T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇAMAŞIR MAKİNESİ DENGELEME HALKASININ MODELLENMESİ

Emin Övünç ŞENGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Haziran, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇAMAŞIR MAKİNESİ DENGELEME HALKASININ MODELLENMESİ

Emin Övünç ŞENGÜN tarafından hazırlanan tez çalışması 28.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Berna BOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Serpil KURT HABİBOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Modellenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emin Övünç ŞENGÜN

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca gerek akademik gerekse de kişisel anlamda yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve birikimini paylaşmaktan çekinmeyen değerli hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sayın Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ' a teşekkürü borç bilirim.

Gerçekleştirmiş olduğum bu tez çalışması; üniversite – sanayi işbirliği kapsamında Arçelik A. Ş. Ar- Ge Direktörlüğü tarafından desteklenmiş olup, gerek teknik gerekse de maddi anlamda bu imkanı sağlayan Arçelik A.Ş. Üst Yönetimi' ne ve Ar- Ge Kıdemli Direktörü Sayın Emre OĞUZ' a, bilgi birikim ve teknik deneyimlerini paylaşan Dijital Modelleme ve Yapısal Tasarım Departmanı Kıdemli Yöneticisi Sayın Kutay EDİS' e, mesleki deneyimini ve teknik bilgisini esirgemeyen, destekleri ile her zaman yanımda olan aynı yöneticilikte çalıştığım, başta Kıdemli Lider Mühendis Sayın Armin AMİNDARİ olmak üzere tüm iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Sadece yüksek lisans tez çalışmam süresince değil, tüm hayatım boyunca; beni ben yapan, hayata dair deneyimlendiren, teknik ve kişisel anlamda geliştiren ve yol gösteren, tek tek adını sayamayacağım, saygı ile andığım tüm büyüklerime, arkadaşlarıma ve özellikle her şey bir yana onlar diğer yana diyebileceğim, kendilerini bizlere adayan, bana her zaman güvenen, kendimi geliştirmem için çabalayan, maddi – manevi her zaman arkamda olduklarını bildiğim ve daima onlarla gurur duyduğum aileme bu tez vesilesi ile sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Emin Övünç ŞENGÜN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xx

ÖZET xxii

ABSTRACT xxiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 1

1.2 Tezin Amacı ... 10

1.3 Hipotez ... 11

1.4 Tez Organizasyonu ... 11

2 GENEL BİLGİLER VE TEORİ 13

2.1 Çamaşır Makinesi Hakkında Genel Bilgiler ... 13

2.1.1 Dünden Bugüne Çamaşır Makinesi ... 15

2.1.2 Yükleme Tipine Göre Çamaşır Makinesi Çeşitleri ... 19

2.1.3 Üstten Yüklemeli Çamaşır Makinesi Komponentleri ... 21

2.2 Dengeleme Halkası ... 23

2.2.1 Dengeleme Halkası Kullanım Amacı ... 24

2.2.2 Dengeleme Halkası Çalışma Prensibi ... 25

2.2.3 Örnek Dengeleme Halkası Tasarımları ... 26

2.3 Bilgisayar Destekli Tasarım Hakkında Genel Bilgiler ... 31

2.4 Teori ... 36

2.4.1 İnterpolasyonlu Tanecik Metodu ... 36

2.4.2 Dengesizlik ... 42

2.4.3 Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkası Çalışma Teorisi ... 45

3 MODELLEME ÇALIŞMALARI 59

3.1 SPH Metoduna Ön Hazırlık Amacıyla Yapılan Çalışmalar ... 59

3.1.1 SPH Metodu İle CFD Metodunun Karşılaştırılması ... 60

3.1.2 Kanal İçerisinde Akışın SPH Metodu ile Modellenmesi ... 69

3.2 Dengeleme Halkası Analizleri ... 75

3.2.1 Tasarımın Basitleştirilmesi ... 75

3.2.2 Basit Dengeleme Halkasının Modellenmesi..... 75
3.2.3 Dengeleme Halkası Analizlerinin Ön Doğrulama Çalışmaları..... 89
3.2.4 Analiz Metodu Geliştirme – Model İyileştirme Çalışmaları..... 96
3.2.5 Dengeleme İyileştirme Amacıyla Gerçekleştirilen Analiz Senaryoları 102
4 BULGULAR **113**
4.1 Analiz Değerlendirme Sürecinde Dikkat Edilen Hususlar 113
4.2 Analiz Sonuçları..... 115
4.2.1 Dengeleme Halkası Analizlerinin Analitik Ön Doğrulama Sonuçları 115
4.2.2 Dengeleme İyileştirme Amacıyla Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.. 141
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **174**
KAYNAKÇA **181**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **184**

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal Hız
E_k^r	Anlık Dönme Kinetik Enerjisi
E_k	Anlık Öteleme Kinetik Enerjisi
$K_{interface}$	Ara Yüzey Rijitliği
c_k	Basit Kübik Yapının Bir Kenarının Uzunluğu
$E_{,1}$	Başlangıçtaki Enerji
m_{denge}	Denge Ağırlığı Kütlesi
R	Dengeleme Halkası Dış Çap
r	Dengeleme Halkası İç Çap
E_{wk}	Dış Kuvvetlerin Yaptığı İş
δ	Dirac / Delta Fonksiyonu
M_d	Disk Kütlesi
r_d	Disk Yarıçapı
d	Düzleştirme Uzunluğu
e	Eksenel Kaçıklık
E	Elastisite Modülü
$K_{element}$	Element Rijitliği
$\Delta t_{Element}$	Elemental Zaman Adımı
K_i	Eşdeğer Nodal Rijitliği
C_0	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
C_1	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
C_2	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
C_3	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
C_4	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
C_5	Hidrodinamik Basınç Katsayısı
E_i	İç Enerji
l_c	Karakteristik Eleman Uzunluğu
Δt_{kin}	Kinematik Kontak Zaman Adımı
ϑ	Kinematik Viskozite
Gap	Kontak Boşluğu
m_i	Nodal Kütle

$\Delta t_{inter\ nodal}$	Nodal Temas Zaman Adımı
Δt_{nodal}	Nodal Zaman Adımı
n	Oluşturulan Tanecik Sayısı
p_{amount}	Penetrasyon Miktarı
$\frac{dp}{dt}$	Penetre Olan Düğüm Noktalarının Bağıl Hızları
υ	Poisson Oranı
c	Ses Hızı
h	SPH Parçacıklarından Birinin, Etrafındaki Herhangi Parçacığa Olan Nominal Uzaklığı
V	Tanecik ile Doldurulan Hacim
m_p	Tek Bir Taneciğin Ağırlığı
V_p	Tek Bir Taneciğin Hacmi
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian (Rastgele Seçilmiş Euler-Lagrange Yöntemi)
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
FEM	Finite Element Method (Sonlu elemanlar Metodu)
FSI	Fluid – Structural Interaction (Sıvı- Katı Temaslı Nümerik Analiz)
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics (İnterpolasyonlu Tanecik Metodu)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 MABE Firması' nın US 8276406 numaralı patenti [2].....2

Şekil 1.2 MABE Firması' nın gerçekleştirdiği analiz çalışmasında ve hızlı kamera ile çekilmiş anlık görüntüde sıvının çalkalanma hareketi [1].....2

Şekil 1.3 Antoci ve arkadaşlarının (2006) üzerinde çalıştığı düzeneğin temsili şekli [6] 4

Şekil 1.4 Bui ve arkadaşlarının (2007) gerçekleştirdiği toprak – basınçlı suyun temasını içeren çalışma [7] 5

Şekil 1.5 Patapov ve arkadaşlarının (2008) gerçekleştirdiği çalışmanın temsili şekli [8] 5

Şekil 1.6 Lee ve Hong' un (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada engel üzerinde hesaplanan von misses gerilmeleri [16] 9

Şekil 2.1 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki iç satış adetleri [18].....14

Şekil 2.2 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki dış satış adetleri [18] 14

Şekil 2.3 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki üretim adetleri [18].....15

Şekil 2.4 1797 yılında icat edilen çamaşır fırçalama tahtasının temsili resmi [19].....16

Şekil 2.5 1910 yılında patentlenen Thor isimli makine [19] 17

Şekil 2.6 Önden yüklemeli (a) ve üstten yüklemeli (b) çamaşır makinesi örnekleri.....19

Şekil 2.7 Önden yüklemeli (a) ve üstten yüklemeli (b) çamaşır makinesi örnek CAD dataları.....20

Şekil 2.8 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi gövde grubu komponentleri 22

Şekil 2.9 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi tahrik grubu komponentleri 22

Şekil 2.10 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi deterjan kutusu ve montajı..23

Şekil 2.11 Örnek dengeleme halkası tasarımı.....23

Şekil 2.12 Örnek dengeleme halkası detay görünümü 24

Şekil 2.13 US6418758 numaralı Sanyo Electric patenti [21] 26

Şekil 2.14 JP2007209502 numaralı Sanyo Electiric patenti [22] 27

Şekil 2.15 GB2388849A numaralı Dyson Ltd. patenti [23] 27

Şekil 2.16 CN107366131A numaralı BSH Electrical Appliances Jiangsu Co. Ltd. patenti [24].....28

Şekil 2.17 CN1782186 numaralı LG Electronics patenti [25] 28
Şekil 2.18 CN104562554A numaralı Haier Group Corp. patenti [26] 29
Şekil 2.19 WO2018099421A1 numaralı Qingdao Haier Washing Mach Co. patenti [27] 29
Şekil 2.20 CN102537186A numaralı Univ. Jiangnan patenti [28] 30
Şekil 2.21 Örnek dairesel kanallar 30
Şekil 2.22 Geleneksel tasarım [29] 32
Şekil 2.23 Bilgisayar destekli mühendislik katkılı tasarım [29] 32
Şekil 2.24 Implicit ve explicit çözümlerin kullanıldığı alanlar [29] 35
Şekil 2.25 Eğri fonksiyonlarında kernel yaklaşımı [31] 36
Şekil 2.26 Hegzagonal kompakt yapı tanecik dağılımı [32] 38
Şekil 2.27 Yüzey merkezli kübik yapı tanecik dağılımı [32] 38
Şekil 2.28 Yüzey merkezli kübik yapı tanecikler arası nominal mesafe ve küp kenar uzunluğu ilişkisi [32] 39
Şekil 2.29 Basit kübik yapı tanecikler arası nominal mesafe ve küp kenar uzunluğu ilişkisi [32] 40
Şekil 2.30 Statik (a) ve dinamik (b) dengesizlik durumları [33] 43
Şekil 2.31 Dengesizlik 44
Şekil 2.32 Tek serbestlik dereceli sistem [33] 45
Şekil 2.33 İki serbestlik dereceli sistem [33] 49
Şekil 2.34 Bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler [33] 52
Şekil 2.35 Bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler [33] 54
Şekil 2.36 İçerisinde bilye ve makine yağı bulunan dengeleme halkasının deneysel ortamdaki görüşü (ω=0 rad/s) [33] 57
Şekil 2.37 Bilyelerin, $\omega \geq \omega n$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33] 57
Şekil 2.38 Bilyelerin, $\omega > \omega n$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33] 58
Şekil 2.39 Bilyelerin, $\omega \gg \omega n$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33] 58
Şekil 3.1 Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada kullanılan deney düzeneğinin temsili resmi [34] 61
Şekil 3.2 Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada kullanılan deney düzeneğinin analiz ortamındaki ilk dijital ikizi [35] 63
Şekil 3.3 Tankın zamana bağlı hız grafiği [35] 65
Şekil 3.4 Tankın mesh yapısı ve sınır koşulları [35] 65

Şekil 3.5 SPH metodu ile elde edilen görüntülerin Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmadan elde edilen sonuçlarla kıyaslanması [35] 66

Şekil 3.6 Tek eksende titreşim hareketinin modellendiği silindirik halka yapısı 67

Şekil 3.7 Halka yapısının x eksenindeki zamana göre konum değişimi [35] 68

Şekil 3.8 Halka yapısının x eksenindeki titreşim hareketi sonucunda, sıvının 2. sn deki dağılımı [35] 68

Şekil 3.9 Akışın gerçekleştiği kanalın ağ yapısı 71

Şekil 3.10 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 6 mm olduğu senaryoda gözlenen akış 72

Şekil 3.11 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 12 mm olduğu senaryoda gözlenen akış 72

Şekil 3.12 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 25 mm olduğu senaryoda gözlenen akış 73

Şekil 3.13 Kompresör emme yaprağının hareketinin SPH yöntemi ile modellenmesi 74

Şekil 3.14 Tankerin dalgalı denizdeki seyrinin SPH yöntemi ile modellenmesi örneği [36] 74

Şekil 3.15 Tahrik grubunun kesit görünümü 76

Şekil 3.16 Dengeleme halkasının dengesiz durumda dönme hareketi 77

Şekil 3.17 Dengeleme halkasının montaj ve hareketinin basitleştirilmiş hali 78

Şekil 3.18 Oluşturulan modelde dengeleme halkasının konumu 78

Şekil 3.19 Dengeleme halkasının modellenme aşamasında modellenmesi sırasında kaldırılan yapısal unsurlar 80

Şekil 3.20 Dengeleme halkası kalınlıkları 81

Şekil 3.21 RBODY elemanın yay elemanına bağlanması 83

Şekil 3.22 Ana modelin temsili görüntüsü 90

Şekil 3.23 Ana modelde kullanılan basitleştirilmiş dengeleme halkasının ölçüleri 90

Şekil 3.24 Öncül analizler senaryo 1 ‘ de tanımlanan hız 91

Şekil 3.25 Öncül analizler senaryo 2 ‘de tanımlanan açısal hız 91

Şekil 3.26 Öncül analizler senaryo 3, senaryo 4, senaryo 5, senaryo 6, senaryo 7, senaryo 11 ve senaryo 12 ‘de tanımlanan açısal hız 92

Şekil 3.27 Öncül analizler senaryo 6 ve senaryo 7’ de tanımlanan sabit ivme ile artan hız grafiği 93

Şekil 3.28 Öncül analizler senaryo 8, senaryo 9 ve senaryo 10' da tanımlanan sinüzoidal hız grafiği 94

Şekil 3.29 Oluşturulan modelin doğrulanabileceği deney düzeneğinin CAD ortamında çizimi 97

Şekil 3.30 Oluşturulan modelin sabit bir zemine bağlanması 97

Şekil 3.31 Modelin bağlandığı zemin 98

Şekil 3.32 Oluşturulan modellerin birbirine bağlantı şeması 99

Şekil 3.33 Analizlerin gerçekleştirileceği finalize model 99

Şekil 3.34 Oluşturulan modelin gelişim aşamaları 101

Şekil 3.35 Dengeleme iyileştirme amacıyla gerçekleştirilen analizlerde tanımlanan açısal hız grafiği 103

Şekil 3.36 Dengeleme halkasının içinin tamamen boş olduğu dengesiz yüksüz tasarım 106

Şekil 3.37 Dengeleme halkasının içinin tamamen boş olduğu tasarım 107

Şekil 3.38 Dengeleme halkasının iki kanallı olduğu tasarım 107

Şekil 3.39 Dengeleme halkasının içerisinde dıştan içe sekiz federin olduğu tasarım 108

Şekil 3.40 Dengeleme halkasının içerisinde dıştan içe kepçe şeklinde sekiz federin olduğu tasarım 109

Şekil 3.41 Dengeleme halkasının içerisinde sekiz ayrı bölmenin olduğu tasarım 109

Şekil 3.42 Dengeleme halkasının içerisinde on altı ayrı bölmenin olduğu tasarım 110

Şekil 3.43 Dengeleme halkasının içerisinde iki kanal ve kanallarda sekizer L şeklinde feder yapısı bulunan tasarım 110

Şekil 3.44 Dengeleme halkasının içerisinde iki kanal ve kanallarda on ikişer L şeklinde feder yapısı bulunan tasarım 111

Şekil 4.1 Gerçekleştirilen analizlerden, örnek olarak seçilen bir senaryo için enerji grafiği 114

Şekil 4.2 Yay elemanı eksen takımı 116

Şekil 4.3 Senaryo 1 için z_{yay} ekseninde hesaplanan kuvvet 116

Şekil 4.4 Senaryo 1 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 117

Şekil 4.5 Senaryo 2 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 118

Şekil 4.6 Senaryo 2 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 119

Şekil 4.7 Senaryo 3 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 119

Şekil 4.8 Senaryo 3 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 120

Şekil 4.9 Senaryo 3 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 120

Şekil 4.10 Senaryo 4 için z_{yay} ekseninde oluşan reaksiyon kuvveti 121
Şekil 4.11 Senaryo 4 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 121
Şekil 4.12 Senaryo 4 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 122
Şekil 4.13 Senaryo 4 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 122
Şekil 4.14 Senaryo 5 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....123
Şekil 4.15 Senaryo 5 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 124
Şekil 4.16 Senaryo 5 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 124
Şekil 4.17 Senaryo 5 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 124
Şekil 4.18 Senaryo 6 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....125
Şekil 4.19 Senaryo 6 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....125
Şekil 4.20 Senaryo 6 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 126
Şekil 4.21 Senaryo 6 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 126
Şekil 4.22 Senaryo 6 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 127
Şekil 4.23 Senaryo 7 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....127
Şekil 4.24 Senaryo 7 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....128
Şekil 4.25 Senaryo 7 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 128
Şekil 4.26 Senaryo 7 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 129
Şekil 4.27 Senaryo 7 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 129
Şekil 4.28 Senaryo 8 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....130
Şekil 4.29 Senaryo 8 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....130
Şekil 4.30 Senaryo 8 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 130
Şekil 4.31 Senaryo 8 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 131
Şekil 4.32 Senaryo 9 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....131
Şekil 4.33 Senaryo 9 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti.....132
Şekil 4.34 Senaryo 9 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 132
Şekil 4.35 Senaryo 9 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 132
Şekil 4.36 Senaryo 10 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....133
Şekil 4.37 Senaryo 10 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....133
Şekil 4.38 Senaryo 10 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....134
Şekil 4.39 Senaryo 10 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 134
Şekil 4.40 Senaryo 10 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 135
Şekil 4.41 Senaryo 10 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 135
Şekil 4.42 Senaryo 11 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....136
Şekil 4.43 Senaryo 11 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....136

Şekil 4.44 Senaryo 11 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....136
Şekil 4.45 Senaryo 11 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 137
Şekil 4.46 Senaryo 11 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 138
Şekil 4.47 Senaryo 11 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 138
Şekil 4.48 Senaryo 12 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....138
Şekil 4.49 Senaryo 12 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....139
Şekil 4.50 Senaryo 12 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti....139
Şekil 4.51 Senaryo 12 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 139
Şekil 4.52 Senaryo 12 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 140
Şekil 4.53 Senaryo 12 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment 140
Şekil 4.54 Düşey z ekseninde Δz konum değişimi incelenen düğüm noktası ve bağıl konum değişimi 141
Şekil 4.55 Tabla 1 üzerinde zamana bağlı deplasman değişimi incelenen düğüm noktasının finalize model üzerinde gösterimi 142
Şekil 4.56 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 143
Şekil 4.57 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 144
Şekil 4.58 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi.....144
Şekil 4.59 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi.....145
Şekil 4.60 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi.....146
Şekil 4.61 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global takımında z eksenindeki deplasman değişimi.....146
Şekil 4.62 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 148

Şekil 4.63 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 148

Şekil 4.64 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi 149

Şekil 4.65 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi 150

Şekil 4.66 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi 150

Şekil 4.67 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi 151

Şekil 4.68 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 152

Şekil 4.69 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 153

Şekil 4.70 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi 154

Şekil 4.71 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi 154

Şekil 4.72 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi 155

Şekil 4.73 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi 155

Şekil 4.74 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 158

Şekil 4.75 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 158

Şekil 4.76 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi 159

Şekil 4.77 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi 159

Şekil 4.78 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi 160

Şekil 4.79 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi 160

Şekil 4.80 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 162

Şekil 4.81 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti 162

Şekil 4.82 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi 163

Şekil 4.83 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi 163

Şekil 4.84 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi 164

Şekil 4.85 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi 164

Şekil 4.86 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay

lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti.....165

Şekil 4.87 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti.....166

Şekil 4.88 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi.....166

Şekil 4.89 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi.....167

Şekil 4.90 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi.....167

Şekil 4.91 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi.....168

Şekil 4.92 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti.....169

Şekil 4.93 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti.....169

Şekil 4.94 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi.....170

Şekil 4.95 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi.....171

Şekil 4.96 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi.....171

Şekil 4.97 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi 172

Şekil 5.1 Yüzde 30 doluluk oranına sahip, içi boş dengeleme halkası içerisindeki sıvının 4. saniyedeki konumlanması 176

Şekil 5.2 Yüzde 30 doluluk oranına sahip, sekiz bölmeli dengeleme halkası içerisindeki sıvının 4. saniyedeki konumlanması 177

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mühendislik problemleri çözümleri [29] 33

Tablo 2.2 İmplicit ve explicit çözüm yöntemleri [30] 35

Tablo 2.3 Yüzey merkezli kübik yapı için farklı düzleştirme uzunluklarında yer alan komşu tanecik sayısı [32] 41

Tablo 2.4 Basit kübik yapı için farklı düzleştirme uzunluklarında yer alan komşu tanecik sayısı [32] 42

Tablo 3.1 Khezzar ve arkadaşlarının deneysel elde ettiği veriler [34] 62

Tablo 3.2 Analizde kullanılan tankın malzeme özellikleri [35] 64

Tablo 3.3 Analizde kullanılan suyun malzeme özellikleri [35] 64

Tablo 3.4 Kanal içirişinde akışın modellendiği senaryoda kanal malzeme özellikleri 70

Tablo 3.5 Dengeleme halkasının analizlerde kullanılan mekanik özellikleri 84

Tablo 3.6 Analizlerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri.....85

Tablo 3.7 Dengeleme halkası içerisinde kullanılan suyun fiziksel özellikleri 86

Tablo 3.8 Ön doğrulama analiz şartları 95

Tablo 3.9 Dengeleme halkası su doluluk oranı ve tanecik oluşturma metoduna göre elde edilen tanecik sayısı 105

Tablo 3.10 Dengeleme halkasının tasarımsal değişikliğine göre türetilen senaryolar.....106

Tablo 3.11 Farklı h değerleri için elde edilen tanecik sayıları.....112

Tablo 4.1 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar 143

Tablo 4.2 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar 147

Tablo 4.3 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar.....152

Tablo 4.4 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar.....157

Tablo 4.5 Yüzde 15 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar.....161

Tablo 4.6 Yüzde 30 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar.....165

Tablo 4.7 Yüzde 60 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar.....169

ÖZET

Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Modellenmesi

Emin Övünç ŞENGÜN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Günümüzde, artan rekabet sebebiyle çamaşır makinesi üreticileri müşterilerine birçok yeni özellik sunmaktadır. Bu özellikler sayesinde; yıkama performansı, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik gibi konularda öncü olmak, tercih edilirliği arttırmak amaçlanmakta ve teknolojinin desteğiyle birçok yenilik ortaya konmaktadır. Çamaşır makinelerine eklenen farklı özelliklerin yanında müşteriler tarafından önem verilen en önemli özelliklerden biri de, yıkama performansıdır. Çamaşır makinesi üreticileri, yıkama performansını geliştirebilmek amacıyla; ürettikleri çamaşır makinelerini çeşitli motor sürüş algoritmaları ile farklı devir aralıklarında çalıştırmaktadır. Amortisör, yay gibi komponentler ve çalışma süresince gerek büyüklükleri gerekse de konumları değişen kütleler içeren çamaşır makinelerinin, farklı devir aralıklarında çalışması tasarım için zorlayıcı bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bu zorlayıcı duruma; fiziksel koşullar ve kullanıcı alışkanlıkları gibi etmenler etki ettiğinde, önemli stabilizasyon ve titreşim problemleri oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında; çamaşır makinesi stabilizasyonunun sağlanması ve titreşiminin azaltılması amacıyla hem üstten yüklemeli hem de önden yüklemeli çamaşır makinelerinde uygulamaları görülmüş olan dengeleme halkasının, üstten yüklemeli çamaşır makinesi özelinde sayısal olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Dengeleme halkası içerisinde bulunan, dengeleme için kullanılan sıvı ve bu sıvının çalkalanma hareketi; akışkan dinamiğindeki Lagrange yaklaşımını temel alan ve ağ yapısız bir yöntem olan interpolasyonlu tanecik metoduyla modellenmiştir.

Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde; dengeleme halkasının çalışma prensibi ve dengesizlik kavramı teorik olarak açıklanmış, dengeleme halkasının ve interpolasyonlu tanecik yönteminin literatürdeki uygulamalarından örnekler verilmiştir. Kapalı kap içerisindeki çalkalanma hareketi, interpolasyonlu tanecik yöntemiyle modellenmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar, hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar mekaniğiyle modellenmiş literatürdeki farklı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ise; dengeleme halkasının nümerik modelleme metodolojisi oluşturulmuştur. Basitleştirilmiş öncül analizlerle, olayın fiziği anlaşılmış ve modele etki eden kuvvetler değerlendirilmiştir. Metodoloji için geliştirilen model üzerinde; dengeleme halkası içerisindeki sıvı miktarının, dengeleme halkası tasarımının, interpolasyonlu tanecik oluşturma metodunun ve interpolasyonlu tanecik sayısının dengelemeye olan etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, oluşturulan senaryolar arasından stabilizasyona katkı sağlayan en uygun dengeleme halkası tasarımı ve sıvı doluluk oranı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çamaşır makinesi, dengeleme halkası, dengeleme, interpolasyonlu tanecik metodu, çalkalanma

ABSTRACT

Modeling of Washing Machine' s Balance Ring

Emin Övünç ŞENGÜN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Birgül AŞIÇIOĞLU TEMİZTAŞ

In today, washing machine manufacturers offer many new features to their customers due to increasing competition. Thanks to these features; it is aimed to be a pioneer in issues such as washing performance, energy efficiency, sustainability and to increase preferability, and many innovations are introduced with the support of technology. In addition to the different features added to the washing machines, one of the most important features given importance by the customers is the washing performance. In order to improve the washing performance, washing machine manufacturers operates the washing machines that they produce at different speed intervals with various engine driving algorithms. The operation of washing machines, which contain components such as shock absorbers, spring and masses that change both in size and position during operation, at different speed ranges creates a challenging situation for the design. When factors such as physical environment and user habits affect this challenging situation, significant stabilization and vibration problems arise.

In this study, it is aimed to numerically model the balance ring, which has been used in both top-load and front-load washing machines, in order to stabilize the top-loader washing machine and reduce its vibration. The fluid in the balance ring that used for stabilitation and the sloshing motion of this liquid are modeled by the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, which is a method based on Lagrange approach in fluid dynamics and does not have mesh.

The study consists of two parts. In the first part; the working principle of the balance ring and the concept of unbalance are explained theoretically, examples of the balance ring and the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method in the literature. The sloshing motion in the closed vessel is modeled by the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The results obtained by this method were compared with different studies in the relevant literature, in which both experimental and computational fluid mechanics were applied. In the second part; the numerical modeling methodology of the balance ring is created. With simplified premise analyses, the physics of the event is understood and the forces acting on the model were evaluated. On the model developed for the methodology; the effects of the amount of liquid in the balance ring, the design of the balance ring, the smoothed particle generation method and the number of interpolated particles on the balancing were investigated. According to the results, the most suitable balance ring design and liquid fill rate that contributes to the stabilization among the scenarios created were determined.

Keywords: Washing machine, balance ring, stabilization, smoothed particle hydrodynamics (SPH), sloshing

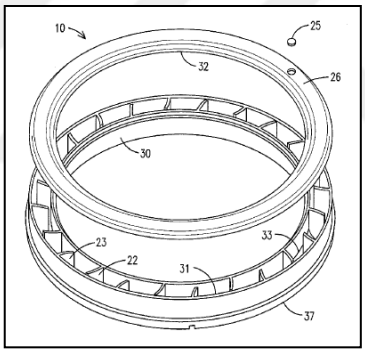
1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

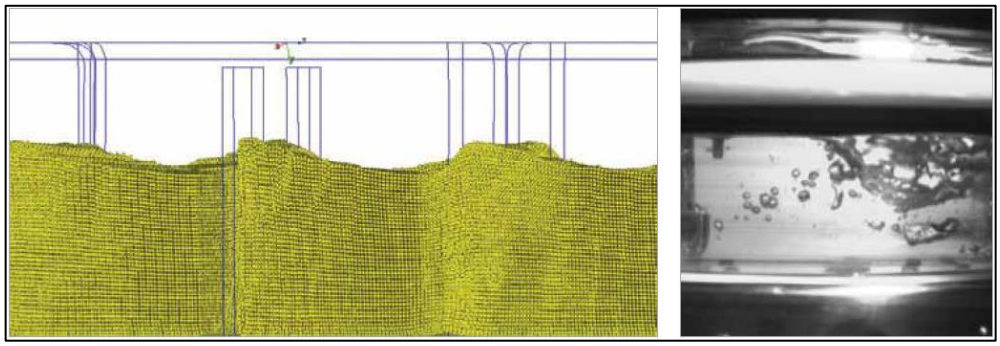
Günümüzde dayanıklı tüketim grubunda üretim yapan firmalar, hatta Ar-Ge çalışması gerçekleştiren tüm firmalar; yapmış oldukları çalışmaları, rekabet ettikleri pazarlarda fark yaratmak ve öncü olmak amacıyla gizlilik ilkeleri kapsamında paylaşmamaktadırlar. Üniversite – sanayi iş birliği kapsamında yürütülen çalışmalarda ise kısıtlı bilgilerle paylaşım yapılmaktadır. Dolayısıyla, Ar-Ge çalışmaları kapsamında yürütülen çalışmaların, birebir örneklerinin literatürde bulunması oldukça zordur. Ancak firmaların almış olduğu patentler, kısıtlı bilgiler de içerse de yapmış oldukları akademik yayınlar, çeşitli başka firmalar ile iş birlikleri sonucu çeşitli konferanslarda tanıtımını yaptıkları çalışmalar, yenilikler firmaların çalıştıkları konular hakkında fikir verir. Literatürde, bu tezin konusu olan; çamaşır makinesi dengeleme halkasının interpolasyonlu tanecik metodu kullanılarak dengeleme metodolojisinin oluşturulması ve akabinde dengeleme performansını iyileştirici parametrelerin bu metodoloji ile incelenmesine yönelik birebir aynı çalışma ile karşılaşılmamıştır. Literatürde yer alan ve bu yeni konunun tetiklenmesini sağlayan iki ana çalışma vardır. Bu çalışmalarda da teknik detaylara yer verilmemiştir.

İlk çalışma, beyaz eşya üreticisi olan MABE firması ve Altair yazılım firması ortaklığında hazırlanmış olan çalışmadır. Bu çalışmada; sıkma döngüsü sırasındaki dengesizliği azaltmak amacıyla; dengeleme halkası doluluk oranı, dönüş hızı ve tasarımı değiştirilerek, MABE mühendisleri tarafından analiz iterasyonları gerçekleştirildiği dile getirilmiştir. Çözümler iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda; dengeleme halkasının hareketi ve sıvının hareketi ele alınıp interpolasyonlu tanecik yöntemi ile çözümlerin yapıldığı, ikinci adımda ise, elde edilen sonuçların esnek çoklu cisim dinamiğine aktarıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmanın neticesinde; US 8276406 numaralı patent alınmıştır. Yapılan bu çalışma; numarası belirtilen patentlenmiş dengeleme halkası tasarımı ile

dengeleme halkasız tasarımın deplasman değerlerini ve belirtilen tasarıma ait hızlı kamera ile çekilmiş suyun çalkalanma hareketini içermektedir. Diğer konular sözel olarak ifade edilmiş olup, deplasman verilerinin nereden alındığı, izole edilen dengeleme halkasının hareketinin nasıl analiz ortamına aktarıldığı, sonlu elemanlar ve çoklu cisimler dinamiği arasındaki veri transferinin eş zamanlı olup olmadığı, tasarımın dengelemeye etkisi, SPH yönteminde kullanılan tanecik sayısı ve tanecikler arası nominal mesafenin sonuçlara etkisi gibi parametrelerin sonuçları çalışmada yer almamaktadır. Bu tez çalışması; belirtilen bu konuların tek tek ele alınması, ayrıca belli bir çalışma hız profili verilip dengelemenin hangi devirlerde etkili olduğunun tespiti, geliştirilen tek adımlı metodoloji (çoklu cisimler dinamiğine aktarılmadan) gibi konulara tek tek yer verilmesi, öncül analizlerle hareketin dinamiği hakkında bilgi verilmesi, SPH yönteminin farklı uygulamalarına yer verilmesi sebeplerinden ötürü MABE' nin çalışmasından farklılaşmaktadır [1].



Şekil 1.1 MABE Firması' nın US 8276406 numaralı patenti [2]



Şekil 1.2 MABE Firması' nın gerçekleştirdiği analiz çalışmasında ve hızlı kamera ile çekilmiş anlık görüntüde sıvının çalkalanma hareketi [1]

İkinci referans çalışma; Vatansever' in (2009) gerçekleştirmiş olduğu yüksek lisans tezidir. Bu çalışma da, Arçelik AŞ firması tarafından desteklenmiştir. Vatansever'

in gerçekleştirmiş olduğu çalışma kapsamında, önden yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkaları ele alınıp sıvılı ve sıvılı – bilyeli sistemler ele alınmıştır. Literatürde yer alan tasarımlar detaylı araştırılmış, dengeleme halkalarının teorisi açıklanmıştır. Ayrıca, gerek literatürdeki tasarımlar gerekse de türetilen yeni tasarımlar tez kapsamında hazırlanmış özel deney düzeneğinde test edilmiştir. Tasarımlar arasındaki farklar deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, sonlu elemanlar analizi, interpolasyonlu tanecik yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği gibi analiz metotlarını içermemektedir. Bu anlamda yürütülmekte olan tez çalışmasından farklılaşmaktadır [3].

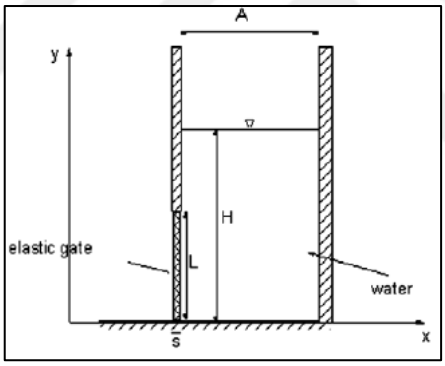
Literatürde çamaşır makinesi, dengeleme halkası ve interpolasyonlu tanecik yöntemi ortak alanında gerçekleştirilen başka bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Ancak gerek çamaşır makinesi dinamiği, gerek interpolasyonlu tanecik yöntemi gerekse de çamaşır makinesi komponentlerine yönelik bir çok çalışma literatürde yer almaktadır.

Müller ve arkadaşlarının (2003) gerçekleştirdikleri çalışmada, çalkalanma, sıçrama gibi problemlerde Euler Yasaları' nı temel alan hesaplamalar, görselleştirmeler yerine, daha hızlı çözümler sunan "smoothed particle hydrodynamics" yöntemini kullanmışlardır. Çalışma kapsamında, farklı tanecik sayıları ile farklı frame sayıları için sıvının sıçraması incelenmiştir. Sıvının serbest yüzeylerinin, anlık fotoğraflar veya render' lar kadar gerçekçi olmasa da çözüm süreleri göz önüne alındığında CFD gibi diğer yöntemlere göre umut verici sonuçlar verdiği belirtilmiştir [4].

Idelsohn ve arkadaşlarının (2006) gerçekleştirdikleri çalışmada, katı sıvı etkileşimlerinde tanecik yönteminin uygulamalarına ve doğrulama çalışmalarına yer verilmiştir. Bu yöntemin çalkalanma, sıçrama gibi yüzey problemlerini, katı – sıvı etkileşimlerini çözmede oldukça hızlı ve etkili çözümler sunabildiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle sıkıştırılamaz bir akışkanın, dikdörtgenler prizması şeklindeki basit bir kap içerisindeki salınımı incelenmiştir. Çözüm iki boyutta gerçekleştirilip dalga genlikleri deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında referans alınan bir kanal

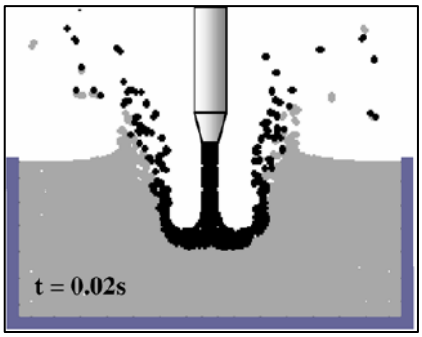
içerisinde hem deneysel hem de tanecik yöntemi ile çalkalanma problemi incelenip kanalı sol duvarında oluşan basınç hesaplanmıştır. Farklı zamanlardaki anlık görüntüler, analiz sonuçlarındaki anlık görüntülerle kıyaslanmıştır. Bir sonraki adım olarak ise, yanal ve dikey dalgalar altında gemilerin davranışı, hatta batışı üzerine çalışılmıştır [5].

Antoci ve arkadaşları (2006), dikdörtgen kesitli bir kabın yan duvarına elastik bir kapı oluşturup, bu kapının sıvı basıncı ile birlikte açılması sonucu kapının ve sıvının aldığı formu hem deneysel hem de SPH yöntemi ile incelemişlerdir. Bu çalışmada hem sıvı hem de elastik kapı tanecik ile modellenmiştir. Bu sayede, katı – sıvı teması oldukça kolay tanımlanmıştır. Elastik kapının serbest ucunun yatay ve düşey eksendeki konumları ayrıca kapının hemen arkasındaki ve kapıdan 5 cm uzaklıktaki sıvı yükseklikleri karşılaştırılmıştır. Elastik kapının hareketinin bazı iyileştirmeler gerektirmesine rağmen, sonuçların deneysel sonuçlar ile örtüşen benzerlikte çıktığı belirtilmiştir [6].



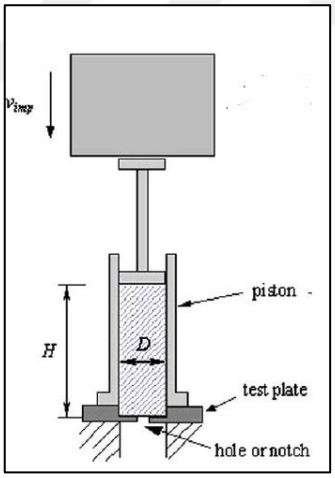
Şekil 1.3 Antoci ve arkadaşlarının (2006) üzerinde çalıştığı düzeneğin temsili şekli [6]

Bui ve arkadaşları (2007), toprak üzerine nozzle ile fışkırtılan suyu SPH yöntemi ile modellemişlerdir. Bu modelde, dikdörtgenler prizması şeklinde bir kapta bulunan toprak, elastik –plastik malzeme olarak, nozzle' dan fışkırtılan su da sıkıştırılabilir viskoz olarak SPH yöntemi ile modellenmiştir. Belirli zamanlarda, taneciklerin anlık görüntüleri incelenmiştir [7].



Şekil 1.4 Bui ve arkadaşlarının (2007) gerçekleştirdiği toprak – basınçlı suyun temasını içeren çalışma [7]

Patapov ve arkadaşları (2008), piston yardımıyla bir kanal içerisinde basınçlandırılan akışkanı SPH yöntemi ile modellemişler, Şekil 1.4‘ te gösterilen boşluk (hide or notch) etrafında oluşan deformasyonu ve akış formunu, hem deneysel hem de SPH yöntemi ile hem de FSI yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışma, büyük yapısal deformasyonlar, hasarlar, ve büyük akışkan hareketleri içermektedir. SPH ile elde edilen sonuçlar genel olarak fiziki elde edilen sonuçlara benzerlik göstermiştir [8].



