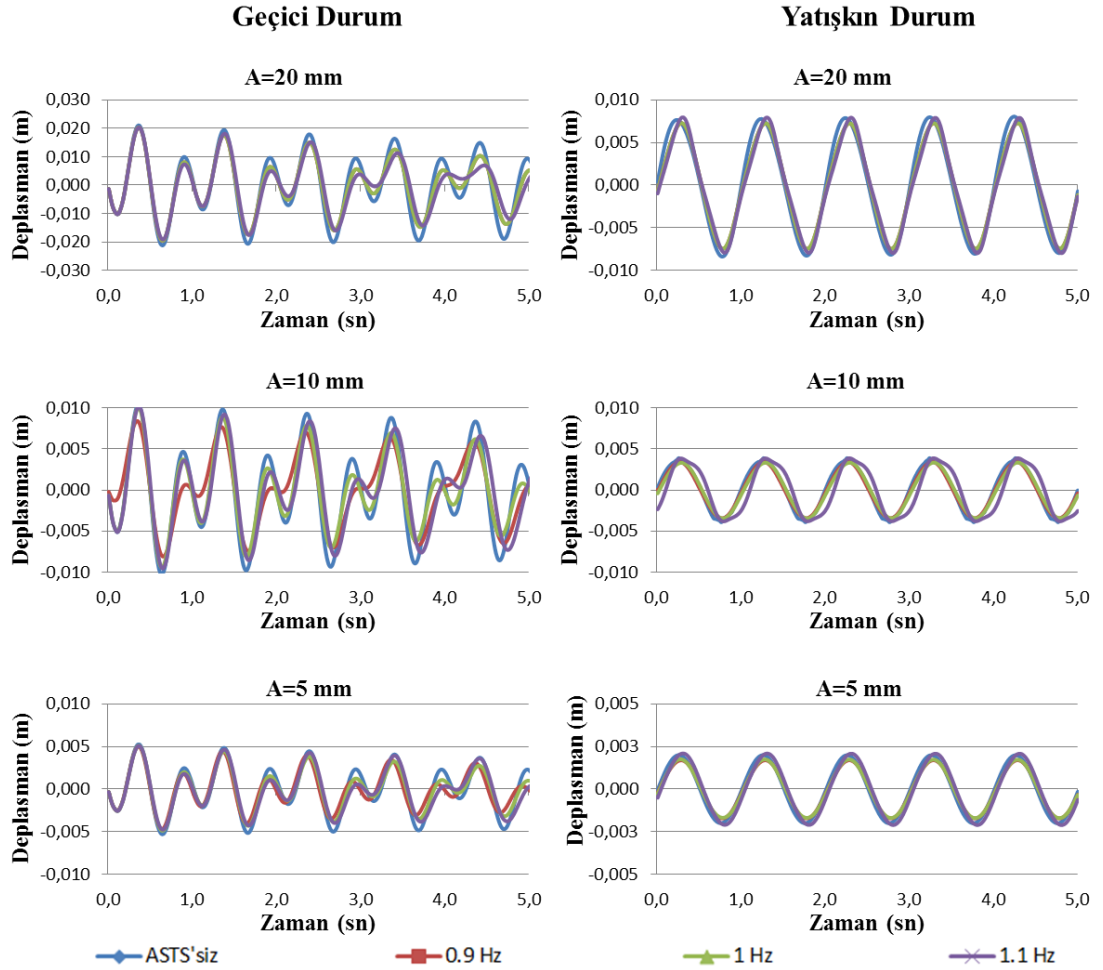
Tank Boyutları		Su Yüksekliği (m)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Deplasman Genliği (mm)	Deplasman Frekansı (Hz)
Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)				
500	500	95	0,9	20	1
500	500	120	1	20	1
500	500	165	1,1	20	1
500	500	95	0,9	10	1
500	500	120	1	10	1
500	500	165	1,1	10	1
500	500	95	0,9	5	1
500	500	120	1	5	1
500	500	165	1,1	5	1
600	600	140	0,9	20	1
600	600	205	1	20	1
600	600	315	1,1	20	1
600	600	140	0,9	10	1
600	600	205	1	10	1
600	600	315	1,1	10	1
600	600	140	0,9	5	1
600	600	205	1	5	1
600	600	315	1,1	5	1

Çalışma kapsamında yapının üzerinde bulunan kap içerisindeki sıvının çalkalanma doğal frekansı Denklem 2.3'e göre hesaplanmıştır. Çözümler 0.02, 0.01 ve 0.005 m etki genliği değerleri ile 1 Hz etki frekansında yapıya Denklem 3.6'da verilen bağıntı yardımıyla oluşturulan deplasman sınır koşulu uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

$$D(f) = A \sin(2\pi f_w t) \quad (3.6)$$

Denklem 3-6'da,  $D(f)$  yapıya uygulanan deplasman sınır koşulu fonksiyonunu,  $A$  tank çalkalanma genliğini,  $f_w$  tank içerisindeki suyun çalkalanma rezonans frekansını ve  $t$  zamanı temsil etmektedir.

Farklı çalkalanma doğal frekansına sahip %3 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin performans çalışması kapsamında geçici durum sonuçlarını içeren grafikler Şekil 3-24'de verilmiştir.



Şekil 3-24 %3 Kütle Oranlı ASTS için Performans Sonuçları

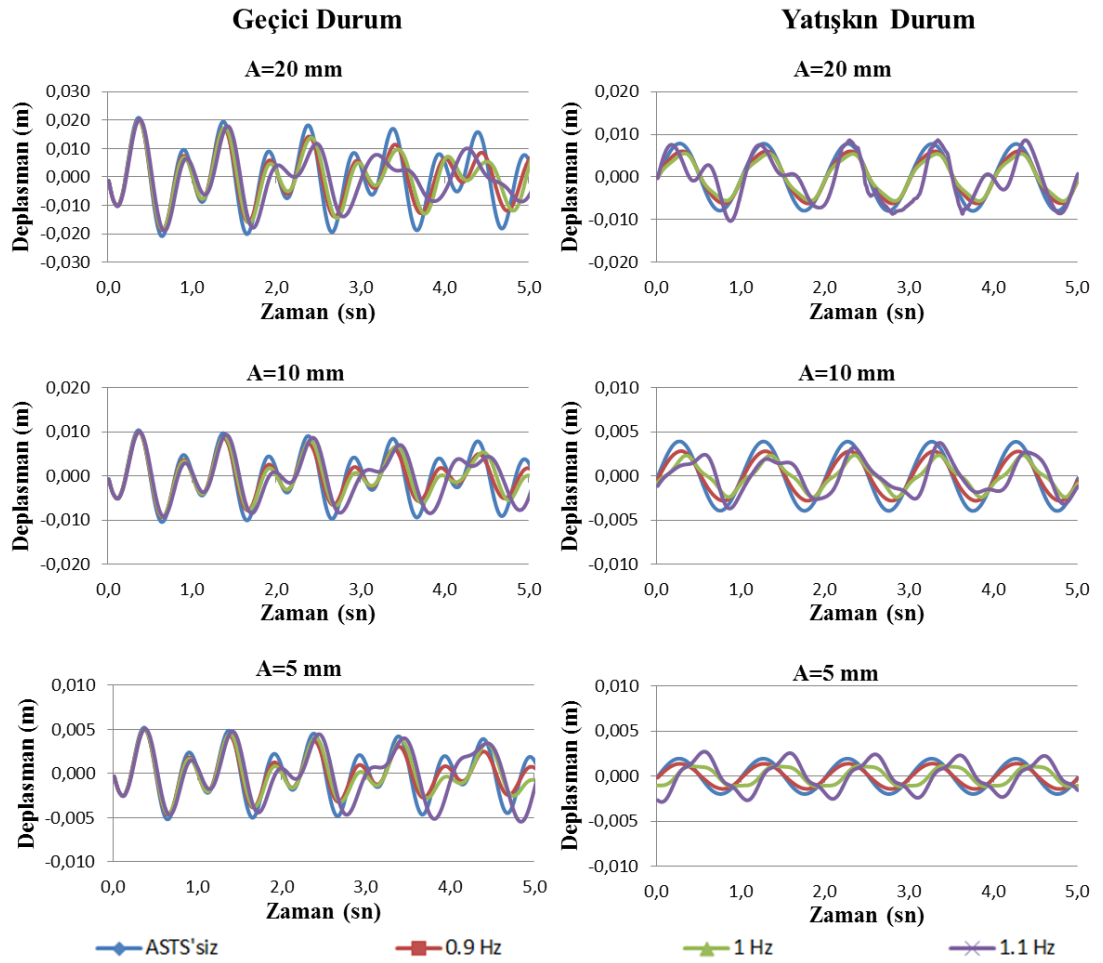
Şekil 3-24’de verilen grafiklerde sol taraftaki sütunda bulunan grafikler geçici durum çözümlerini, sağ taraftaki sütunda verilen grafikler ise yataşkın durum çözümlerini belirtmektedir. Üstte bulunan grafikler 0.02 m etki genliği ile yüksek genlik, ortada bulunan grafikler 0.01 m orta genlik ve altta bulunan grafikler 0.005 m etki genliği ile düşük genlik sonuçlarını vermektedir. Farklı çalkalanma doğal frekansına sahip %3 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin geçici ve yataşkın durum performans değerleri Çizelge 3-10’da verilmiştir.