Şekil 1.5 Patapov ve arkadaşlarının (2008) gerçekleştirdiği çalışmanın temsili şekli [8]

Junk ve arkadaşları (2012) gerçekleştirdikleri çalışmada, dikdörtgenler prizması şeklindeki bir kabın yanal hareketi sonucu içinde bulunan sıvının çalkalanma hareketini CFD metodu ile incelemişlerdir. Ayrıca gerçekleştirdikleri her senaryoda, kabın içerisine farklı yüksekliklerde engeller koyup bu engelin sıvı harekete etkisini nümerik ve deneysel sonuçlarla elde etmişlerdir. Görsel olarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Tank yüksekliği ve hareket engelleyici feder

yüksekliği arasında oranlar belirleyip tankın yüksekliğine bağlı feder yüksekliğine göre çıkarımda bulunmuşlardır. Literatürdeki aynı problem üzerine yapılmış başka çalışmalarda yer alan, yan duvarların belirli noktalarındaki basıncın zamana bağlı değişimi ile yan duvarlarda kendi çalışmalarında hesapladıkları basınçları karşılaştırmışlardır [9].

Özbulut (2013) gerçekleştirmiş olduğu doktora tezinde, interpolasyonlu tanecik yöntemini kullanarak serbest yüzeyli şiddetli akış problemlerini (baraj yıkılması, kısmi olarak sıvı ile doldurulmuş dikdörtgen kesitli yatay eksende sinizoidal bir hareket denklemi ile hareketi) incelemiştir. İnterpolasyonlu tanecik metodu ile ağ esaslı parçacık yöntemleri hakkında karşılaştırıcı bilgiler vermiştir. Lagrange ve Euler yaklaşımlarını karşılaştırken; “ Lagrange yaklaşımında direkt olarak parçacığın takip edildiği, Euler yaklaşımında ise parçacığın sabit bir referans noktasına göre değişimlerinin incelenmesi ve maddesel türev olarak adlandırılan türevlerin alınması gerekmektedir. Euler yaklaşımı uzaysal koordinatlarda tanımlı olup bu yaklaşıma örnek olarak “Sonlu Farklar Yöntemi” verilebilir. Lagrange yaklaşımı ise maddesel koordinatlarda tanımlıdır ve bu yaklaşıma günümüzde en popüler yöntemlerden biri olarak bilinen “Sonlu Elemanlar Yöntemi” örnek olarak verilebilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ilk ortaya konulduğunda Euler yaklaşımı ile tanımlı iken günümüzde Lagrange yaklaşımı da geliştirilmiş ve bu haliyle kullanımı da yaygınlaşmıştır. Literatürde bu iki yaklaşımın bir arada kullanıldığı yaklaşımlar da bulunmaktadır ve "Rastgele Seçilmiş Euler-Lagrange Yöntemleri (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods)" yöntemleri olarak anılmaktadır. Bu yöntemlerde akışkan parçacıklarının hareketi, bağlı olduğu düğüm noktalarından ayrı olarak hesaplanır ve parçacıkların o düğüm noktasına göre bağıl hızları bir bağlayıcı (connective) hız değeri olarak momentum denklemlerinde kullanılır.” ifadelerini kullanmıştır [10].

Szmidt ve Hedzielski (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine silindirik bir engel koyup bu engel etrafındaki akışı interpolasyonlu tanecik metodu ile modellemişlerdir. Dairesel yapı ilk durumda sıvı içerisinde konumlandırılmış olup sıvı hareketi bir piston yardımıyla verilmektedir. Bu şekilde bir çalkalanma hareketi oluşturulmuştur. Belirli zamanlarda taneciklerin konumları ile görsel olarak paylaşılmıştır. Viskoz akışkanlar için kesme

kuvvetlerini hesaplamak için yaklaşım yapılmış ve bir çift parçacık arasında etkileşim kuvvetleri formülüze edilmiştir. Yapılan çalışma ile, viskoz akışkan için yapılan çözümün doğadaki viskoz olmayan sıvılar için çözüm ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Geliştirilen SPH formülüzasyonu ile, belirtilmiş katı – sıvı etkileşimi olan bölgeler hariç doğru sonuçlar elde edilmiştir [11].

Dede (2015) gerçekleştirmiş olduğu yüksek lisans çalışmasında, havacılık sektöründeki önemli problemlerinden biri olan kuş çarpmasını ele almıştır. Basit bir model üzerinde, Ls-Dyna çözücüsünde bulunan SPH, Eulerian ve ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) metodları ile çözümler yapmıştır. Sonlu elemanlar, SPH ve ALE metotları ile yaptıkları çalışmaları birbiri ile kıyaslayıp deformasyon, çarpma kuvveti sonuçlarını kıyaslamıştır. Metal yapıları modellemek için; elastik – plastik ve elastik – viskoplastik malzeme modellerini kıyaslayarak, en uygun malzeme modelinin Johnson Cook malzeme modelinin olduğu anlaşılmıştır [12]. Bu çalışma, tez kapsamında SPH metoduna ön hazırlık amacıyla yürütülen çalışmalardan olan, kompresör valf yaprağı analizlerinde malzeme modellerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

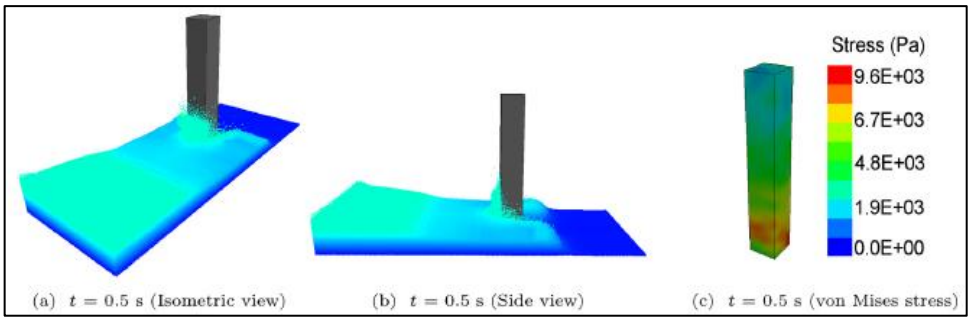
Rajagounder ve arkadaşları (2016), otomobil yakıt tankının, belli bir sabit ivme altındaki hareketi sonucu, yakıt tankı içerisindeki yakıtın hareketini deneysel ve ANSYS Fluent ticari programı yardımıyla CFD metodu ile incelemişlerdir. Akışkan serbest yüzeyinin konumunun bulunması için analitik bir model geliştirmişlerdir. Deneysel olarak; yüksek hızlı kameralar ile görüntüler almışlardır. Ayrıca yakıt tankı içerisindeki engellerin ve yakıtın doluluk oranının harekete etkisini de bu çalışma aracılığıyla incelemişlerdir. Dolum miktarının artması ile birlikte, sıvı serbest yüzeyinin yer değiştirme genliğinde önemli bir azalma olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu durumu ise, sıvı kütlesinin artması, tanka uygulanan tepki kuvvetini sönümleyeceği ve serbest yüzeyin hızlı bir şekilde stabil duruma ulaşmasına yardımcı olacağı şeklinde yorumlamışlardır [13].

Topçu ve arkadaşları (2017), binek bir aracın yakıt tankının çalkalanma davranışını deneysel olarak ele almışlardır. Bu çalışma, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmekte olup San- Tez projesi ile desteklenmiştir. İçerisinde sıvının hareketini kısıtlayacak engelin bulunduğu ve bulunmadığı

şekilde iki farklı tank tasarımı ve % 50 - % 85 doluluk oranları kullanılarak tanka yatay eksende sinüzidal giriş verilmiştir. Tankın çeşitli noktalarından ivme ve basınç verileri okunmuştur. Sıvı seviyesinin arttıkça, aynı noktalarda ölçülen ani basınç sıçramalarının ortadan kalktığı, sıvı hareketinin daha düzgün hale geldiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca engellerin, sıvının çalkalanma hareketi sonucunda okunan basınçları düşürdüğü tespit edilmiştir [14].

Güray ve arkadaşları (2018), yatay eksende yer sarsıntısına maruz kalan prizmatik bir kapta, oluşan çalkalanma hareketini insterpolasyonlu tanecik yöntemi ile modellemişlerdir. Çalışma içeriğinde, gerçekleştirilen analiz sonuçları deneysel ve ANSYS Fluent ticari programında hazırlanan CFD analizleri ile karşılaştırılmıştır, sonuçlar anlık görsellerle paylaşılmıştır. İnterpolasyonlu tanecik yönteminin süreksizlikleri yakalama ve hareketli yüzey sınırlarını elde etmede oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca SPH yöntemi ile hazırlanan modelde, sadece temel çalkantılar oluşmayıp alt çalkantılar da oluşmuştur. Daha yoğun tanecik kullanımı ile duvarlardaki sıvı hareketinin çözünürlüğünün arttırılabileceği sonucuna varılmıştır [15].

Lee ve Hong (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, sonlu elemanlar ve SPH etkileşimi içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Dikdörtgenler prizması şeklindeki bir tankın içine başka bir dikdörtgenler prizması yerleştirmişlerdir. Tank içerisindeki engelin kalkması ile harekete geçen sıvı, engel etrafında bir dalga ve çalkalanma hareketi oluşturmuştur. Bu modelde engel, sonlu elemanlar ile modellenip bu elemanlarda akış etkisi ile oluşan von misses gerilme değerleri hesaplanmıştır. Sıvı ile engel arasında “node to surface” kontak tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca bu çalışma, tanecikler arası nominal mesafe olarak bilinen h değerinin değiştirilmesi ile tekrarlanmıştır. Oluşturulan tüm senaryolarda dalga yüksekliği tanımı yapılıp, engel üzerinde dalganın etkisi ile oluşan reaksiyon kuvvetleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, analitik hesaplanan verilerle ve literatürden elde edilen deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Zaman adımı, yumuşatma faktörü gibi değerlerin değişmesi sonuçları oldukça az değiştirmiştir. Ancak daha yoğun tanecik kullanımının daha doğru sonuçlar verdiği ve hidrodinamik, hidrostatik kuvvelerin hesaplanabilmesi için SPH – FEM içeren modellerin kullanılabileceği bilgisi paylaşılmıştır [16].



Şekil 1.6 Lee ve Hong' un (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada engel üzerinde hesaplanan von misses gerilmeleri [16]

Trimulyono ve Hashimoto (2019) çalışmalarında, interpolasyonlu tanecik metodunun, piston tipi dalga yapıcı içeren deney düzeneği üzerinde doğrulanmasına yer vermişlerdir. Oluşturulan 2D ve 3D modellerle, belirli zamanlarda pistonun belirli hareket miktarlarında oluşan dalga yüksekliğini hesaplamışlardır. Buna bağlı olarak, deney düzeneğinde havuz zeminine basınç ölçer yerleştirerek; deneysel basınç verileri ile 2D ve 3D analiz çözümlerinde, dalgaların hareketine bağlı olarak hesaplanan dinamik basınçları hesaplamışlardır. Ayrıca deney düzeneğindeki havuz içerisine bir engel oluşturarak ve deney düzeneğindeki sıvı miktarını değiştirerek de bu çalışmaları tekrarlamışlardır. Ayrıca çalışmada, tanecikler arası nominal mesafenin dalga yüksekliğine etkisi de incelenmiştir. Taneciklerin yayılımına bağlı olarak, görsel anlamda analiz – deney karşılaştırılması da yapılmıştır. Sonuç olarak, sıvıların serbest yüzeyinin belirlenmesinde, havuz içerisine konulmuş engelin, tanecikler arası ilk mesafenin analiz sonuçlarına etkilerinin incelenmesinde SPH yönteminin kullanılabileceği paylaşılmıştır. Dinamik basıncın doğrulanması için daha fazla çalışılması gerektiği belirtilmiştir [17].

Özetlenecek olunursa, literatürde katı – sıvı etkileşimi içeren çeşitli örnekler mevcuttur. Bu çalışmalarda deneysel, nümerik ve analitik olarak çözümler sunulmuştur. Ayrıca örneğin nümerik çözümlerin alt başlıkları olarak FSI, CFD, SPH gibi metotlar kullanılarak da çözümler yapılmıştır.

Tez konusunun yapı taşı olan SHP metodundan uzaklaşılmamak adına, literatür araştırması kısmında yer verilmemiş olsa da, çamaşır makinesi dinamiğine yönelik bir çok çalışma da bulunmaktadır. Özellikle, üstten yüklemeli çamaşır makinesi dengesizliğine yönelik literatürdeki çalışmalar da detaylı incelenmiştir. Ancak bu

çalışmalarda amortisör, yay modellenmesi gibi kısımlar olduğundan tez kapsamında paylaşımı yapılmamıştır.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde beyaz eşya kullanımının artması ile birlikte müşterilerin, üreticilerden beklentileri de artmaktadır. En çok kullanılan beyaz eşyalardan biri olan çamaşır makinesinin stabilizasyonu müşterilerin memnuniyetine direk etki etmektedir. Çamaşır makinesinde stabilizasyonun sağlanamadığı durumlarda; yürüme gibi müşteri tarafından direk görünebilen problemler ve komponent ömrünün azalması gibi direk görünmese de müşteri memnuniyetini azaltan problemler ortaya çıkmaktadır. Çamaşır makinesi stabilizasyonuna; ayak tasarımından, ayakların konumuna, yay, amortisör özelliklerinden, yükleme tipine ve miktarına kadar birçok faktör etki etmektedir. Beyaz eşya üreticileri de stabilizasyonu arttırmak için gerek analiz ortamlarında gerekse de prototipler üreterek birçok çalışma gerçekleştirmektedir.

Çamaşır makinesi stabilizasyonuna katkıda bulunan komponentlerden birisi de dengeleme halkalarıdır. Dengeleme halkaları çamaşır makinesi tamburu etrafına monte edilen ve içerisinde sıvı ve/ veya bilye olan komponentlerdir.

Bu çalışmanın amacı, dengeleme halkalarının çalışma prensibini irdeleyerek ve mevcut modellerdeki dengeleme halkası tasarımlarını inceleyerek, interpolasyonlu tanecik yöntemi ile sıvının dengeleme halkası içerisindeki çalkalanma hareketinin modellenme metodolojisinin oluşturulmasıdır. Bu sayede, çamaşır makinesi stabilizasyonuna katkıda bulunan dengeleme halkasının, tasarımı iyileştirilebilecek ve dengeleme halkasının dengeleme kapasitesi arttırılabilecektir. Böylece, çamaşır makinelerinde oluşan dengesiz yükler ortadan kaldırılabilecek ve çamaşır makinesinde dengesiz yüklerin en belirgin gözlendiği sıkma devirlerinde, sıkma performansları iyileştirilebilecektir.

Ayrıca interpolasyonlu tanecik yöntemi metodu öğrenilerek farklı uygulamalarda kullanılabilecektir.

Özetlenecek olursa; bu çalışma kapsamında, çamaşır makinesi dengeleme halkası içerisindeki sıvının çalkalanma hareketi sonlu hacimler yöntemi yerine

interpolasyonlu tanecik yöntemi ile modellenecek ve dengeleme halkasının dengeleme kapasitesini artıracak parametreler detaylı incelenecektir. Ayrıca geliştirilen modelleme metodolojisinde bir hız profili verilerek dengeleme halkasının farklı devirlerdeki dengelemeye olumlu – olumsuz etkileri değerlendirilecektir.

1.3 Hipotez

Çamaşır makinesinin çalışması sırasında; kapasitesinin altında ya da kapasitesine yakın miktarda çamaşır kullanılması sonucu, özellikle sıkma devirlerinde tambur içerisinde hareket eden çamaşırlar sebebiyle dengesiz yükler oluşabilmektedir. Tambur etrafına takılan ve içerisinde sıvı ve/veya bilye bulunan dengeleme halkası yardımıyla bu dengesizliklerin giderilmesi öngörülmektedir.

Çamaşır makinesinin, çalışması sırasında oluşan dengesizlik durumunda gösterdiği davranış, hesaplamalı mühendislik araçları ile simule edilebilir. Yapılan simülasyonlar yardımıyla da dengesizliği pasif olarak gidermek için tasarlanan dengeleme halkasının tasarımına geri bildirimler verilebilir. Böylece maksimum dengeleme için en uygun dengeleme halkası tasarımı, en uygun dengeleme halkası sıvısı miktarı ve yoğunluğu, en uygun çalışma hız profili elde edilebilir.

Tüm bu amaçlar; sadece sonlu hacimler yöntemi gibi daha yaygın kullanılan ama daha fazla uzmanlık gerektiren analiz yöntemleri yerine interpolasyonlu tanecik yöntemi ile gerçekleştirilebilir.

1.4 Tez Organizasyonu

Üstten yüklemeli çamaşır makinesinde kullanılan dengeleme halkasının, simülasyon ortamında interpolasyonlu tanecik yöntemi ile modelleme metodolojisinin oluşturulması ve dengeleme kabiliyetinin iyileştirilmesi amacıyla hazırlanan bu tezde ana başlıklar altında anlatılan konular aşağıda özetlenmiştir.

Bölüm 1’ de literatür özeti, tezin amacı açıklanmış ve tezin literatürdeki benzer çalışmalardan fark yaratacak özelliği vurgulanmıştır.

Bölüm 2’ de çamaşır makinesi, dengeleme halkası, sonlu elemanlar yöntemi ve interpolasyonlu tanecik yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Sonlu hacimler yöntemine alternatif olarak kullanılan interpolasyonlu tanecik yöntemi

ve bu yöntemin avantaj - dezavantajları açıklanmıştır. Ayrıca interpolasyonlu tanecik yöntemi teorisi hakkında bilgi verilmiş, dengesizlik durumları açıklanmış ve de bu dengesizliğin ortadan kaldırılması amacıyla çamaşır makinesinde kullanılması planlanan dengeleme halkasının fiziksel çalışma teorisi açıklanmıştır.

Bölüm 3' te öncelikle interpolasyonlu tanecik yönteminin öğrenilmesi ve farklı modellere uyarlanabilirliğinin araştırılması amacıyla farklı simülasyon modelleri üzerinde çalışılmıştır. Tezin kapsamını oluşturan dengeleme halkasının, basit modeli üzerinde analitik doğrulaması yapılmıştır. Dengeleme halkası hareketini simule etmek için geliştirilen modelin ve metodun geliştirilmesi için yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Dengeleme halkasının, dengeleme kabiliyetinin geliştirilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar açıklanmıştır.

Bölüm 4' da daha önceki bölümlerde anlatılmış olan, interpolasyonlu tanecik yötemi ile kurgulanmış analiz senaryolarından edilen sonuçlar açıklanmıştır.

Bölüm 5' de ise elde edilen sonuçlar değerlendirilip gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2
GENEL BİLGİLER VE TEORİ

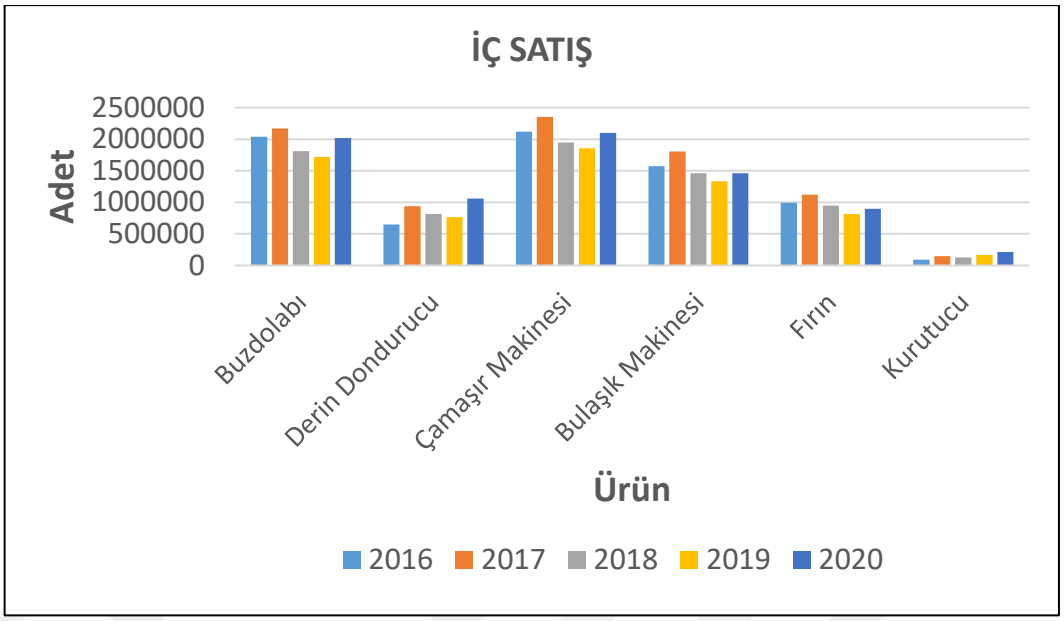
2.1 Çamaşır Makinesi Hakkında Genel Bilgiler

Bu bölümde çamaşır makinesinin gelişimi, sektörel bilgiler gibi genel bilgiler verilmiştir. Çamaşır makinesi komponentleri sınıflandırılmış ve kısaca açıklanmıştır. Ayrıca yükleme tipine göre çamaşır makineleri sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre sık kullanılan ülkeler ve kullanım alanları belirtilmiştir.

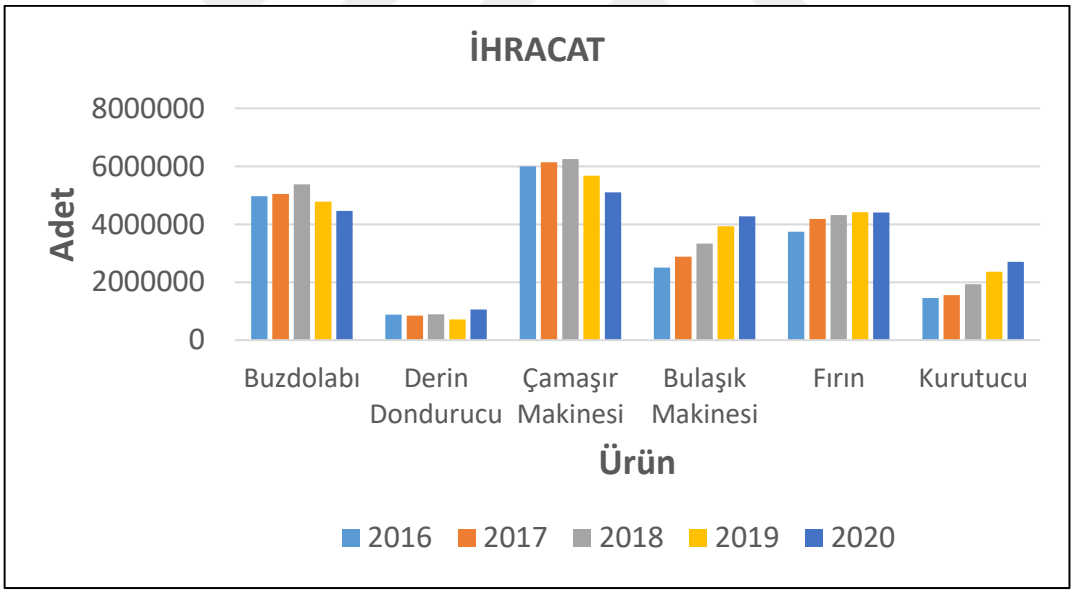
Günümüzde her insanın, elektrikli ev aletleri ve aynı zamanda dayanıklı tüketim malları kapsamında nitelendirilen beyaz eşya sektörünü oluşturan çamaşır makinesi, buzdolabı, bulaşık makinesi, saç kurutma makinesi, elektrikli süpürge, fırın, klima vb. ürünler ile etkileşimi vardır. Bu etkileşim teknolojinin hayatımızın her alanında yer alması ile gün geçtikçe artmaktadır ve bu ürünlerin hayatımızı kolaylaştırdığı tartışılmaz bir gerçektir. Ayrıca bu ürünlerin üretilmesi, pazarlanması sırasında elde edilen milli ekonomiye katkısı ve sağlanan istihdam da beyaz eşya sektörünün imalat sanayinde itici güç olarak yer almasını sağlamaktadır.

Türk beyaz eşya sektörü, beyaz eşya üretiminin öncüleri ülkeleri olan Almanya ve İtalya' yı geride bırakarak, 25 milyon adetlik üretimiyle bugün Avrupa' nın bir numaralı üreticisi konumundadır. Dünya sıralamasında ise, Dünya üretiminin yarısını gerçekleştiren Çin' in ardında ikinci sıradadır. Dolayısıyla ülke beyaz eşya sektörü, istihdama verdiği ve ekonomiye sağladığı katkı ile ülke ekonomisinde önemli bir yer tutmaktadır. Hal böyle olunca, Türkiye' de faaliyet gösteren beyaz eşya firmalarının Ar-Ge çalışmalarına verdiği yatırımlar ve patent başvuruları sayesinde bu sektör daha da ön plana çıkmaktadır [18].

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2' de sırasıyla, Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre 2016 – 2020 yılları arasında yıllara göre ürün gruplarınki iç satış ve ihracat adetleri gösterilmiştir.



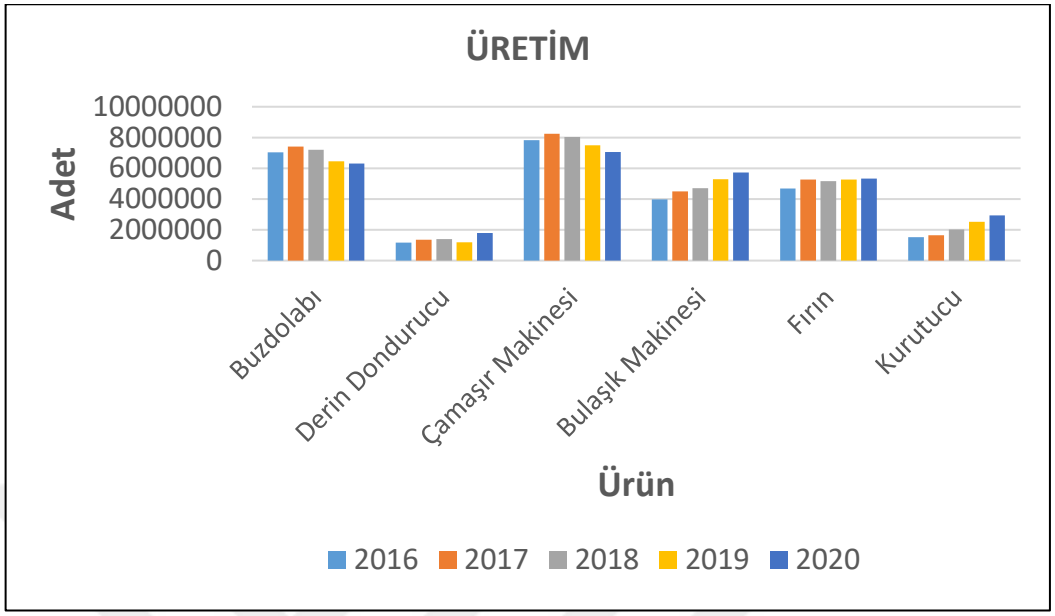
Şekil 2.1 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki iç satış adetleri [18]



Şekil 2.2 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki dış satış adetleri [18]

Şekil 2.3' te Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre 2016 – 2020 yılları arasında Türkiye' de üretimi yapılan beyaz eşya ürünlerinin yıllara göre üretim adedi gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde; iç ve dış pazarlardaki yüksek çamaşır makinesi talebine yönelik tüm yıllarda en çok üretimin çamaşır makinesi ürün grubunda yapıldığı görülmektedir. Dolayısıyla çamaşır makinesi

üretimi hem ülke ekonomisi hem de Dünya ekonomisi açısından önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 2.3 Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği' nin verilerine göre yıllara göre ürün gruplarınki üretim adetleri [18]

2.1.1 Dünden Bugüne Çamaşır Makinesi

Evlerin vazgeçilmez eşyalarından biri olan ve gündelik hayatı kolaylaştıran "çamaşır makinesi" kelime grubu, çamaşır temizlemede kuru temizleme veya ultrasonik temizleyiciler yerine genellikle su kullanılan makineler için kullanılır.

Çamaşır makinelerinin icadından önce, insanlar çamaşırlarını akarsu ve göl kenarlarında elleriyle ovalayarak, kumaşı taş ve ahşap zemine sürterek, toprak ve çeşitli doğal sabunlar kullanarak yıkamaktaydılar. Akarsuların bulunmadığı yerlerde ise çamaşırlar; tahta, bakır, ya da demir kaplarda yıkanmıştır. İlk çamaşır makinesi örnekleri 18. yüzyıla dayanır. Bu örnekler, kısaca tahta, bakır ve demir kaplara belli bir mekanizmanın eklenmesi sonucu ortaya çıkmış buluşlar olarak nitelendirilebilir. Çamaşır makinesi tarihsel gelişimi kronolojik olarak özetlenecek olursa;

- 1767 yılında Jacob Christian Schaffer tarafından icat edilen ilk çamaşır makinesi, elbiseleri karıştırmak için kullanılan bir kol, bir su tankı ve elbiseleri sıkmak için kullanılan iki silindirden oluşmaktadır.

- 1782 yılında Henry Sidgier tarafından Londra' da altıgen biçiminde yeni bir çamaşır makinesi tasarımı ortaya atılmıştır. Bu makine altıgen biçiminde ahşaptan yapılmış çamaşır teknesinden oluşmaktaydı. Bu tekne kol gücüyle çevrilerek çamaşırlar yıkanmakta ve sonrasında iki silindir merdane arasından geçilerek sıkılmaktaydı.
- Henry Sidgier tarafından icat edilen bu sisteme Ferguson Hardie tarafından çift taraflı dönme hareketi eklenmiştir. Yani merdane kolunun tek yönlü hareketiyle merdanenin ileri- geri hareketi gerçekleştirebilmesini sağlamıştır. Böylece yıkama bir miktar kolaylaştırılmıştır.
- 1797 yılında ise Amerika' da ilk çamaşır fırçalama tahtası Nathaniel Briggs tarafından icat edilmiştir. Fırçalama tahtaları ve ahşap çamaşır teknelerinden oluşan kombinasyonlar günümüzdeki çamaşır makinesi tasarımcılarına büyük fikirler vermiştir. Şekil 2.4' te 1797 yılında icat edilen çamaşır fırçalama tahtasının temsili resmi yer almaktadır.



Şekil 2.4 1797 yılında icat edilen çamaşır fırçalama tahtasının temsili resmi [19]

- 1851 yılında James King tamburu olan çamaşır makinesinin patentini almıştır. Bu tambur el ile çevrilmekteydi.
- 1858 yılında Hamilton Smith dönme sistemine hem ileri hem de geri çalışabilme özelliğini ekleyerek döner çamaşır makinesinin patentini almıştır.
- 1900' lu yılların başında tamburlu çamaşır makinelerine çelik tank ve kömür brülörü dahil edilen tasarımlar ortaya çıkmıştır. Fakat çamaşır makinelerinde devrim niteliği yaratan buluş, Ford Motor Şirketi' nde geliştirilen küçük elektrik motorlarıdır. Louis Goldenberg isimli mühendis tarafından icat edilen

bu motorlar, elektriğin çamaşır makinelerinde kullanılmasına imkan tanıyarak yıkamadaki insan gücünü sıfıra indirgemiştir.

- 1906 yılında Alva John Fisher tarafından elektrikle çalışan ilk çamaşır makinesi icat edildi ve elektrikli çamaşır makinesinin patentini alan kişi olmuştur. Bu tasarımda tambur elektrik yardımıyla döndürülmektedir. Böylece modern çamaşır makinelerinin çalışma yapısına yakın ilk tasarım elde edilmiştir.
- 1908 yılında Alva Fisher' ın icat ettiği çamaşır makinesi Chicago' da bulunan Hurley Machine Company tarafından üretilmeye başlanmıştır. 1910 yılında bu makineye patent alınıp ismine Thor adı verilmiştir. Şekil 2.5' te 1910 yılında patentlenen Thor isimli makine görülmektedir. [19]



Şekil 2.5 1910 yılında patentlenen Thor isimli makine [19]

- 1924 yılında kurutmalı çamaşır makinelerinin ilk örnekleri üretilmiştir [19].
- 1930' lu yıllarda Maytag, Upton gibi şirketler çamaşır makinelerinin seri üretimini üstlenmişlerdir.
- 1937 yılında Bendix Corporation şirketi tarafından ilk tam otomatik çamaşır makinesi üretilmiş ve 1940' lı yıllardan itibaren bu makineler evlerde kullanılmaya başlanmıştır [19].
- 1950' li yılarda ise Amerika bulunan şirketler tarafından geliştirilen bu çamaşır makineleri Avrupa' daki ülkelere gelmiş ve bu ülkelerde üretilmeye başlanmıştır. Örneğin tamamen otomatik çamaşır makinesi 1951 yılında Almanya' da piyasaya sürülmüştür [19].
- 1958 yılında ise Miele Firması tarafından ilk kurutmalı çamaşır makinesi piyasaya sürülmüştür [19].

- 1980’ lerden itibaren ise teknolojinin gelişmesi, kullanıcıların istekleri doğrultusunda kilo algılama, renkli, beyaz gibi farklı çevrimler, enerji ve su tasarrufu gibi özellikler eklenmiştir.
- 1990 yılında İngiliz James Dyson, ters yöne dönen iki silindire sahip, mevcut çamaşır makinesi tasarımına göre daha iyi yıkama performansı ve daha kısa yıkama süresi sağlayan çamaşır makinesini üretmiştir.
- Günümüzde ise müşterilerin talepleri, teknolojinin gelişmesi, çevre duyarlılığının artması ile birlikte yeni fikirler ortaya çıkmaktadır. Örneğin, Wi-fi ile uzaktan komut verebilme, ağırlık algılama ve bu ağırlığa göre enerji, su ve deterjan kullanımı gibi özellikle günümüz çamaşır makinelerinde görülmektedir. Ayrıca tüketicilerin çamaşır makinelerinden yüksek yıkama performansı, düşük enerji tüketimi, minimum gürültü seviyesi gibi beklentileri de bulunmaktadır. Çamaşır makinesi üreticileri ise, tüketicilerin bu beklentileri karşılayacak ve diğer markalardan farklılaşmasını sağlayacak özellikleri belirli standartlar altında, maliyet kriterlerini göz önüne alarak ürünlerine entegre etmektedirler.

Çamaşır makinesinin Arçelik A.Ş bünyesindeki yakın tarihine kısaca bakılacak olursa;

- Türkiye’ deki ilk çamaşır makinesi üretimi 1959 yılında Arçelik A.Ş tarafından üretilmiştir [20].
- 2009 yılında A enerji sınıfından %30 daha verimli olmasıyla “Dünyanın En Az Enerji Harcayan Çamaşır Makinesi” ve Hızlı 14 programı ile kısa sürede temizlik sunmasıyla “Dünya’ nın En Hızlı Çamaşır Makinesi” unvanlarına sahip çamaşır makinesi üretilmiştir [20].
- 2010 yılında A sınıfından %50 daha az enerji tüketen yeni çamaşır makinesi 8124 HST Ekonomist piyasaya sunulmuştur [20].
- 2010 yılında Dünya’ nın ilk çamaşırı tanıyan otomatik programa sahip çamaşır makinesi - 8128 H Autologic pazara sunulmuştur [20].
- 2011 yılında Arçelik 8123 ER Silent-Tech çok sessiz ve A sınıfında %50 oranında enerji tasarrufu sağlayan çamaşır makinesi pazara sunulmuştur [20].

2.1.2 Yükleme Tipine Göre Çamaşır Makinesi Çeşitleri

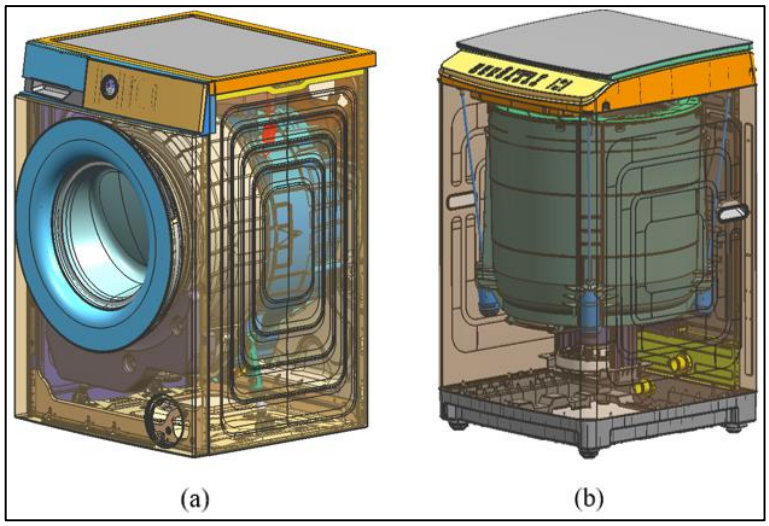
Çamaşır makineleri; enerji tüketimlerine, yıkama kapasitelerine, kurutma özelliği olup olmamasına gibi özelliklere göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma faktörlerinden biri de yükleme tipidir. Yükleme tipine göre çamaşır makineleri üstten yüklemeli ve önden yüklemeli olarak iki ana gruba ayrılır.

Üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde makine tamburunun kendi etrafında döndüğü eksen; ilk durumda zemine dik olarak konumlanmış ve çamaşır yüklemesi üstten yapılırken, önden yüklemeli çamaşır makinelerinde tamburun kendi etrafında döndüğü eksen zemine yaklaşık paralel konumlanmış ve çamaşır yüklemesi ön kısımdan yapılmaktadır. Kısaca önden yüklemeli çamaşır makinelerinde kapak ön duvara yerleştirilmişken, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinden kapak üst tablaya ya da üst kısma yerleştirilmiştir. Şekil 2.6' da sırasıyla önden yüklemeli ve üstten yüklemeli çamaşır makinelerine örnek görseller yer almaktadır.



Şekil 2.6 Önden yüklemeli (a) ve üstten yüklemeli (b) çamaşır makinesi örnekleri

Tasarımsal karşılaştırılacak olursa; üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde tahrik grubu dört amortisör ile gövde grubuna asılırken, önden yüklemeli makinelerde ise genellikle üstten iki yay ve alttan üç ya da dört tane amortisör ile gövde grubuna bağlanır. Ayrıca önden yüklemeli çamaşır makinelerinde, üstten yüklemeli makinelerden farklı olarak denge taşı kullanımı ve körük kullanımı da mevcuttur.



Şekil 2.7 Önden yüklemeli (a) ve üstten yüklemeli (b) çamaşır makinesi örnek CAD dataları

Şekil 2.7' de tasarımların daha iyi anlaşılabilmesi için sırasıyla önden yüklemeli ve üstten yüklemeli çamaşır makinelerine örnek CAD datalara yer verilmiştir.

Çalışma devir sayıları kıyaslanacak olursa; genel anlamda önden yüklemeli çamaşır makinelerinin çalışma devirleri, üstten yüklemeli makinelere kıyasla daha yüksektir. Piyasadaki üstten yüklemeli makinelerin sıkma devirleri maksimum 700 - 900 RPM civarlarındayken, önden yüklemeli çamaşır makinelerinde bu değerler 1400 RPM değerlerine kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla üstten yüklemeli çamaşır makinelerinin çalışma devirleri daha düşük olduğundan daha az merkezcil kuvvetler etkisinde çalışır, kazanda bulunan rulmanlar ve rulman yatakları daha az kuvvete maruz kalır.

Çamaşır yıkama kapasitesi olarak da önden yüklemeli çamaşır makinelerinin kapasiteleri üstten yüklemeli makinelere göre daha fazladır.

Güç aktarımı karşılaştırılacak olursa; üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde motor mili genelde doğrudan tambur miline bağlıyken, önden yüklemeli makinelerde genelde kayış kasnak sistemi ile motordaki güç aktarımı gerçekleştirilir.

Kullanım açısından karşılaştırılacak olursa, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinden çamaşır yüklemesi daha kolaydır. Ancak yıkama sonrası çamaşırların çıkarılması için kullanıcının eğilmesi bu tasarımda da gerçekleşir.

Tezgâh altı ya da üst üste başka makinelerin konumlandırılması açısından ise önden yüklemeli daha avantajlıdır.

Son yıllardaki gelişmelere bakıldığında önden yüklemeli çamaşır makinelerine daha fazla özellik (kurutma, deterjan dozajlama, buharlı yıkama gibi özellikler) entegre edilmiştir.

Kapladığı yer bakımından değerlendirilecek olursa; standart boyutlardaki makineler karşılaştırılırsa, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinin hem boyutlar hem de kapak açılış yönü göz önüne alındığında daha az yer kapladığı söylenebilir. Dolayısıyla insan yoğunluğunun fazla, daha düşük metrekaredeki evlerin bulunduğu Çin, Hindistan, Pakistan gibi pazarlarda kullanımı daha fazladır.

Sürdürülebilirliğe katkıları göz önüne alındığında hem Türkiye' de hem de Dünya' da önden yüklemeli çamaşır makinelerinin kullanımı daha fazladır. Bu açıdan herhangi bir komponentin geri dönüştürülebilir olması durumunda önden yüklemeli makineler sürdürülebilirliğe daha fazla katkıda bulunabilir.

Görünüş gruplarının, kontrol panelinin konumlandırılması her iki tasarım çamaşır makinesinde de genel anlamda aynıdır. Bu tez kapsamında üstten yüklemeli çamaşır makineleri ele alınacaktır.

2.1.3 Üstten Yüklemeli Çamaşır Makinesi Komponentleri

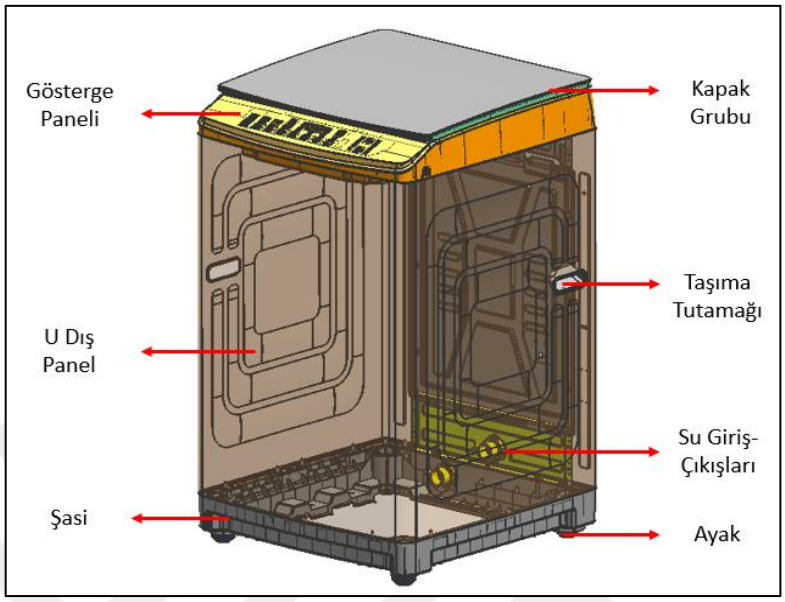
Bu tez kapsamında üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkaları ve içerisinde bulunan sıvının çalkalanma hareketi interpolasyonlu tanecik yöntemi ile modelleneceğinden bu bölümde üstten yüklemeli çamaşır makinelerinin parçaları kısaca açıklanacaktır.

Üstten yüklemeli çamaşır makinesini oluşturan parçalar aşağıda belirtildiği üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

- Tahrik grubu komponentleri
- Gövde grubu komponentleri

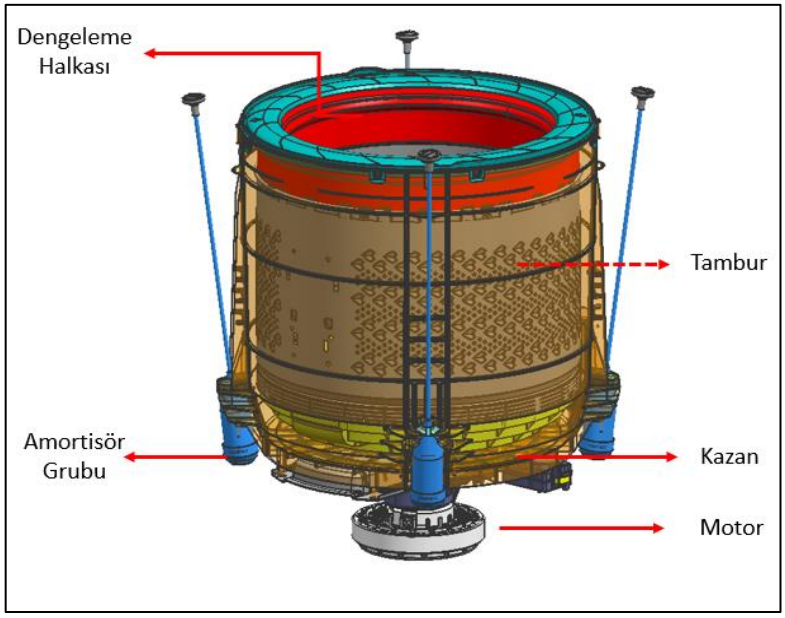
Tahrik grubu komponentlerini; motor, tambur, kazan, dengeleme halkası gibi parçalar oluştururken, gövde grubu komponentleri ise; şasi, dış paneller, ayaklar, tutamaklar, görünüş grubu ve kapaktan oluşmaktadır.

Gövde ve tahrik grubu ana komponentleri dışında deterjan kutusu, su pompası, su hortumları, kapak kilit mekanizmaları vb. parçalar da üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde bulunmaktadır.



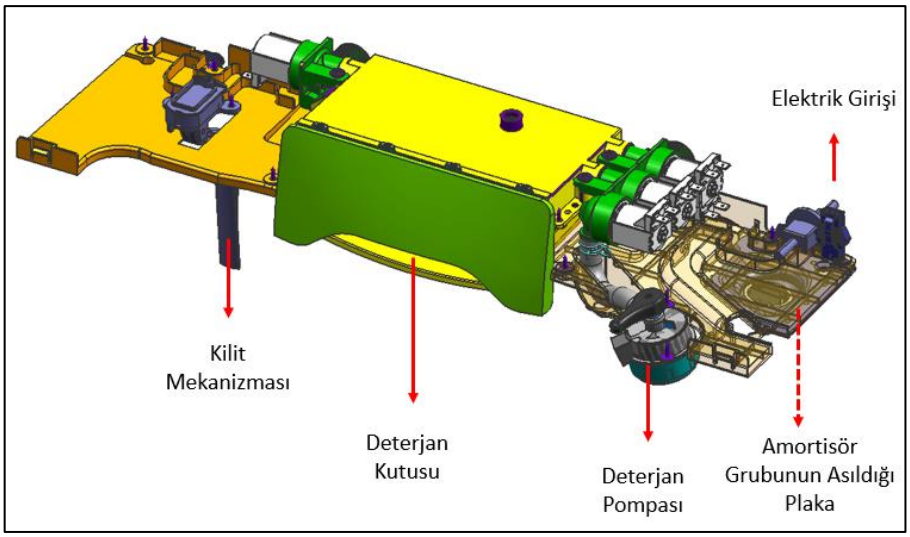
Şekil 2.8 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi gövde grubu komponentleri

Üstten yüklemeli bir çamaşır makinesi örneğinin gövde grubu ana komponentleri Şekil 2.8' de, tahrik grubu komponentleri ise Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi tahrik grubu komponentleri

Şekil 2.9' da gösterilen tahrik grubu, amortisör şaftları yardımıyla gövde grubunda U dış panelin köşelerinde yer alan sac plakalara asılmaktadır.



Şekil 2.10 Üstten yüklemeli çamaşır makinesi deterjan kutusu ve montajı

2.2 Dengeleme Halkası

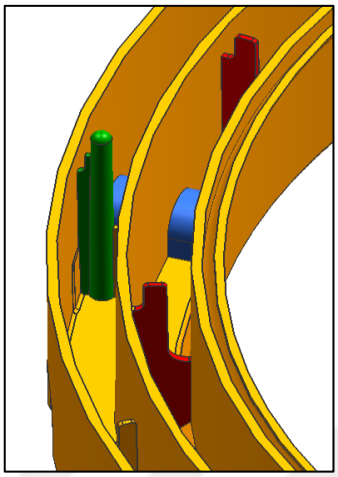
Bu bölümde gerek üstten yüklemeli gerekse de önden yüklemeli çamaşır makinelerinin çalışması sırasında oluşan dengesizliği pasif olarak gidermek amacıyla kullanılan dengeleme halkaları hakkında kısa bilgiler verilecektir.



Şekil 2.11 Örnek dengeleme halkası tasarımı

Şekil 2.11' de üstten yüklemeli bir çamaşır makinesine ait dengeleme halkası tasarımı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, imalat kolaylığı açısından iki parça olarak üretilmektedir. Bu iki parça sızdırmazlık sağlanacak şekilde yapıştırılarak birleştirilmektedir. Ayrıca Şekil 2.12' de görülebileceği üzere; yeşil boss yapıları ile, üst parçası ve alt parçasının birbirine göre izafi hareket yapması engellenir. Böylece yapıştırma işlemi sırasında parçaların konumu sabitlenmiş olur. Yine aynı şekilde görülebileceği üzere; mavi ile gösterilen boss yapılarından çamaşır

makinesi tamburuna cıvata ile monte edilmektedir. Kırmızı feder yapısı ise, dengeleme halkası içerisinde bulunan sıvı ve/ veya bilyelerin hareketini sınırlamaktadır. Yani kontrolsüz bir şekilde hareket etmelerini engellemektedir.



Şekil 2.12 Örnek dengeleme halkası detay görünümü

2.2.1 Dengeleme Halkası Kullanım Amacı

Gerek motor ve diğer komponentlerin oluşturduğu titreşim hareketi, gerekse de tambur içerisindeki çamaşırın bir bölgede toplanması ya da tek adet çamaşır, ayakkabı yıkanması gibi sebeplerden çamaşır makinesinde dengesizlik durumu oluşmaktadır. Bu dengesizlik, özellikle sıkma devirleri gibi yüksek devirlerde çok daha belirgin gözlenmektedir. Oluşan bu dengesizliğin bir ya da birden çok eksende karşı dengesizlikler yaratılarak giderilmesi amaçlanmaktadır. Dengeleme halkası da bu amaç doğrultusunda hem önden yüklemeli hem de üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan bir parçadır.

Dengelenmek istenen eksenler ve dengeleme kapasitesine göre bir, iki ya da üç tane dengeleme halkası kullanılabilir. Dengeleme halkası, çamaşır makinesi tahrik grubunu oluşturan komponentlerden biri olan tamburun etrafına takılan simit şeklindeki parçadır. Yani, dengeleme halkası silindirik yapısının merkez ekseni ile çamaşır makinesinin tamburunun dönme ekseni aynı olacak şekilde monte edilmektedir. Çamaşır makinesi tamburunun hareketi göz önüne alındığında, dengeleme için tek bir eksende konumlandırılması yeterli olacaktır.

Piyasadaki dengeleme halkası kullanılan çamaşır makineleri incelendiğinde ise, genel kullanım tek ya da iki adettir. Bir adet kullanılan modellerde maksimum

dengelemenin sağlanabilmesi açısından tamburun, tahrik milinden en uzak noktasında konumlanacak şekilde kullanılmaktadır. İki adet kullanılan modellerde ise; tek adet kullanılan tasarıma ek olarak tambur ortasında ya da tambur tahrik miline yakın bir konumda bir adet daha kullanılan modeller mevcuttur.

2.2.2 Dengeleme Halkası Çalışma Prensibi

Bu bölümde dengeleme halkası çalışma prensibi, sözel olarak kısaca anlatılacak olup matematiksel olarak Bölüm 2.4.3‘ te detaylı açıklanacaktır.

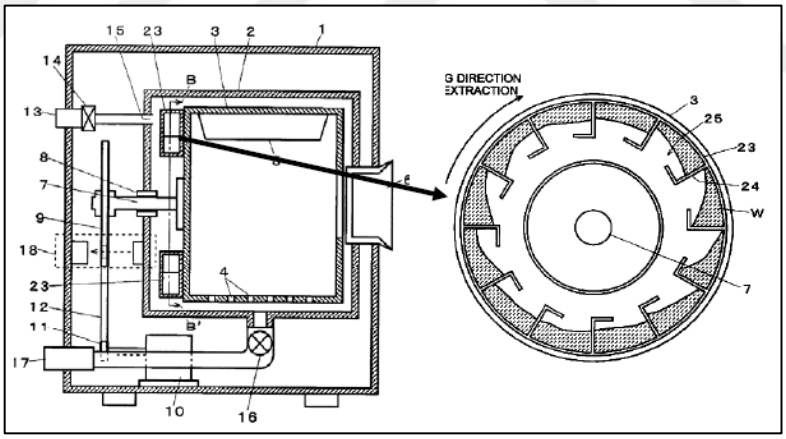
Çamaşır makinesinde oluşan ve daha önceki bölümlerde açıklanmış olan dengesizlik durumunun ortadan kaldırılması için, simetrik olarak tasarlanmış ve tambur etrafına monte edilen parçanın kullanılması yeterli değildir. Dengelemenin sağlanabilmesi için, oluşan dengesizliğin simetriğinde aynı büyüklükte farklı bir dengesizlik yaratılması amaçlanmaktadır. Bunun için dengeleme halkasının içerisine bilyeler ya da sıvı fazda akışkanlar konulur. Bilye ya da sıvı kullanımının birbirlerine göre avantaj ya da dezavantajları vardır. Avantaj ve dezavantajlar özetlenecek olursa; bilye kullanımında daha yüksek dengelemeler sağlanabilir. Ancak bilyelerin çarpışma sesleri duyulacaktır. Sıvı kullanımında ise dengeleme halkası içerisindeki sıvının çalkalanma hareketinin sesi oluşmaktadır. Bu yüzden bazı tasarımlarda hem sıvı hem de bilye kullanımı mevcuttur.

Çalışma prensibi basitçe; dönme hareketi nedeniyle oluşan merkezcil kuvvetlerin etki etmesi sonucunda dengeleme halkası içerisinde yer alan sıvı ve/ veya bilyenin dengesizliğin karşısında toplanması sonucu dengesizliğin ortadan kalkması şeklinde ifade edilebilir. Yani, dengesizliğin tamburun herhangi bir yerinde oluşabildiği düşünülürse, sıvı ve/ veya bilyelerin ise dışarıdan herhangi bir müdahaleye gerek kalmadan, durumun fiziği gereği kendiliğinden dengeleme sağladığı söylenebilir. Bu yüzden bu tür sistemlere literatürde pasif dengeleme sistemleri ya da pasif dengeleme halkaları şeklinde de isimlendirilmeler yapılmıştır.

2.2.3 Örnek Dengeleme Halkası Tasarımları

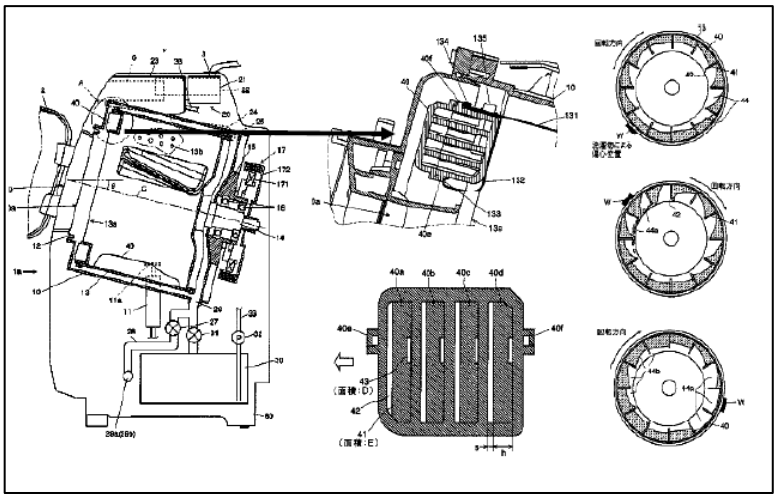
Beyaz eşya üreticileri; farklı devir aralıklarında, daha az maliyetle, maksimum dengesizliği gidermeyi sağlayacak dengeleme halkası tasarımları üzerine çalışmaktadırlar. Bunun için de dengeleme halkası sıvısının miktarı, konstrüktif yapısının tasarımı, sıvı yoğunluğu, bilye – sıvı kombinasyonları üzerine çalışmalar yapılmakta ve gerekli patentler alınmaktadır. Literatürde de bu patentlerin detaylı araştırıldığı yüksek lisans tez çalışmaları ve patentler bulunmaktadır. Bu tez çalışmalarında ve patentlerde, genel anlamda düşük devirlerde dengelemeyi sağlamak amaçlanmıştır.

Şekil 2.13 'te Sanyo Electric' in bir patenti gösterilmektedir. Bu patentte dengeleme halkası içerisine kepçe şeklinde feder yapıları konularak sıvının kontrolsüz olarak hareket etmesi engellenmeye çalışılmıştır. Bu kepçe şeklindeki yapıların uç noktaları dönme yönünün tersine doğru konumlandırılmıştır. Yani tasarım, dönme hızının artması ile birlikte her bir bölgede tutulan suyun miktarının değişmesine olanak sağlamaktadır.



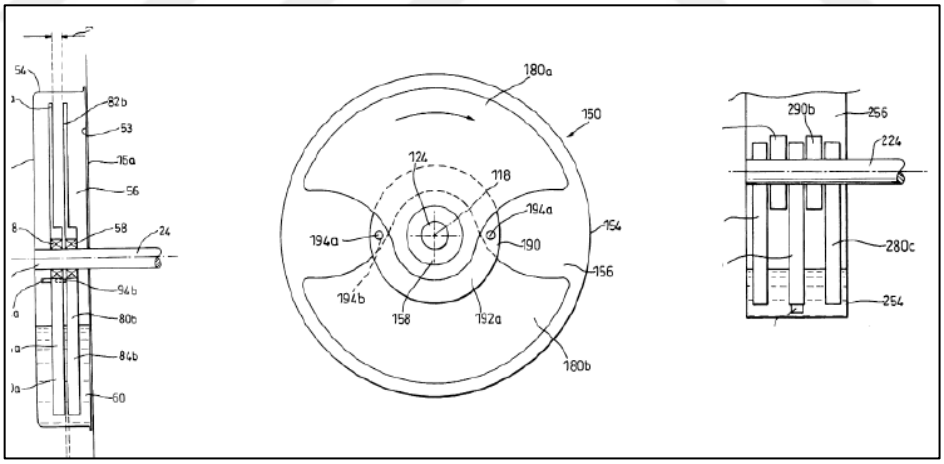
Şekil 2.13 US6418758 numaralı Sanyo Electric patenti [21]

Şekil 2.14 'te Sanyo Electric' in başka bir patenti gösterilmiştir. Bu patentte de dengeleme halkası kısmi olarak bölgelere ayrılmıştır. Dengeleme halkasının dönme merkezine göre daha dış kısmında kalan çeperinde küçük bölmeler açılarak dönme hızının değişmesi ile birlikte sıvının bölmeler arasında hareket etmesine olanak tanınmıştır.



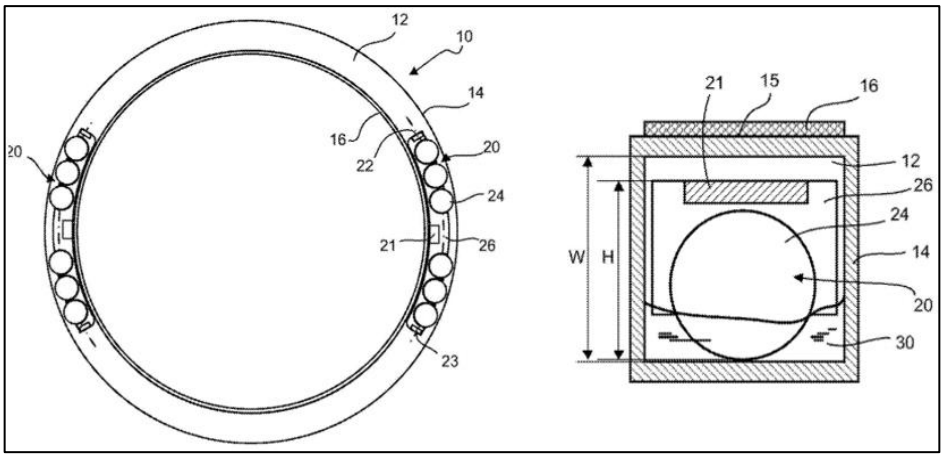
Şekil 2.14 JP2007209502 numaralı Sanyo Electiric patenti [22]

Şekil 2.15' te gösterilen Dyson Ltd. patenti, önden yüklemeli ya da yatay tamburlu çamaşır makineleri üzerinedir. Tambur arkasına yerleştirilmiş olan haznede tambur ile aynı eksende dönebilen iki disk ve viskoz sıvı bulunmaktadır. Ayrıca, daha yüksek dengelemeler için disk sayısı arttırılabilmektedir. Sistem doğal frekansının üstündeki devirlerde, diskler kilitlenerek sistemin dengelenmesi amaçlanmıştır.



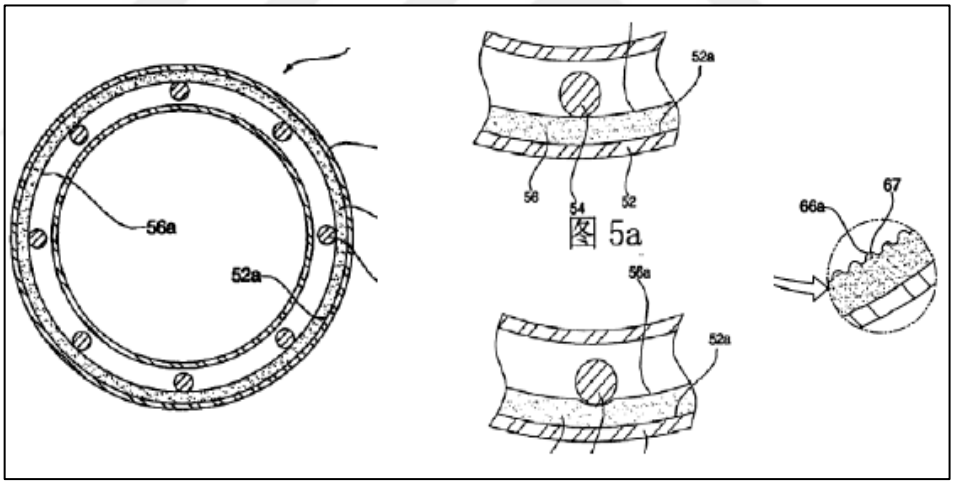
Şekil 2.15 GB2388849A numaralı Dyson Ltd. patenti [23]

BSH Electrical Appliances Jiangsu Co. Ltd.' nin Şekil 2.16' da gösterilen patenti, dairesel içi boş kanal içerisinde hareket edebilen kütleler ve manyetik kuvvetler etkisi ile hareket edebilen engeller içerir. Belirlenen hızların altında; manyetik kuvvetler devreye girerek, engellerin kütlelerin hareketini engellemesi sağlanmıştır.



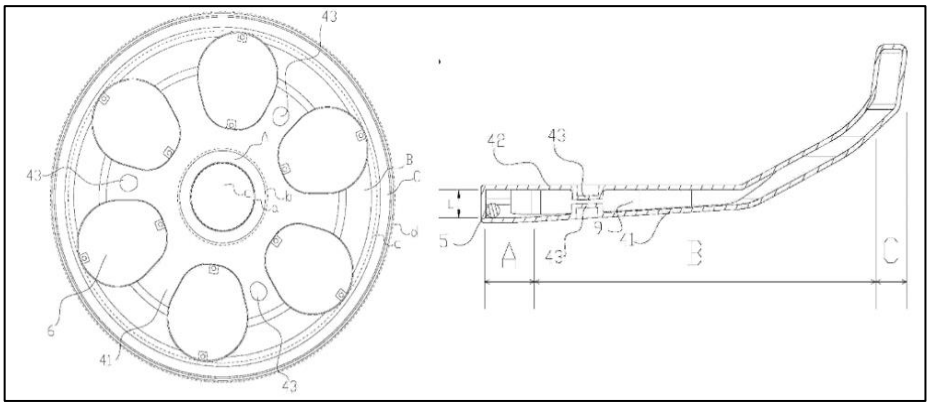
Şekil 2.16 CN107366131A numaralı BSH Electrical Appliances Jiangsu Co. Ltd. patenti [24]

Yukarıda örnek olarak sunulan patentler önden yüklemeli çamaşır makineleri için alınmıştır. Önden yüklemeli ve üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkalarının çalışma prensiplerinin aynı olduğu düşünüldüğünde benzer tasarımlar üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde de bulunmaktadır.



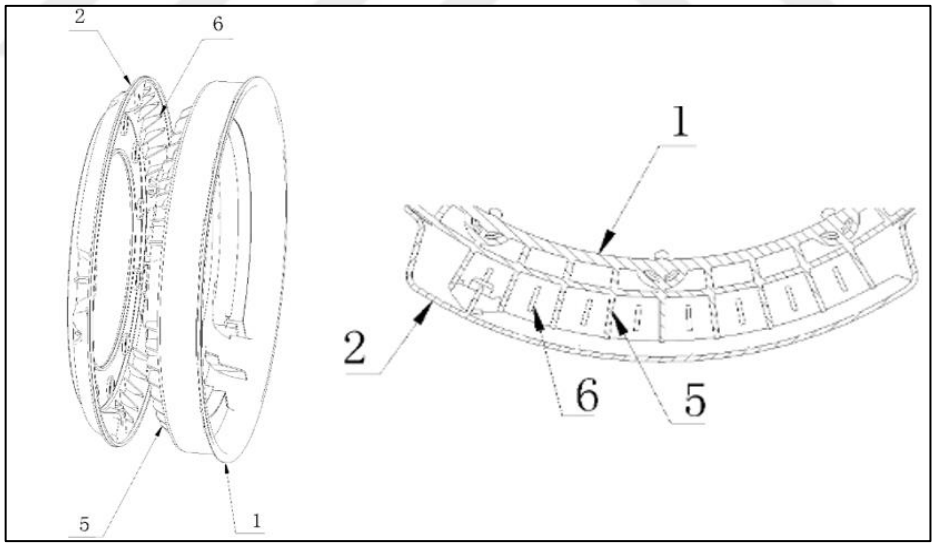
Şekil 2.17 CN1782186 numaralı LG Electronics patenti [25]

Şekil 2.17' da gösterilen LG Electronics' in patenti, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılmakta olup bilyeli bir dengeleme halkasına örnektir. Bilyelerin oluşturduğu ses ve gürültüyü engellemek için, bilye kanalları elastik bir katmanla kaplanmıştır.



Şekil 2.18 CN104562554A numaralı Haier Group Corp. patenti [26]

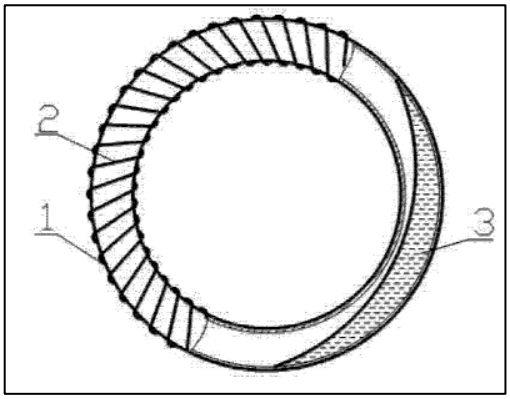
Şekil 2.18' da gösterilen Haier Group Corp.' in patenti üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkalarına ayrı bir örnektir. Dengeleme halkası, tambur altında bir katman oluşturacak ve ortasında motor mili geçecek şekilde monte edilmiştir. Katman içerisinde kanallar oluşturularak dengeleme için kullanılan bilyaların bu kanallarda hareket etmesi sağlanmıştır. Ayrıca kanallar kesit görüntüden de görülebileceği üzere; milden uzaklaştıkça, üstten yüklemeli çamaşır makinesinin kapağına doğru yükselmektedir.



Şekil 2.19 WO2018099421A1 numaralı Qingdao Haier Washing Mach Co. patenti [27]

Qingdao Haier Washing Mach Co' nin Şekil 2.19 'da gösterilen patenti üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılmıştır. İki parçadan oluşan dengeleme halkası sızdırmaz olarak birleştirilip kapalı bir hacim oluşturulmuştur. Oluşturulan

kapalı hacim içerisine konulan sıvının, çalkalanma süresince akış hızı feder yapıları ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 2.20 CN102537186A numaralı Univ. Jiangnan patenti [28]

Şekil 2.20' de gösterilen Jiangnan Üniversitesi' nin patenti, içi boş bir dairesel kap içerisinde hareket eden manyetoreolojik sıvı ve kabın dışına sarılmış bobinden oluşur. Manyetik alan oluşturmak için bobine akım uygulandığında; sıvı viskozitesini büyük oranda kaybederek sabit kalır. İstenilen hızlarda ise sıvının hareket etmesi sağlanarak titreşim azaltılır.

Örnek olarak sunulan bu patentlere ek olarak Şekil 2.21' de gösterilen şekilde dairesel kanallar dengeleme halkasının içerisine eklenerek sıvının farklı kanallarda hareket etmesi sağlanan tasarımlar da mevcuttur. Bu kanallarda ekstra dengeleme için bilye kullanılan tasarımlar da bulunmaktadır. Ayrıca gliserin gibi yoğunluğu farklı sıvıların kullanımı da mevcuttur.



Şekil 2.21 Örnek dairesel kanallar

Özetlenecek olursa; literatürdeki ve piyasadaki dengeleme halkası tasarımları incelendiğinde dış tasarımlarında küçük farklılıklar gözlenmektedir. Ancak

dengeleme halkasının iç tasarımları yani sıvının dolaştığı hacim incelendiğinde, mukavemet açısından yapısal tasarımından ziyade sıvının hareketinin yönlendirilmesi amacıyla çeşitli feder ve kanal yapılarının oluşturulduğu gözlenmiştir. Böylece farklı dönme hızlarında, daha etkili dengeleme yapılabilecektir. Ayrıca bu kanal yapıları ile müşteri tarafından da duyulabilecek olan dengeleme halkası içerisindeki sıvının çalkalanma hareketinin sesi de azaltılmaya çalışılmıştır.

Farklı devirlerde dengeleme sağlamak, dengeleme kapasitesini arttırmak, çalkantı sesini düşürmek amacıyla sadece yapısal tasarım anlamında değişikliklerden ziyade, Bölüm 2.4 Teori başlığı altında da matematiksel olarak açıklanacağı üzere, sıvı yoğunluğunu, viskozitesini değiştirerek yapılan çalışmalar da mevcuttur. Ayrıca dengeleme halkasından bağımsız olarak motor sürüş ile ilgili de çalışmalar yapılmıştır.

2.3 Bilgisayar Destekli Tasarım Hakkında Genel Bilgiler

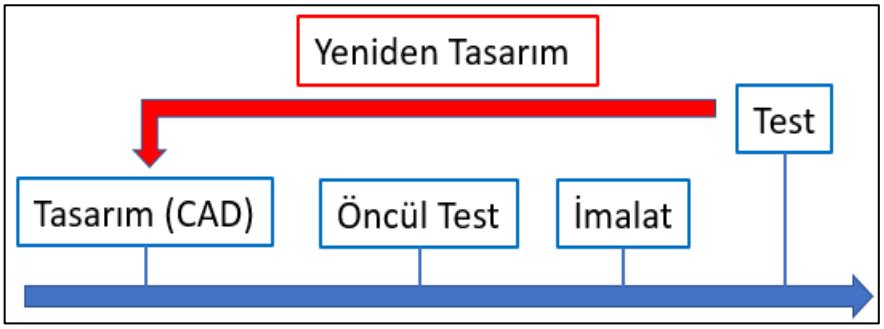
Günümüzde bilgisayar destekli mühendislik; otomotiv, savunma, tüketim ürünleri, havacılık gibi ürün geliştirilen, aklımıza gelebilecek her alanda kullanılabilmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte klasik deneme yanılma yöntemlerinin yerini bu yöntemin aldığı söylenebilir. Yani ürünlerin prototip aşamalarından önce, bilgisayar ortamında gerekli isterleri karşılayacak şekilde tasarımlar yapılabilir. Bilgisayar destekli mühendisliğin en büyük avantajları;

- Yeni ve ilham verici tasarımların ortaya konulabilmesi,
- Daha kaliteli ürünlerin üretilebilirliği,
- Daha az malzeme kullanılan ya da daha hafif ürünlerin üretilebilirliği,
- Daha hızlı tasarlama ve üretime hazır hale getirme şeklinde sıralanabilir.

Kısacası; bilgisayar destekli mühendislik ve simülasyon ile zamandan tasarruf sağlanır, maliyetler düşürülür ve dolayısıyla şirketlerin rekabet güçleri arttırılır. Tabi ki, olumlu yanlarının yanında kullanılan programların maliyetleri, uzmanlık gerektirme gibi ek külfetleri de vardır.

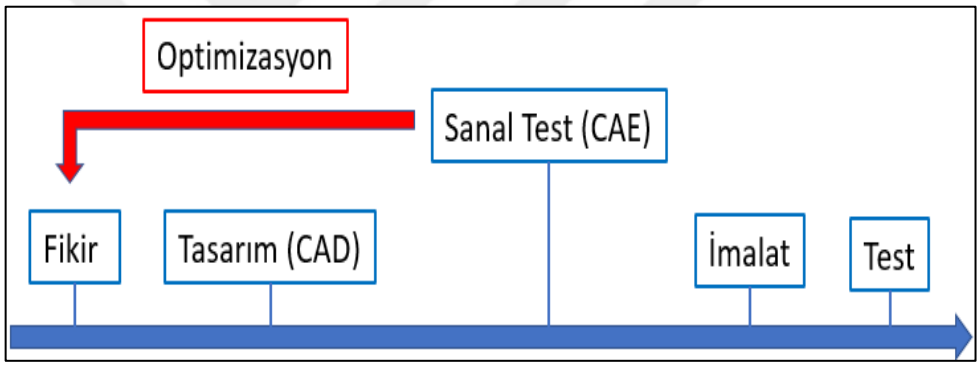
Şekil 2.22’ de geleneksel tasarım süreçleri gösterilmiştir. Bu süreçlerde çok sayıda prototip üretilip bu prototipler üzerinde testler yapılarak tasarımların üretime

hazır hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu durum da ekstra bir zaman ve maliyete sebep olmaktadır.



Şekil 2.22 Geleneksel tasarım [29]

Şekil 2.23' de gösterilen modern, bilgisayar destek mühendislik sürecinde ise; simülasyon yöntemleri tasarım sürecine eklenerek tasarımların optimize edilmesi sağlanmış, süreçler kısalmış ve maliyetler azalmıştır.



Şekil 2.23 Bilgisayar destekli mühendislik katkılı tasarım [29]

Simülasyon ya da analiz yöntemlerinin tasarım süreçlerine dahil edilmesi prototip aşamalarının tamamen kalktığı anlamına gelmemelidir. Seri üretim süreçlerinde prototipler tabi ki de üretilmektedir. Ancak bilgisayar destekli mühendislik tasarım süreçlerinin en büyük avantajı, farklı fikirlerin daha üretime geçmeden ya da herhangi bir prototip yapılmadan, sanal ortamda dijital ikizlerinin oluşturularak, birbirleri ile karşılaştırılabilmesi ve gerekli isterleri sağlamayan fikirlerin elenebilmesidir.

Mühendislik problemleri;

- Analitik metot,
- Nümerik metot,

- Deneysel metot olmak üzere üç şekilde çözülebilir.

Tablo 2.1' de, analitik methot, nümerik methot ve deneysel methotun temel özellikleri açıklanmış ve aralarındaki farklar ortaya konulmuştur.

Tablo 2.1 Mühendislik problemleri çözümleri [29]

Analitik Metot	**Nümerik Metot**	**Deneysel Metot**
• Klasik yaklaşımlar • %100 doğru sonuç • Çözümler kapalı formludur. • Sadece basit problemler için kullanılır • Kendi içinde tamamlanır	• Matematiksel yaklaşımlar • Yaklaşık sonuçlar • Prototipin henüz üretilmediği durumlarda kullanılabilir. • Gerçek hayatta kompleks problemlerde kullanılır. • Körü körüne güvenilmemelidir. Analitik ya da deneysel metotlar ile doğrulanması gerekir.	• Gerçek ölçümlerdir. • Diğer metotlara göre daha çok zaman gerekir. • Kurulumu pahalıdır. • Sonuçların güvenilebilir olması için 3 ila 5 prototip üzerinde çalışılması gerekir.
Çözümler kapalı formlu değilse, yaklaşık çözümler verebilir.	Sonlu elemanlar, sonlu hacimler, sonlu farklar, sınır elemanlar metodu şeklinde çeşitleri vardır.	Strain gauge, görüntü işleme, titreşim ölçümleri, sensör ile sıcaklık- basınç ölçümleri, yorulma testleri

Bir mühendislik probleminin çözümünde, nümerik metotlar kullanıldığında aşağıdaki analiz çeşitlerinden biri ya da birkaçı mühendislik probleminde yer alabilir. Bu analiz çeşitleri:

1. Lineer statik analizler
2. Non-lineer analizler
3. Dinamik analizler
4. Burulma analizleri
5. Termal analizler
6. Yorulma analizleri
7. Optimizasyon
8. CFD analizleri
9. Çarpma (Crash) analizleri
10. Titreşim – Akustik (NVH) analizleridir [29].

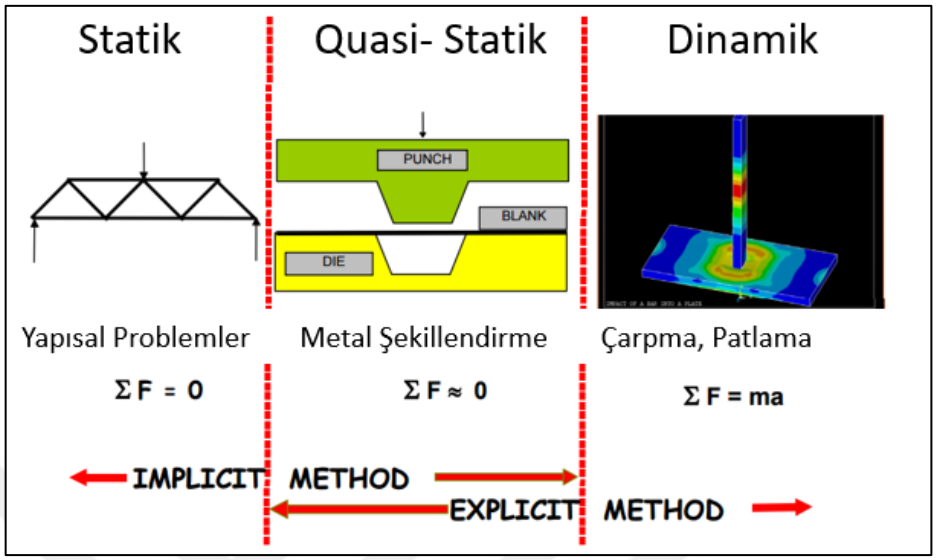
Yukarıda belirtilen bu analiz çeşitleri detaylı açıklanmayacak olup, sadece tez kapsamında çalışmada oluşturulan model anlatılırken, gerekli bilgiler verilecektir.