Çizelge 3-10 %3 Kütle Oranlı ASTS Sönümleme Performans Değerleri

% Genlik Azalımı		Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)					
		Geçici Durum Performansları			Yataşkın durum Performansları		
		0,9	1	1,1	0,9	1	1,1
Genlik (m)	0,02	21	24	22	10	8	7
	0,01	24	23	20	13	13	3
	0,005	18	23	17	15	15	2

Çizelge 3-10’da %3 kütle oranlı farklı çalkalanma doğal frekansına sahip ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin geçici ve yataşkın durum performans değerlerine bakıldığında, her üç çalkalanma doğal frekansına ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin de yataşkın durum performanslarından ayrı olarak geçici durumda sönümlemede %20 civarındaki başarısı görülmektedir. Yataşkın durum performanslarında ise etki genliğinin artmasıyla 0.9 ve 1 Hz’e ayarlanmış sönümleyicilerde sönümleme başarısı artmış, 1.1 Hz de ise azalmıştır. Çalkalanma doğal frekansının 0.9 Hz’e ayarlanması ile birlikte sönümleme performanslarında yüksek genlik durumunda azalma olmuş, diğer durumlarda ise herhangi bir değişiklik gözlemlenememiştir. Genel olarak çalkalanma doğal frekansının yapı doğal frekansı ve etki frekansına eşit ve bir miktar düşük olduğu durumlarda ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyiciler kabul edilebilir düzeyde performans sergilemiş, fazla olduğu durumlarda ise performanslarında düşüş gözlemlenmiştir.

Farklı çalkalanma doğal frekansına sahip ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin performans çalışmasında %3 kütle oranlı duruma ek olarak %6 kütle oranlı durum için de analizler yapılmış ve elde edilen geçici hal ve sabit hal performans grafikleri Şekil 3-25'te verilmiştir.



Şekil 3-25 : %6 Kütle Oranlı ASTS için Performans Sonuçları

Şekil 3-25'te verilen grafiklerde sol taraftaki sütunda verilen grafikler geçici durum çözümlerini, sağ taraftaki sütunda verilen grafikler ise yatışkın durum çözümlerini belirtmektedir. Üstte bulunan grafikler 0.02 m etki genliği ile yüksek genlik, ortada bulunan grafikler 0.01 m orta genlik ve altta bulunan grafikler 0.005 m etki genliği

ile düşük genlik sonuçlarını vermektedir. Farklı çalkalanma doğal frekansına sahip %6 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin geçici ve yataşkın durum performans değerleri Çizelge 3-11’de verilmiştir.

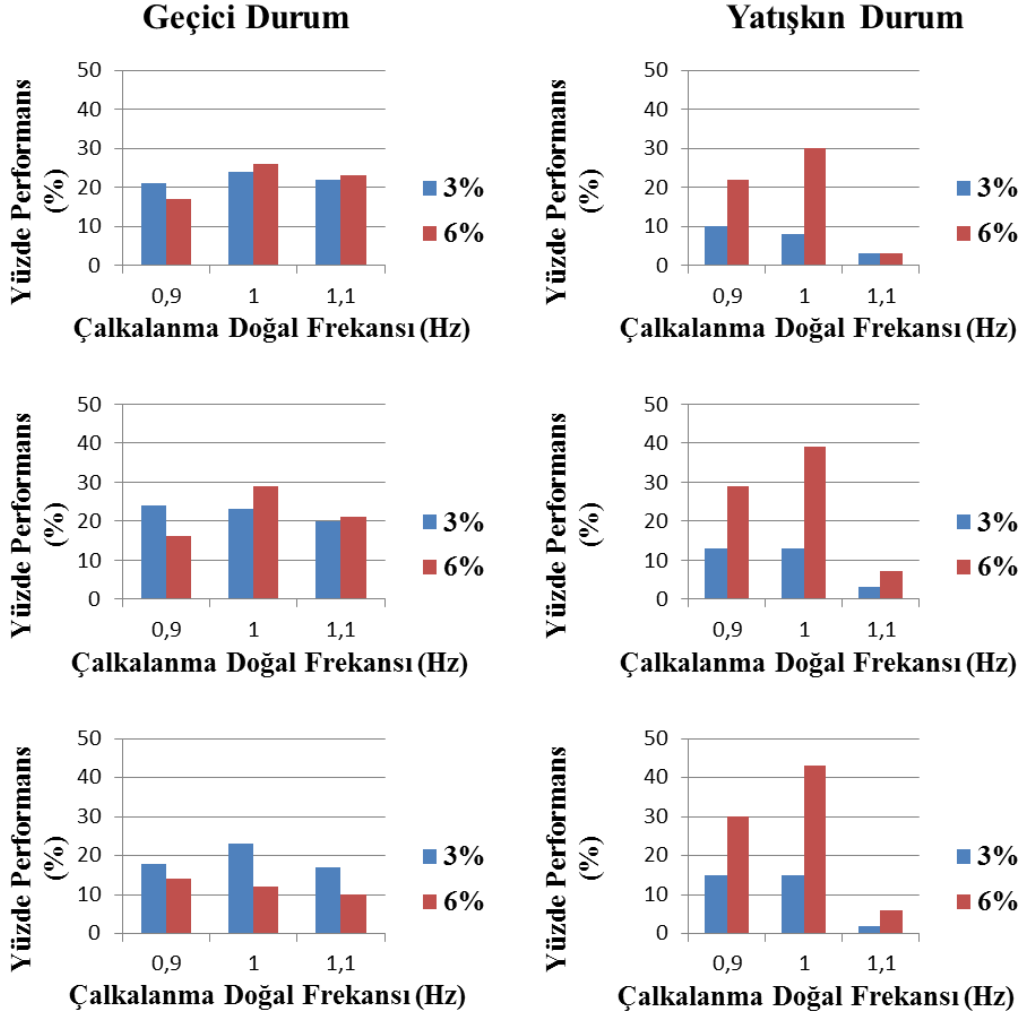
Çizelge 3-11 %6 Kütle Oranlı ASTS Sönümlenme Performans Değerleri