Nümerik metotların kullanım alanlarını incelediğimizde; sonlu elemanlar metotları, lineer, non- lineer, termal, burulma, dinamik, ve yorulma analizlerinde kullanılır. Sınır elemanlar metodu, akustik analizlerde kullanılır. Sonlu hacimler metodu; CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ve hesaplamalı elektromanyetikte kullanılır. Sonlu farklar metodu ise termal analizlerde ve sıvı akış analizlerinde sonlu hacimler metoduyla birlikte kullanılabilir.

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan çözücüleri ele aldığımızda ise karşımıza iki tip çözüm tipi ortaya çıkar: Implicit ve Explicit.

Bu çözüm yöntemleri mühendislik probleminin fiziksel karşılığına eş değer olan zamana bağlı ya da zamandan bağımsız diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılır. Explicit çözüm yönetimi anlık durum ve herhangi bir zaman sonraki duruma göre oluşturulan bir matrisi çözerken , implicit analizler anlık durum ve anlık durumdan hemen sonraki durum için oluşturulan matrisi çözerler [30]. Implicit analizlerde zaman adımları büyültülebilir ancak her zaman adımında yakınsama gerçekleşmesi gerekmektedir. Explicit analizlerde ise, daha küçük zaman adımları kullanılır ve her aman adımında yakınsama gerçekleşmesine

gerek yoktur. Mühendislik problemlerinde explicit ve implicit çözücüler Şekil 2.24' de gösterilmiştir. Implicit ve explicit çözüm yöntemleri, Tablo 2.2 'de gösterildiği gibi özetlenebilir [30].



Şekil 2.24 Implicit ve explicit çözümlerin kullanıldığı alanlar [29]

Tablo 2.2 İmplicit ve explicit çözüm yöntemleri [30]

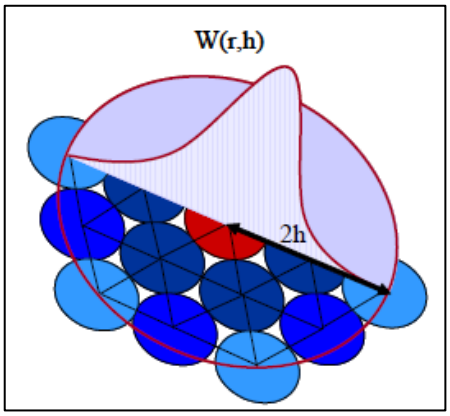
İmplicit Zaman İntegrasyonu	Explicit Zaman İntegrasyonu
• Koşulsuz kararlıdır. • K matrisi ters çevrilir. • Büyük zaman adımları kullanılır. • Nonlineer iteratif metot • Yakınsama problemleri var. • Statik ve quasi-statik problemler • Nispeten daha kısa süreli çözümler	• Kararlılık sorunları var. • K matrisi ters çevrilmez. • Kararlılık için küçük zaman adımları kullanılır. • Yakınsama problemleri yok. • Dinamik ve quasi-statik problemler • Uzun simülasyon süreleri

2.4 Teori

Bu başlık altında, interpolasyonlu tanecik metodu, dönen cisimlerdeki dengesizlik durumları ve çamaşır makinesi dengeleme halkası çalışma prensibi hakkındaki temel teorik bilgilere yer verilmiştir.

2.4.1 İnterpolasyonlu Tanecik Metodu

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere; interpolasyonlu tanecik metodu, ağsız bir sayısal yöntem olup SPH (smoothed particle hydrodynamics) teorisi interpolasyon teorilerine dayanmaktadır. Teorisi sanılanın aksine, tamamen parçacık fiziği yasaları ile direk açıklanmamaktadır. Partikül formları için, kernel çekirdek yaklaşımının integral eşitlikleri kullanılarak dönüştürülen diferansiyel denklemler, sürekli ortamlar dinamiğinin korunum yasalarına uyarlanarak yorumlanmaktadır. Bu yöntem öncelikle astrofizikte kullanılmıştır. 1991 – 1995 yılları arasında interpolasyonlu tanecik yönteminin genel anlamda kullanımı kabul görmüş, geçen süre zarfında akışkan ve katı mekaniği uygulamaları olmuştur. SPH yöntemi ayrıca, parçacıkların zaman içindeki hareketinin incelendiği lagrange yaklaşımında da kullanılmaktadır [31].



Şekil 2.25 Eğri fonksiyonlarında kernel yaklaşımı [31]

SPH yaklaşım denklemi aşağıda kısaca incelenmiştir. İntegral yaklaşımına göre, f skaler fonksiyonunun uzaydaki denklemi $\Pi f(x)$ olarak kabul edilirse,

$$\prod f(x) = \int_{\Omega} f(y) W(x-y,h) dy \tag{2.1}$$

(2.1) eşitliği, h yumuşatma uzunluğu (kübik yapıların bir kenar uzunluğu ya da tanecikler arası nominal mesafe) ve W çekirdek yaklaşımına göre (2.2)' de gösterildiği şekilde yazılabilir [31].

$$\forall x \, , \int_{\Omega} W(x-y,h)dy = 1 \tag{2.2}$$

$$\forall x \, , \lim_{h \to 0} W(x-y,h) = \delta(x-y) \tag{2.3}$$

δ, Dirac fonksiyonunu ya da başka bir deyişle delta fonksiyonunu temsil eder. Kütlesi m_i, yoğunluğu ρ_i olan n sayıdaki parçacığın kümesini oluşturan parçacıkların konumları x_i (i=1,n) kabul edilirse,

$$\prod_{s} f(x) = \sum_{i=1,n} \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) \bigtriangledown W(x-y,h) \tag{2.4}$$

Oluşturulan yaklaşımın türevleri, sıradan türev ile elde edilirse (2.5) eşitliği yazılabilir [31].

$$\bigtriangledown f(x) = \sum_{i=1,n} \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) \bigtriangledown W(x-y,h) \tag{2.5}$$

Şekil 2.25' te gösterilen takip edilen tanecik, eğri boyunca seçilen Gaussian Kernel yaklaşımına göre yorumlanırsa, (2.6), (2.7) ve (2.8) eşitlikleri elde edilir [31].

$$r \leq h \Rightarrow W(r,h) = \frac{3}{2\pi h^3}\left[\frac{2}{3} - \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{h}\right)^3\right] \tag{2.6}$$

$$h \leq r \leq 2h \Rightarrow W(r,h) = \frac{1}{4\pi h^3}\left[2 - \left(\frac{r}{h}\right)\right]^3 \tag{2.7}$$

$$2h \leq r \Rightarrow W(r,h) = 0 \tag{2.8}$$

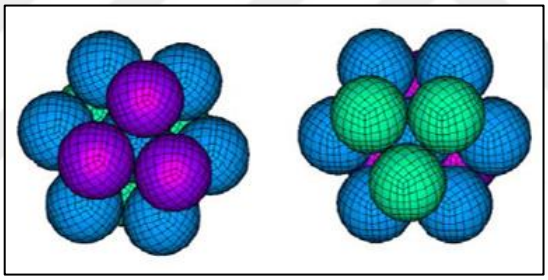
Her bir tanecik, yalnızca en yakınında bulunan taneciğe etki eder. Bu özellik hesaplamalar açısından önemlidir.

Literatürde ve ilgili analiz programlarının kullanma kılavuzlarında interpolasyonlu tanecik metodunun teorisine yönelik daha detaylı bilgilere ulaşabilir. Bu kısımda biraz da taneciklerin Altair Hypermesh ticari programında

nasıl oluşturulduğu yönünde bilgi vermek gerekirse; Hypermesh ticari programında, üç farklı şekilde tanecik oluşturulduğu söylenebilir. Bu oluşumlar aşağıda listelenmiştir [32]:

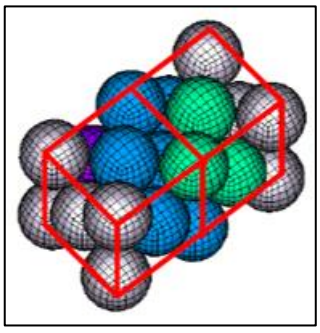
- Hegzagonal kompakt yapı
- Yüzey merkezli kübik yapı
- Basit kübik yapı

Bu oluşumlardan; hegzagonal kompakt yapı ve yüzey merkezli kübik yapı dağılımda, SPH tanecik dağılım şekli aynı olup taneciklerin yüzey merkezli kübik yapıyı sağlayacak şekilde dağılımı gerçekleşmektedir. Sadece oluşturulma yöntemi olarak farklılık bulunmaktadır. Hegzagonal kompakt yapıda, tanecik oluşumu TCL kod yardımıyla gerçekleşirken, yüzey merkezli kübik yapı olarak isimlendirilen dağılım ise komutlar yardımıyla oluşturulabilmektedir. Programın üreticisi tarafından genellikle bu iki yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [32].



Şekil 2.26 Hegzagonal kompakt yapı tanecik dağılımı [32]

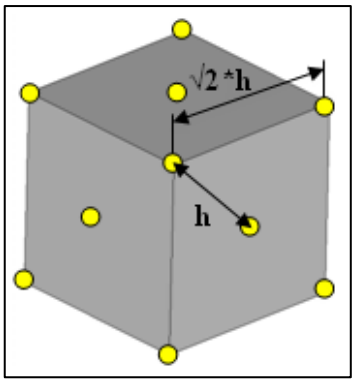
Şekil 2.26 ve Şekil 2.27' de sırasıyla, hegzagonal kompakt ve yüzey merkezli tanecik dağılımı tanecik formunda gösterilmiştir.



Şekil 2.27 Yüzey merkezli kübik yapı tanecik dağılımı [32]

Yüzey merkezli kübik ve basit kübik yapı oluşumlarında, h değeri herhangi bir parçacığın, en yakın parçacık ile arasındaki nominal mesafeyi temsil eder.

Dolayısıyla hegzagonal kompakt yapıda kübik yapının bir kenarının uzunluğu $\sqrt{2}$h iken, basit kübik yapıda kübik yapının bir kenarının uzunluğu c_k=h' tır. Bu ilişkiler Şekil 2.28 ve Şekil 2.29' da gösterilmiştir.



Şekil 2.28 Yüzey merkezli kübik yapı tanecikler arası nominal mesafe ve küp kenar uzunluğu ilişkisi [32]

Hegzagonal kompakt yapıda oluşturulan interpolasyonlu taneciklerin her birinin kütlesi (2.9) eşitliği ile hesaplanabilir. Belli bir hacmin, hesaplanan ağırlıktaki tanecikler ile doldurulduğunu düşünüldüğünden, aynı eşitlikten (2.10) eşitliği türetilerek her bir taneciğin sahip olduğu hacim de hesaplanabilir [32].

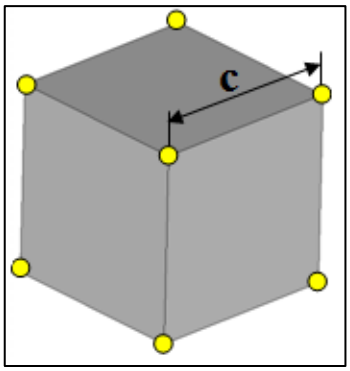
$$m_p \approx \frac{h^3}{\sqrt{2}}\rho \tag{2.9}$$

$$V_p \approx \frac{h^3}{\sqrt{2}} \tag{2.10}$$

Taneciklerin yerleşimi sırasında hacimde oluşan farklılıklar sebebiyle, tanecik kütlesi (2.11) eşitliği ile basit bir yaklaşımla da hesaplanabilir [32].

$$m_p \approx \frac{\rho V}{n} \tag{2.11}$$

(2.11) eşitliğinde; ρ değeri, tanecikler ile temsil edilen akışkanın yoğunluğunu gösterirken, V değeri tanecikle doldurulan hacmi, *n* ise oluşturulan tanecik sayısını ifade eder.



Şekil 2.29 Basit kübik yapı tanecikler arası nominal mesafe ve küp kenar uzunluğu ilişkisi [32]

Basit kübik yapıdaki tanecik oluşturma metodu ele alınacak olunursa; her bir oluşturulan her bir taneciğin kütlesi (2.12) eşitliği ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte c_k kübik yapının bir kenarının uzunluğunu temsil eder. Kübik yapının bir kenarı tanecikler arası nominal uzaklık cinsinden ifade edilecek olunursa, c_k=h şeklinde yazılabilir [32].

$$m_p \approx c_k^3 \rho \tag{2.12}$$

Bu kavramlara ek olarak; bir diğer önemli nokta, tanecik özelliklerinin ve davranışının belirlendiği PROP/SPH başlığı altında tanımlanan "smoothing length" olarak tanımlanan ve h ile gösterilen (fakat kavram tez kapsamında kavram karmaşası yaşanmaması adına d ile gösterilmiştir.) düzleştirme uzunluğudur [32].

Radioss çözücüsünün üreticisi olan Altair Firmasının önerilerine göre; yüzey merkezli kübik yapılarda, düzleştirme uzunluğu tanecikler arası en kısa nominal mesafeyi ifade eden h değeriyle aynı kullanılabilir. İç gerilmelerin etkilerinin çok fazla olmadığı fiziksel problemlerde, tanecikler arası mesafeden daha düşük düzleştirme uzunlukları kullanılabilir. Ancak akışkanı oluşturan tanecikler birbirini çekme davranışı gösteriyorlarsa; düzleştirme uzunluğu, tanecikler arası mesafeden daha büyük olacak şekilde kullanılmalı ve akışkanın stabilizesi arttırılmalıdır. SPH taneciklerinin, birbirini çekme davranışı gösterdiği durumlarda; tanecikler arası mesafeden daha büyük düzleştirme uzunluğu seçimi, akışkanı daha doğru bir şekilde simule ederken beraberinde de hesaplama sürelerinin uzamasına sebep olur [32].

Basit kübik yapıda ise, tanecikler arası gerinin kararsızlığının çözülebilmesi için yüzey merkezli kübik ve hegzagonal kompakt yapıya göre daha fazla bir düzleştirme uzunluğu seçilmelidir. Bu sayede, düzleştirme uzunluğu arttıkça tek bir taneciğin hesaplamalara dahil edilmesinde daha fazla komşu tanecik kullanılır. Bu kullanım şeklinin de çözüm sürelerini uzatacağı unutulmamalıdır. Basit kübik yapı için, Altair tarafından önerilen düzleştirme uzunluğu ise, $1{,}25c_k$ ve $1{,}5c_k$ arasındadır [32].

Bu tez kapsamında anlatılan çalışmalarda; düzleştirme uzunluğu, iki tanecik arasında minimum mesafeyi temsil eden h değeri ile aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Tablo 2.3 ve Tablo 2.4' te sırasıyla yüzey merkezli kübik yapı ve basit kübik yapıda kullanılabilecek örnek düzleştirme uzunlukları için, bu düzleştirme uzunlukları içerisinde yer alan tanecik sayıları gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Yüzey merkezli kübik yapı için farklı düzleştirme uzunluklarında yer alan komşu tanecik sayısı [32]

Düzleştirme uzunluğu, d	d mesafesindeki tanecik sayısı	d mesafesi içindeki tanecik sayısı
h	12	12
$\sqrt{2}$h	6	18
$\sqrt{3}$h	24	42
2h	12	54
$\sqrt{5}$h	24	78

Tablo 2.4 Basit kübik yapı için farklı düzleştirme uzunluklarında yer alan komşu tanecik sayısı [32]

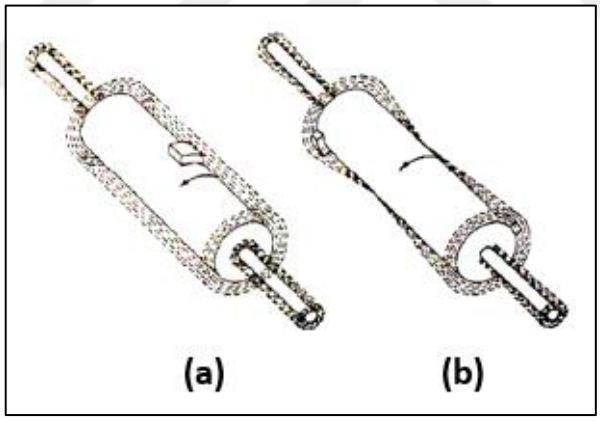
Düzleştirme uzunluğu, d	d mesafesindeki tanecik sayısı	d mesafesi içindeki tanecik sayısı
c	6	6
$\sqrt{2}c$	12	18
$\sqrt{3}c$	8	26
2c	6	32
$\sqrt{5}c$	24	56
$\sqrt{6}$c	24	80
$2\sqrt{2}$c	12	92
3c	6	98

2.4.2 Dengesizlik

Makinelerde gözlenen titreşimin ana kaynaklarından birisi dengesizlik problemleridir. Dengesizlik durumu; yataklamanın düzgün tasarlanmamış olması, üretimsel hatalar, hareket süresince farklı kuvvetlerin komponent üzerine etki etmesi, dönen komponentlerin yataklarının aşınması gibi problemlerden doğabilir. Örneğin dönen ve rotoru bulunan bir makinenin rotorunun kütle merkezi ile dönme merkezinin çakışmaması ya da çalışmakta olan bir çamaşır makinesinin içindeki yüklerin konumunun değişmesi birer dengesizlik örneği olarak verilebilir. Dengesizlik problemleri sonucunda parçaların üzerine ekstra kuvvetler etki etmekte ve çeşitli hasarlara sebep olmaktadır. Malzemelerin homojen olmamasından, ya da üretim toleranslarından ötürü dengesizliğin oluştuğu söylenebilir. Özellikle yüksek devir hızlarına çıkan makinalarda, dengelenmemiş çok küçük kuvvetler bile büyük atalet kuvvetlerinin doğmasına, yataklara etki eden kuvvetlerin artmasına ve aşınmalara sebep olabilir. Bu

dengesizlik uygun tasarımlar ve hassas üretim toleransları ile ortadan kaldırılabilir.

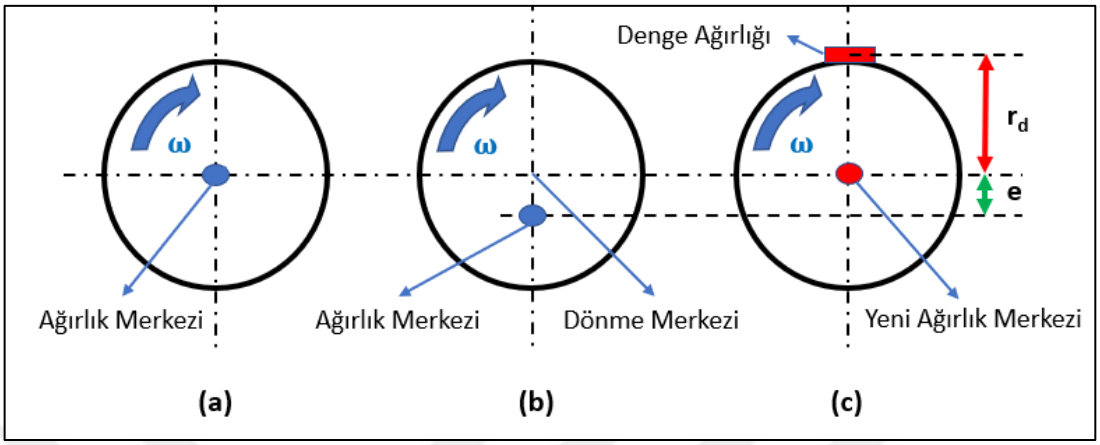
Dengesizlik; dinamik ve statik dengesizlik olarak ikiye ayrılabilir. Statik dengesizlik durumunda cismin geometrik merkezinden geçen eksen ile dönme ekseni paralel olup birbiri ile çakışmamaktadır ya da dengesizliğin tek bir düzlemde oluğu söylenebilir. Rotorların eğilmesine sebep olan kuvvetlerle birlikte yataklama bölgelerinde, tek eksende büyüklük olarak belirli maksimum minimum reaksiyon kuvveti aralığında değişen kuvvetler oluşur. Bu dengesizlik tipinde tek bir düzlemde dengeleme yapılarak dengesizlik giderilebilir. Dinamik dengesizlik durumunun oluşması için ise, dönme ekseni ile dönen cismin merkezinden geçen asal eksen arasında açısal farklılık olması gerekmektedir. Gerçek hayatta yani üç boyutlu ortamlarda gözlenen dengesizlikler genellikle bu çeşittir. Dönen cisim üzerindeki dengesizlikler statik olarak tek eksende dengelense bile oluşan atalet kuvvetleri dönen cisim üzerinde ayrıca moment oluşturmaktadır. Şekil 2.30 ‘ da statik ve dinamik dengesizlik durumları gösterilmiştir [33].



Şekil 2.30 Statik (a) ve dinamik (b) dengesizlik durumları [33]

Dengesizliği en basit şekilde açıklamak amacıyla; disk şeklinde, M_d ağırlığında r_d yarıçapına sahip dönen, oldukça ince bir diski ele alalım. Bu disk, her iki tarafından mafsallanmış ve kütlesi ihmal edilen bir mil etrafında ω açısal hızı ile dönmektedir. Ayrıca imalat toleranslarının ve diskin kütlesinin homojen yayıldığı kabul edilmiştir. Şekil 2.31’ de (a) resminde ağırlık merkezi etrafında belirli bir açısal hızla dönen disk görülmektedir. Bu durum; herhangi bir dengesizliğin ve dolayısıyla dengesizlik kaynaklı titreşimlerin oluşmadığı durum olarak belirtilebilir. Yine aynı resmin (b) seçeneğinde ise, ağırlık merkezi ile diskin

dönme merkezi arasında e büyüklüğünde eksenel kaçıklık vardır. Bu durum statik dengesizliğin ve atalet kuvvetlerinden ötürü titreşimin oluşmasına sebep olacaktır [33].



Şekil 2.31 Dengesizlik

$$F = M_d . e . \omega^2 \tag{2.13}$$

(2.13) eşitliği ile, Şekil 2.31 (b) resminde gösterilen durumda disk üzerine etki eden kuvvet hesaplanabilir. Şekil 2.21 (c)' de ise dönme merkezi ve ağırlık merkezinin eksenel kaçıklığından kaynaklanan dengesizliğin giderilmesi amacıyla eklenen denge ağırlığı gösterilmiştir. Dengesizliğin giderilebilmesi için, eklenen denge ağırlığının oluşturduğu atalet kuvveti, (2.13) eşitliğindeki değere eşit olmalıdır. Böylece dengeleme sağlanmış olacaktır. Dengeleme büyüklüğü olarak tanımlanan büyüklük (2.14) eşitliğinde gösterilmiştir. Bu eşitlik sayesinde dengeleme kütlesi hesaplanabilir [33].

$$m_{denge} = \frac{M . e}{r_d} \tag{2.14}$$

Şekil 2.21 (c) ve (2.15) eşitliğinde ise; ilk durumdaki dengesizliğin oluşturduğu atalet kuvveti ile dengeleme ağırlığının oluşturduğu atalet kuvvetinin birbirine eşit olması durumunda dengesizliğin ortadan kalkacağı gösterilmiştir. Böylece dengesizlik kaynaklı titreşim de ortadan kalkacaktır.

$$F = M_d . e . \omega^2 - m_{denge} . e . \omega^2 = 0 \tag{2.15}$$

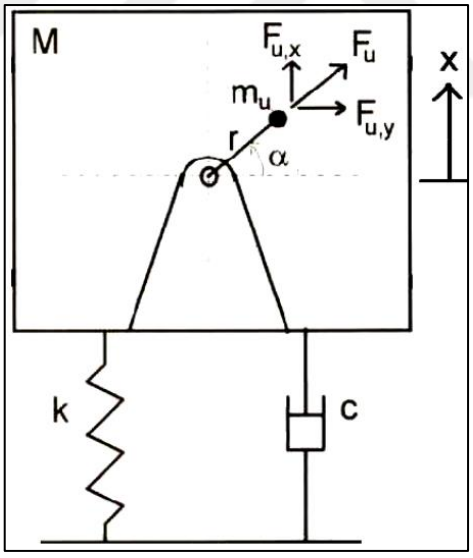
2.4.3 Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkası Çalışma Teorisi

Dengeleme halkasının çalışma teorisi olarak nitelendirilebilecek bu konu başlığı altında, tek ve çift serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemleri ve dengeleme halkasına etkiyen kuvvetler matematiksel eşitliklerle anlatılmıştır.

2.4.3.1 Tek ve Çift Serbestlik Dereceli Sistemlerin Hareket Denklemleri

Çamaşır makinesi dengeleme halkasının çalışma prensibini daha iyi anlatabilmek amacıyla, öncelikle tek ve iki serbestlik dereceli sistemlerin titreşim ve hareket denklemleri oluşturulmuştur.

Şekil 2.32' de sadece tek bir eksende (düşey doğrultuda) hareket edebilen tek serbestlik dereceli bir sistem gösterilmiştir. Hareket ekseni x ile gösterilmiştir. Şekil 2.32' de gösterilen tüm sistemin kütlesi M olup, ω açısal hızı ile dönmekte olan m_u kütlesi bu sistem içerisinde yer almaktadır. M kütlesinden oluşan sistem; yay sabitesi k ve sönüm katsayısı c olan yay ve sönüm elemanları ile zemine bağlanmıştır [33].



Şekil 2.32 Tek serbestlik dereceli sistem [33]

m_u kütlesinin öncelikle açısal hareketi ele alınırsa; sistem içerinde ω hızı ile döndüğünden herhangi bir t anında α açısı kadar konum değiştirecektir.

$$\alpha = \omega . t \tag{2.16}$$

Düşey eksendeki doğrusal konum değişimi ise (2.17) eşitliği şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte x_u, m_u kütleisnin yer değiştirmesini, r ise m_u kütlesinin bağlı olduğu ve açısal hareket yaptığı eksenin yarıçapını oluşturan uzunluğu temsil etmektedir.

$$x_u - x = r.\sin(\omega.t) \tag{2.17}$$

Sistemin hareket denklemi (2.18) eşitliğide gösterildiği gibi yazılabilir.

$$(M - m_u).\ddot{x} + m_u.\ddot{x_u} + c.\dot{x} + k.x = 0 \tag{2.18}$$

(2.17) eşitliğindeki x_u ifadesi çekilip (2.18) eşitliğinde yerine yazılırsa, eşitlik aşağıdaki şekli alır.

$$(M - m_u).\ddot{x} + m_u.\frac{d^2}{dt^2}(x + r.\sin(\omega.t)) + c.\dot{x} + k.x = 0 \tag{2.19}$$

İşlem adımları takip edilerek, (2.19) eşitliği (2.21) eşitliğine dönüştürülür.

$$M.\ddot{x} - m_u.\ddot{x} + m_u.\ddot{x} - m_u.r.\omega^2\sin(\omega.t) + c.\dot{x} + k.x = 0 \tag{2.20}$$

$$M.\ddot{x} + c.\dot{x} + k.x = m_u.r.\omega^2\sin(\omega.t) \tag{2.21}$$

(2.21) eşitliğinin, genel çözümü (2.22) ve (2.23)' te gösterilmiştir.

$$x = X.\sin(\omega.t - \theta) \tag{2.22}$$

$$x = X.\sin(\omega.t - \theta) = A.\sin(\omega.t) + B.\cos(\omega.t) \tag{2.23}$$

(2.23) eşitliğinde A ve B değerleri; aşağıda gösterilmiştir.

$$X = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{2.24}$$

$$\tan(\theta) = \frac{-B}{A} \tag{2.25}$$

Bu ifadelerdeki X, A, B ve θ ifadelerinin hesaplanabilmesi amacıyla; (2.23) eşitliğinin türevi alınıp (2.21) denkleminde ilgili yerlere yazılırsa, (2.26) eşitliği elde edilir.

$$M.(-A.\omega^2.\sin(\omega.t) - B.\omega^2.\cos(\omega.t)) + c.(A.\omega.\cos(\omega.t) - B.\omega.\sin(\omega.t)) + k.(A.\sin(\omega.t) + B.\cos(\omega.t)) = m_u.r.\omega^2 \sin(\omega.t) \quad (2.26)$$

(2.26) eşitliğinde $\sin(\omega.t)$ ve $\cos(\omega.t)$ ifadeleri kendi içerisinde eşitlenirse;

$$(k - M.\omega^2).A - c.\omega.B = m_u.r.\omega^2 \quad (2.27)$$

$$c.A.\omega + (k - M.\omega^2).B = 0 \quad (2.28)$$

Yukarıdaki iki denklem yardımıyla A ve B katsayıları sırasıyla (2.29) ve (2.30) eşitliğindeki gibi hesaplanabilir.

$$A = \frac{(k - M.\omega^2).m_u.r.\omega^2}{(k - M.\omega^2)^2 + (c.\omega)^2} \quad (2.29)$$

$$B = \frac{(-c.\omega.m_u.r.\omega^2)}{(k - M.\omega^2)^2 + (c.\omega)^2} \quad (2.30)$$

Bu iki ifade yardımıyla, X ve $\tan(\theta)$ için eşitlikler oluşturulabilir.

$$X = \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{(m_u.r.\omega^2)}{\sqrt{(k - M.\omega^2)^2 + (c.\omega)^2}} \quad (2.31)$$

$$\tan(\theta) = \frac{-B}{A} = \frac{c.\omega}{k - M.\omega^2} \quad (2.32)$$

Genel anlamda; sırasıyla,

- Tahrik frekansı ω, (2.33) eşitliğindeki gibi,
- Sönümsüz doğal frekans ω_n, (2.34) eşitliğindeki gibi
- Tahrik frekansının doğal frekansa oranı β, (2.35) eşitliğindeki gibi
- Sönüm faktörü ξ, (2.36) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$\omega = \frac{2.\pi.N}{60} \quad (2.33)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2.34)$$

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_n} \tag{2.35}$$

$$\xi = \frac{c}{c_k} = \frac{c}{2.\sqrt{k.M}} = \frac{c}{2.M.\omega_n} \tag{2.36}$$

Yukarıdaki tanımlar kullanılarak; (2.21) eşitliğinin çözümü, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$x = \frac{m_u.r.}{M} \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2.\xi.\beta)^2}} \sin(\omega.t - \theta) \tag{2.37}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2.\xi.\beta}{1-\beta^2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.\xi.\frac{\omega}{\omega_n}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right) \tag{2.38}$$

Yukarıdaki formüllerden de görülebileceği üzere; sistem ($m_u.r.\omega^2$) genliğindeki bir harmonik kuvvet ile tahrik edildiğinde, yer değiştirme miktarı (2.37) eşitliğindeki kadar olacak ve tahrik kuvveti formunu θ açısı kadar gerisinde takip edecektir [33].

m_u kütlesinin dönme hareketinden kaynaklı kütle üzerine etkiyen kuvvet (2.39) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

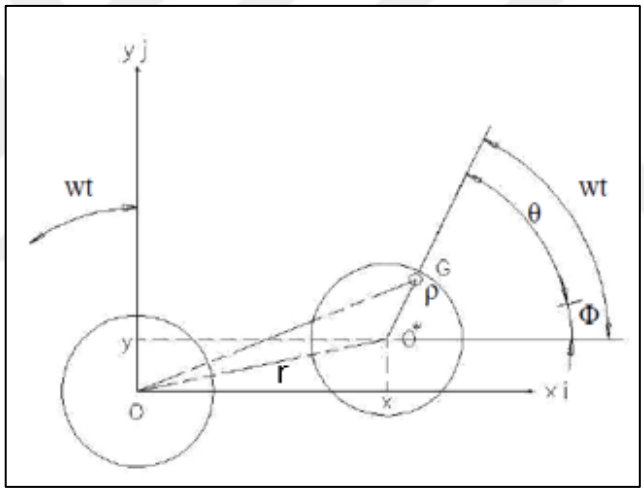
$$\vec{F} = m_u.r.\omega^2 \tag{2.39}$$

(2.37), (2.38) ve (2.39) eşitlikleri yorumlanacak olunursa; açısal hız arttıkça m_u kütlesi üzerine etkiyen F kuvvet vektörünün şiddeti açısal hızın karesi ile orantılı olacak şekilde artmaktadır. x titreşim vektörünün şiddeti ise doğal frekansa karşılık gelen kritik bir hıza kadar artmakta, kritik hızda maksimum olmakta ve kritik hızın üstündeki hızlarda ise azalmaktadır [33].

Dengesiz yük içeren bir diskin mile monte edildiği ve bu milin de tek ya da iki taraftan yataklandığı düşünüldüğünde; mil ve dengesiz yük içeren diskten oluşan sistemin, mil ekseni etrafında belirli bir açısal hızda dönerken milin ekseninin herhangi bir t zamanındaki doğrultusunun ilk durumdaki doğrultusundan farklılaşması sonucu oluşan titreşim hareketine salınım ya da whirl hareketi denir [33]. Bu hareket; kazan – motor milinin tek noktadan yataklandığı göz önüne

alındığında, üsten yüklemeli çamaşır makinelerinde de görülür. Hatta düzgün doğrusal olarak artan bir açısal hız profili için, salınım yani titreşim hareketinin genliğinin arttığı da söylenebilir. Whirl hareketini daha iyi açıklayabilmek amacıyla iki serbestlik dereceli sistemin titreşim hareket denklemleri yazılabilir.

Şekil 2.33 ‘ te iki serbestlik dereceli bir sistemin hareketi gösterilmiştir. Bu gösterimde, $\boldsymbol{i}$ ve $\boldsymbol{j}$ sırasıyla x ve y eksenlerindeki birim vektörleri temsil etmektedir. Ağırlık merkezi geometrik merkezden ρ kadar kaymış, G noktasında ağırlık merkezine sahip m kütlesindeki bir disk, O noktası etrafında ω açısal hızıyla dönmektedir. Açısal hız ve ağırlık merkezi - geometrik merkez farklılığı sebepleri ile m kütlesindeki disk dönme ekseninden sapmaya yani salınım hareketi yapmaya çalışacaktır. Ayrıca mil yatak sisteminin oluşturduğu sönüm ve direngenlik katsayıları sırasıyla, c ve k ile gösterilmiştir [33].



Şekil 2.33 İki serbestlik dereceli sistem [33]

Ağırlık merkezindeki kuvvet denge denklemleri (2.40) eşitliğinde gösterildiği üzere vektörel formda yazılabilir.

$$m.\ddot{\boldsymbol{r}} = -k.x.\boldsymbol{i} - k.y.\boldsymbol{j} - c.\dot{x}.\boldsymbol{i} - c.\dot{y}.\boldsymbol{j} \tag{2.40}$$

(2.40) eşitliğindeki r vektörü x ve y eksenlerindeki birim vektörler cinsinden yazılabilir.

$$r = (x + \rho.\cos(\omega.t)).\boldsymbol{i} + (y + \rho.\sin(\omega.t)).\boldsymbol{j} \tag{2.41}$$

(2.41) eşitliğinin iki kere türevi alınarak (2.42) eşitliği elde edilir.

$$\ddot{r} = (\ddot{x} - \rho.\omega^2.\cos(\omega.t)).\boldsymbol{i} + (\ddot{y} - \rho.\omega^2.\sin(\omega.t)).\boldsymbol{j} \tag{2.42}$$

(2.42) eşitliği, (2.40) eşitliğinde yerine yazılabilir.

$$\begin{aligned}(m\ddot{x} - m.\rho.\omega^2.\cos(\omega.t) + c.\dot{x} + k.x).\boldsymbol{i} \\ + (m\ddot{y} - m.\rho.\omega^2.\sin(\omega.t) + c.\dot{y} + k.y).\boldsymbol{j} = 0\end{aligned} \tag{2.43}$$

i ve j birim vektörlerinin katsayıları sıfıra eşitlenerek (2.44) ve (2.45) eşitlikleri elde edilir.

$$\ddot{x} + +c.\dot{x} + k.x = m.\rho.\omega^2.\cos(\omega.t) \tag{2.44}$$

$$\ddot{y} + +c.\dot{y} + k.y = m.\rho.\omega^2.\sin(\omega.t) \tag{2.45}$$

Tek serbestlik dereceli titreşim denklemleri de referans alınarak; iki serbestlik dereceli ve salınım/ whirl hareketi yapan sistemin x ve y eksenlerindeki zamana bağlı konumu, (2.46) ve (2.47) eşitlikleri ile yazılabilir.

$$x(t) = \frac{\rho.\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2.\xi.\beta)^2}}.\cos\left[\omega.t - \tan^{-1}\left(\frac{2.\xi.\beta}{1-\beta^2}\right)\right] \tag{2.46}$$

$$y(t) = \frac{\rho.\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2.\xi.\beta)^2}}.\sin\left[\omega.t - \tan^{-1}\left(\frac{2.\xi.\beta}{1-\beta^2}\right)\right] \tag{2.47}$$

Şekil 2.33’ te gösterilen OO^* ve O^*G doğruları arasında kalan dar açı; tek serbestlik dereceli sistemde hesaplanan faz açına eşittir. ϕ açısı, (2.38) ve (2.48) eşitlikleri yardımıyla yazılabilir.

$$\phi = \omega.t - \theta \tag{2.48}$$

$$\tan(\phi) = \frac{y}{x} = \frac{\sin(\omega.t-\theta)}{\cos(\omega.t-\theta)} = \tan(\omega.t-\theta) \tag{2.49}$$

ϕ açısının zamana bağlı birinci türevi; iki serbestlik dereceli sistemin açısal hızına ya da başka bir deyişle O^* noktası etrafındaki dönme hızına karşılık gelecektir [33].

$$\dot{\phi} = \omega \tag{2.50}$$

Salınımın genliğini oluşturan ve zamana bağlı değişen OO^* uzunluğu birim vektörlerle yazılabilir. Bu vektörün uzunluğu, aynı zamanda salınım hareketinin genliğini oluşturmaktadır [33].

$$OO^* = \boldsymbol{r} = x.\boldsymbol{i} + y.\boldsymbol{j} \tag{2.51}$$

(2.46) ve (2.47) eşitlikleri ile hesaplanabilecek $x(t)$ ve $y(t)$ değerlerindeki sabit katsayı X^* olarak ifade edilirse, hareketin genliği (2.53) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$X^* = \frac{\rho.\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2.\xi.\beta)^2}} \tag{2.52}$$

$$|r(t)| = \sqrt{x^2 + y^2} = X^*.\sqrt{\sin^2(\omega.t-\theta) + \cos^2(\omega.t-\theta)} = X^* \tag{2.53}$$

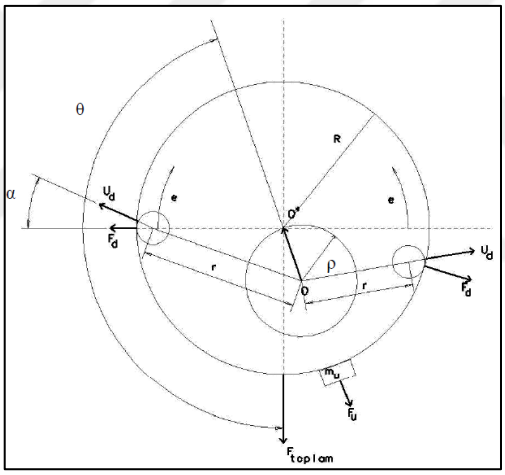
(2.53) eşitliği yorumlanacak olunursa; m kütleli, geometik merkez ve ağırlık merkezinin konumunun aynı olmadığı bir disk ve milden oluşan, tek ya da iki noktadan yataklanmış, iki serbestlik dereceli bir sistemin, mil ekseni etrafında ω açısal hızı ile dönmesi sonucu oluşan salınım ya da whirl hareketi,

- Mil - yatak sisteminin oluşturduğu sönüm ve direngenlik katsayılarının, x ve y eksenlerindeki katsayılarının aynı olması durumunda dairesel şekilde oluşurken,
- Mil - yatak sisteminin oluşturduğu sönüm ve direngenlik katsayılarının, x ve y eksenlerindeki katsayılarının farklı olması durumunda ise eliptik şekilde oluşur.

Üstten yüklemeli çamaşır makinesini ele aldığımızda ise; bu salınım hareketi, xy, yz ve xz düzleminde de görülecektir. Dengeleme halkasının bu düzlemlere izdüşümünün şekli, x, y ve z eksenlerindeki mil- yatak sisteminin direngenlik ve sönüm katsayılarına bağlı olarak değişecektir. Ayrıca sistemin açısal hızı da genliği değiştirecektir.

2.4.3.2 Bilyeli ve Sıvılı Dengeleme Halkaları Üzerine Etkiyen Kuvvetler

Tezin ana içeriğini oluşturan sıvılı dengeleme halkalarına etkiyen kuvvetleri açıklamadan önce, bilyeli dengeleme halkalarının üzerine etkiyen kuvvetlerin açıklanması durumun fiziğinin açıklanmasını kolaylaştıracaktır. En basit anlamda düşünüldüğünde, dengeleme halkası içerisinde sıvı ya da bilye olması dengeleme halkasının fiziksel davranışını değiştirmez. Dengeleme halkası, oluşan dengesizlik durumunda daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi bir davranış gösterir. Belirgin en önemli fark; sıvının viskozitesinden ötürü, dengeleme halkası içerisinde belli bir yayılma özelliği göstermesidir. Sıvının kanal içerisindeki bu yayılma özelliğinden ötürü, ilerleyen kısımlarda da anlatılacağı üzere, etkiyen kuvvetler diferansiyel olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzden; durumu basitleştirmek için öncelikle bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler açıklanmıştır.



Şekil 2.34 Bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler [33]

Şekil 2.34' te bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Dengesizlik oluşturan kütle m_u, bilyelerin her birinin kütlesi ise m_d ile tanımlanmıştır. m_d kütleleri, sadece kanal olarak isimlendirilen R yarıçaplı dairesel bir yörüngede hareket etmektedirler ve bu yörüngede sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Şekil 2.34' teki gösterimde; hareketin iki serbestlik derecesine sahip olduğu, bilyeler, m_u kütlesi ve kanaldan oluşan sistemin yatay ve dikey eksenlerdeki direngenlik ve sönüm katsayılarının aynı olduğu dolayısıyla, ρ yarıçaplı dairesel bir yörüngede whirl hareketi yaptığı kabul edilmiştir [33].

Dengesizliği oluşturan m_u kütlesine herhangi bir zamanda etkiyen merkezcil kuvvet (2.54) eşitliğinde yazılmıştır.

$$F_u = m_u.R.\omega^2 \tag{2.54}$$

Sistemin daha da basitleştirilmesi için; gösterimdekinin aksine tek bir bilye hesaba katılmış olup bilyenin üzerine etkiyen merkezcil kuvvet (2.55) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$F_d = m_d.R.\omega^2 \tag{2.55}$$

ω açısal hızından ötürü; dengesizliği oluşturan m_u kütlesine ve bilyeye herhangi bir anda etkiyen merkezcil kuvvetler yazıldığına göre; toplam sisteme etkiyen bileşke kuvvetin büyüklüğü (2.56) eşitliğindeki gibi yazılabilir. Hareketin fiziği gereği; dönme hareketi süresince; $\vec{F}_u$ ve $\vec{F}_d$ vektörel kuvvetleri arasında 0-180 derece arasında bir açı olacaktır.

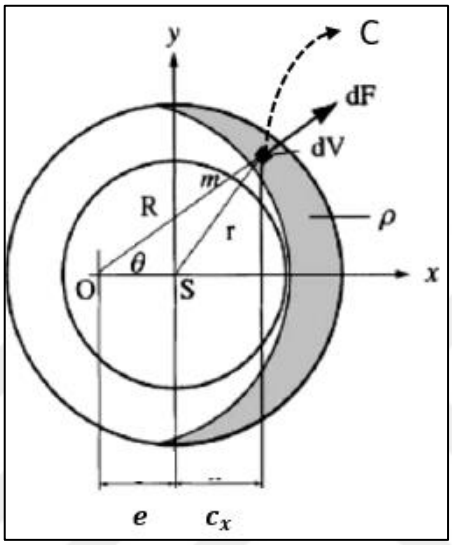
$$|\vec{F}_{toplam}| = \sqrt{|\vec{F}_u|^2 + |\vec{F}_d|^2} \tag{2.56}$$

Sistem geometrik merkezi olan O* noktası etrafında ω açısal hızla dönerken; dengesizlik sebebiyle O* noktası da 0 noktası etrafında ω açısal hızıyla dönecektir ve whirl hareketi gerçekleşecektir. Bilyeler üzerine merkezcil kuvvete ek olarak; whirl hareketinden kaynaklı U_d kuvveti de etki edecektir. U_d kuvvetinin büyüklüğü (2.57) eşitliği ile hesaplanabilir. F_d ve U_d kuvvetleri arasındaki açı; α olarak kabul edilirse; U_d kuvvetinin kosinüs bileşeni F_d kuvvetine paralel, U_d kuvvetinin sinüs bileşeni ise (2.58) eşitliğinde yazıldığı üzere F_d kuvvetine dik olur. (2.58) eşitliğinde yazılan bu kuvvet; bilyeleri e doğrultusunda hareket ettirerek, bilyelerin dengesiz yük karşısında konumlanmasına sebep olur. F_d ve U_d arasındaki açının yani α açısının sıfır olması durumunda ise, bilyeler hareket etmeyecektir. Dengesizlik durumundaki dönme merkezi O noktası ile denge durumu ya da geometrik merkez olan O* noktalarını birleştiren doğru ile F_{toplam} arasındaki açı olarak tanımlanan θ açısı yani faz açısı küçüldükçe α açısı da küçülmektedir [33].

$$U_d = m_d . r . \omega^2 \tag{2.57}$$

$$U_{d_y} = U_d . \sin \alpha \tag{2.58}$$

Bilyeli dengeleme halkalarına etkiyen kuvvetlere benzer şekilde, sıvılı dengeleme halkalarına etkiyen kuvvetler de açıklanabilir. Şekil 2.35 ‘ te sıvılı dengeleme halkalarına etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 2.35 Bilyeli dengeleme halkaları üzerine etkiyen kuvvetler [33]

Şekil 2.35 ‘ te; sistemin kütlesi m ile, sıvı yoğunluğu ρ ile, ağırlık merkezinin orijinal dönme ekseni ya da dönme merkezine uzaklığı r ile, eksen kaçıklığı e ile, açısal hız ω ile gösterilmiş olup salınım durumunda dönme merkezi ve ağırlık merkezininden geçen doğrunun x ekseni ile yaptığı açı θ ile tanımlanmıştır.

Bu şekil üzerinde oluşan kuvvetler diferansiyel boyutta ele alınmıştır. Buna göre; dV hacmindeki sıvı üzerine etki eden merkezcil kuvvet dF olarak tanımlanmıştır ve bu kuvvet (2.59) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$dF = \rho . R . \omega^2 . dV \tag{2.59}$$

Dengeleme halkası içerisinde bulunan sıvı yüzünden toplam etkiyen merkezcil kuvvet (2.60) eşitliği ile yazılabilir.

$$F = \int dF . \cos \theta = \rho . \omega^2 . e . \int dV + \rho . \omega^2 . \int x . dV \tag{2.60}$$

c noktasının sıvının ağırlık merkezi olduğu kabul edilirse, bu ağırlık merkezinin x ekseni yönündeki konumu c_x ile ifade edilmiştir ve (2.61) eşitliği yazılmıştır. Bu eşitlik ayrıca (2.62) eşitliği olarak da yazılabilir.

$$c_x = \frac{\int x.dV}{\int dV} \tag{2.61}$$

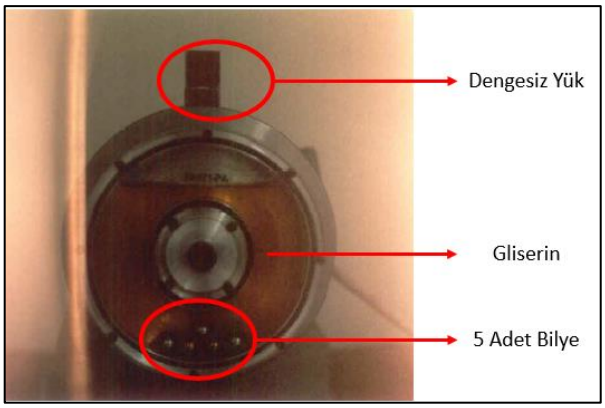
$$F = m.\omega^2.(e + c_x) \tag{2.62}$$

Sıvılı dengeleme halkalarında oluşan kuvvetler ile, bilyeli dengeleme halkalarında oluşan kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin açıklanmasında kullanılan eşitliklerin birbirleri ile benzer olduğu aşikardır. Sıvılı dengeleme halkalarında, bilyeli dengeleme halkalarındaki parametrelere ek olarak; sıvı viskozitesi ve sıvının dengeleme halkası içerisindeki doluluk oranı dengeleme kabiliyetine etki etmektedir [33].

Çamaşır makinesi dengeleme halkasının çalışma prensibini aktarabilmek adına; bölüm 2.4.2' de dengesizlik hakkında, bölüm 2.4.3' te ise sırasıyla tek serbestlik dereceli, iki serbestlik dereceli dengesizlik durumu içeren dönen sistemlerin hareket denklemleri aktarılmış, ayrıca bilyeli ve sıvılı dengeleme halkası tasarımlarına etki eden kuvvetler açıklanmıştır. Bu bilgiler ışığında da çamaşır makinesi dengeleme halkasının teorik çalışma prensibi açıklanmıştır. Ancak kısa bir not olarak yeniden değinilecek ve özetlenecek olunursa;

- Tek serbestlik dereceli düşey doğrultuda hareket edebilen ve bu hareket sırasında dönen bir disk içeren bir sistem, $(m_u.r.\omega^2)$ genliğindeki bir harmonik kuvvet ile tahrik edildiğinde, yer değiştirme miktarı (2.37) eşitliğindeki kadar olacak ve tahrik kuvveti formunu θ açısı kadar gerisinde takip edecektir.
- Dengesizlik içeren bir sistemin iki serbestlik dereceli hareketi ele alındığında, benzer hareket denklemleri yine elde edilmiştir.
- Bu hareket denklemlerine göre; dengeleme halkalarının dengelemeleri kabiliyeti, dönme hızı monte edildiği makinenin ilk doğal frekansının üstünde olduğu durumlarda oluşmaktadır [33].

- Dengeleme halkalarının dengeleme kapasiteleri; içindeki ağırlık miktarları, dönme yarıçapı, içlerindeki sıvının yoğunlukları, sıvının viskoziteleri ile doğru orantılıdır [33].
- Dengeleme halkalarının içerisindeki dengeleme için kullanılan bilye, sıvı gibi komponentlerin dengeleme halkasıyla birlikte aynı hızda döndüğü düşünüldüğünde; dengesizlik oluşturan toplam kuvvetler ile titreşim vektörü arasında θ açısı kadar faz farkı oluşacaktır. θ açısı 180^0 olduğu yani titreşim vektörü ile dengesizlik oluşturan kuvvet vektörlerinin ters konumlandığı durumlarda ise, dengeleme için kullanılan komponentler (bilye ya da sıvılar) dengesizliği oluşturan ağırlığın yani sistemin titreşim vektörünün tam karşısında toplanacaklardır. Dengeleme için konulan kütleler ve bu kütlelerin hareket ettiği yarıçapların çarpımı, dengesizliği oluşturan kütle ve bu kütlenin hareket yarıçapının çarpımına eşit ise tam olarak dengeleme sağlanabilir. Böylece dengesizlik ortadan kalkmış ve dolayısıyla titreşim de zamanla azalmış olacaktır. Dengeleme için konulan kütleler ve bu kütlelerin hareket ettiği yarıçapların çarpımına "dengeleme kapasitesi", dengesizliği oluşturan kütle ve bu kütlenin hareket yarıçapının çarpımına ise "toplam dengesizlik" ismi verilebilir [33].
- θ açısının tam olarak 180^0 olmadığı ama bu değere yaklaşıldığı dönme hızlarında ya da dengeleme kapasitesinin toplam dengesizlikten daha düşük olduğu durumlarda tam olarak dengeleme sağlanamamasına rağmen, bu durumda da tireşim azalacaktır.
- θ açısının tam olarak 180^0 olduğu ya da 180^0 dereceye yaklaştığı açısal hızlar için; dengeleme kapasitesinin, toplam dengesizlikten büyük olduğu durumlarda ise, ekstra bir dengesizlik durumu ortaya çıkabilir. Bu yüzden; dengeleme halkalarında, dengeleme için kullanılan parçaların çoklu parçalara bölünmesi ya da sıvı kullanımı bu durumun önüne geçecektir.



Şekil 2.36 İçerisinde bilye ve makine yağı bulunan dengeleme halkasının deneysel ortamdaki görüşü (ω=0 rad/s) [33]

Dengesizlik durumunda; dengeleme halkasının çalışma prensibini daha iyi aktarabilmek amacıyla; şekil 2.36' da yatay olarak konumlandırılmış bir mil üzerine bağlanan ve motor tarafından tahrik edilerek döndürülen, içerisinde sıvı olarak makine yağı ve beş adet çelik bilye bulunan bir dengeleme halkasının farklı dönme hızlarındaki davranışını göstermek için oluşturulan bir deney düzeneği gösterilmiştir. Bu şekil aynı zamanda önden yüklemeli bir çamaşır makinesinin dengeleme halkasının, deneysel ortamdaki temsili olarak da düşünülebilir. Daha önceki konu başlıklarında da belirtildiği üzere, dengeleme halkası içerisinde sadece sıvı ya da sadece bilye kullanılabileceği gibi bu uygulamada her ikisinin aynı anda kullanıldığı bir senaryo oluşturulmuştur.



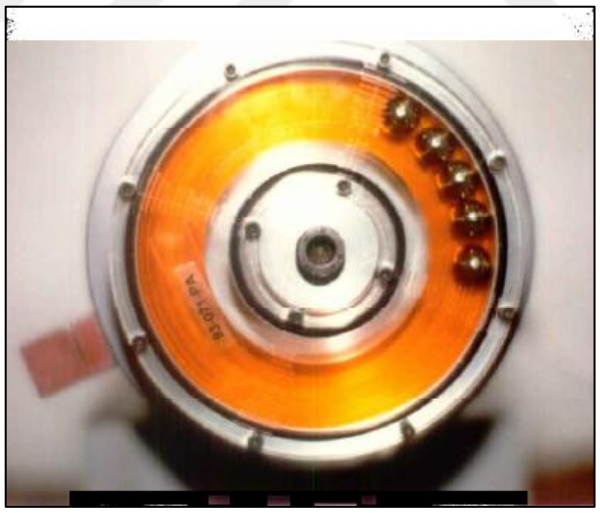
Şekil 2.37 Bilyelerin, $\boldsymbol{\omega \geq \omega_n}$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33]

Şekil 2.37' de sistemin dönme hızı, kritik hızın hemen üstündeyken yani sistemin ilk doğal frekansına karşılık gelen açılsa hızın hemen üstündeyken bilyelerin konumu gösterilmiştir.



Şekil 2.38 Bilyelerin, $\boldsymbol{\omega} > \boldsymbol{\omega_n}$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33]

Şekil 2.38 ve Şekil 2.39' da ise sistemin dönme hızının, kritik hızın daha da çok üstüne çıktığı durumlarda bilyelerin konumlanması gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere; kritik hızın üstündeki açısal hız değerlerinde, kritik hızdan uzaklaşıldıkça bilyeler dengesiz yük karşısında daha da çok toplanma eğilimi göstermektedirler. Böylece dengesizlik ortadan kalkmakta ve sistemin titreşimi azalmaktadır.



Şekil 2.39 Bilyelerin, $\boldsymbol{\omega} \gg \boldsymbol{\omega_n}$ dönme hızlarında dengeleme halkası içerisinde konumlanma şekli [33]

3
MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkasında oluşan çalkalanma hareketinin, interpolasyonlu tanecik metodu ile modellenme metodolojisinin geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar yer almaktadır.

3.1 SPH Metoduna Ön Hazırlık Amacıyla Yapılan Çalışmalar

Dengeleme halkasında oluşan çalkalanma hareketinin modelleme yöntemine geçmeden önce, interpolasyonlu tanecik yönteminin Hyperworks Altair™ paket programında uygulanabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır. Hyperworks Altair™ paket programı explicit çözücüsü olan Radioss, interpolasyonlu tanecik yöntemini ya da literatürdeki adı ile smoothed particle hydrodynamics – SPH yöntemini desteklemektedir.

Gerçekleştirilen analizlerde geometri hazırlama ve tasarım işlemleri Siemens NX 11 ticari CAD tasarım programında yapılmıştır. Oluşturulan modellerde ağ yapısı (mesh) oluşturma, sınır şartlarının belirlenmesi aşamalarını yani analizlerin pre-processing aşamaları Hyperworks Altair™ paket programının Hypermesh pre-processing modülünde hazırlanmıştır. Sonuçların incelenmesi yani post-processing aşaması ise yine aynı paket programın Hyperview modülünde gerçekleştirilmiştir.

İnterpolasyonlu tanecik yönteminin kaba tabirle, sıvının katı taneciklerle modellendiği bir metot olduğu göz önüne alınırsa, bu yöntemle bir nevi sıvının akış hareketi de modelleniyor şeklinde bir sonuca varılabilir. Yapılan araştırmalarda, interpolasyonlu tanecik yöntemini için başka ticari programların 2D akışları desteklediği görülmüşken, Radioss çözücüsü sadece 3D akışlara olanak tanımaktadır. Radioss kullanım kılavuzlarında SPH tanecikleri 0D eleman olarak belirtilmiştir. Hypermesh programında bu tanecikleri oluşturma arayüzü 1D başlığı altında bulunabilir.

Öncelikle Hypermesh programında SPH parametrelerinin kavranması için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlerleyen aşamalarda ise, öncelikle SPH ile CFD metotlarını kullanıldığında sıvı hareketini basitçe, görsel olarak karşılaştıracak bir çalışmaya yer verilmiştir. İlerleyen aşamalarda, geliştirilecek metodun Arçelik A.Ş Ar-Ge Merkezlerinde başka projelerde uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla kanal içeri akışlarda kullanılan çalışmalara yer verilmiştir. En son aşamada ise, dengeleme halkasında oluşan çalkalanma hareketinin modellenmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 SPH Metodu İle CFD Metodunun Karşılaştırılması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve interpolasyonlu tanecik (SPH) yöntemini genel anlamda karşılaştırılacak olursa;

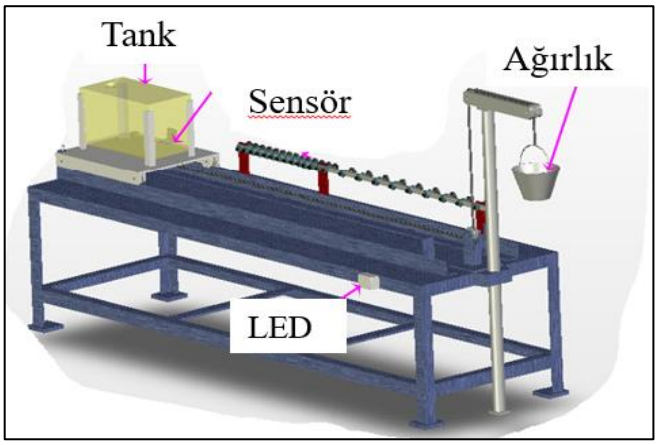
- İnterpolasyonlu tanecik yöntemi Lagrange yaklaşımını, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ise Euler yaklaşımını temel alır. Euler yaklaşımları sonlu hacimler yöntemlerinde kullanılırken, Lagrange yaklaşımı sonlu elemanlar yönteminde kullanılmaktadır.
- SPH yöntemi ağsız bir yöntem iken, CFD yöntemi mesh, ağ yapısı gerektiren bir yöntemdir.
- SPH metodunda kütle akısının hesaplanmasına gerek yoktur. Her parçacığın kütlesi vardır. Mükemmel bir kütle korunumu söz konusudur.
- Katı-sıvı etkileşimleri ve büyük deformasyonların olduğu durumlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılacaksa, co-simulation (eş zamanlı simülasyon) yapılması tercih edilir. Bu da ayrıca bir zaman ve maliyet kaybıdır.
- Sıçrama, çalkalanma gibi problemlerde interpolasyonlu tanecik yöntemi daha iyi sonuç verir.
- SPH tanecikleri dağılmaya çok müsaittir. Bu yönteme uygun olmayan problemlerde iyi sonuçlar vermez. Yüksek doğruluk istenen çözümlerde sınır koşulları ile uğraşmak zordur. Süreksizlikler gözlenebilir. Bu problemleri interpolasyonlu tanecik yönteminde çözmek daha zordur.

Özetle; büyük ölçekli değişiklikler, deformasyonlar gerçekleşiyorsa, çok karmaşık sınır koşulları varsa, model sabit parçalardan oluşuyorsa sonlu hacimler yöntemlerini kullanmak daha uygunken, karmaşık ve hareketli bir geometriye sahip olunması durumunda interpolasyonlu tanecik yöntemi kullanımı daha avantajlıdır.

İnterpolasyonlu tanecik denkleminin hesaplamalı akışkanlar dinamiğine göre üstünlükleri ise;

- Kütlenin, momentumun, açısal momentumun, enerjinin ve entropinin eşzamanlı korunması,
- İçsel dağılmanın sıfır olması (Örneğin viskozite ile dağılma yapay olarak eklenir.)
- Süreklilik denklemi ile zamandan bağımsız çözüm,
- Parçacıkların enerjisinin minimum olması,
- Gausmann dağılım formülleri çekirdek olarak uygulandığında teorik sonuçların kolayca yorumlanmasıdır.

Bir kap içerisindeki sıvının çalkalanma hareketini gözlemlemek amacıyla; literatürde yer alan "Water sloshing in regtangular tanks: An experimental insvestigation and numerical simulation" başlıklı bildiri referans alınmıştır ve akışkanlar dinamiğinde lagrange yaklaşımını temel alan ve ağ yapısına sahip olmayan interpolasyonlu tanecik yöntemi ile doğrulanmıştır [34].



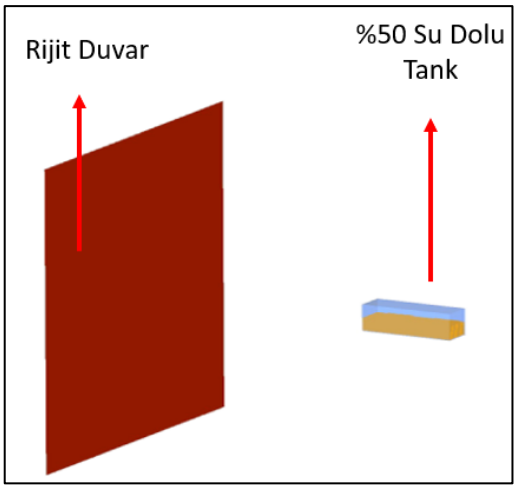
Şekil 3.1 Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada kullanılan deney düzeneğinin temsili resmi [34]

Khezzar ve arkadaşları, hacmi 560 mm x 160 mm x185 mm olan dikdörtgenler prizması şeklindeki bir kabı düşey yönde hareket eden bir ağırlık yardımıyla yatay düzlemde hareket ettirip, bir durdurucu ya da stoper' e çarptırmışlardır. Şekil 3.1' de referans alınan bildiride kullanılan deney düzeneğinin temsili resmi görülmektedir. Suyun kap içerisindeki hareketini deneysel ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği metotları ile gözlemlemişlerdir. Bildiride; 4,5 kg ağırlık ve %50 doluluk seviyesinde su kullanılarak gerçekleştirilen senaryonun detayları yer almaktadır. Ek olarak dikdörtgen şeklindeki tankın zamana bağlı hareket denklemini de çıkarılmıştır. Bildiride tankın ve suyun malzeme özelikleri ile ilgili detay bilgilere yer verilmemiştir. Tablo 3.1' de Khezzar ve arkadaşlarının deneysel elde ettiği verilere ulaşılabilir [34].

Tablo 3.1 Khezzar ve arkadaşlarının deneysel elde ettiği veriler [34]

Su Seviyesi (%)	50
Kullanılan Ağırlık (kg)	4,5
Deplasman (m)	$X(t) = 0{,}407t^{1{,}89}$
Hız (m/s)	$X(t) = 0{,}768t^{0{,}89}$
Hareket Süresi (s)	1,98
Çarpma Noktasına Varış Hızı (m/s)	1,41

Tablo 3.1' deki gösterilen veriler kullanılarak; "Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Tek Bir Eksendeki Titreşim Hareketinin İnterpolasyonlu Tanecik Yöntemi ile Modellenmesi" isimli bildiri yayınlanmış ve literatüre katkıda bulunulmuştur. Bu çalışmanın ilk bölümünde belirtilen bildirinin doğrulama çalışması yapılmış, ikinci bölümünde ise dengeleme halkası basitleştirilerek tek eksende sinüzoidal hareket ettirilmiştir [35].



Şekil 3.2 Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada kullanılan deney düzeneğinin analiz ortamındaki ilk dijital ikizi [35]

Şekil 3.1' de gösterilen temsili deney düzeneği, Şekil 3.2' de gösterildiği üzere analiz ortamında modellenmiştir ve zamana bağlı çözümler Radioss çözücüsünde yapılmıştır. Rijit duvarın, tanktan uzaklığı Tablo 3.1' deki hareket mesafesi denklemine göre belirlenmiştir. Tankın malzemesi ve çeper kalınlığı hakkında detay bilgi çalışmada yer almamaktadır. Bu yüzden Tablo 3.2' de gösterilen plastik malzeme özellikleri ve M1_ELAST malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli malzemenin gerilme – şekil değiştirme eğirişinin sadece elastik kısmını modellemektedir. Yani şekil değiştirme ile gerilmelerin lineer artacağı söylenebilir. Ayrıca çarpma anında da yüksek gerilmeler oluşacaktır. Tankın çeperleri P1_SHELL özelliği ile 2D kabuk eleman olarak modellenmiştir. Oldukça basit bir geometri olduğundan QAUD4 eleman tipi kullanılmıştır. Zaman adımlarının çok küçülmemesi adına, büyük mesh boyutları ve düşük elastisite modüllü bir malzeme kullanılmıştır. Amacımız tankın üzerinde oluşan gerilmelerden ya da tankın hasarından ziyade, sıvının hareketi olduğundan bu aşamada malzemeye seçimine ve ağ boyutlarına önem verilmemiştir. Sıvı ise, oluşturulan bu kabuk elemanlara göre z ekseninde yüzde 50 doluluk sağlanacak şekilde basit kübik yapısı ile farklı tanecik sayılarına göre modellenmiştir. Tablo 3.3 ' te kullanılan suyun özelliklerine ulaşılabilir. Şekil 3.2' de oluşturulan modelde, tankın alt yüzeyinde bulunan düğüm noktalarına (node' lara) y,z eksenlerinde ötelenme ve x,y,z eksenleri etrafında ise dönmeye karşı hareket sınır şartı verilmiştir. Tankın düğüm noktalarına (node' lara) ise x ekseninde ilk hız

verilerek tankın duvara çarpması sağlanmıştır. Ayrıca hem sıvının hem de tankın tüm düğüm noktalarına -z ekseninde yerçekimi kuvveti uygulanmıştır [35].

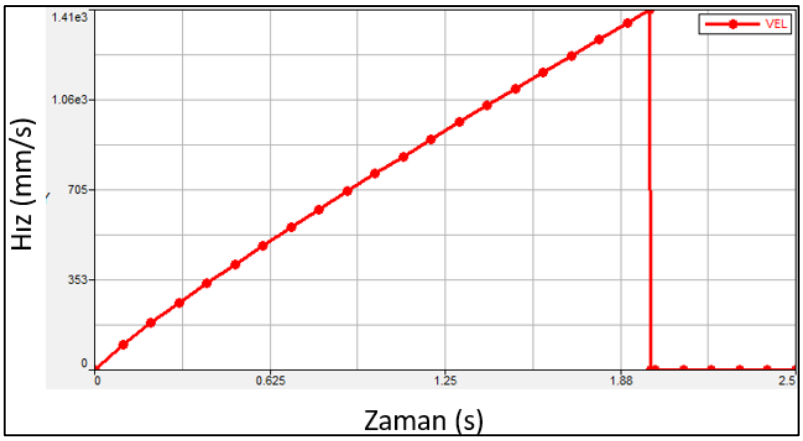
Tablo 3.2 Analizde kullanılan tankın malzeme özellikleri [35]

Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	1,19
Elastisite Modülü, E (MPa)	3210
Poisson Oranı, υ	0,38
Kalınlık (mm)	2

Tablo 3.3 Analizde kullanılan suyun malzeme özellikleri [35]

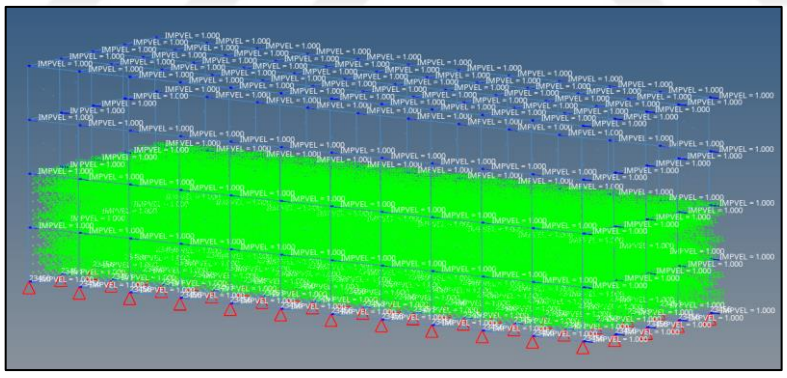
Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	1
Kinematik Viskozite, ϑ, (mm^2/s)	1,1

Ancak bu durum, tankın zamana göre hareketini tam olarak simule etmemektedir. Çünkü deney düzeneğinde sürtünme kuvvetleri de yer almaktadır ve zamana göre tankın ivmesi değişmektedir. Ayrıca çarpma anında çok yüksek enerji hataları oluşmaktadır. Bölüm 4.1' de enerji hataları ile ilgili detaylı bilgi verilecektir. Bu yüzden rijit duvar kaldırılıp Tablo 3.1' de gösterilen hız denklemine göre Şekil 3.3' te gösterilen zamana bağlı hız grafiği oluşturulmuştur.



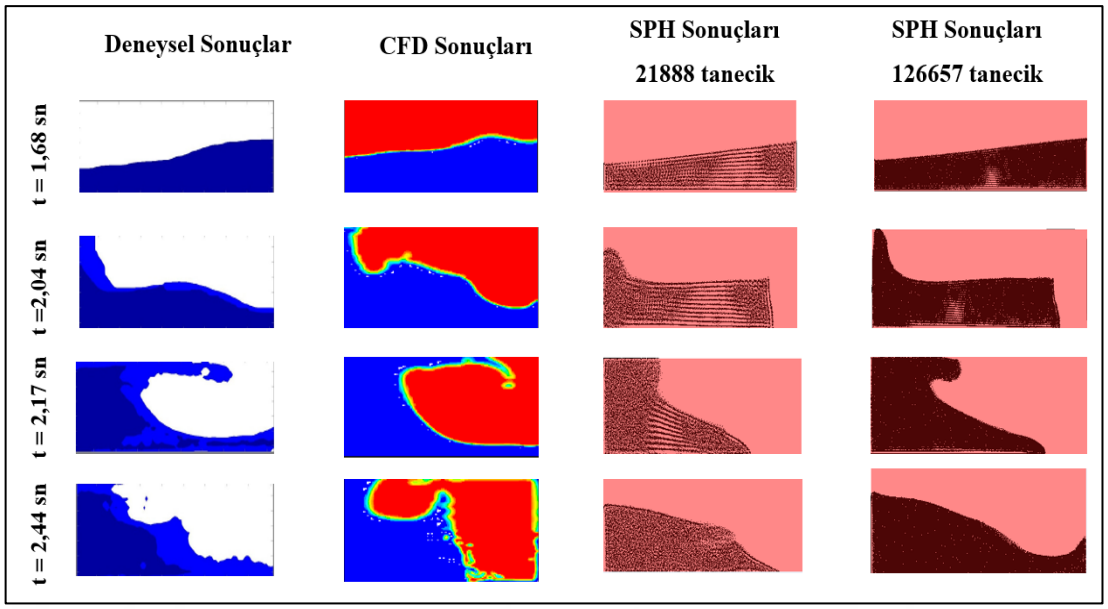
Şekil 3.3 Tankın zamana bağlı hız grafiği [35]

Şekil 3.3' te gösterilen hız grafiği tankın tüm düğüm noktalarına x ekseninde uygulanmıştır. Ayrıca tankın alt yüzeyinde bulunan düğüm noktalarına (node' lara) y,z eksenlerinde ötelenme ve x,y,z eksenleri etrafında ise dönmeye karşı hareket sınır şartı verilmiştir. Sıvı ve katıyı oluşturan tüm node' lara ise yine -z ekseninde yerçekimi kuvveti uygulanmıştır. Bu modele Şekil 3.4' te gösterilmiştir [35].



Şekil 3.4 Tankın mesh yapısı ve sınır koşulları [35]

Oluşturulan hız grafiğine göre gerçekleştirilen analizlerde belirli zamanlarda alınan görüntüler, Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada yine aynı zamanlarda elde edilen deneysel ve CFD' den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır [35].

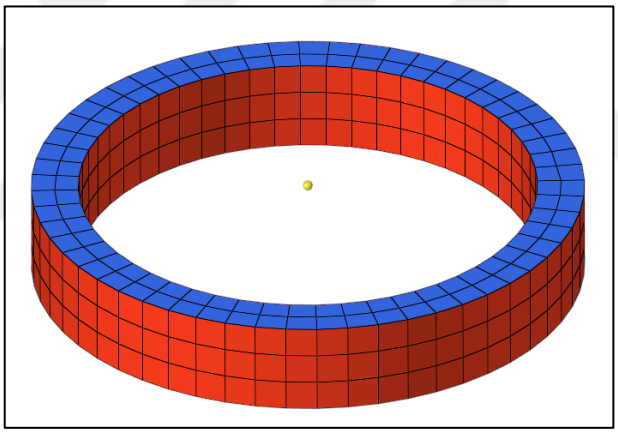


Şekil 3.5 SPH metodu ile elde edilen görüntülerin Khezzar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmadan elde edilen sonuçlarla kıyaslanması [35]

Şekil 3.5' te SPH yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerin CFD' den ve deneysel sonuçlardan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanması gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirilecek olursa; çarpışmanın 1,98.s' den önce dikkate alınırsa, çarpışmadan önceki sıvı hareketleri her üç metotta da birbirine benzerdir. Özellikle çarpışmadan sonraki hareket farklılaşmıştır. Sıvının formundaki küçük farklılıkların sıvının viskozitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca tankın çarpışma anındaki deformasyonu da sıvının formunu değiştirebilecek bir unsurdur. SPH metodunun kullanıldığı senaryolar kendi içerisinde değerlendirilecek olursa; tanecik sayısı artıkça suyun formunun deneyselde ve CFD analiz sonuçlarında gözlenen forma yaklaştığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde mesh ya da eleman sayısı arttıkça sonuçların daha doğru bir değere yakınsadığı durumunda olduğu gibi; SPH metodunda da tanecik sayısı arttıkça doğruluk ve hassasiyetin arttığı söylenebilir. Tabi ki bu durumunun, çözüm süresinin uzaması gibi bir dezavantajı da vardır [35].

"Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Tek Bir Eksendeki Titreşim Hareketinin İnterpolasyonlu Tanecik Yöntemi ile Modellenmesi" isimli bildirinin ikinci bölümünde ise, dengeleme halkasının basitleştirilmiş formuna benzer halka şeklinde bir yapı oluşturulmuştur. Bu yapının tek eksende hareket etmesini sağlayacak sınır koşulları verilmiştir. Bu silindirik yapının dış çapı 447,6 mm, iç

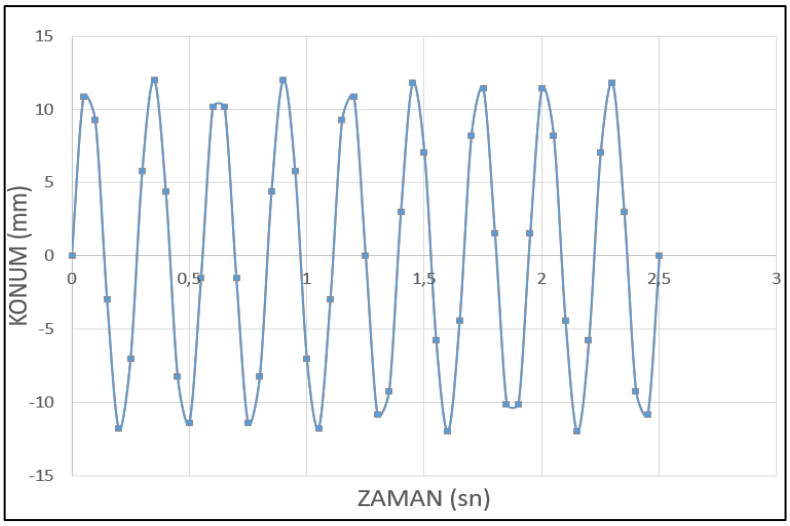
çapı ise 371 mm' dir. Bu yapı yine P1_SHELL özelliği ile 2D kabuk elemanlar ile modellenmiştir. Şekil 3.6' da gösterilen geometride parçanın kırmızı kısmı 3mm, mavi kısmı ise 2,5 mm olarak modellenmiştir. Halka şeklindeki yapının ve sıvının malzeme özellikleri olarak Tablo 3.2 ve Tablo 3.3' teki veriler kullanılmıştır. Mavi ile gösterilen yüzey xy düzlemine konumlandırılmıştır. Sınır şartları olarak mavi yüzeydeki düğüm noktalarının her birine y,z eksenlerinde ötelenme ve x,y,z eksenleri etrafında ise dönmeye karşı hareket sınır şartı verilmiştir. Z ekseninde %25 doluluk sağlayacak şekilde 5 mm basit kübik yapısı ile 6839 SPH taneciği oluşturulmuştur. Hem oluşturulan SPH taneciklerine hem de halka yapısındaki tüm düğüm noktalarına (-z) ekseninde yerçekimi kuvveti uygulanmıştır. Halka yapısını oluşturan elemanların düğüm noktalarına toplam 2,5 sn süre ile x ekseninde titreşim hareketini sağlayacak şekilde zamana bağlı konum değişimi tanımlanmıştır [35].