% Genlik Azalımı		Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)					
		Geçici Durum Performansları			Yataşkın Durum Performansları		
		0,9	1	1,1	0,9	1	1,1
<b>Genlik</b>	<b>0,02</b>	17	26	23	22	30	2
<b>(m)</b>	<b>0,01</b>	16	29	21	29	39	7
	<b>0,005</b>	14	12	10	30	43	6

Çizelge 3-11’de %6 kütle oranlı ve farklı çalkalanma doğal frekanslarına sahip ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin yüksek, orta ve düşük genliklerdeki performans sonuçlarına bakıldığında, %3 kütle oranlı ASTS’de olduğu gibi geçici durum performanslarında her üç çalkalanma doğal frekansında da sönümlenme başarısı gözlemlenmektedir. Yataşkın durumu için ise yine %3 kütle oranlı ASTS’de olduğu gibi etki genliğinin azalması ile birlikte ASTS’nin performanslarında artış gözlemlenmektedir. Kütle oranının artmasıyla birlikte 0.9 Hz çalkalanma doğal frekansına ayarlanmış ASTS’nin performansları, 1 Hz çalkalanma doğal frekansına ayarlanmış ASTS performanslarına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çalkalanma doğal frekansı 1.1 Hz’e ayarlanmış ASTS’nin ise performansları yine %3 kütle oranlıda olduğu gibi diğerlerine göre düşük seviyededir.

Farklı çalkalanma doğal frekansına sahip ASTS’ler için alınan çözümlerin özetlenmiş hali Şekil 3-26’da verilmiştir.





Şekil 3-26 Farklı Çalkalanma Doğal Frekansına Sahip ASTS'lerin Performans Karşılaştırması

Şekil 3-26'da verilen sonuçlara bakıldığında en üstte verilen sonuçlar 0.02 m ile yüksek genlik sonuçlarını, ortada verilen sonuçlar 0.01 m ile orta genlik sonuçlarını ve altta bulunan sonuçlar ise 0.005 m ile düşük genlik sonuçlarını belirtmektedir. Sol taraftaki sütun geçici çözümlere, sağ taraftaki sütun ise yatışkın durum çözümlerine aittir. Sonuçlara göre farklı çalkalanma doğal frekanslarına sahip ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin kütle oranının artmasıyla yatışkın durum performanslarında artış gözlemlenmektedir. Yatışkın durumsönümlenme performansları çalkalanma doğal frekansının 1.1 Hz olduğu durumlarda sıfıra yakın değerler almaktadır.

Çalkalanma doğal frekansının 0.9 ve 1 Hz olduğu durumlarda ise %3 kütle oranlı ASTS’de birbirine yakın değerler aldığı, %6 kütle oranlı ASTS’de ise 1 Hz çalkalanma doğal frekansına ait durumun daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Geçici durum çözümlerinde elde edilen performans değerleri her iki kütle oranlı ASTS için benzerdir. Çalkalanma doğal frekansının farklı değerler almasıyla da ASTS performanslarında bariz değişimler gözlemlenmemiş, oluşturulan ASTS’lerin geçici durum cevaplarında başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

#### **3.2.4.2 Farklı Etki Frekansı Altındaki Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyicilerin Sönümleme Performansı**

Farklı etki frekansı altındaki ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicilerin sönümleme performans karşılaştırılması bölüm 3.2.4.1’de olduğu gibi iki adımda yapılmıştır. Çizelge 3-12’de performans karşılaştırması kapsamında seçilen durumlar için detaylı bilgi verilmiştir.

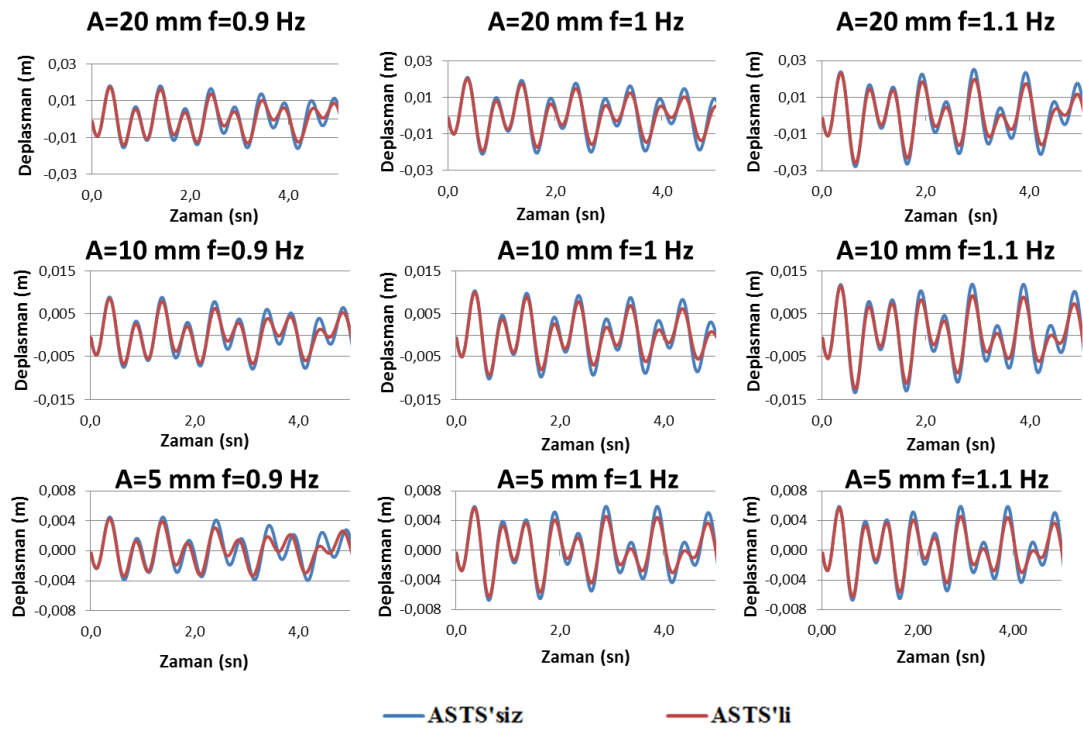
Çizelge 3-12: Farklı Etki Frekansı Çalışmasına Ait Parametreler

Kap Boyutları		Su Kütle Oranı (m <sub>r</sub> )	Su Yüksekliği (m)	Deplasman Genliği (mm)	Deplasman Frekansı (Hz)
Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)				
500	500	0,03	120	20	0,9
500	500	0,03	120	20	1
500	500	0,03	120	20	1,1
500	500	0,03	120	10	0,9
500	500	0,03	120	10	1
500	500	0,03	120	10	1,1
500	500	0,03	120	5	0,9
500	500	0,03	120	5	0,95
500	500	0,03	120	5	1
500	500	0,03	120	5	1,05
500	500	0,03	120	5	1,1
600	600	0,06	205	20	0,9
600	600	0,06	205	20	1
600	600	0,06	205	20	1,1
600	600	0,06	205	10	0,9
600	600	0,06	205	10	1
600	600	0,06	205	10	1,1
600	600	0,06	205	5	0,9
600	600	0,06	205	5	1
600	600	0,06	205	5	1,1

Performans karşılaştırması sırasında kap içerisindeki sıvının kütesinin, yapının toplam kütesine oranı %3 ve %6 olan iki farklı ASTS için sıvı yükseklikleri belirlenirken, Bölüm 2.1’de anlatıldığı üzere ana sistemin rezonans frekansının, ek sistemin rezonans frekansına eşit olması gerekliliği göz önüne alınarak, suyun çalkalanma frekansının 1 Hz’de sabit kalması esas alınmıştır. Her iki kütle oranı ile

tasarlanan ASTS'nin performansları yüksek genlik 0.02 m, orta genlik 0.01 m ve düşük genlik 0.005 m ve 0.9, 1 ve 1.1 Hz frekans ile aşağıda Denklem 3.6'da verilen formulasyon yardımıyla hesaplanmış deplasman sınır koşulu uygulanarak sonuçlar alınmıştır.

Şekil 3-27'de %3 kütle oranı için yapıdan alınan ASTS'siz ve ASTS'li deplasman verilerine ait grafikler bulunmaktadır.



Şekil 3-27 : %3 Kütle Oranlı Ayarlanmış Sıvılı Titreşim Sönümleyici Geçici Cevap Sonuçları

Şekil 3-27'de verilen grafikte tank içerisindeki sıvının kütesinin, yapının toplam kütesine oranının 0.03 olduğu durum için yapıdaki beton blok üzerinden alınan deplasman verisinin yapının hareketine göre farkı ile inceleme yapılmıştır. Grafiklerde yapı üzerine etkiyen deplasman sınır koşulunun frekans ve genliğinin artmasıyla birlikte yapıdan alınan deplasman verilerinin genliğinde de artış olduğu

gözlemlenmiştir. Yapıdan alınan deplasman verilerinin ASTS kullanılmadığı durumlarda, ASTS kullanıldığı durumlara göre daha fazla genlikte olduğu gözlemlenmiş, 0.03 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin geçici çözümde bir miktar başarılı olduğu anlaşılmıştır.

Geçici cevap performansları karşılaştırmasına ait ASTS'li ve ASTS'siz durum için alınan sonuçlar aşağıda Çizelge 3-13'de özetlenmiştir.

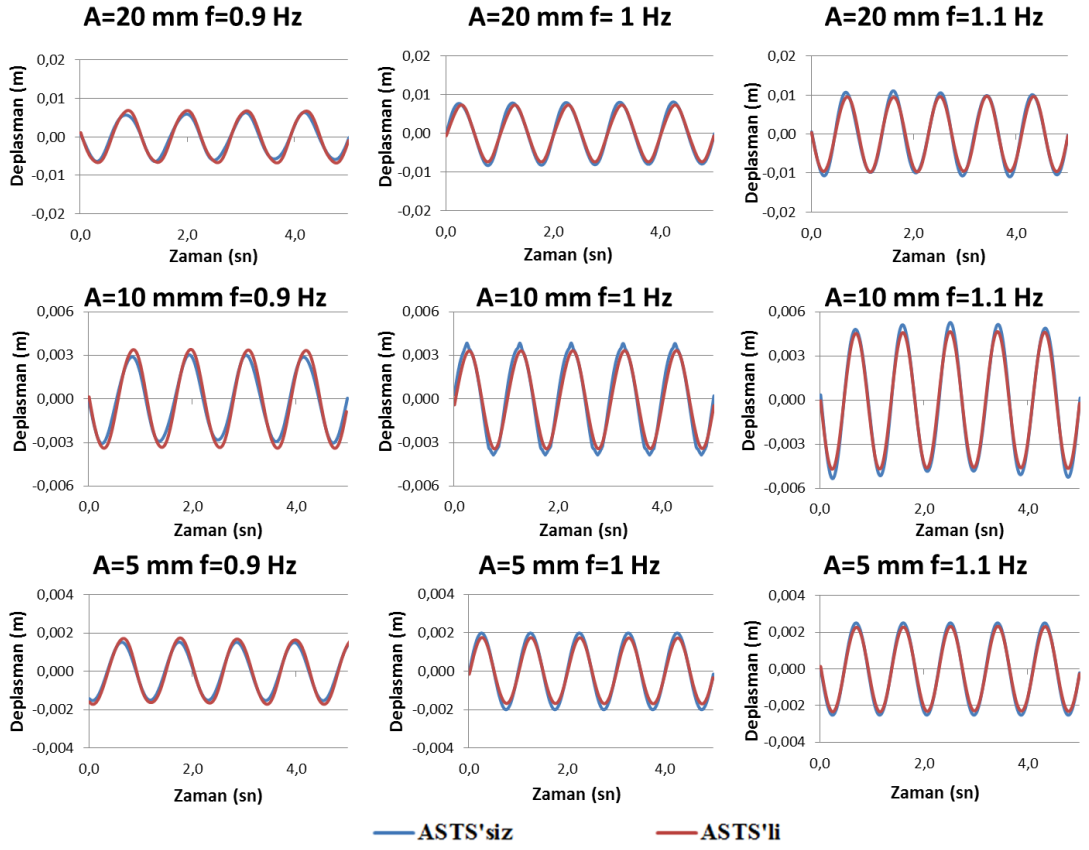
Çizelge 3-13 : %3 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Performans Sonuçları

% Genlik Azalımı		Frekans (Hz)		
		0.9	1	1.1
Genlik (m)	0.02	23	24	25
	0.01	20	23	24
	0.005	17	23	24

Çizelge 3-13'e göre geçici çözümde ASTS'lerin yapının ilk beş saniye içerisindeki deplasman tepe noktalarındaki düşme değerlerini %20 düzeylerinde azalttığı gözlemlenmiştir. Oluşturulan ASTS'nin her üç genlik ve frekans değerlerinde de benzer oranlarda sönümleme sağlaması ile geniş bir yelpazede geçici çözümde salınımları azalttığı anlaşılmıştır.

Çözümlerde bünyesinde ASTS barındırmayan yapının deplasman sınır koşulu karşısında yaklaşık 40-50 saniye arasında durağan hale geldiği gözlemlenmiş, yapıya ASTS eklenmesi ile birlikte durağan hale gelme süresi 20-25 saniyelere düşmüştür. Böylece ASTS'lerin yapıyı sönüm oranı daha yüksek bir hale getirdiği savunulabilir.

Performans karşılaştırmasının ikinci adımında oluşturulan ASTS'nin, yapı durağan hale gelmesiyle birlikte deformasyona katkısı incelenmiştir. Aşağıda Şekil 3-28'de oluşturulan ASTS'nin durağan hale katkısının incelendiği durumlara ait grafikler paylaşılmıştır.



Şekil 3-28 : %3 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Sonuçları

Şekil 3-28'deki grafiklere göre yapının geçici cevabına benzer bir şekilde yapıya etkiyen deplasman sınır koşulunun genlik ve frekans değerlerinin artması ile birlikte yapının deformasyonlarında artış gözlemlenmektedir. ASTS kullanılan durumlarda kullanılmayan durumlara göre yapı deformasyonunda geçici hale benzer şekilde durağan halde de azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen azalma oranları aşağıda Çizelge 3-14'de özetlenmiştir.