Şekil 3.6 Tek eksende titreşim hareketinin modellendiği silindirik halka yapısı

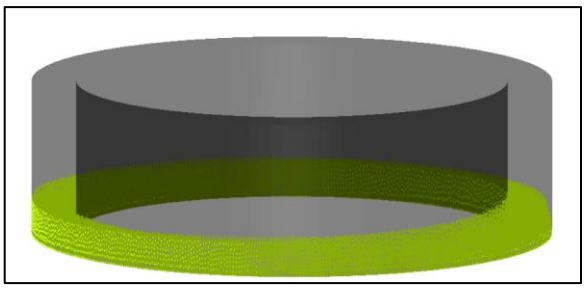
Şekil 3.7' de gösterilen konum değişimi (3.1) eşitliğinde gösterilen formüle göre hesaplanıp grafiği çizdirilmiştir. Bu grafik daha sonra belirtildiği üzere, halka yapısının düğüm noktalarına zamana bağlı konum değişimi olarak tanımlanmıştır.

$$X = A\sin(\omega t) \tag{3.1}$$



Şekil 3.7 Halka yapısının x eksenindeki zamana göre konum değişimi [35]

Şekil 3.7' de görülebileceği üzere, hareketin periyot sayısı 9' dur. Periyottan devir sayısına geçilecek olursa; devrin 216 rpm'e denk geldiği görülecektir. Bu değer, üstten yüklemeli bir çamaşır makinesinin çalışma aralığında bir değerdir. Hatta sıkma devirlerinin altında bir değerdir. Literatürdeki ve patentlerdeki dengeleme halkası ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, düşük devirlerde ekstra dengesizlik probleminin gözlenebileceği bilgisi yer almaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada 216 rpm' de titreşim hareketi yapacak şekilde bir hareket modellenmiştir. (3.1) eşitliğinde A değeri, yani sinüs fonksiyonunun genliği olarak 12 mm, açısal hız olarak ise 22,62 rad/s kabul edilmiştir. Bu değerler; 216 devir için 2,5 sn' de 9 periyot sayısının belirlenmesi için önemlidir. Dengeleme halkası, reelde tek eksende 12 mm titreşim genliğinde çalıştığı söylenemez. Ancak sıvı hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi açısından bu değer abartılarak kullanılmıştır [35].



Şekil 3.8 Halka yapısının x eksenindeki titreşim hareketi sonucunda, sıvının 2. sn deki dağılımı [35]

Şekil 3.8' de elde edilen sıvı dağılımı yorumlanacak olursa, sıvının pozitif ya da negatif yöndeki eksen hareketinin tam tersi yönünde toplandığı gözlenmiştir. Ayrıca açısal hız ve periyot sayısı arttıkça sıvının çeperlerde toplanma miktarı artmaktadır [35].

Gerçekleştirilen bu çalışmalarla öncelikle hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile interpolasyonlu tanecik metodu kullanıldığı senaryolarda sıvının form dağılımları karşılaştırılmıştır. İlerleyen aşamalarda ise dengeleme halkasının oldukça basitleştirilmiş geometrisi kullanarak titreşim hareketi tek eksene indirgenmiştir. Bu eksendeki hareket sonucunda sıvının formu gözlenmiştir. SPH tanecikleri ile sıvı kaplarının arasındaki kontaklar belirlenmiştir ve parametreler optimize edilmiştir. Kontak parametreleri ile ilgili bilgi, Bölüm 3.2' de açıklanacaktır.

3.1.2 Kanal İçerisinde Akışın SPH Metodu ile Modellenmesi

Bu bölümde, interpolasyonlu tanecik metodunun başka sınır şartlarına sahip problemlere uygulanabilirliğinin araştırılması adına çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında; bir kap içerisinde bulunan sıvının çalkalanma hareketine odaklanılsa da, sıvı hareketinden ziyade temas ettiği katının hareketinin gözlenmek istendiği durumlarda interpolasyonlu tanecik yönteminin kullanıldığı örnekler de literatürde bulunmaktadır. Ayrıca programın yetkinliği de sorgulandığında bu konuda detaylı komutlar bulunmaktadır. Bu anlamda interpolasyonlu tanecik yönteminin başka problemlere uygulanabilirliğini araştırmak adına, bir kanal içerisinde bulunan valf benzeri yapıya akışkanın çarpması modellenmiştir.

120 mm x 200 mm x 1000 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde bir kanal oluşturulmuştur. Bu kanalın uzunluğu oluşturulan senaryoda önemsizdir. Çünkü bu aşamada sadece kanal içerisinde homojen bir akış profili oluşması amaçlanmıştır. Kanal içi akışta 1 gr/cm^3 yoğunluğuna sahip su kullanılmıştır ve bu su yoğunluğunun zamana bağlı değişmediği kabul edilmiştir. Analiz süresinin kısa olması ve elde edilen sonuçların hemen gözlenebilmesi amacıyla akışkan ilk giriş hızı 15000 mm/s verilmiştir. Burada dikkat edilecek husus, girişteki akışkan parametresinin basınç olarak değil, hız olarak veriliyor olmasıdır. Dolayısıyla farklı senaryolara uygulanırken, hız - basınç ilişkisinin kurulması gerekmektedir.

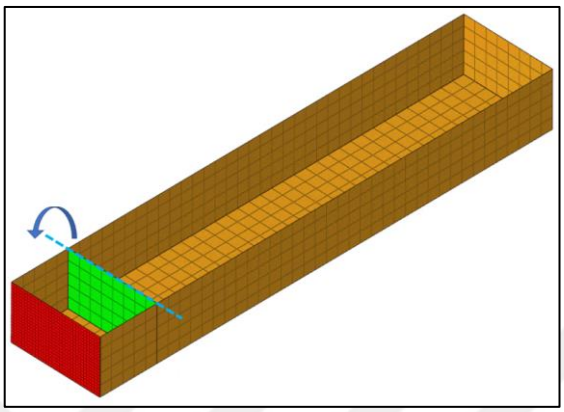
Tablo 3.4 Kanal içirişinde akışın modellendiği senaryoda kanal malzeme özellikleri

	Kanal Çeperleri	**Kanal Girişi**
Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	7,8	7,5
Elastisite Modülü, E (MPa)	210000	200000
Poisson Oranı, υ	0,25	0,3
Kalınlık (mm)	10	0,5

Tablo 3.4' te kanal çeperlerinde ve kanal girişinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir. Kanal çeperlerinin kalınlığı 10 mm olarak belirlenmiş, P1_SHELL kabuk elemanı ve QEPH 24 kabuk formülüzasyonu kullanılmıştır. Giriş yüzeyi kalınlığı ise 0,5 mm olarak belirlenmiş P1_SHELL kabuk elemanı ve QBAT 12 kabuk formülüzasyonu kullanılmıştır. Kanal çeperlerinde M1_ELAST malzeme modeli kullanılırken giriş yüzeyinde M2_PLAS_JOHNS_ZERIL malzeme modeli kullanılmış ve malzeme akması 265 MPA olarak kabul edilmiştir. Analizlerde hareket sınırı olarak, kanalı zeminindeki düğüm noktalarına, giriş yüzeyinin ise tüm düğüm noktalarına 6 eksende hareket sınırı verilmiştir. Ayrıca SPH taneciklerinin giriş yüzeyinde üretilebilmesi için bir yüzey tanımı yapılmıştır. Yapılan öncül analizler incelendiğinde, SPH taneciklerinin yüzeyi oluşturan elemanların orta noktalarından üretildiği gözlenmiştir. Buradan, giriş yüzeyi eleman boyutunun SPH taneciklerinin sıklığının belirlenmesinde bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır.

Analizlerin çok uzun sürmemesi, yani zaman adımlarının büyük olması amaçlandığından ve çeperlerdeki gerilmeler incelenmediğinden, zaman adımlarını büyültecek şekilde mümkün oldukça malzemelerin elastisite modülleri düşük seçilmiş, eleman boyutları büyük ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu anlamda kanal ağ yapısı oluşturulurken 25 mm ile, giriş yüzeyi ağ yapısı oluşturulurken ise 6 mm, 12 mm ve 25 mm ile üç farklı versiyonda mesh atılmıştır. Valf kısmı ise,

Şekil 3.9 ‘ da görülebileceği üzere, mavi ile gösterilen eksen üzerindeki düğüm noktalarına altı eksende hareket sınırı verilerek konumlandırılmıştır. Bu sayede valf akış gerçekleştiğinde mavi eksen etrafında hareket edebilmektedir. Valfin kalınlığı 0,5 mm’ dir. Malzemesi ve malzeme modeli ise, kanalın çeperleri ile aynıdır.



Şekil 3.9 Akışın gerçekleştiği kanalın ağ yapısı

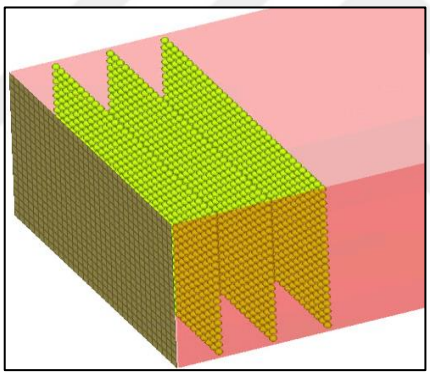
Oluşturulacak olan SPH tanecikleri ile kanalın çeperleri ve valf arasında TYPE 7 tipi bir kontak oluşturulmuştur. Bu kontak, tanecikler ile 2D elemanların birbirine kayar şekilde temas etmesine olanak sağlamaktadır. Bu kontağın detay parametreleri bölüm 3.2 ‘de detaylı anlatılacaktır. Ayrıca tanecikler ve 2D elemanlar arasında “node to surface” kontak tanımı yapılmıştır.

Öncelikle kanalın tamamen dolu olduğu kabul edilmiş ve basit kübik yapılı SPH tanecik oluşturma metoduna göre h = 10 mm ile tanecikler oluşturulmuştur. Bu parametreye göre taneciklerin ağırlığı program tarafından 1.1854429462085 gr olarak belirlenmiştir. Bu tanecik parametrelerine göre, akış giriş özelliği tanımlandığında taneciklerin kanal boyu yönündeki eksende birbirinden ayrık olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple, aynı tanecik ağırlığı korunarak, h = 0,1 mm olacak şekilde başka tanecik özelliği belirtilmiştir. Bu durumda, akış kanalı boyundaki eksende taneciklerin sıklaştığı görülmüştür. Akış kanalına boyuna denk gelen eksene dik olacak seçilen bir yüzeydeki taneciklerin birbirine olan sıklığını, giriş yüzeyindeki elemanların yoğunluğu belirlemektedir.

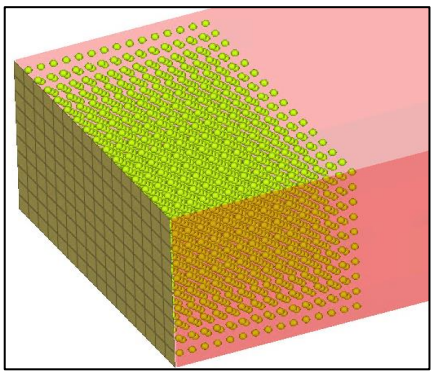
Özetlenecek olursa; bir kanal içi akışta, belli bir akış giriş yüzeyi oluşturulup kanal içerisinde akış gerçekleştiriliyorsa; akış kanalına dik bir kesitteki taneciklerin birbirine olan uzaklıklarını azaltmak için giriş yüzeyindeki ağ yapısının daha da

sıklaştırılması gerekmektedir. Akış boyunca taneciklerin birbirine olan uzaklığını azaltmak için ise, h parametresi kullanılabilir. Burada ideal olan akış kanalı boyunca oluşan eksende ve akış kanalına dik düzlemi oluşturan eksenlerde tanecikler arasındaki uzaklığın birbirine yakın ya da aynı olmasıdır. Gerçekleştirilen analizlerde, tek bir taneciğin ağırlığı, zaman adımına direk etki etmekte olup kanalın tamamen dolu olduğu durumda basit kübik yapısı h = 10 mm için elde edilen tanecik ağırlığı referans alınmıştır [32].

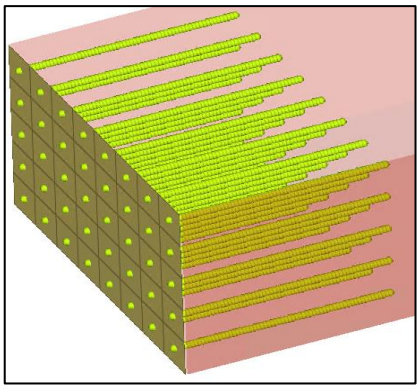
Belirtildiği üzere, giriş yüzeyinde 6 mm, 12 mm ve 25 mm boyutlarında üç farklı versiyonda ağ yapısı oluşturularak giriş yüzeyindeki ağ yapısının, akış kanalı boyunca ve akış kanalına dik olan düzlemi oluşturan eksenlerde oluşan taneciklerin birbirlerine olan uzaklıkları incelenmiştir. Şekil 3. 10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de sırasıyla giriş yüzeyinde 6 mm, 12 mm ve 25 mm eleman boyutlarına sahip modellerde oluşan tanecikler görülmektedir.



Şekil 3.10 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 6 mm olduğu senaryoda gözlenen akış



Şekil 3.11 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 12 mm olduğu senaryoda gözlenen akış

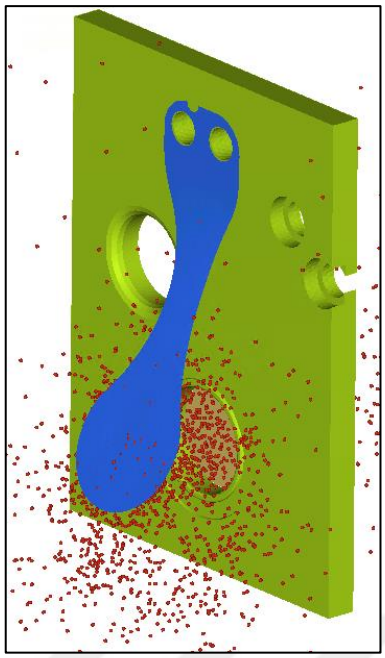


Şekil 3.12 Akış giriş yüzeyinindeki eleman boyutunun 25 mm olduğu senaryoda gözlenen akış

Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de gösterilen durumlar değerlendirilecek olursa, giriş yüzeyindeki eleman sayısı arttıkça, akışın herhangi bir zamanındaki oluşan tanecik sayısı artacağından kütlesel debinin korunabilmesi için akış ekseni boyunca oluşan tanecik aralığının program algoritması tarafından otomatik arttırıldığını göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu tür problemlerde ideal durum, tek bir taneciğin her üç eksendeki taneciklerden eşit ya da yakın uzaklıkta olduğu senaryonun oluşturulmasıdır.

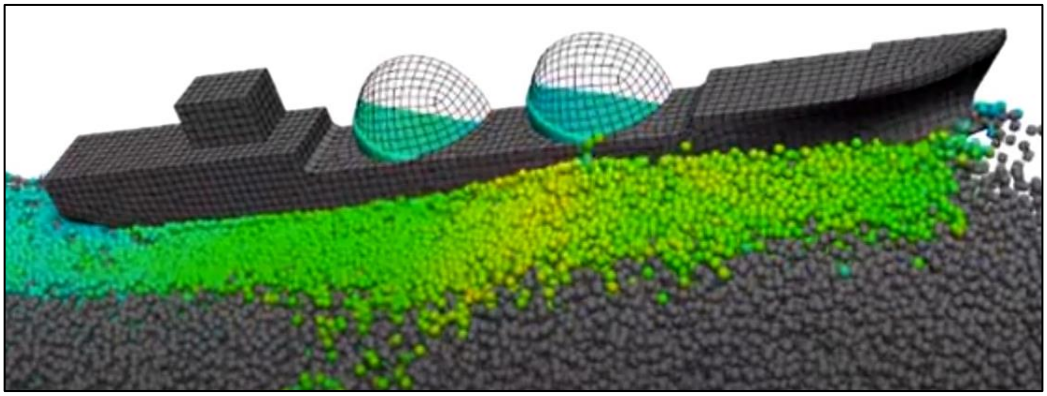
Anlatılan senaryolarda; kanal girişinde oluşturulan taneciklerin, oluşturulma parametreleri incelenmiş olup taneciklerin valf yapısına temasına değinilmemiştir. Oluşturulan basit modellerde valf benzeri yapının simule edilmesinin sebebi, türetilecek başka çalışmalara zemin hazırlamak ve kontak parametrelerini incelemek içindir.

Şekil 3. 13 'te, SPH yönteminin, Arçelik kompresörlerinin emme yaprağındaki yaprak açılma – kapanma senaryosunda kullanımı gösterilmiştir. Bu durumda yaprağın açılması klasik katı – sıvı etkileşimi içeren FSI (Fluid – Structural Interaction) yöntemi yerine interpolasyonlu tanecik yöntemi ile modellenmiştir. Bu modelde, emme yaprağının temas ettiği komponentler modele dahil edilmiş, komponentler arasına gerekli kontaklar verilmiştir. Valf yaprağı için Johnson Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Bu sayede yaprağın açılması simule edilmiş ve yaprak üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.



Şekil 3.13 Kompresör emme yaprağının hareketinin SPH yöntemi ile modellenmesi

Yapılan araştırmalarda, akışkan girişi olarak belirlenen yüzey düşey eksende belli bir periyotta hareket ettirilerek, SPH yönteminin dalgalı bir denizde yol alan geminin simule edilmesi gibi farklı senaryolarda kullanılabildiği ve bu sayede gemi üzerine gelen kuvvetlerin, gemi üzerinde oluşan gerilmelerin hesaplanabildiği görülmüştür. Ayrıca gösterilen örnekte tankerinin sudaki hareketinin yanı sıra tanklar içerisindeki akışkan da SPH yöntemi ile modellenmiş ve bu akışkanın hareketi de gözlenmiştir. Şekil 3.14' te bahsedilen probleme örnek bir durum gösterilmiştir [36].



Şekil 3.14 Tankerin dalgalı denizdeki seyrinin SPH yöntemi ile modellenmesi örneği [36]

3.2 Dengeleme Halkası Analizleri

Bu bölümde, tezin ana içeriğini oluşturan üstten yüklemeli çamaşır makinelerinde kullanılan dengeleme halkalarının içerisindeki sıvının çalkalanma hareketinin interpolasyonlu tanecik yöntemi ile modellendiği ve konstrüksiyon değişiminin dengelemeye etkisinin incelendiği analizlerin detayları hakkında bilgi verilecektir. Gerçekleştirilen ön doğrulama analizleri ile ana problemin, analiz ortamında temsili için oluşturulan analiz senaryoları detaylı açıklanacaktır.

3.2.1 Tasarımın Basitleştirilmesi

Üstten yüklemeli çamaşır makinesinin stabilizasyonunu; çamaşır makinesinin kapasitesinin çok altında ya da üstünde yükleme, dört tane ayağın tam olarak zemine oturmaması, amortisörlerin işlevini yerine getirmemesi gibi birçok faktör bozabilir. Diğer tüm faktörlerin etkisinin olmadığı, sadece çamaşırların çamaşır makinesi içerisinde konumlanmasından ötürü dengesizlik oluştuğu ve stabilize çalışma durumunu bozduğu gerçekleştirilen analizlerde kabul edilmiştir. Ayrıca çamaşır makinesinin dönme hareketinden ötürü, çamaşırların konumunun değişmesi göz ardı edilmiştir. Yani, ideal durumda çamaşır makinesi tamburunun düşey eksen etrafında döndüğü, dengesizlik durumunda ise çamaşırların tambur içerisinde tek bir noktada toplanarak dengesizlik oluşturduğu kabulü yapılmıştır. Kısacası, çamaşırların tamburun tek bir noktasına toplanması sonucu dengesizliğin oluştuğu durum incelenmiştir.

Problemin basitleştirilmesi amacıyla; yukarıda bahsedilen kabule ek olarak, dengeleme halkası tasarımı da basitleştirilmiştir.

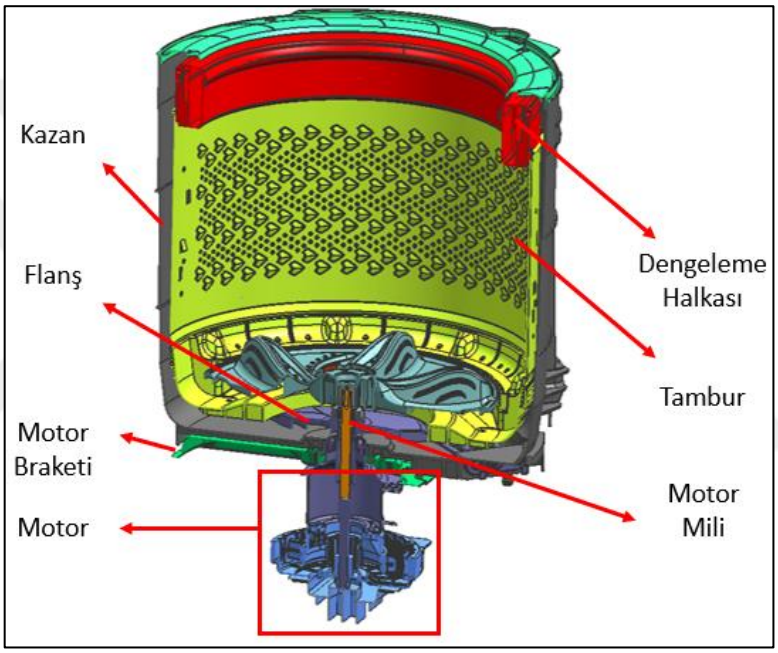
3.2.2 Basit Dengeleme Halkasının Modellenmesi

Basit dengeleme halkası olarak kastedilen tasarım, dengeleme halkası içerisinde bulunan federlerin kaldırıldığı, dengeleme halkasının imalatı için oluşturulan kalıp açılarının kaldırıldığı ve kalınlık detaylarının komponentlerin modellenmesi başlığı altında anlatılacağı üzere, sabit tutulduğu tasarımdır.

3.2.2.1 Komponentlerin Modellenmesi

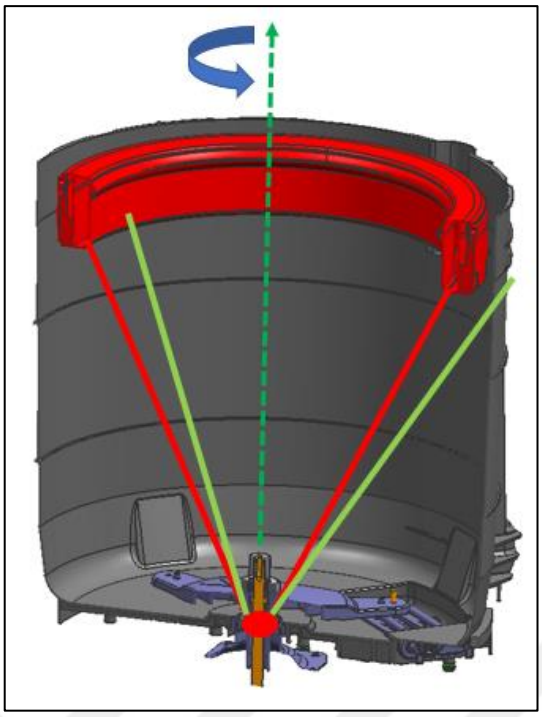
Problemin basitleştirilmesi amacıyla, daha önce de bahsedildiği üzere; dengesizliği oluşturan, kazan içerisindeki herhangi bir noktadaki ekstra ağırlık,

dengeleme halkası ve dengeleme halkası içerisindeki sıvı, modellemelerde dikkate alınacak odak noktadır. Şekil 3.15' te tahrik grubunun kesit görünümü gösterilmiştir. Şekil 3.15' te gösterilen montaj kısaca özetlenirse; motor, motor mili ekseni düşey eksende konumlanacak şekilde motor braketine monte edilmiştir. Motor braketi ise, çamaşır makinesi kazanına monte edilmektedir. Motorun mili, kazanda bulunan rulman yardımıyla yataklanmaktadır. Yataklanan bu mil, tamburun alt kısmına sabitlenmiş flanşa monte edilmektedir. Çamaşır makinesi kazanı ise, dört amortisör yardımıyla gövde grubuna asılmaktadır. Dengeleme halkası ise, tamburun en üst noktasına konumlandırılmıştır.



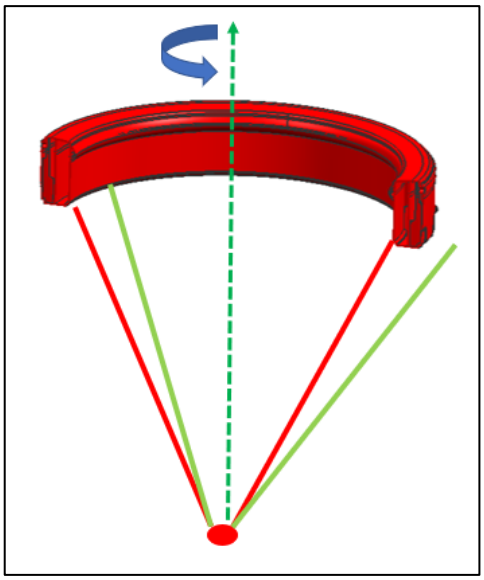
Şekil 3.15 Tahrik grubunun kesit görünümü

Çamaşırlardan oluşan dengesizliğin, çamaşır makinesi tamburunun zemininin herhangi bir noktasında sabit olacak şekilde konumlandığı ve çamaşır makinesi tahrik grubunu oluşturan elemanların basitçe montaj şekli ele alındığında dengeleme halkasının ideal durumda (dengesizlik yok iken) motor milinden geçen eksen etrafında döndüğü söylenebilir. Tamburda dengesizlik oluştuğunda ise dengeleme halkası; motor milinin mesnetlendiği ya da yataklandığı nokta olan ve kazan arkasında bulunan rulman bölgesinden, düşey eksenden zamana ve devire bağlı değişen açıyla salınımlar yaparak yine düşey eksen etrafında bir dönme hareketi gerçekleştirmektedir.



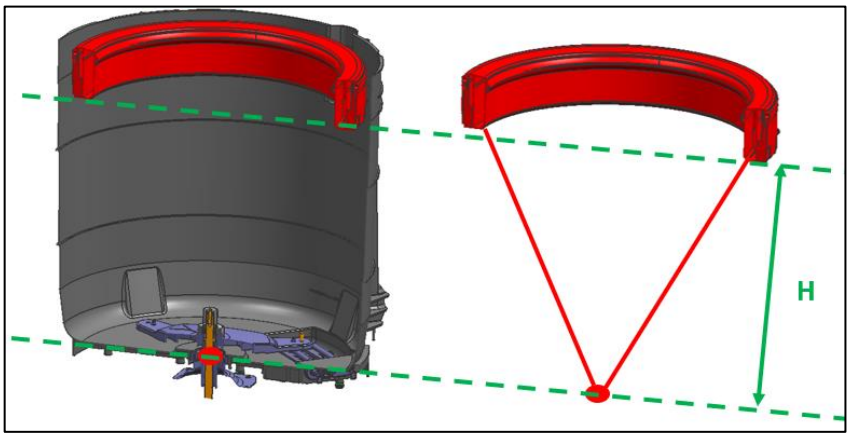
Şekil 3.16 Dengeleme halkasının dengesiz durumda dönme hareketi

Şekil 3.16’ da çamaşır makinesi dengesiz durumunda dengeleme halkasının dönme hareketi gösterilmiştir. Kırmızı nokta ile gösterilen bölgede motor mili kazanda yataklanmaktadır. Dengeleme halkası direk olarak tambura monte edildiğinden dengeleme halkasının kırmızı noktaya olan bağlantısı rijit kabul edilebilir. Bu rijitlik kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir. Dengeleme halkasının dengesizlik durumunda düşey eksenle açı yapacak şekilde konum değişimi yeşil çizgilerle gösterilmiştir. Dönme hareketi de düşey eksendeki mil ekseni etrafında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla oluşturulan modellerde; kazan, tambur ve motor mili de göz ardı edilebilir. Tambur zemininin herhangi bir noktasında, dönme süresince sabit konumlanarak oluşan dengesiz yük ise, dengeleme halkasının herhangi bir noktasına taşınabilir. Tüm bunlar göz önüne alındığında problemin en basit hali, Şekil 3.16’ dan türetilerek, Şekil 3.17’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Dengeleme halkasının montaj ve hareketinin basitleştirilmiş hali

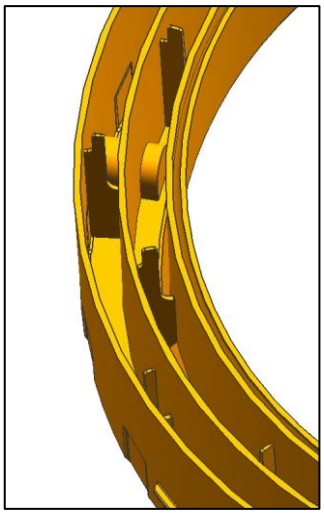
Şekil 3.17' deki durum ele alınırsa, dengeleme halkası ile motor milinin rulmanla yataklandığı nokta arasında rijit olarak bağlantı kurduğu kabul edilerek oluşturulan modellerde sağlanmıştır. Ayrıca milin yataklandığı noktayı temsil eden, kırmızı noktadaki hareket, eksenlerde ötelenmeyi önleyecek ama dönmeyi sınırlamayacak şekilde sınır koşulları verilecek şekilde düşünülmüştür. Oluşturulan öncül modelde, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18' deki node' a (düğüm noktasına) sadece motor mili ekseninden geçen eksen etrafında dönme hareketine izin verecek şekilde bir sınır koşulu ve yine bu node' a açısal hız verilerek, dengeleme halkasının motor mili ekseninden geçen doğru etrafında dönmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.18 Oluşturulan modelde dengeleme halkasının konumu

Oluşturulan öncül modelde; dengeleme halkası, kazan arkasında bulunan ve motor milini yataklamaya yarayan rulmanın yuvasından uzaklığı sabit kalacak şekilde ya da gerçek modeldeki uzaklık korunacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 3.18' de bu konum açıklanmıştır. Rulman yuvasındaki nokta ile dengeleme halkasını oluşturan ağ yapısı 1D boyuttaki RBODY rijit eleman ile birleştirilmiştir. Bir boyuttaki RBODY rijit eleman oluştururken, rijit elemanın bağımlı (dependent) düğüm noktası rulman yuvasındaki nokta seçilirken, bağımsız (independent) düğüm noktaları dengeleme halkasını oluşturan ağ yapısının tüm düğüm noktaları seçilmiştir. Bu sayede dengeleme halkasının hareket sürecinde deforme olmasının önüne geçilmiştir. Başka bir deyişle, dengeleme halkası rijitleştirilerek, malzemeden bağımsız ve deforme olmayacak bir şekilde modellenmiştir. Bu yüzden, sıvının hareketinden ötürü dengeleme halkası üzerinde oluşan gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanmamıştır. Sadece dengesiz yükten ve sıvının hareketinden ötürü oluşan harekete odaklanılmıştır. Kazan, tambur ve üzerlerinde bulunan diğer komponentlerin ağırlıkları eklenerek RBODY elemana ağırlık atanabilir. Ancak tambur ve kazanın oluşan salının hareketinde, birbirlerine rijit olarak bağlı bir hareket göstermeyecek olacağından RBODY elemana ağırlık verilmemiştir. Oluşturulan model sadece, dengeleme halkası, sıvı ve dengesiz yükün ağırlığından oluşmaktadır. Altair Hypermesh paket programının Radioss çözücüsü için oluşturulan arayüzünde RBODY elemanın ağırlık merkezinin konumu da ayarlanabilmektedir. ICOG = 3 komutu ile, oluşturulan RBODY elemanın ağırlık merkezi RBODY elemanın bağımlı düğüm noktasına taşınması sağlanmıştır. Bu komut ile ayrıca bağımsız düğüm noktalarında hesaplanan ağırlık merkezi ve atalet momentleri de bağımlı düğüm noktasına taşınmaktadır. Analiz sonucunda da, bu bağımlı düğüm noktasının konumu değişmemektedir [32].

Dengeleme halkası modellenirken, öncelikle radüs, kalıp açıları gibi tüm üretime ait detaylar göz ardı edilmiştir. Yapı içerisinde bulunan, yapısal katkı sağlayan ve sıvının hareketini yönlendiren feder yapıları kaldırılmıştır. Şekil 3.19 'da kaldırılan bu feder yapıları gösterilmiştir.



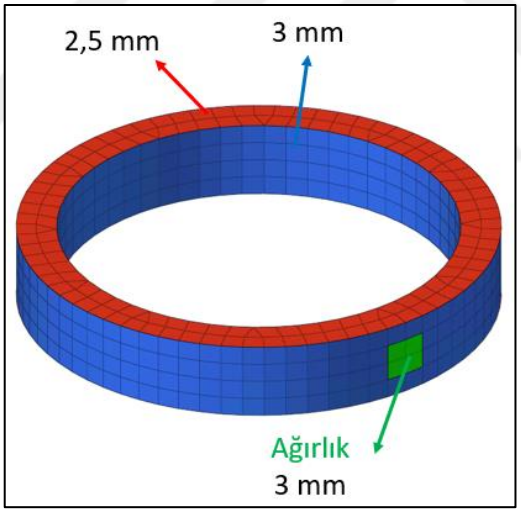
Şekil 3.19 Dengeleme halkasının modellenme aşamasında modellenmesi sırasında kaldırılan yapısal unsurlar

Dengeleme halkasının malzemesi, üretim yöntemi ve tasarımsal kalınlıkları göz önüne alındığında; bir eksendeki kalınlığı diğer iki eksendeki uzunluk ve genişliğine göre çok küçük olduğundan, parçanın 2D boyuttaki kabul yani Shell elemanlar ile modellenmesine karar verilmiştir. Ayrıca dengeleme halkasının tüm düğüm noktaları rijit elemanın bağımsız düğüm elemanları ile tutulduğundan aslında 3D ve 2D boyuttaki elemanlar ile modellemek arasında bir fark oluşturmayacaktır. Ancak bu seçim, aynı zamanda modeldeki eleman sayısını azaltmanın yanında eleman boyutlarının da arttırılmasına olanak sağlayacaktır.

Dengeleme halkası için oluşturulan ağ yapısında P1_SHELL özelliğindeki quad4 ve tria3 elemanlar kullanılmıştır. Analiz süresince oluşan enerji hatalarının azaltılması amacıyla 4 düğümlü eleman tiplerinde kullanılan QEPH : 24 kabuk formulüzasyonu kullanılmıştır. Kalınlığı temsil edecek hesaplamalarda kullanılan ve 0 ile 10 arasında seçilebilen bir değer olan, integrasyon noktasının 5 olduğu kabul edilmiştir. Ağ yapısını oluşturan elemanların boyutları explicit analizlerde zaman adımına direk olarak etki ettiği için, geometrik formun kaybolmasına izin vermeyecek en büyük eleman boyutunu sağlayacak, 20 mm ile ağ yapısı oluşturulmuştur.

Dengeleme halkası üst ve alt olacak şekilde iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki parça, sıvı sızdırmazlığı sağlanacak şekilde birleştirilmektedir. Oluşturulan modelde her iki parça içerisindeki yapısal unsurlar kaldırıldığından birleştirilme

yüzeylerinde bir kontak oluşturulduğunda sıvının modellemesinde kullanılan taneciklerin dışarı çıkabildikleri gözlenmiştir. Problemin karmaşıklığını arttırmamak amacıyla; ayrıca bir kontak ya da rijit bağlantı oluşturulmamıştır. Direk olarak, her iki komponent üzerindeki ağ yapıları birleştirilerek, sanki tek bir parçaymış gibi modellenmiştir. Dengesizliği oluşturacak ağırlık ise, dengeleme halkası üzerine indirgenmiştir. Dört düğüm noktasına sahip dört elemana toplamda 500 gr 'lık dengesizlik oluşturacak şekilde malzeme tanımlaması yapılmıştır. Bu kısımda kalınlık, dengeleme halkasının yüzeyindeki kalınlık homojenliğini koruyacak şekilde 3 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca dengeleme halkasının ağırlığının ve ataletinin; analizlere doğru bir şekilde aktarılabilmesi açısından, öncül tasarımdaki kalınlıklara yakın değerler analizlerde kullanılmıştır. Üst yüzeyi ve alt yüzeyi oluşturan elemanlara 2,5 mm kalınlık verilirken silindirik yüzeyi oluşturan elemanlara ise 3 mm kalınlık verilmiştir. Dengeleme halkasını oluşturan elemanların kalınlıkları şekil 3.20' de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Dengeleme halkası kalınlıkları

Dengeleme halkası içerisinde bulunan sıvının modellemesi, tezin ana kapsamını oluşturan lagrange metodunu temel alan tanecik yani interpolasyonlu tanecik metodu ile gerçekleştirilmiştir. Dengeleme halkasının dış çeperlerini oluşturan yüzeyler, yani şekil 3.20' de gösterilen yüzeyler referans alınarak, bu referans hacmi %30 'u dolu olacak şekilde basit kübik yapısı metodu ile ve kübiğe ait tek bir kenarın uzunluğu (tanecikler arası nominal mesafe, basit kübik yapısının bir kenarının uzunluğuna eşittir.) h = 5 olacak şekilde 7342 adet parçacık

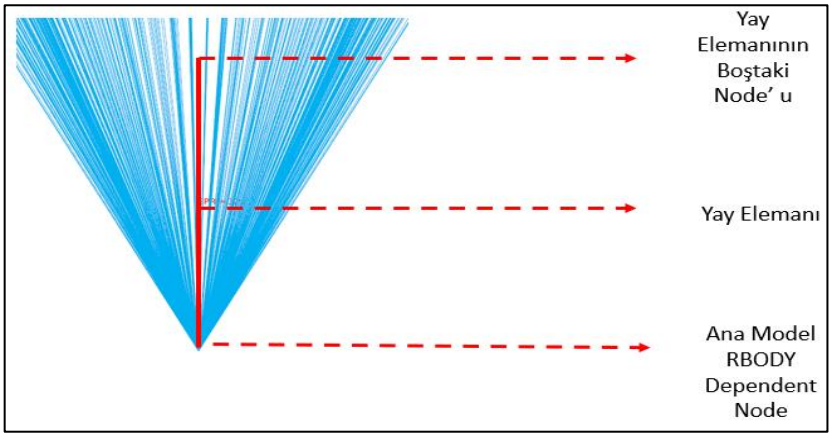
oluşturulmuştur. Tek bir taneciğin ağırlığı da yaklaşık olarak 1,2769000272405e-01 gr' a denk gelmektedir. Burada taneciğin oluşturulma yöntemi dikkate alınacak olursa, kübik yapının bir kenarını oluşturan h değeri düştükçe tanecik sayısı artmakta, tanecik başına düşen ağırlık azalmaktadır. Tanecik sayısı da arttıkça, aynı sonlu elemanlarda olduğu gibi analizlerin doğrulukları artmaktadır ve yine sonlu elemanlarda ağdan bağımsızlık durumunda sonuçların belli bir değere yakınsadığı gibi interpolasyonlu tanecik metodunda da belli bir tanecik sayısından sonra sonuçların belli bir değere yakınsadığı söylenebilir. Ancak artan tanecik sayıları ile birlikte tanecik ağırlıkları ve zaman adımları düşmekte, dolayısıyla her bir iterasyon için analiz süresi çok uzamaktadır. Bu yüzden, farklı sayıdaki taneciklerle yapılan analizler sonucunda 7342 adet tanecik kullanmanın hem analizlerin süresi hem de doğruluğu açısından oluşturulan senaryo için yeterli ve optimum olacağına karar verilmiştir.