Çizelge 3-14 : %3 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Performans Sonuçları

% Genlik Azalımı		Frekans (Hz)		
		0.9	1	1.1
Genlik (m)	0.02	X	8.4	6.4
	0.01	X	12.5	8.7
	0.005	X	15	8.3

Çizelge 3-14'de verilen sönümlenme oranları incelendiğinde, tasarlanan ASTS'nin 0.9 Hz frekans ile bütün genliklerde durağan halde başarılı olamadığı hatta salınım genliklerini arttırdığı söylenebilir. Yapı üzerine etkiyen sınır koşulunun frekansı arttıkça, çalkalanma olayının şiddetlenmesi ile yapı üzerinde durağan halde sönümlenme sağlanabilmiş, genliğin azalması ile birlikte ise % 8.4'den %15'lere kadar artış gözlemlenmiştir. Yapı üzerinde maksimum sönümlenme 1 Hz frekans ile uygulanan sınır koşulunda sağlanmış olup, bu durumun tank içerisindeki suyun çalkalanma rezonans frekansının 1 Hz olmasıyla birlikte titreşim sönümleyicinin 1 Hz'e ayarlanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Yapı üzerine uygulanan sınır koşuluna ait frekans arttıkça yapının durağan yanıtında genliklerindeki düşüş azalmaya başlamıştır. Yapı üzerine 1.1 Hz ile sınır koşulu uygulandığında maksimum sönümlenmenin elde edildiği 5 mm lik genlikte sönümlenme %15'den %8'lere kadar azalmıştır. Böylece ASTS'lerin, bünyesinde bulundurduğu sıvının doğal frekansındaki etkide maksimum sönümlenmeyi elde ettikleri, bu frekanstan uzaklaştıkça sönümlenme oranlarının azaldıkları söylenebilir. Bu durum için yukarıda üç farklı frekansta durağan halde sönümlenme oranları incelenen 5 mm genlikli durum için ara frekans değerlerinde çözüm alınmış ve aşağıda Çizelge 3-15'de sunulmuştur.

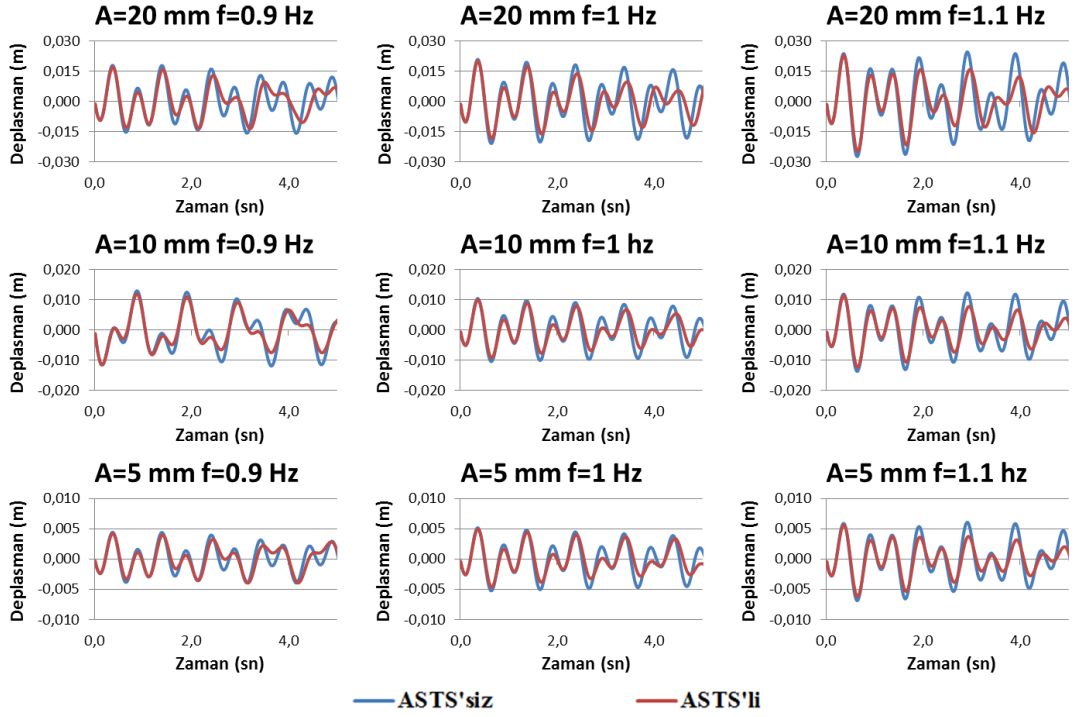
Çizelge 3-15 : %3 Kütle Oranlı ASTS Genişletilmiş Frekans Aralığı Performans Sonuçları

	<b>Frekans (Hz)</b>				
	<b>0.9</b>	<b>0.95</b>	<b>1</b>	<b>1.05</b>	<b>1.1</b>
<b>% Genlik Azalımı</b>	X	7.7	15	10.9	8.2

Çizelge 3-15’de verilen sönümlenme oranlarına göre en yüksek sönümlenme tank içerisindeki sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz’de gerçekleşmiş olup 1 Hz den uzaklaştıkça yapının sönümlenme oranlarında azalma meydana gelmektedir. 0.9 Hz frekans değerinde yapının ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyici ile deformasyonu, ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicisiz deformasyonundan daha büyük olduğundan sönümlenme oranından bahsedilmemiştir.

%3 kütle oranlı ASTS’ye ek olarak %6 kütle oranlı ASTS ile de hem geçici cevap hemde durağan cevap karşılaştırması yapılarak ASTS’lerin performansları karşılaştırılmıştır. Aşağıda Şekil 3-29’da %6 kütle oranlı ASTS’ye ait farklı frekans ve farklı genliklerde geçici durum çözümlerine ait sonuçlar bulunmaktadır.





Şekil 3-29 : %6 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Sonuçları

Şekil 3-29'daki grafiklere göre %6 kütle oranlı ASTS'de de %3 kütle oranlı da olduğu gibi sınır koşuluna ait genlik ve frekans arttıkça yapıdan alınan cevabın genliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. ASTS'nin geçici çözümde yapının deformasyonuna ait ilk bir kaç tepe noktası dışında diğer tepe noktalarında iyileşmeye neden olduğu gözlemlenmektedir. Geçici cevap için %6 kütle oranlı ASTS'nin sönümleme performansı aşağıda Çizelge 3-16'da özetlenmiştir.

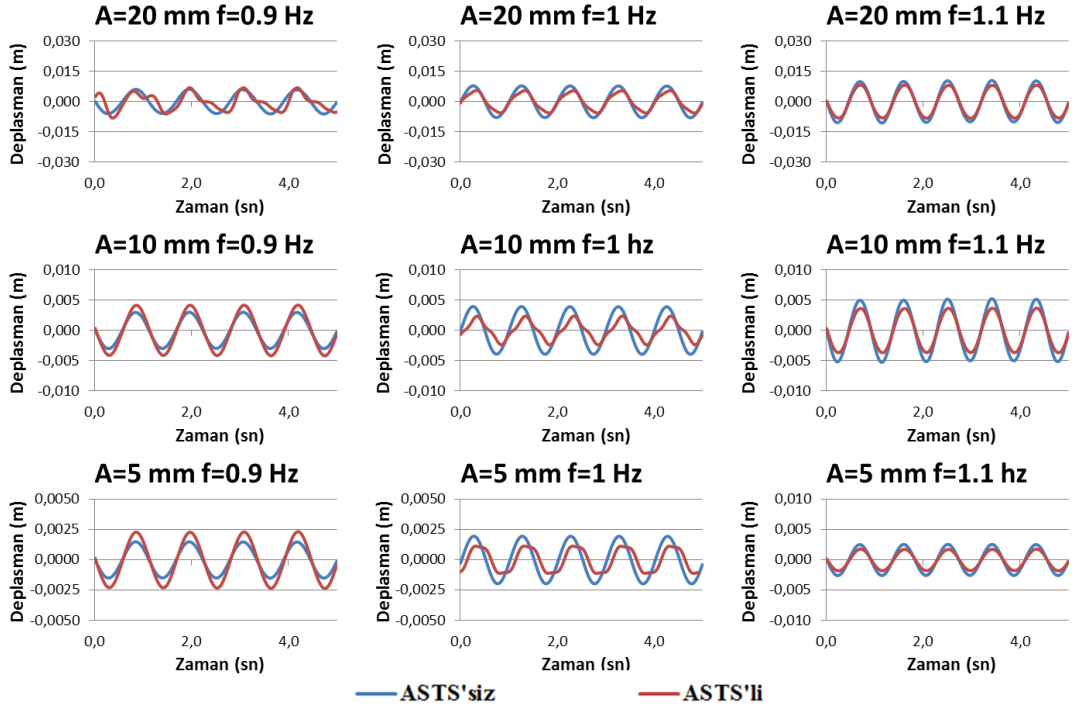
Çizelge 3-16 : %6 Kütle Oranlı ASTS Geçici Durum Performans Sonuçları

% Genlik Azalımı		Frekans (Hz)		
		0.9	1	1.1
Genlik (m)	0.02	30	26	28
	0.01	24	29	30
	0.005	16	12	33

Çizelge 3-16'da verilen sönümlenme oranlarına göre %6 kütle oranlı ASTS'nin, yapının geçici cevabında %3kütle oranlıda olduğu gibi %20 oranında başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Titreşim sönümleyicideki kütle artışının geçici cevapta bir etkisi gözlemlenememiş olup, farklı frekans ve genlik değerlerinde ise %6 kütle oranlı titreşim sönümleyicinin başarılı olduğu söylenebilir.

Çözümlerde bünyesinde ASTS barındırmayan yapının deplasman sınır koşulu karşısında durağan rejime varma süresindeki düşüş burada da gözlemlenmiştir.

%6 kütle oranlı ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin durağan hal performansı için çözümlerden elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 3-30'da sunulmuştur.



Şekil 3-30 : %6 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Sonuçları

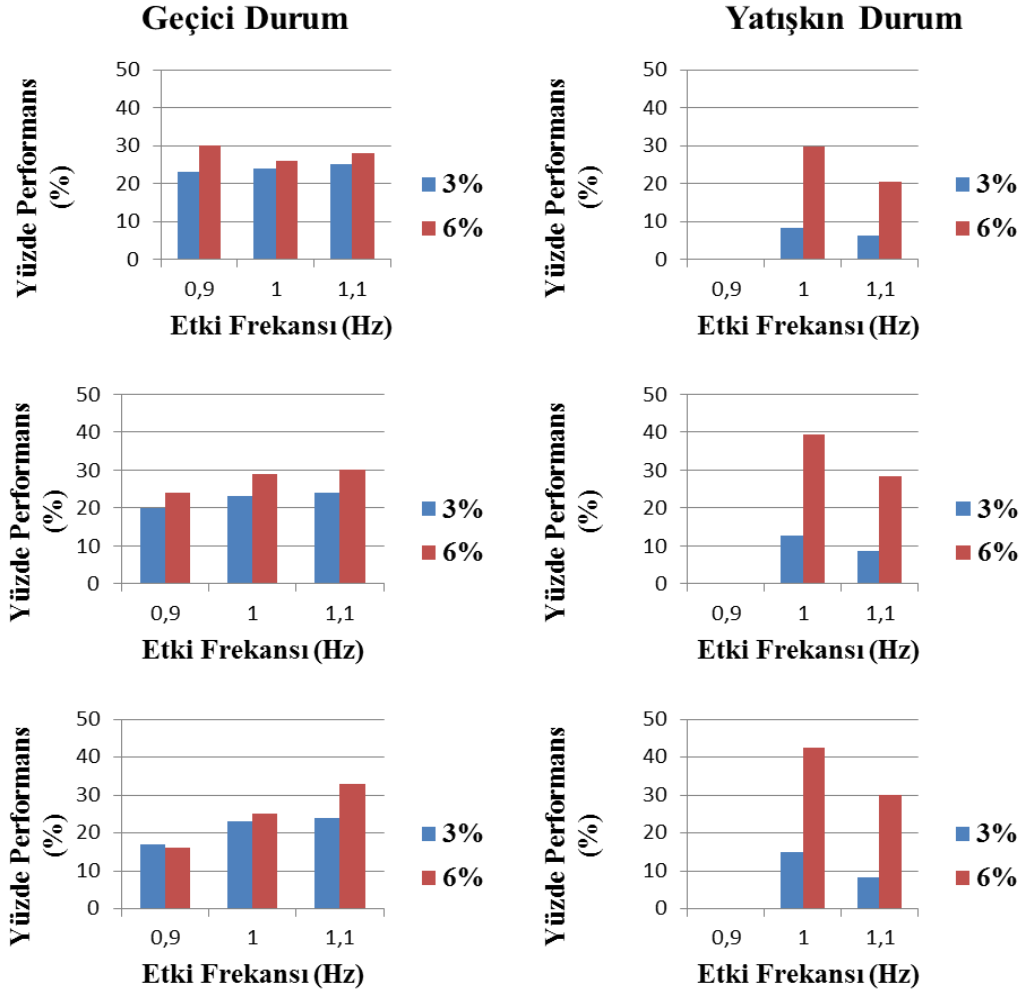
Şekil 3-30'da verilen grafikler, %6 kütle oranlı ASTS'nin 20 mm, 10 mm ve 5 mm genliklerde 0,9 Hz, 1 Hz ve 1,1 Hz frekanslardaki yapı üzerinde deformasyona etkisini göstermektedir. Grafiklerde 0,9 Hz zorlama frekansına sahip durumlara bakıldığında, oluşturulmuş %6 kütle oranlı ASTS'nin sönmülemde başarısız olduğu gözlemlenmiştir. %3 kütle oranlı durumdan farklı olarak %6 kütle oranlı ASTS 0,9 Hz zorlama frekansı altında ASTS'li durumda ASTS'siz duruma göre yapıdaki deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir. Zorlama frekansının sıvının çalkalanma doğal frekansı olan 1 Hz değerine çıkmasıyla birlikte, ASTS'nin performansında iyi derecede artış gözlemlenmiş, zorlama frekansının 1,1 Hz değerine çıkarılmasıyla birlikte bir önceki adıma göre ASTS'nin performansında bir miktar azalma gözlemlenmesinde yinede yapının sönmülenmesinde başarısından söz edilebilir düzeydedir. Aşağıda Çizelge 3-17'de %6 kütle oranlı ASTS'nin sönmüleme performansı özetlenmiştir.

Çizelge 3-17 : %6 Kütle Oranlı ASTS Yatışkın Durum Performans Sonuçları

% Genlik Azalımı		Frekans (Hz)		
		0.9	1	1.1
Genlik (m)	0.02	X	29.7	20.6
	0.01	X	39.4	28.4
	0.005	X	42.6	29.9

Çizelge 3-17’de verilen değerlere bakıldığında ASTS’ye ait kütle oranının %3’ten %6’ya çıkarılmasıyla %15’lerde olan sönümleme performansının %40’lara çıktığı gözlemlenmektedir. 0.9 Hz için ASTS’li durumda sönümleyicisiz duruma göre daha kötü sonuçlar alındığından genlik düşümünden bahsedilmemiştir.

Tez kapsamında farklı etki frekansı altındaki sıvılı titreşim sönümleyilerin sönümleme performanslarının belirlenmesi çalışmasında alınan sonuçlar Şekil 3-31’de özetlenmiştir.



Şekil 3-31 : Farklı Etki Frekansı Altında ASTS'lerin Performans Karşılaştırması

Şekil 3-31'de verilen sonuçlara bakıldığında en üstte verilen sonuçlar 0.02 m ile yüksek genlik sonuçlarını, ortada verilen sonuçlar 0.01 m ile orta genlik sonuçlarını ve altta bulunan sonuçlar ise 0.005 m ile düşük genlik sonuçlarını belirtmektedir. Sol taraftaki sütun geçici çözümlere, sağ taraftaki sütun ise yatışkın durum çözümlerine aittir. Sonuçlara göre ayarlanmış sıvılı titreşim sönümleyicinin kütle oranının artmasıyla yatışkın durum ve geçici durum performanslarının her ikisinde de artış gözlemlenmektedir. Her iki kütle oranlı ASTS'lerin geçici hal performansları etki genliğinin artmasıyla birlikte artmakta, yatışkın durum performansları ise etki genliğinin artması ile birlikte azalmaktadır. Geçici durum çözümlerinde her iki kütle oranındaki performanslar arasındaki fark yatışkın durum çözümlerindeki farklardan daha az olduğu gözlemlenmektedir.