Sıvıyı oluşturan tanecikler ile dengeleme halkasını oluşturan kabuk elemanlar arasında etkileşimi sağlayabilmek amacıyla bu iki tür komponent arasına kontak tanımlaması yapılmaktadır. Altair Hypermesh paket programının Radioss çözücüsü için oluşturulan ara yüzünde, belirlenen bir yüzey ile düğüm noktaları (node) arasında darbe etkisine izin veren TYPE 7 kontak tipi oluşturulmuştur. Belirlenen node' lar ile yüzey arasında temas için oluşturulan kontağın aktivasyonu için 0,1 mm boşluk belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı 0,1 N/mm olarak kabul edilmiştir.

Dengeleme halkasının; tambur, kazan gibi diğer komponentlere bağlı olduğunu göz ardı ederek, motor miline bağlı olduğunu temsil etmesi amacıyla, RBODY elemanın bağımlı (dependent) node' u motor mili ekseni ile aynı eksende konumlandırılan bir yay elemana bağlanarak model bir aşama daha geliştirilmiştir. Detaylar şekil 3.21' de görülebilir.

Yay elemanın çekme ve kayma eksenlerindeki katılıkları 1000000 N/mm, sönümleri 1 Ns/mm, burulma ve eğilme eksenlerindeki katılığı 1000000000000 N/mm , sönümü 25000 Ns/mm olarak belirlemiştir. Bu sayede yayın; çekmeye, burulmalara ve eğilmeye karşı oldukça rijit şekilde davranması sağlanmıştır. Bu tanımlamanın yapılabilmesi için program ara yüzünde P13_SPR_BEAM özellikteki

1D boyuttaki eleman kullanılmıştır. Bu eleman sebebiyle modelin etkilenmemesi amacıyla, bu elemanın ağırlığı 1gr gibi çok küçük bir değer seçilmiştir.



Şekil 3.21 RBODY elemanın yay elemanına bağlanması

Mil ekseni ile aynı doğrultuda oluşturulan bu yay elemanın bir node' u daha önce bahsedildiği üzere, RBODY elemana bağlanırken, diğer node' u ise, sadece düşey eksende koordinatı değişmiş uzaydaki herhangi başka bir node' a bağlanmıştır. Bu node' a; x,y,z eksenlerinde ötelenme ve x,y eksenlerinde dönme hareket sınırı verilirken, düşey eksen olan z ekseni etrafında dönmesine izin verilmiştir. Yine yayın aynı node' una açısal hız tanımlaması yapılmıştır. Bu sayede, dengeleme halkasının döndürülmesi sağlanmıştır. Oldukça rijit bir şekilde modellenen yay elemanın eksenlerde herhangi bir eğilme ya da burulma yapmadan dengeleme halkasını döndürmesi sağlanmıştır. RBODY elemanın bağımlı (dependent) node' u ise yay elemanın node' una bağlanıp öncül modeldeki sadece düşey eksen etrafındaki harekete izin veren sınır koşulu kaldırılmıştır. Ön doğrulama çalışmalarında; farklı senaryolar için, yayın üzerinden yayın eksenlerinde oluşan reaksiyon kuvvetleri okunmuştur.

3.2.2.2 Kullanılan Malzeme Özellikleri

Dengeleme halkasının ve interpolasyonlu tanecik yöntemi ile dengeleme yetkinliğinin modellenmesi amacıyla oluşturulan modelde, kullanılan malzeme özellikleri hakkında bu bölümde bilgi verilmiştir.

Modelde kullanılan bir boyutlu elemanlardan RBODY, RBE2 gibi rijit elemanlara ve yay ve mafsal özelliği katan SPRING elemanına malzeme ataması

yapılmamaktadır. Oluşturulan bu yay elemanların sadece ağırlık, rijitlik gibi özellikleri belirlenmelidir. Bu konuda da diğer bölümlerde detaylı bilgi verilmiştir.

Dengeleme halkasını oluşturan elemanlarda ve dengeleme halkası üzerinde bulunan dengesiz yükü oluşturan elemanlarda, Altair Hypermesh ticari yazılımında kullanılan M2_JOHNS_ZERIL yani izotropik elasto-plastik malzemelerin modellenmesinde kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli gerilmeyi; gerinim, gerinimin hızı ve sıcaklığın fonksiyonuna göre belirler. Maksimum plastik gerinime bağlı olarak failure model oluşturulur. Ya da daha basit bir tabir ile malzeme akma değerinin altında lineer özellik gösterirken, akma sınırının üstünde yani plastik bölgede, modelin tanımladığı formülüzasyona göre malzeme üzerinde gerilmeler oluşturur [32]. Ancak bizim modelimizde, dengeleme halkasını oluşturan tüm ağ yapısı rijit elemanın bağımsız düğüm noktalarını oluşturduğundan, bir gerilme ya da deformasyon gözlenmemiştir. Bu durum da beklendiğinden ayrıca akma noktası tanımlaması yapılmamıştır. Dengeleme halkasında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3.5 ‘te gösterilmiştir. Malzeme kalınlıkları ile ilgili bilgiler komponentlerin modellenmesi başlığı altında yer almaktadır. Dengesiz yüke ait malzeme mekanik özellikleri, yoğunluk hariç dengeleme halkası ile aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Yoğunluk da dengesiz yükün 500 gr olarak kabul edilmesi durumuna tekabül edecek büyüklükte seçilmiştir.

Tablo 3.5 Dengeleme halkasının analizlerde kullanılan mekanik özellikleri

Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	1,19
Elastisite Modülü, E (MPa)	3210
Poisson Oranı, υ	0,38

Dengeleme halkası içerisindeki sıvının malzemesi; dengeleme halkası malzemesi ile tepkimeye girmeyen ya da benzer şekilde malzeme içerisine difüze olmayan, sağlık açısından zararlı olmayan, belirli viskozite değerlerine sahip malzemeler olarak seçilmektedir. Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.4’ te anlatıldığı üzere; dengeleme

halkası içerisinde, dengeleme kapasitesinin arttırılması amacıyla bilyeler de kullanılabilir. Bu yüzden genellikle gliserin gibi yoğunluğu yüksek malzemeler ya da su- gliserin gibi birbirileri ile homojen karışan farklı sıvı malzemeler kullanılmaktadır. Karışım durumunda sıvı karışımının her yerinde aynı özelliğin bulunması açısından homojen karışım olması oldukça önemlidir. Farklı sıvıların karışım oranları, karışımın yoğunluk ve viskozite değerlerinin dengelemeye olan etkisi literatürde yer almaktadır [3].

Finalize modelde, ana modelin bağlandığı komponentler olan ve tabla 1, tabla 2 olarak isimlendirilen parçalar ise çelik olarak tanımlanmıştır. Kullanılan çeliğin malzeme mekanik özellikleri Tablo 3.6' da gösterilmiştir. Tabla 1 ve tabla 2, ticari analiz programında M1_ELAST malzeme modeli ile modellenmiştir. Bu malzeme modeli, Hook Kanuna göre malzemenin izotropik ve lineer elastik malzeme özelliği olduğunu gösterir [32]. Yani gerilme ve gerinim arasında lineer bir ilişki vardır. Doğrulama için oluşturulabilecek deney düzeneği düşünülürken; bu parçaların minimum deformasyona uğraması istendiğinden; mümkün oldukça kalınlıklar fazla ve elastisite modülü yüksek bir malzeme seçimi yapılmıştır. Bu yüzden çok fazla deformasyona uğrayacağı öngörülmemektedir. Kısacası güvenlik katsayısının oldukça yüksek olduğu düşünülebilir. Ancak analiz sonuçlarında gerilme değerleri de incelenecek olursa, basitçe, akma değerinin üstündeki gerilmelerde "plastik deformasyon açısından risk vardır" şeklinde bir yorum yapılabilir.

Tablo 3.6 Analizlerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri

Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	7,85
Elastisite Modülü, E (MPa)	210000
Poisson Oranı, υ	0,33

Tez kapsamında, dengeleme halkası içerisinde su kullanılmış olup kullanılan suyun fiziksel özellikleri Tablo 3.7' da açıklanmıştır. Suyun, interpolasyonlu tanecik metoduna göre tanecik olarak modellenmesine imkan tanıyacak şekilde, sıvı ve gaz özellikteki, viskoz, akışkan malzemelerin modellenmesinde kullanılan MLAW6_HYD_VISC malzeme modeli kullanılmıştır [32]. Bu başlık altında; sıvı modellemesi için, sıkıştırılamaz akış kabulü yapılıp lineer polinom denklemleri kullanılmıştır. Bu yaklaşımda hidrodinamik basınç katsayıları olan C_0, C_2, C_3, C_4, C_5 değerleri sıfır kabul edilmiş. C_1 değeri ise (3.2) ile hesaplanmıştır.

$$C_1 = \rho c^2 \tag{3.2}$$

Tablo 3.7 Dengeleme halkası içerisinde kullanılan suyun fiziksel özellikleri

Yoğunluk, ρ (gr/cm³)	1
Kinematik Viskozite, ϑ, (mm²/s)	1,1

3.2.2.3 Zaman Adımı Seçimi

Sonlu elemanlar analizlerinde belirlenen analiz süresi, küçük aralıklarla ya da zaman adımları ile çözülür. Bu zaman adımları ne kadar küçükse, daha fazla döngü ve daha fazla çözüm yapıldığından analizlerin çözülme süreleri o kadar uzamaktadır. Zaman adımlarına birçok parametre etki etmektedir. Ancak bu tez kapsamında kullanılan Altair Radioss explicit çözücüsünde zaman adımları otomatik olarak belirlenir. Basitçe, kurgulanan problemin karmaşıklığı, kontaktan, malzemeden, ya da geometrik non-lineer durumların varlığı ve bu durumları ortaya çıkaracak sınır koşularının oluşması gibi sebepler analizlerin reelde çözülme süresini uzatır. Dolayısıyla, her ne kadar yapısal analizlerin çözüldüğü bilgisayarlar günlük hatta kullanılan bilgisayarlara göre oldukça güçlü bilgisayarlar olsa da; metodoloji geliştirirken ya da karmaşık problemlerin çözümlerine daha hızlı ulaşmak adına zaman adımlarına dikkat edilmelidir. Belirtildiği üzere, problemin karmaşıklığından ötürü zaman adımları her ne kadar küçük olsa da ve bu zaman adımları program tarafından otomatik belirleniyor olsa da, bu zaman adımlarına müdahale etme şansımız bulunmaktadır. Zaman

adımlarına müdahalede bulunulduğu zaman en çok dikkat etmemiz gereken husus; modelde gerçekte olmayan fiziksel davranışlar gözlenebileceğidir. Zaman adımlarına müdahalede bulunulduğunda yapılabilecek en basit şey, zaman adımlarına müdahalede bulunulmamış durum ile müdahalede bulunulmuş durumun karşılaştırılmasıdır [32]. Bu anlamda zaman adımlarının program tarafından nasıl hesaplandığı, hangi parametrelerin değiştirilmesinin zaman adımlarına nasıl etkisi olacağının gözlenmesi açısından oldukça önemlidir [32].

Altair Radioss explicit çözücüsünde bilinen zaman adımları aşağıdaki gibidir:

- Elemantal time step
- Nodal time step
- Global time step
- Contact interface time step

Bu zaman adımlarından; elemantal zaman adımına, nodal zaman adımına ve kontak yüzeyi zaman adımına müdahalede bulunulabilmektedir.

Yukarıda belirtilen zaman adımlarına kısaca değinilecek olunursa; "elemantal time step" aşağıdaki formülasyonla hesaplanır [32].

$$\Delta t_{Element} = \frac{l_c}{c} \tag{3.3}$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3.4}$$

(3.3) eşitliğinde, l_c karakteristik eleman boyutunu gösterirken, c malzeme içerisindeki ses hızını göstermektedir. (3.4) eşitliğinde ise E elastisite modülünü, ρ ise yoğunluğu göstermektedir. Dolayısıyla en basit anlamda küçük eleman boyutlarına sahip modellerin ya da elastisite modülleri büyük malzemelerden oluşan modellerin zaman adımları küçük olur sonucuna varılabilir. Bu yüzden metodolojiyi geliştirdiğimiz model üzerinde çalışılırken, mümkün oldukça büyük boyutlarda elemanlar kullanılmıştır. "Nodal time step" ise aşağıdaki formülasyonla hesaplanmaktadır [32].

$$\Delta t_{nodal} = \sqrt{\frac{2m_i}{K_i}} \tag{3.5}$$

(3.5) eşitliğinde m_i nodal kütleyi, K_i ise eşdeğer nodal stiffness' ı göstermektedir. Bu formül yorumlanacak olursa, nodal kütle düştükçe nodal zaman adımı da düşmektedir. Bizim senaryomuz için yorumda bulunulacak olursak, SPH taneciği arttıkça her bir tanecik başına düşen kütle azalacağından zaman adımı düşecektir.

"Contact interface time step" ise stiffness ya da slave node' ların hızı bazlı olmak üzere iki farklı hesaplanabilmektedir [32].

$$\Delta t_{inter\ nodal} = \sqrt{\frac{2m_i}{\sum(K_{interface} + K_{element})}} \tag{3.6}$$

$$\Delta t_{kin} = \frac{1}{2}\left[\frac{Gap - p_{amount}}{\frac{dp}{dt}}\right] \tag{3.7}$$

Nodal temas zaman adımının hesaplandığı (3.6) eşitliğinde $K_{interface}$, $K_{element}$ sırasıyla ara yüzey rijitliğini ve element rijitliğini temsil ederken, kinematik konak zaman adımının hesaplandığı (3.7) eşitliğinde Gap boşluğu, p_{amount} girişim miktarını, $\frac{dp}{dt}$ ise girişimde olan düğüm noktalarının bağıl hızlarını göstermektedir. (3.7)' den de görülebileceği üzere, temas halinde olan düğüm noktalarının hızı artıkça zaman adımları da düşmektedir. Yani çamaşır makinesinin dönme hızının artması ile birlikte sıvıyı temsil eden SPH taneciklerinin hızı artacağından zaman adımları düşecektir.

Bölüm 3.2.4' te hazırlanan tüm senaryolar için toplam analiz süresi 20 sn olarak belirlendiği ve bu analiz süresi için 24 çekirdekli bir bilgisayarda çözüm süresinin yaklaşık iki haftayı bulması sebebiyle nodal time step müdahalesinde bulunulmuştur. Bu yöntem explicit analizlerde zaman adımının belirli bir değerin altına düşmesini engellemek adına yaygın olarak kullanılmaktadır. Basitçe program tarafından ilgili düğüm noktalarına ağırlık uygulanmaktadır. Çok fazla kütle eklemek sistemin kinetik enerjisini arttırarak olayın fiziğini bozabilir. Artan kütle patlama olaylarının ya da düşme, çarpma olaylarının simülasyonunda parçaların modal frekanslarını değiştirebilir. Dolayısıyla genelde eklenen kütlenin

%5 altında tutulmasına dikkat edilir. Yarı statik durumlarda ise hızlar düşük olacağından daha fazla kütle eklemesi yapılabilir [32].

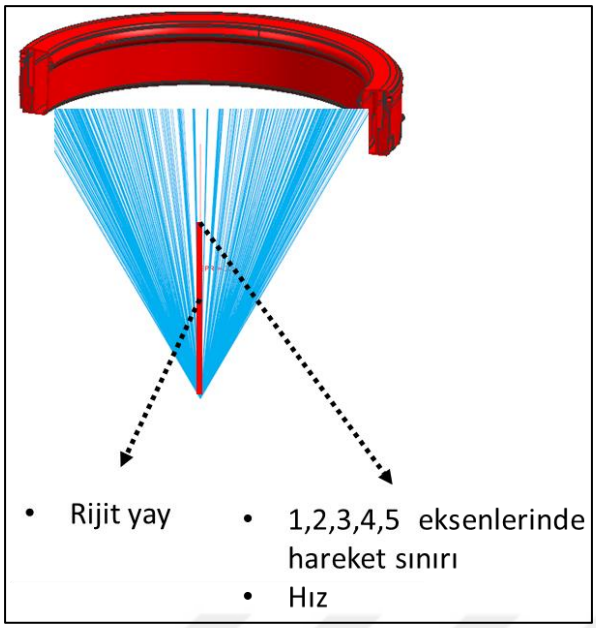
Özetle, model ilk başta hazırlanırken, zaman adımlarının büyük olması hedeflendiğinden özellikle elastisite modülü yüksek olan parçaların ağ yapıları olmak üzere modeldeki tüm ağ yapısı büyük elemanlardan oluşmaktadır. SPH taneciklerin ağırlıkları nodal zaman adımlarını düşürdüğünden nodal time step kontrolü gerçekleştirilmiş ve nodal anlamda eklenen kütlenin %5' in altında tutulmasına dikkat edilmiştir.

3.2.3 Dengeleme Halkası Analizlerinin Ön Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde, dengeleme halkası, dengesiz yük, RBODY eleman ve yay elemanından oluşan ana model üzerinde öncül analizler yapılarak yay elemanı üzerindeki reaksiyon kuvvetleri okunmuştur ve Bölüm 4.2' de sonuçlar grafiksel açıklanarak, olayın fiziği ile örtüşüp örtüşmediği, oluşan kuvvetlerin büyüklüklerinin analitik hesaplamalara yakın olup olmadığı yönünde yorumlarda bulunulmuştur. Problemi basitleştirebilmek amacıyla, ön doğrulama analizlerinde yerçekimi kuvvetleri modele dahil edilmemiştir.

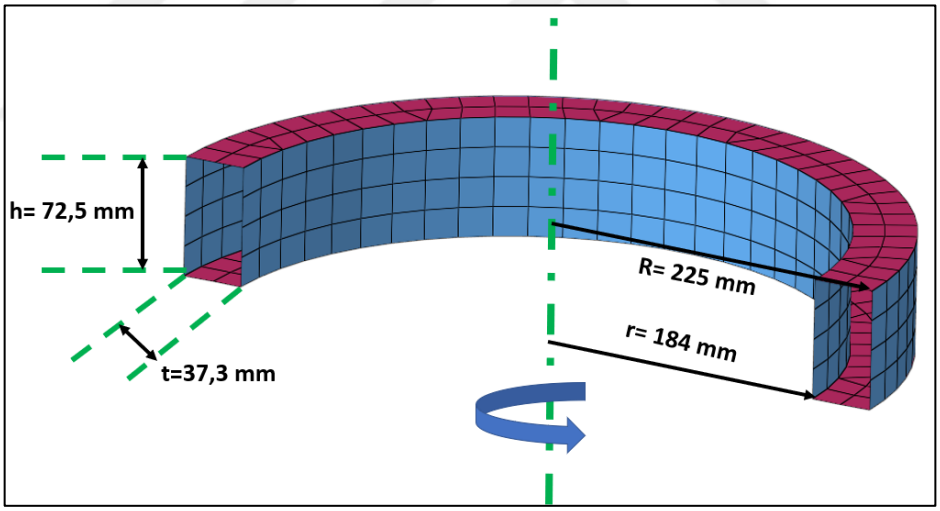
Gerçekleştirilen her öncül analiz senaryo 1' den başlayacak şekilde isimlendirilmiştir. Her senaryoya karşılık gelen açıklama ise bu bölümün en sonunda bir tablo ile özetlenecektir.

Ön doğrulama için gerçekleştirilen analiz senaryolarına geçmeden önce; ana model olarak tabir edilen model kısaca hatırlayacak olursak; ana model, RBODY elemanın bağımsız düğüm noktalarının dengeleme halkasının tüm düğüm noktalarına bağlandığı ve bağımlı düğüm noktasının, çamaşır makinesi motor mili ekseni ile kazan arkasında bulunan rulmanı yatay düzlemde ortadan kesen düzlemin kesişiminde olduğu ve bu düğüm noktasına çekme, eğilme ve burulmaya karşı oldukça rijit bir yayın mil ekseninde bağlanması ile oluşturulmuş modeldi. Rijit yayın da uzaydaki düğüm noktası düşey eksen etrafında dönme hariç tüm hareketlerde kısıtlanmıştı ve bu düğüm noktasından hareket verilmekteydi. Temsili görüntüsü Şekil 3.22' de gösterilmiştir.



Şekil 3.22 Ana modelin temsili görüntüsü

Ana modelde ve ön doğrulama çalışmalarında kullanılan; basitleştirilmiş dengeleme halkasının yaklaşık ölçüleri Şekil 3.23' te gösterilmiştir.

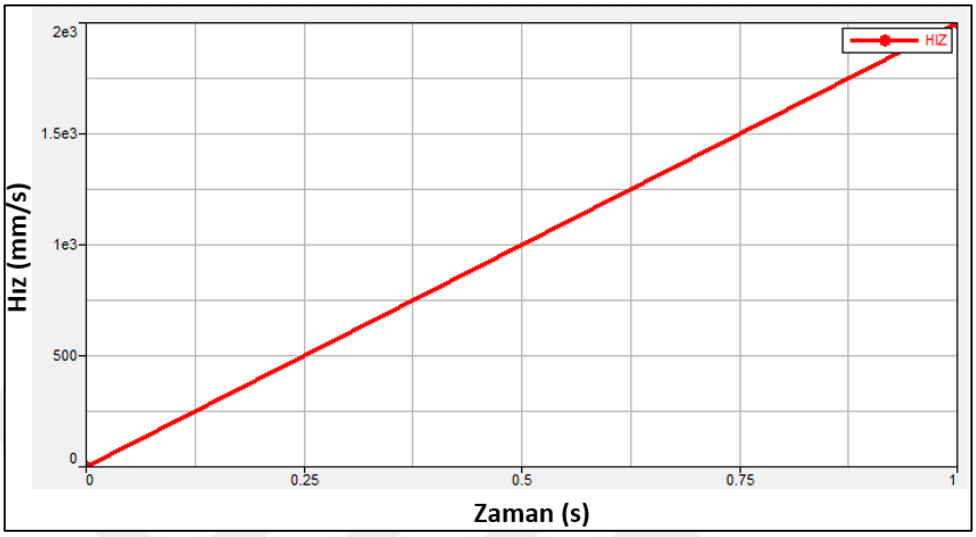


Şekil 3.13 Ana modelde kullanılan basitleştirilmiş dengeleme halkasının ölçüleri

Öncül analizler başlığı altında gerçekleştirilen analizler aşağıda sırasıyla detayları ile anlatılmıştır.

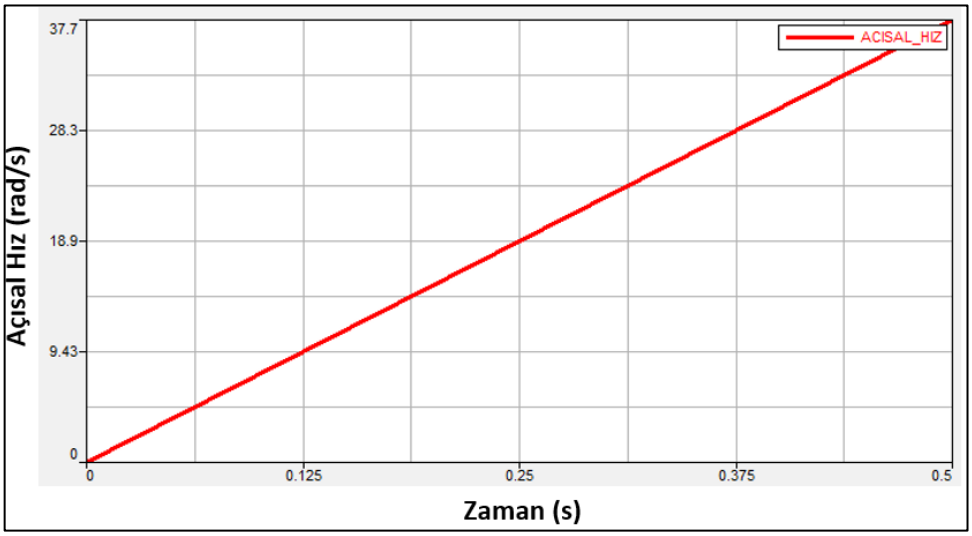
Senaryo 1' de; en temel hareket üzerine modelleme yapılmıştır. Dengeleme halkası, tamamen içi dolu bir katı halka olarak modellenip Newton' un 2. Hareket Kanunu incelenmiştir. Bunun için Şekil 3.21' de gösterilen modelde dengeleme halkası kısmı tamamen katı olacak şekilde üç boyutlu Hex8 elemanlar ile

modellenmiştir. Ana modeldeki RBODY elemanın bağımsız düğümleri ise, tüm Hex8 elemanların düğümlerine bağlanmıştır. Hareket verilen node yine aynıdır. Zamana bağlı sabit bir ivme ile düzgün hızlanan bir hareket tanımlaması yapılmıştır. Şekil 3.24' de verilen hız grafiği gösterilmiştir.



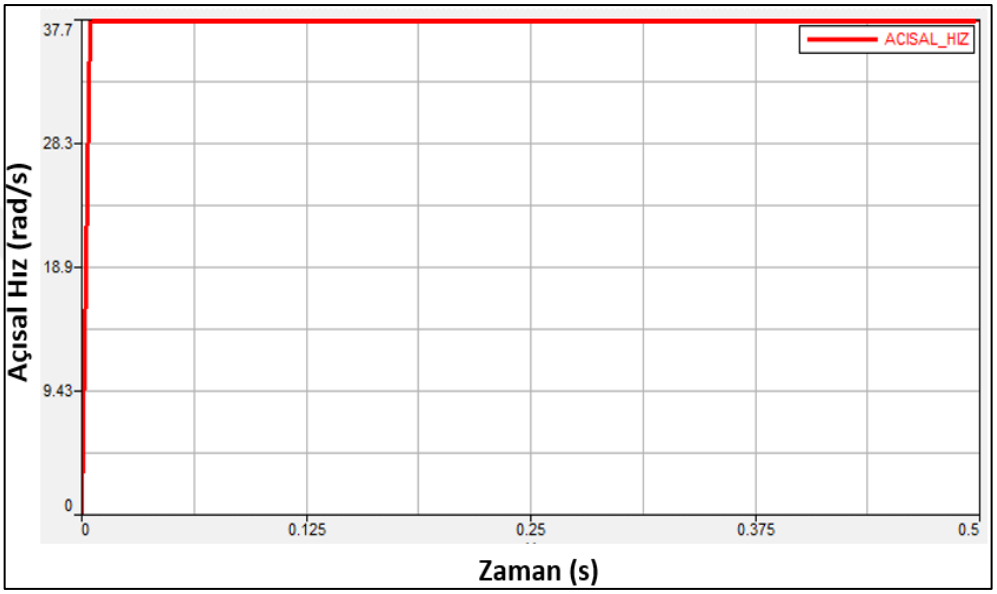
Şekil 3.24 Öncül analizler senaryo 1 ' de tanımlanan hız

Senaryo 2' de, üç boyutlu Hex8 elemanlarla oluşturulmuş modelin kendi etrafında dönmesi simule edilmiştir. Bunun için hareket tanımlaması yapılan node' a zamana bağlı sabit açısal ivme ile düzgün olarak artan açısal hız tanımlaması yapılmıştır. Uygulanan açısal hız ve ivme Şekil 3.25' te gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Öncül analizler senaryo 2 'de tanımlanan açısal hız

Senaryo 3' te, en başta anlatılan ana model üzerine dönüş yapılmıştır. Yani dengeleme halkası kabuk elemanlar ile modellenmiştir. Senaryo 2' dekine benzer bir şekilde kendi etrafında dönme hareketi verilmiştir. Ana modelden tek farklılık ;bu senaryoda dengesiz yük bulunmamaktadır. Dengesiz yük tanımlamasının yapıldığı elemanlar dengeleme halkası malzemesi ile aynı özellikte malzeme olacak şekilde bir seçim yapılmıştır. Şekil 3.26' da modele etki eden açısal hız grafiği gösterilmektedir.



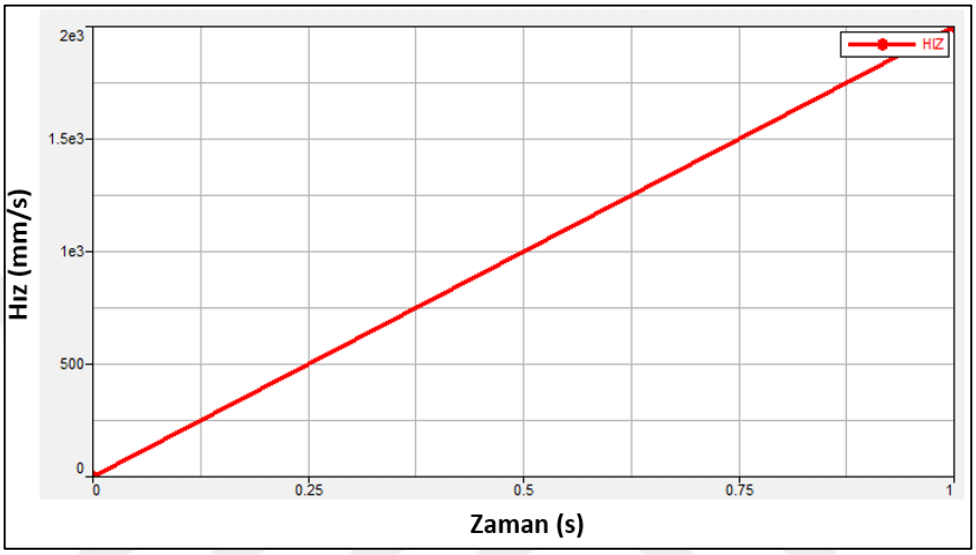
Şekil 3.26 Öncül analizler senaryo 3, senaryo 4, senaryo 5, senaryo 6, senaryo 7, senaryo 11 ve senaryo 12 'de tanımlanan açısal hız

Şekil 3.26' da gösterilen açısal hız grafiğinden anlaşılabileceği üzere; 37,7 rad/s büyüklüğünde sabit bir açısal hızın modele etki etmesi amaçlanmıştır. Ancak durur vaziyetteki bir modeli direk bu hızla döndürmeye çalışmak enerji hatalarına sebep olduğu için, 0,005 sn gibi küçük bir zaman aralığında 0' dan 37,7 rad/s hıza çıkılarak ilk anda görülen enerji hatalarının önüne geçilmiştir.

Senaryo 4' te; 500 gr ağırlığındaki dengesiz yük modele eklenerek senaryo 3' teki durum tekrarlanmıştır. Yani dengesiz yük içeren ana modele kendi etrafında sabit bir açısal hız verilmiştir.

Senaryo 5' te; 500 gr dengesiz yük içeren ana modele, dengeleme halkası %30 dolulukta olacak şekilde sıvı konularak SPH tanecikleri dahil edilmiştir. Senaryo 4' ten farkı; sıvının modele dahil edilmesidir. Burada sıvı olarak kastedilen, "malzeme özellikleri" bölümünde detaylı özellikleri verilen sudur.

Senaryo 6’ da; 500 gr dengesiz yük içeren ana modelin, kendi etrafında dönerken tek eksende tek yöne doğru bir hareket yapması simule edilmiştir. Bu sayede salınımın yarım periyotluk süresinde etki eden kuvvetlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, hareket verdiğimiz düğüm noktasına hem Şekil 3.26 ‘daki açısal hız hem de Şekil 3.27’ deki sabit ivmeli düzgün hızlanan hız etki etmiştir.



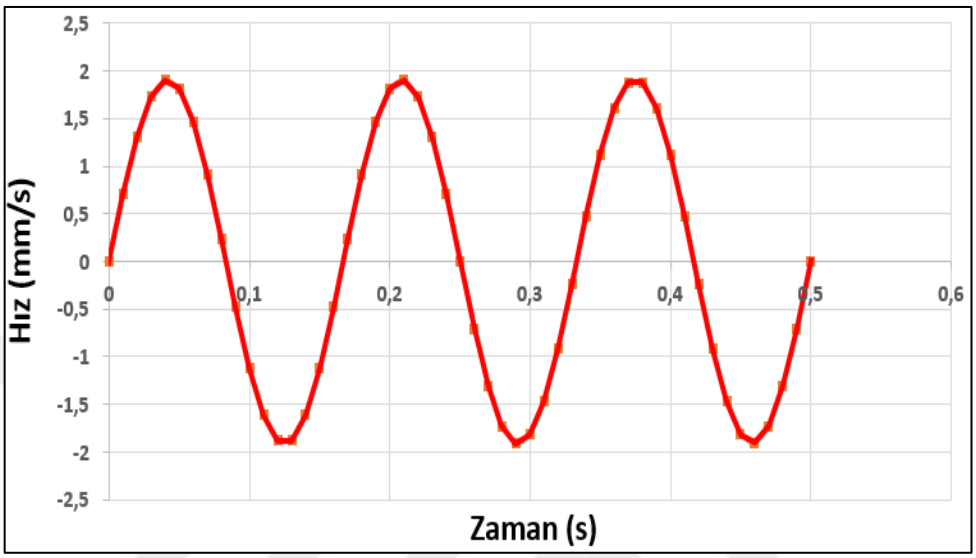
Şekil 3.27 Öncül analizler senaryo 6 ve senaryo 7’ de tanımlanan sabit ivme ile artan hız grafiği

Senaryo 7’ de; senaryo 6’ da oluşturulan modelin içerisine %30 doluluk sağlanacak şekilde sıvı da konularak olaya SPH tanecikleri dahil edilmiştir.

Senaryo 8’ de; senaryo 6 ve senaryo 7’ de kurgulanan tek eksendeki tek yöne doğru hareketi, tek eksende gerçekleşen bir salınım hareketi haline dönüştürmek amaçlanmıştır. Bu yüzden, hareket genliği 50 mm olacak şekilde sinüs sinüzoidal bir hız eğrisi tanımlanmıştır. Ana modelde dengesiz yük ortadan kaldırılıp sadece tek eksende salınım hareketi simule edilecek durum için Şekil 3.28’ de gösterilen hız grafiği, modeli hareket ettirmek için kullandığımız düğüm noktasına etki etmiştir.

Senaryo 9; senaryo 8’ in 500 gr dengesiz yük eklenmiş durumu olarak düşünülebilir. Sıvısız durumda dengesiz yüke sahip dengeleme halkasının tek eksendeki salınım hareketini temsil etmektedir.

Senaryo 10; Senaryo 9 ‘ da oluşturulan duruma ek olarak, dengeleme halkasında % 30 doluluk sağlanacak şekilde sıvı (su) konulmuş durum olarak özetlenebilir. Bu senaryoda hem dengesiz yük hem de sıvı bulunmaktadır ve hazırlanan model tek eksende sinüzoidal hareket yapmaktadır. Sinüzoidal hareket için Şekil 3.28’ deki grafik kullanılmıştır.



Şekil 3.28 Öncül analizler senaryo 8, senaryo 9 ve senaryo 10’ da tanımlanan sinüzoidal hız grafiği

Bu kısma kadar oluşturulan modellerde dengeleme halkasında dengesiz yükün olmadığı ve olduğu, içerisinde sıvının bulunmadığı ve bulunduğu senaryolar için; dengeleme halkasının sadece kendi etrafında döndüğü, kendi etrafında dönerek tek eksende tek doğrultuda hareket ettiği, tek eksende salınımı temsilen tek eksende hareket ettiği durumlar incelenmiştir.

Dengeleme halkasının üzerinde 500 gr ağırlığında bir dengesiz yük bulunarak; hem kendi etrafında Şekil 3.26’ daki açısal hız ile dönüp, hem de Şekil 3.28’ deki hız grafiğine göre tek eksende sinüzoidal hareket yaptığı sıvısız durum senaryo 11, dengeleme halkasının % 30 sıvı (su) doluluğuna sahip olduğu sıvılı durum ise senaryo 12 olarak isimlendirilmiştir.

Oluşturulan tüm senaryolarda hareketi sağlayan hız ve açısal hız grafiklerinin, ana modeldeki hareket verilen düğüm noktası (node) üzerinden etki ettiği unutulmamalıdır. Oluşturulan senaryoları özetleyecek şekilde Tablo 3.8’ de; dengesiz yükün ve sıvının olup olmama durumları için, doğrusal hız, açısal hız ve

tek eksende sinüzoidal hareketi sağlayan hız eşleştirmeleri görülebilir. İlgili senaryoda olan durumlar “X” ile işaretlenmiştir.

Tablo 3.8 Ön doğrulama analiz şartları

	Mesh Tipi		Dengesiz Yük Durumu		Sıvı Durumu		Hareket Şekli		
	3D	2D	Var	Yok	Var	Yok	Tek Eksende Açısal Hız	Tek Eksende Tek Doğrultuda Hız	Tek Eksende Sinüzoidal Hız
Senaryo 1	X			X		X		X	
Senaryo 2	X			X		X	X		
Senaryo 3		X		X		X	X		
Senaryo 4		X	X			X	X		
Senaryo 5		X	X		X		X		
Senaryo 6		X	X			X	X	X	
Senaryo 7		X	X		X		X	X	
Senaryo 8		X		X		X			X
Senaryo 9		X	X			X			X
Senaryo 10		X	X		X				X
Senaryo 11		X	X			X	X		X
Senaryo 12		X	X		X		X		X

3.2.4 Analiz Metodu Geliştirme – Model İyileştirme Çalışmaları

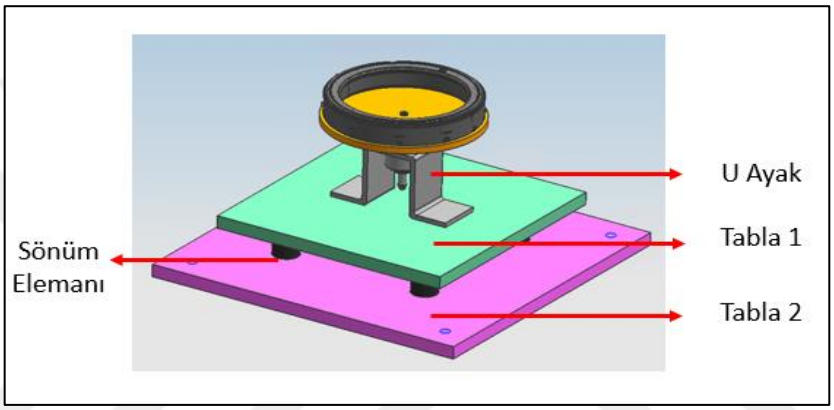
Bölüm 3.2.2‘ de dengeleme halkasının dönmesinin sağlanması ve oluşan dengesizlik durumunda oluşacak reaksiyon kuvvetlerinin okunması amacıyla oluşturulan ana model anlatılmıştır. Bu bölümde ise, oluşturulan analiz senaryosunun deneysel çalışmalarla da doğrulanabilmesi ve fiziksel deney koşulları ile oluşturulan modelin birebir aynı özellikte olması amacıyla modelde yapılan geliştirmeler, iyileştirmeler detaylandırılmıştır.

Hatırlanacağı üzere, yay elemanın uzayda bulunan node’ una belli koordinatlarda hareket sınırı verilmiş ve bu node’ a hareket verilerek dengeleme halkasının dönmesi sağlanmıştı. Bu bölüm kapsamında; bu yayın özelliklerinde değişiklikler yapılarak, oluşturulan ana modelin motor mili ekseninden, zamana ve hıza bağlı bir şekilde belli bir açıyla salınım yapması sağlanmıştır.