#### 4. TARTIŞMALAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, son yıllarda üzerine yoğun çalışmalar yapılan ve genellikle rüzgar yükünün gökdelenlerin salınımlarını, insan konforunu etkileyecek şekilde arttırdığı durumlarda kullanılan ASTS'lerin deprem yükü gibi, rüzgar yüküne göre frekansı ve genliği daha fazla olan yüklemelerde performanslarının incelenmesi amacıyla, bünyesinde Yapısal Analiz ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinden aynı anda yararlanılmasını sağlayan çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yönteminin doğruluğunun incelenmesi amacıyla literatürde çalışılmış deneysel çalışmalarla öncelikle ASTS tankı içerisindeki sıvının serbest yüzey hareketleri, sığ su-şiddetli çalkalanma, derin su-şiddetli olmayan çalkalanma ve derin su-şiddetli çalkalanma durumları için ayrı ayrı incelenmiş, tank içerisindeki sıvının tank duvarlarına etkideği kuvvet ise yine literatürde deneysel olarak çalışılmış düşük genlik ve yüksek genlik yüksek frekans durumları için karşılaştırılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, simülasyondan serbest yüzey şekli ve kuvvet verisi karşılaştırmaları ile doğru sonuçların alındığı belirlenmiştir.

Çift yönlü akışkan yapı etkileşimi yöntemi ile başarılı sonuçlar elde edilmesiyle birlikte ASTS'nin simülasyonlarının yapılabilmesi için alüminyum bir kiriş üzerinde dikdörtgenler prizması şeklinde beton bir blok konularak temsili bir yapı oluşturulmuş ve oluşturulan yapının 0.02 m, 0.01 m ve 0.005 m genliklere ve 0.9 Hz, 1 Hz ve 1.1 Hz frekanslara sahip sinüzoidal zorlamalar altındaki cevapları %3 ve %6 kütle oranlı ASTS'ler için incelenmiştir. Yapılan çalışma kapsamında öncelikle farklı çalkalanma rezonans frekansına sahip ASTS'ler ile hangi frekansta ayarlanmış ASTS'den daha verimli sonuçlar alınacağı incelenmiş, ikinci adımda ise farklı etki frekanslarındaki performansları belirlenmiştir. Performans incelemesi iki adımda gerçekleştirilmiş, ilk adımda yapının geçici halde, ikinci adımda ise durağan halde cevapları incelenmiştir. 1 Hz çalkalanma doğal frekansına ayarlanmış ASTS'lerin daha verimli olduğu belirlenmiştir. Her iki kütle oranı için geçici halde ASTS'nin genlik düşümüne katkısı %25 civarında olup, durağan halde ise %3 kütle oranlı

ASTS'nin maksimum genlik düşümü %15 iken kütle oranının %6 ya çıkarılmasıyla yapının genliklerindeki azalmanın %42 lere çıktığı gözlemlenmiştir. ASTS'lerin geçici durum cevaplarındaki başarısı geniş frekans ve genliklerde birbirine benzese de durağan hal cevaplarında yapı üzerine etkileyen yüklemenin frekansının ASTS'nin genlik düşümüne farklı etkiler yaptığı anlaşılmıştır. Yapı üzerine uygulanan yüklemenin genliğinin artmasıyla birlikte ise şiddetli çalkalanmalarda sıvının serbest yüzeyinden kopmaların olmasıyla birlikte ASTS'nin genlik azalımı performansında azalmalar gözlemlenmiştir. Böylece durağan hal cevaplarında ASTS'nin istenilen zorlama genliği ve frekansında başarılı sonuçlar vermesi için optimizasyon çalışmasına gereksinimi olduğu ortaya çıkmıştır.

ASTS modellenmesinde çift yönlü akışkan yapı etkileşimi ile birlikte başarılı sonuçlar elde edilmiştir. İleride gerçekleştirilecek çalışmalarda tasarlanacak ASTS'lerde tank içerisine yerleştirilecek ketler ile şiddetli çalkalanmaların yaşandığı durumlarda sönümleme kapasitesinin artıp artmayacağını incelenmesi ve farklı tank geometrilerinin performansa etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Kap içerisinde bulunan sıvının sistemi, lineer olmayan sisem haline getirmesi ile birlikte, lineer olmayan sönümleyiciler üzerinde çalışmalar yapılması planlanmıştır. Ayrıca gerçek bir yapı üzerine gerçek deprem verilerinin verilmesi ile ASTS'lerin deprem yüklemelerinde yapıya katkısının olup olmayacağını daha doğru öngörülmesi düşünülmektedir.

## **KAYNAKLAR**

- [1] Kareem, A., T. Kijewski, and Y. Tamura. "Mitigation of Motions of Tall Buildings with specific Examples of Recent Applications." *Wind and Structures* 2(3):201-251, 1999.
- [2] Abramson, H. N., Chu, W. H., and Kana, D. D., "Some Studies of Nonlinear Lateral Sloshing in Rigid Containers." *ASME Trans. J. Appl. Mech.*, 33(4), pp. 777-784, 1966.
- [3] Frahm, H. "Device for damping vibrations of bodies." U.S. Patent No: 989958.
- [4] Ormondroyd, J., and Den Hartog, J.P.: "Theory of the dynamic vibration absorber." *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 50:9-22, 1928.
- [5] "Skyscrapers Detailed Information" erişim adresi: <http://www.skyscrapers.com/> , erişim tarihi: 10 Haziran 2014 .
- [6] H. F. Bauer, Oscillations of Immiscible Liquids in a Rectangular Container: A new Damper for Excited Structures, *Journal of Sound and Vibration*, 93 117-133, 1983.
- [7] Strandberg, L., "Lateral stability of road tanks", National Road and Traffic research Institute, Report No. 138A, 1978.
- [8] Wang, W., Wang, X., Wang, J., and Wei, R., "Dynamical behaviour of parametrically excited solitary waves in Faraday's water through experiment." *Physics Letters A*, 219, 74-78, 1996.
- [9] Akyildiz, H., Unal, E., "Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank due to the Liquid Sloshing." *Ocean Engineering* 32 (2005) 1503-1516, 2005..
- [10] Kim, J. K., Koh, H. M., and Kwahk, I. J., Dynamic response of rectangular flexible fluid containers, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 122(9), 807-817, 1996.
- [11] Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F., and Timokha, A. N., "Resonant three dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin." *Journal of Fluid Mechanics*, 478, 1-22, 2003.



- [12] C. G. Koh, S. Mahatma, C. M. Wang, "Reduction of Structural Vibrations by Multiple-Mode Liquid Dampers." *Engineering Structures* V17 N2, 1995.
- [13] Shimizu, T. and Hayama, S. 'Nonlinear response of sloshing based on shallow water theory', *Japan Soc. Mech. Engrs* 30,806-813, 1987.
- [14] Sun, L. M., Fujino, Y., Pascheco, B. M. and Isobe, M. 'Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular Tuned Liquid Damper(TLD) simulation and experimental verification' *Struct. Engng/Eartquake Engn. JSCE*, 6,273s-282s, 1989.
- [15] P., Pinot, G., Geneves, "Numerical simulation for designing tuned liquid dampers to damp out double-pendulum oscillations." *Measurement science and technology*, 2003.
- [16] Banerji, P., Murudi, M., Shah, A. H., and Popplewell, N., "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures." *Eartquake Engng Struct Dyn.* 29,(2000), pp. 713-743,2000.
- [17] Grilli S. T., Skourup J., Svendsen I. A., "An Efficient Boundary Element Method for Nonlinear Water Waves." *Computational Mechanics Publications*, Vol.6, No. 2, 1989.
- [18] A. Gedikli, M.E. Ergüven, "Evaluation of Sloshing Problem by Variational Boundary Element Method." *Engineering Analysis with BoundarY Elements* 27 (2003) 935-943, 2003.
- [19] S. Huang, W. Duan, X. Zhu, "Time-Domain Simulation of Tank Slushing Pressure and Experimental Validation." *9th International Conferance on Hyrodynamics* October 11-15,Shanghai, China, 2010.
- [20] Chen, H. Chiang, "Complete two Dimentional Analysis of Sea-Wave-Induced Fully Non-linear Slushing Fluid in a Rigid Floating Tank." *Ocean Engineering* 27 953-977, 2000.
- [21] Y. Kim, Y. Shin, K. H. Lee, "Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks." *Applied Ocean Research* 26 213-226, 2004.
- [22] B. Chen, R. Nokes, "Time-independent Finite Difference Analysis of Fully Non-linear and Viscous Fluid Sloshing in a Rectangular Tank." *Journal of Computational Physics* 209 47-81, 2005.

- [23] S. J. Lee, M. H. Kim, D. H. Lee, J. W. Kim, Y. H. Kim, "The effects of LNG-tank sloshing on the global motions of LNG carries." *Ocean Engineering* 34 10-20, 2006.
- [24] M. S. Celebi, H. Akyıldız, "Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank." *Ocean Engineering* 29 1527-1553, 2002.
- [25] C. H. Wu, B.F. Chen, "Sloshing waves and resonance modes of fluid in a 3D tank by a time-independent finite difference method." *Ocean Engineering*, 36 500-510, 2009.
- [26] G. X. Wu, R. E. Taylor, "Finite element analysis of two-dimensional non-linear transient water waves." *Applied Ocean Research* 16(1994) 363-372 Elsevier Science Limited 0141-1187(94)00029-8, 1994.
- [27] W. Wang, J. Li, T. Wang, "Damping computation of liquid sloshing with small amplitude in rigid container using FEM." *Acta Mech Sinica* (2006) 22:93-98 DOI 10.1007/s10409-005-0081-3, 2006.
- [28] N. C. Pal, S. K. Bhattacharyya, P. K. Sinha, "Non-linear coupled slosh dynamics of liquid-filled laminated composite containers: a two dimensional finite element approach." *Journal of Sound and Vibration* 261 729-749, 2003.
- [29] K. C. Biswal, S. K. Bhattacharyya, P. K. Sinha, "Free-vibration analysis of liquid-filled tank with baffles, *Journal of Sound and Vibration*" 259(1), 177-192, 2003.
- [30] G. X. Wu, Q. W. Ma, R. E. Taylor, "Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method." *Applied Ocean Research* 20 337-355, 1988.
- [31] V. J. Modi, A. Akıntürk and W. Tse, "A Family of Efficient Liquid Dampers for Suppression of Wind-Induced Instabilities." *Journal of Vibration and Control* 9:361, 2003.
- [32] V. J. Modi, S. R. Munshi, "An efficient liquid sloshing damper for vibration control, *Journal of Fluids and Structures*." 12, 1055-1071 Article No: f1980182, 1998.
- [33] Modi, V., J., and Munshi, S. R., An efficient Liquid Sloshing Damper for Vibration Control, *Journal of FLUIDS AND STRUCTURES*, 12, PP. 1055-1071, 1998.

- [34] Fediw, A. A., Isyumov N., and Vickery B. J., Performance of a tuned sloshing water damper, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57, pp. 237-247, 1995.
- [35] E. Bucchignani, "A numerical study of non-linear dynamics in a tank for aerospace applications." *Applied Numerical Mathematics* 49, 307-318, 2004.
- [36] Y. Tamura, K. Fujii, T. Ohtsuki, T. Wakahara, R. Kohsaka, "Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation." *Engineering structures*, Vol. 17, No. 9, pp 609-621, 1995.
- [37] G. Yan, S. Rakheja, K. Siddiqui, "Experimental Study of Liquid Slosh Dynamics in a Partially-Filled Tank." *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 131 / 071303-1, 2009.
- [38] Hong-Nan Li et al, "Wind-induced vibration control of Dalian International Trade Mansion by tuned liquid dampers", 1995.
- [39] O. Corbi, "Experimental Investigation on Sloshing Water Dampers Attached to Rigid Blocks." *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science*, Hangzhou, China, 2006.
- [40] Qiao Jin et al, "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform." *Marine Structures* 20 238-254, 2007.
- [41] Z. R. Kisev, C. Hu, M. Kashiwagi, "Numerical Simulation of Violent Sloshing by a CIP-based Method." *J Mar Sci Technol* 11:111-112 DOI 10.1007/s00773-006-0216-7, 2006.
- [42] Reed, D., Yu, J., Yeh, H., Gardarsson, S., Investigation of Tuned Liquid Dampers under Large Amplitude Excitation, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, ISSN 0733-9399/98/0004-0405-0413, 1998.
- [43] A. Marsh, M. Prakash, E. Semercigil, Ö. F. Turan, "A Numerical Investigation of Energy Dissipation with a Shallow Depth Sloshing Absorber." *Applied Mathematical Modelling* 34 2941-2957, 2011.
- [44] A. P. Marsh, M. Prakash, S. E. Semercigil, O. F. Turan, "Energy Dissipation through Sloshing in an Egg-Shaped Shell." 17th Australasian Fluid Mechanics Conference Auckland, New Zealand 5-9 December 2010.

- [45] M., R., Cassolato, The Performance of Tuned Liquid Damper Equipped With Inclined and Oscillating Damping Screens, Yüksek Lisans Tezi, McMaster University, 2007.
- [46] F. K. Benra, H.J. Dohmen, J. Pei, S. Schuster, B. Wan, A Comparison of One Way and Two Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid Structure Interactions, Journal of Applied Mathematics, ID 853560, 2011.
- [47] Gingold, R. A. and Monaghan, J. J., "Smooth Particle Hydrodynamic Theory and Application to Non-Spherical Stars", Royal Astronomical Society, 181 375-389, 1977.
- [48] FLUENT, "Theory Guide", 2014..
- [49] C. W. Hirt and B. D. Nichols, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of free Boundaries, Journal of Computational physics 39, 201-225, 1981.
- [50] Mimi, G., Numerical Simulation of Liquid Sloshing in Rectangular Tank Using Consistent Particle Method and Experimental Verification, Doktora Tezi, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : VURUSKAN, Ilker  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 14.09.1988 Adana  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (530) 881 19 38  
e-mail : [ivuruskan@etu.edu.tr](mailto:ivuruskan@etu.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2014
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2011
Lise	İçel Anadolu Lisesi	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
12.2012-	TürkTraktör Ziraat Makinaları A.Ş. AR-GE	Ürün Değerlendirme Mühendisi
09.2011-12.2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üni. Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
05.2011-08.2011	OTOKAR Otomotiv ve Savunma San.	Stajyer
2009	TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi	Stajyer
2008	Anadolu Metalurji ve Mak. San	Stajyer

**Yabancı Dil**

İngilizce

Almanca

**Yayınlar**

Vuruskan I., Sert C., Ozer M. B., “Simulation of Fluid Sloshing for Decreasing the Response of a Structural” Systems-Proceedings of the 12<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA14, Copenhagen –Denmark, 2014