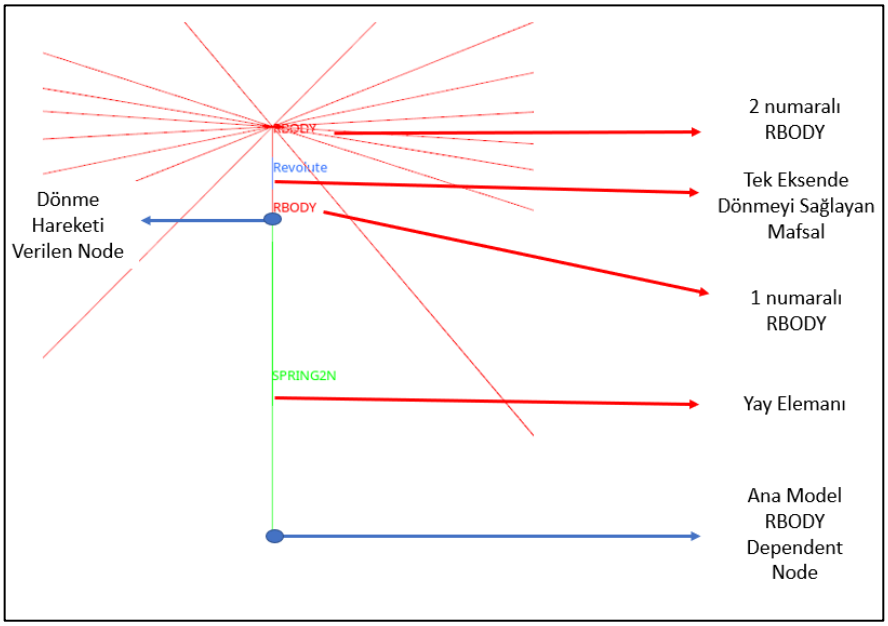
Dengeleme halkasının dönerken, aynı zamanda da oluşturulan dengesiz yük sebebiyle düşey eksen ile belli bir salınım yapması amacıyla; yay elemanın çekme ve kayma eksenlerindeki katılıkları 1000000 N/mm, sönümleri 1 Ns/mm, burulma eksenindeki katılığı 1000000000000 N/mm , sönümü 25000 Ns/mm ve eğilme eksenlerindeki katılıkları 1000000 N/mm , sönümleri 25000 Ns/mm olarak belirlemiştir. Bölüm 3.2.2’ de hazırlanan modele göre sadece eğilmeye izin verecek bir katılık değişimi yapılmıştır. Bu sayede yay, çekmeye ve burulmalara karşı oldukça rijit, eğilmeye karşı da belirlenen ölçüde izin verecek şekilde davranacaktır. Yani, eğilmelere izin verecek katılık değerleri düşürülmüştür. Eğilmeye izin verecek katılık değeri; çamaşır makinesi askı yaylarının esnemediği durumda, dengesiz yük sebebiyle tamburun kazan içerisinde yapabileceği en büyük açı değerine göre belirlenmiştir. Bu tanımlamanın yapılabilmesi için program ara yüzünde yine P13_SPR_BEAM özellikteki 1D boyuttaki eleman kullanılıp, elemanın ağırlığı sebebiyle modelin etkilenmemesi amacıyla bu elemanın ağırlığı 1gr belirlenmiştir.

Oluşturulan modelin deneysellerle doğrulanabilmesi açısından, bu kısma kadar anlatılan modelin bir tablaya ya da bir zemine bağlanması gerekmektedir. Basit bir şekilde doğrulamanın planlandığı model hakkında bilgi vermek gerekirse, dengeleme halkası modelde ve gerçek tasarımda olduğu gibi yatay

konumlandırılacaktır. Motor, şekil 3.29' da görüldüğü üzere, U ayak vasıtası ile dikey konumlandırılacaktır. U ayak, tabla1' e bağlanacak, tabla1' de simetrik olarak konumlandırılan dört tane sönüm elemanı (yay, amortisör, kauçuk sönüm elemanı) ile tabla 2' ye monte edilecektir. Tabla 2 altında ise simetrik olarak bulunan dört tane ayak ile zemine yerleştirilecektir. U ayak üzerine konumlandırılabilecek ivme ölçerle ölçülebilecek titreşimler sayesinde modelin doğrulaması yapılabilir. Bu tez kapsamında doğrulama aşamasına yer verilmemiş olsa da, modelin gerçek bir deney düzeneğine nasıl çevrilebileceğinin bilgisinin verilmesi açısından açıklamalarda bulunulmuş ve model bu yönde geliştirilmiştir.

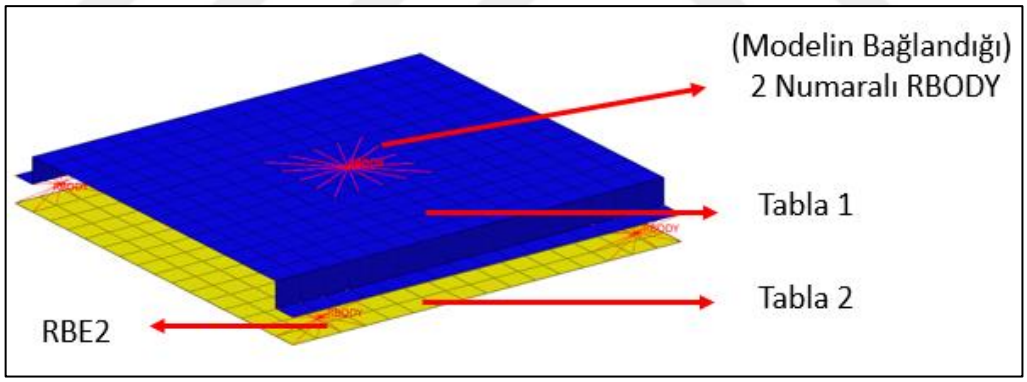


Şekil 3.29 Oluşturulan modelin doğrulanabileceği deney düzeneğinin CAD ortamında çizimi



Şekil 3.30 Oluşturulan modelin sabit bir zemine bağlanması

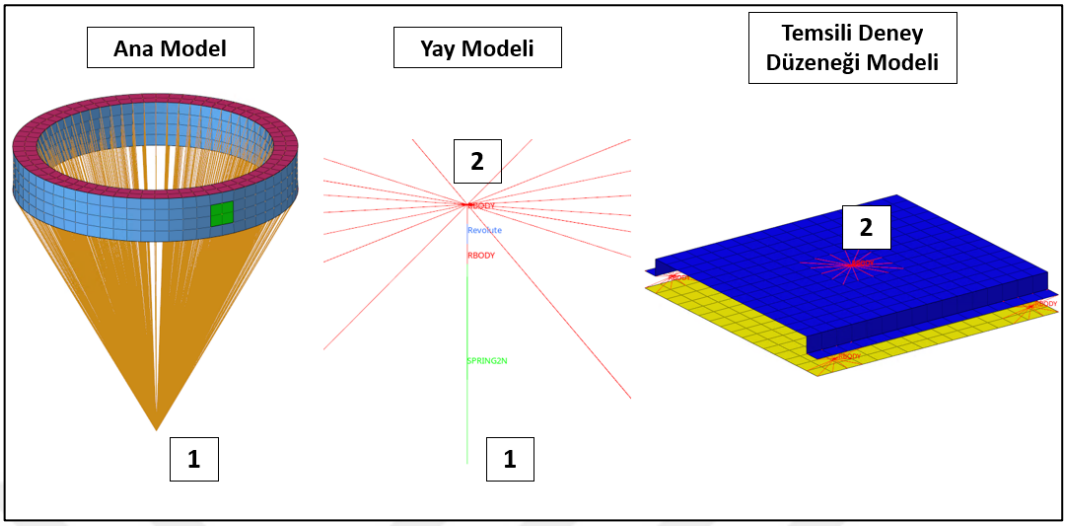
Modelin gerçek bir deney düzeneğine dönüştürülebilmesi amacıyla tek bir eksende dönmeye izin verilen bir mafsal ya da bir eleman eklenmesine karar verilmiştir. Şekil 3.30' da görülebileceği üzere, modele tek eksen etrafında dönmeyi sağlayacak "Revolute" olarak isimlendirilen bir mafsal eklenmiştir. Bu eleman yay eleman özelliğini taşımaktadır. Ancak rijit olarak modele eklenmiştir. Bu özelliğin katılabilmesi amacıyla, yaya ara yüzde P45_KJOINT2 özelliği kazandırılmıştır. Bu özellik iki rijit elemanın birleştirilmesini desteklemektedir. Bu yüzden eğilmeyi sağlayacak yay ile arasında RBODY elaman kullanılmıştır. Yine tüm modelin bir yere bağlanabilmesi amacıyla da RBODY eleman kullanılmıştır. Modelin sanal ortamda bir yere bağlandığını temsilen Şekil 3.29' de gösterilen 800 mm x 800 mm x 20 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklindeki tabla 2 ve tabla 1' i temsilen, şekil 3.23' te gösterilen 8 mm profil kalınlığına sahip parça kullanılmıştır. Tabla 1 ve tabla 2 arasında kullanılması planlanan, sönüm – yay elemanları analiz süresinin daha da uzamaması açısından rijit olarak modellenmiştir. Yani tabla 1 ve tabla 2 bir boyuttaki RBE2 elemanlar ile birbirine rijit olarak bağlanmıştır.



Şekil 3.11 Modelin bağlandığı zemin

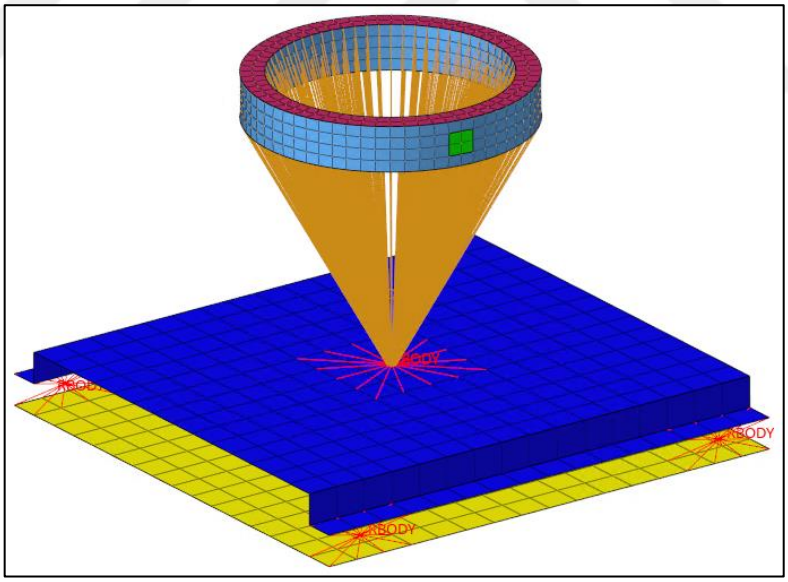
Dijital ortamda modele eklenmiş tabla 1 ve tabla 2 'nin tez kapsamında deneysel karşılığı olmadığından çok fazla detay verilmeyecektir. Ancak deney ortamında ayaklar üzerinde bulunan tabla 2' nin hiç hareket etmemesi planlandığından, ayaklar modele dahil edilmeyip tabla 2' yi oluşturan tüm elemanların düğüm noktalarına 6 eksende hareket sınır koşulu verilmiştir. Oluşturulan tabla 1 ve tabla 2' nin modellenmesinde, analiz sürelerin uzamaması açısından eleman boyutları 50 mm olan quad 4 özellikteki kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kısaca özetlenecek olursa, şekil 3.32' te gösterilen farklı modeller üzerinde aynı numaralar ile

tanımlanmış bağlantı noktaları bir araya getirilerek model tamamlanmış ve şekil 3.33' te gösterildiği halini almıştır.



Şekil 3.32 Oluşturulan modellerin birbirine bağlantı şeması

Bölüm 4' te bulguları açıklanacak olan analizler, şekil 3.33' te gösterilen modelde bulunan dengeleme halkası üzerinde değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir.



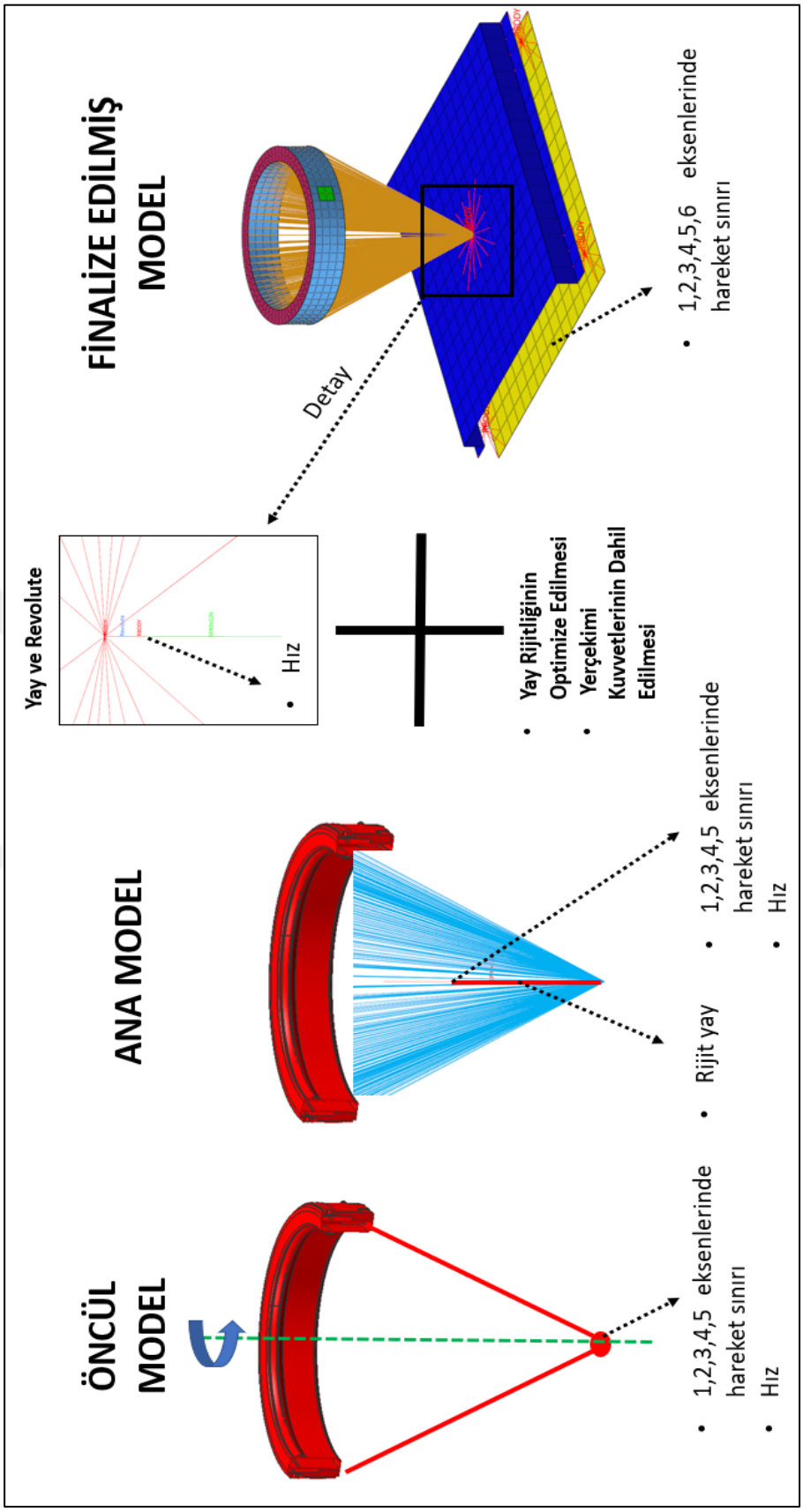
Şekil 3.33 Analizlerin gerçekleştirileceği finalize model

Kurgulanan analiz senaryosunda yerçekimi kuvvetleri de modele dahil edilmiş olup yay stifness değerlerinin bu duruma göre optimize edilmiştir. Bu durumda ağırlıklardan ötürü; yayın eğilme eksenlerindeki katılık değerlerine ek olarak çekme ve burulma yönündeki yayın katılık değerlerinin de etkili olacağı unutulmamalıdır. Çekme ve burulma yönlerinde rijit olarak tanımlanmış bir yaya,

olayın fiziği gereği bir kuvvet uygulandığından enerji hatalarının da biraz artması dikkate alınmıştır.

Oluşturulan finalize modelde; yay, RBODY eleman, dengeleme halkası ve dengesiz yükten oluşan ana model, yaylar üzerinde bulunan tüm hareket sınır koşulları kaldırılarak, rijit elemanlar ve tek eksende dönmeye izin veren mafsal ile tablalara sabitlenmiştir. Dönme hareketinin verildiği node değiştirilmemiş olup, yay elaman ile Şekil 3.30' da gösterilen 1 numaralı RBODY elaman arasındaki düğüm noktasıdır.

Şekil 3.34' te geliştirilen modelin aşamaları özetlenmiştir.



Şekil 3.34 Oluşturulan modelin gelişim aşamaları

3.2.5 Dengeleme İyileştirme Amacıyla Gerçekleştirilen Analiz Senaryoları

Bu bölümde; dengeleme halkası hareketinin simülasyonu için oluşturulan analiz metoduna göre, dengeleme halkasının dengeleme kapasitesini arttırmak amacıyla farklı analiz senaryoları kurgulanmıştır. Dengelemeye etki eden; sıvı yoğunluğu, sıvı miktarı, tasarımsal yapı gibi ana parametrelerin yanında interpolasyonlu tanecik metodu gereği oluşturulan tanecik sayısı, tanecik oluşturma metodu gibi parametrelerin de analiz sonuçlarına ne oranda etki ettiğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

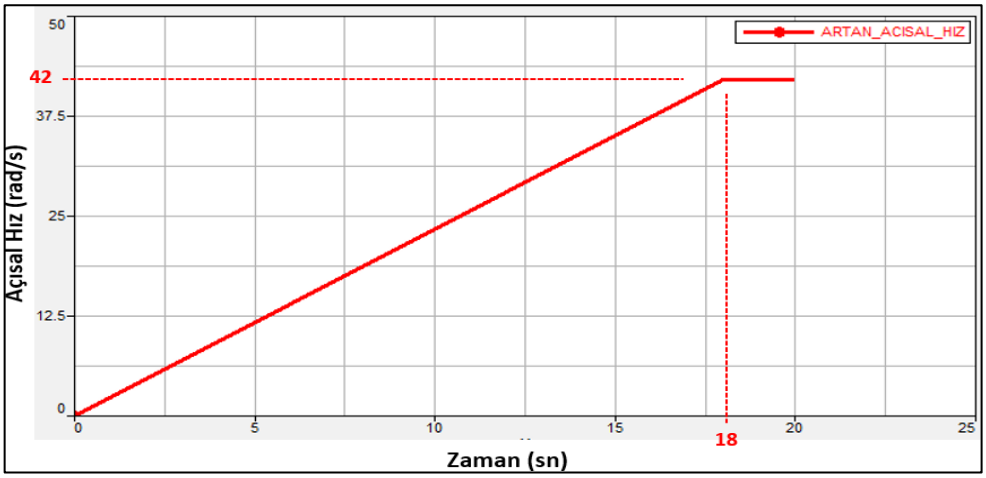
Sıvının viskozitesi ve yoğunluğu, dengeleme halkasının ağırlığı, hacmi, tambur üzerindeki konumu, sayısı gibi parametreler de dengeleme halkasının dengeleme kapasitesine etki edecektir. Ayrıca kazan içinde oluşan dengesiz yükün de konumunun değişmediği kabul edilmiştir. Dengesiz yükün konumunun değişmesi durumunda da dengeleme performansının değişeceği unutulmamalıdır.

Örneğin; sıvı yoğunluğunu ele aldığımızda, Bölüm 2.4' te yer alan teorik içeriğe dayanarak, yoğunluk arttıkça dengeleme kapasitesinin arttığı söylenilebilir. Hatta bu sebeple piyasada yer alan dengeleme halkalarının içinde gliserin gibi yüksek yoğunluklu sıvılar kullanılmaktadır. Tabi bu kısımda, dengeleme kapasitesini arttırmak amacıyla yoğunluğu değiştirirken viskozitenin de genellikle değişeceği göz önüne alınmalıdır. Bu sebeple uygulamalarda ve literatürde, farklı sıvıların farklı miktarlarda karıştırılması ile istenilen özelliklerin elde edildiği örnekler de yer almaktadır [3].

Aşağıdaki başlıklarda, kurgulanan analiz senaryoları kapsamında ele alınan parametreler için ayrı birer alt başlık oluşturulmuştur. Bu başlıklardan da görülebileceği üzere; tüm parametreler ele alınmayıp, dengeleme halkasının konumu yani tambur üzerine monte edileceği yeri ve sayısı sabit tutulup daha çok tasarımsal değişiklikler üzerine ve sıvı miktarı ile ilgili değişiklikler üzerine odaklanılmıştır. Ek olarak; direk dengeleme kapasitesine etkisi olmasa da, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından önemli olan tanecik sayısının etkisinin incelenmesi ve tanecik oluşturma metodunun incelenmesi de bu başlık altında gerçekleştirilmiştir. Kısaca dengelemeye etki eden iki farklı parametre ve analizlerin doğruluğuna etki eden iki farklı parametre ele alınmıştır denilebilir.

Oluşturulan tüm senaryolar; analiz metodolojisinin oluşturulduğu ve modelin iyileştirildiği, daha önceki bölümlerde detaylı anlatılan modeller üzerinden türetilmiştir. Referans model olarak alınan model, finalize edilmiş modelde dengeleme halkası içerisinde hiçbir feder benzeri yapı olmayan model olarak düşünülebilir. Bu modelde; sıvı miktarında, sıvı oluşturma metodunda ve yapısal anlamda değişiklikler yapılarak diğer senaryolar oluşturulmuştur.

Tüm senaryolarda; Şekil 3.35' te gösterilmiş olan açısal hız grafiği kullanılmıştır. Bu hız grafiği ile; 0 - 400 devir/dk arasındaki çalışma koşullarında, dengeleme halkasının belirlenen başlıklardaki performansı ve dengelemeye etkisi incelenmiştir. Düşük devirlerde, dengeleme halkasının dengelemeyi olumsuz yönde etkilediği ve etkili dengelemenin 350 devir/dk dolaylarında başladığı yönünde deneyimsel ve tecrübesel bilgiler sebebiyle bu çalışma aralığı seçilmiştir [33]. Ayrıca motor sürüş kısmını yani belirli devirler arasındaki ivme değişimini basitleştirmek amacıyla, ortalama bir ivme belirlenip 0-18 sn arasında bu ortalama ivme ile düzgün hızlanan açısal hız modele etki etmiştir. 18-20 sn aralığında ise, özel olarak 400 devir/dk' da dengeleme halkasının dengelemeye olan etkisi incelenmek istenmiştir. Şekil 3.35' te gösterilen hız grafiği finalize modelde, hız tanımlamasının tapıldığı düğüm noktasından modele etki etmiştir.



Şekil 3.35 Dengeleme iyileştirme amacıyla gerçekleştirilen analizlerde tanımlanan açısal hız grafiği

3.2.5.1 Sıvı Miktarının Dengelemeye Etkisi

En basit anlamda; dengeleme halkası içerisinde, dengesiz yük ağırlığında bir sıvı miktarının olması, dengelemenin büyük oranda gerçekleştirilebileceği anlamına gelebilir. Ancak çamaşır makinesi çalışma koşullarında dengesiz yükün; yüklemeye, çalışma devrine, çamaşır çeşidine göre değişmesi ve değişen dengesiz yük karşısında dengeleme halkası içerisindeki sıvının sabit kalmaması, dengesiz yük kadar karşı ağırlığın dengesizliği ortadan büyük oranda kaldırabileceği görüşünü ortadan kaldırmaktadır. Yani, gerçek koşullarda hiçbir zaman dengesiz yük sabit değildir. Mevcut dengeleme halkası tasarımlarında ise, buna karşılık dengeleme için kullanılan sıvı miktarı sabittir. Farklı tasarımlarla, dengeleme halkası içerisindeki sıvının miktarının değiştirilebileceği düşünülebilir. Ancak o zaman da maliyet gibi başka problemler ortaya çıkabilir. Bu yüzden, sabit bir dengesiz yük kabulünde, içinde sabit miktarda sıvı bulunan dengeleme halkasının sıvı miktarı optimize edilebilir. Dengesiz yükten daha az ağırlıkta bir sıvı miktarı, dengelemeye yeterli olmuyorken dengesiz yükten daha çok ağırlıkta bulunan sıvı miktarı ise ekstra bir dengesizlik durumu ortaya çıkarabilir. Bu anlamda, farklı sıvı miktarları için senaryolar oluşturulup dengeleme yönündeki avantaj-dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Hatırlanacağı üzere, Altair Hypermesh ticari programının Radioss ön hazırlık (pre-processing) ara yüzünde SPH tanecikleri oluştururken; basit kübik yapıda ve yüzey merkezli kübik yapıda tanecikler konumlandırılarak iki farklı şekilde tanecikler oluşturulmaktaydı. Oluşturulan finalize modelde; basit kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile dengeleme halkasının %10' u, %15' i, %30' u ve %60' ı su ile dolu olacak şekilde, yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile ise dengeleme halkasının %15' i, %30' u ve %60' ı su ile dolacak şekilde farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu sayede dengeleme halkasının sıvı doluluk miktarının dengelemeye olan etkisi karşılaştırılırken, aynı doluluk oranı için basit kübik yapılı ve yüzey merkezli kübik yapılı tanecik oluşturma yöntemleri için elde edilen sonuçlar da karşılaştırılabilecektir. Tablo 3.9' da dengeleme halkası su doluluk oranı ve tanecik oluşturma metoduna göre elde edilen tanecik sayıları gösterilmiştir.

Tablo 3.9 Dengeleme halkası su doluluk oranı ve tanecik oluşturma metoduna göre elde edilen tanecik sayısı

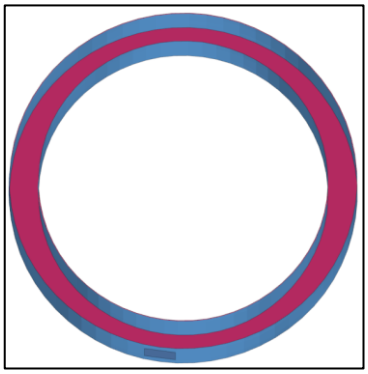
Dengeleme Halkası Su Doluluk Oranı	Tanecik Oluşturma Metoduna Göre Tanecik Sayısı	
	Basit Kübik	Yüzey Merkezli Kübik
%10	2448	-
%15	3671	2884
%30	7342	7525
%60	14684	16549

3.2.5.2 Konstrüktif Yapıdaki Değişikliklerin Dengelemeye Etkisi

Konstrüktif yapının dengelemeye olan etkisinin incelenmesi amacıyla, sadece silindirik bir halka şeklinde kabul edilmiş basit dengeleme halkasının hacminin %30' u su ile dolu olacak senaryo referans kabul edilmiştir. Bu dengeleme halkasının iç yapısına, rakip ürün incelemelerinde, patentlerde ya da literatürde görülen yapısal iç yapılar eklenmiştir. Oluşturulan senaryolar Tablo 3.10' da gösterilmiştir. Oluşturulan senaryolar kısaca özetlenecek olursa, referans olarak kullanılan ve dengeleme halkası içi tamamen boş olan tasarım Şekil 3.36' te gösterilmiştir. Gerek Şekil 3.36' da gerekse de diğer senaryolarda gösterilen tasarımlar ağ yapısı üzerinden gösterilmiştir. Yani, tasarımlar referans model üzerinde ağ yapısında değişiklikler yapılarak türetilmiştir. 2D olarak görünen elemanların kabuk yani shell eleman olduğu, şekiller incelenirken göz önüne alınmalıdır. Tasarımlara yapılan eklemeler mevcut kalınlıkları koruyacak şekilde yapılmıştır.

Tablo 3.10 Dengeleme halkasının tasarımsal değişikliğine göre türetilen senaryolar

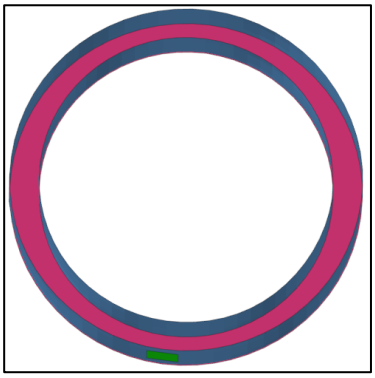
	Senaryo No	Tasarım Değişikliği İle Oluşturulan Senaryolar
Sıvısız	Senaryo 0.1	Tasarımsal olarak içi boş – Dengesiz yüksüz
	Senaryo 0.2	Tasarımsal olarak içi boş – Dengesiz yüklü
Dengesiz Yüklü ve %30 Doluluk Oranı	Referans	Tasarımsal olarak içi boş – Dengesiz yüklü
	Senaryo 1	İki kanallı
	Senaryo 2	Dıştan içe sekiz federli
	Senaryo 3	Kepçe şeklinde dıştan içe sekiz federli
	Senaryo 4	Sekiz bölmeli
	Senaryo 5	On altı bölmeli (Senaryo 1 + Senaryo 4)
	Senaryo 6	İki kanallı ve 8' er adet L şeklinde federli
	Senaryo 7	İki kanallı ve 12' şer adet L şeklinde federli



Şekil 3.36 Dengeleme halkasının içinin tamamen boş olduğu dengesiz yüksüz tasarım

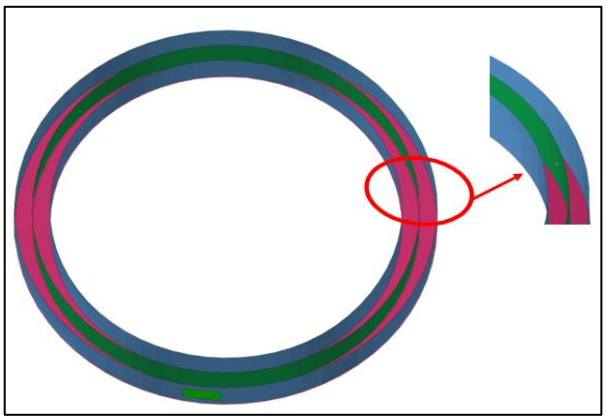
Bu başlık altında gerçekleştirilen analizlerde öncelikle Şekil 3.36' da gösterilen dengesiz yükün ve suyun olmadığı senaryo, sonrasında ise sadece dengesiz yükün olduğu senaryo incelenmiştir. Böylece dengesiz yükün harekete etkisi gözlenmiştir. Daha sonra ise, dengesiz yük içeren dengeleme halkası modeline, önceki paragrafta da belirtildiği üzere %30 doluluk sağlayacak şekilde su

konulmuş ve tasarımsal anlamda türetilen senaryolar bu durum ile karşılaştırılmıştır.



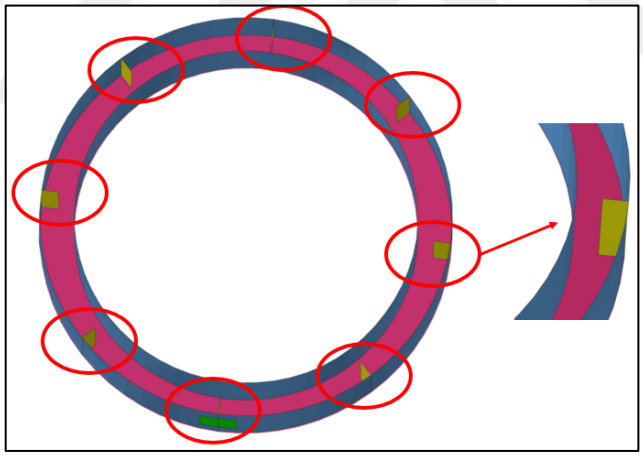
Şekil 3.37 Dengeleme halkasının içinin tamamen boş olduğu tasarım

Dengeleme halkasının, yapısal olarak suyun hidrodinamik kuvvetlerinden bir zarar göreceği öngörülmemektedir. Bu yüzden de aslında, dengeleme halkası analizler sırasında rijitleştirilmiştir. Yani, bu tasarımlar türetilirken oluşturulan feder vb. yapıların, yapısal dayanımdan ziyade dengeleme halkasının içerisinde bulunan ve dengeleme halkasının %30 oranında dolmasını sağlayan suyun, dengeleme halkasının hareketi sırasında yönlendirmesini sağlaması amaçlanmıştır. Dolayısıyla eklenen yapıların kalınlıkları, kalıp açıları, uzunlukları ya da tasarımsal tolerans gibi kriterleri üzerinde durulmayıp sadece suyun hareketini yönlendirecek şekilde ağ yapısı üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu da aslında bize, tasarıma eklenecek olan benzer yapılar hakkında bir öngörüde bulunmamızı sağlayacaktır. Tasarımda yapılan değişiklikler sırasıyla açıklanmıştır.



Şekil 3.38 Dengeleme halkasının iki kanallı olduğu tasarım

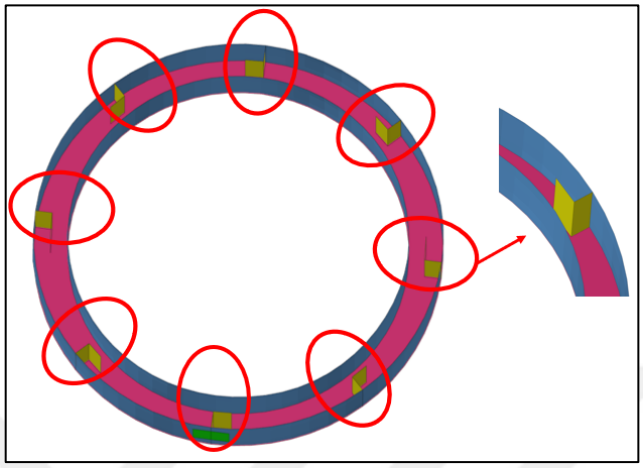
Tamburun kendi merkez ekseni etrafındaki dönme hareketi sonucu; dengeleme halkası içerisindeki sıvı, merkezcil kuvvetlerin etkisi ile dengeleme halkasının dış çapı oluşturan çeperlerine doğru hareket etmektedir. Dolayısıyla, belli devirlerden sonra dengeleme halkasının iç çapını oluşturan çeperinde ya da dengeleme halkasının içindeki kanalın ortalarında sıvı kalmamaktadır. Bu da aslında başka bir dengesizlik durumunu ortaya çıkarmaktadır. Dengeleme halkasının çalışma prensibi gereği; oluşan bu dengesizliğin, çamaşırlardan oluşan dengesizliği giderebileceği düşünülebilir. Ancak uygun olmayan devir sayılarında ve uygun olmayan sıvı miktarında ekstra dengesizlik durumunun da oluştuğu gözlenmiştir. Bu yüzden sıvının ağırlığının, dengeleme halkasının orta bölgelerinde de dağılmasını sağlamak amacıyla iç çap ile dış çapı oluşturan yüzeyler arasında tam ortaya, yeni bir yüzey oluşturularak dengeleme halkasının iki kanallı olması sağlanmıştır. Bu tasarım sonuçlar yorumlanırken senaryo 1 olarak isimlendirilmiştir ve Şekil 3.38' de bu tasarım görülmektedir. Rakip ürünler incelendiğinde bu kanal sayılarının arttırıldığı tasarımlar da gözlenmiştir.



Şekil 3.39 Dengeleme halkasının içerisinde dıştan içe sekiz federin olduğu tasarım

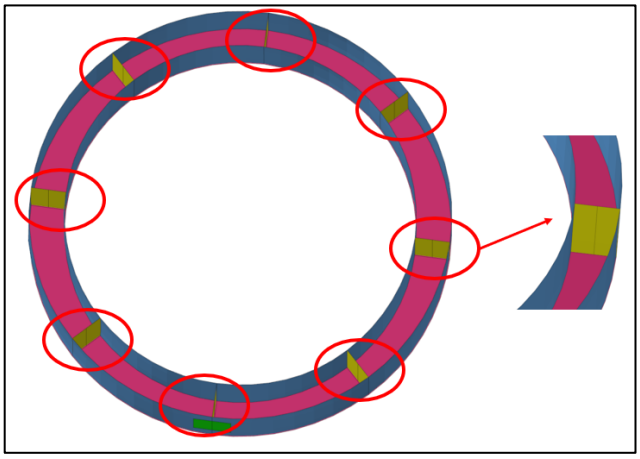
Çamaşır makinesinin hareketi sırasında; dengeleme halkası içerisindeki suyun/ sıvının merkezcil kuvvetler etkisi sebebiyle dengeleme halkasının dış çapını oluşturan yüzeye doğru hareket edeceği daha önceki paragrafta açıklanmıştı. Dengeleme halkasının dış çapını oluşturan yüzeyde toplanan sıvı da, çamaşır makinesinin artan dönme hızı ile birlikte dengeleme halkası içerisinde dönmeye başlayacaktır. Bu hareketin kısmi olarak önlenebilmesi açısından Şekil 3.39' da gösterildiği üzere 45 derecelik dilimlerde sekiz adet feder yapısı oluşturulmuştur.

Federlerin uzunluğu, dengeleme halkasının içerisinde suyun hareket ettiği kanalın yarısını kapatacak miktardadır. Federlerin yüksekliği ise, dengeleme halkasının yüksekliğine eşittir. Bu tasarım sonuçlar yorumlanırken senaryo 2 olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.40 Dengeleme halkasının içerisinde dıştan içe kepçe şeklinde sekiz federin olduğu tasarım

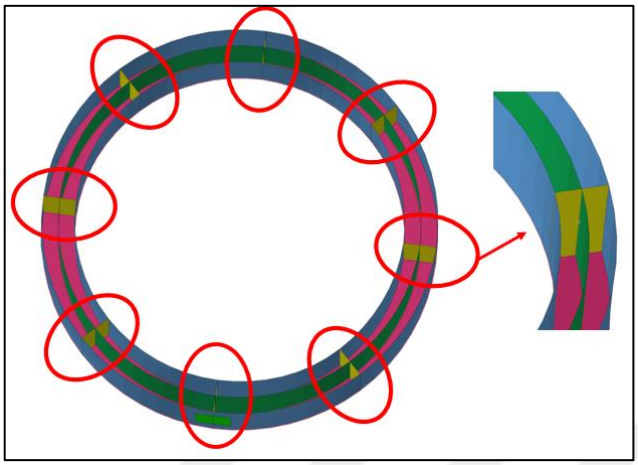
Senaryo 2' deki tasarıma ek olarak; federlerin uçlarına federlere dik olacak şekilde federlerin uzunluğunda ek bir feder yapısı daha eklenmiştir. Bu şekilde federlerin kepçe yapısını alması sağlanmıştır. Bu tasarımda dikkat edilen kısım, dönme hareketi sonucu oluşan sıvı hareketinin kepçe yapısının içini dolduracak şekilde tasarlanmasıdır. Oluşan tasarım Şekil 3.40' ta gösterilmiştir.



Şekil 3.41 Dengeleme halkasının içerisinde sekiz ayrı bölmenin olduğu tasarım

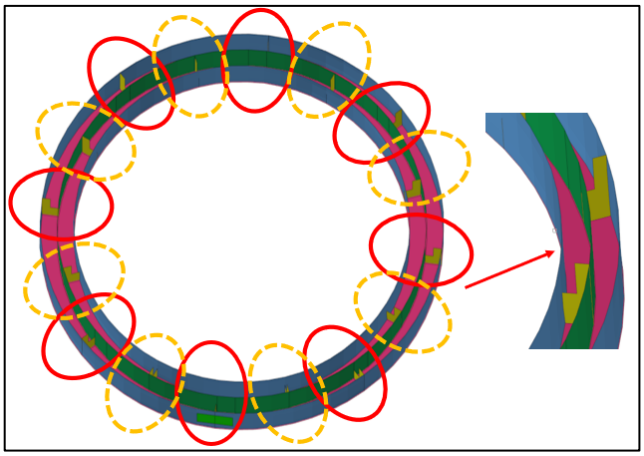
Senaryo 2' nin tasarımı anlatılırken bahsedilen, sıvının da dış çapı oluşturan yüzeye temas ederek dönmesi hareketini oldukça sınırlandırmak amacıyla, 45

derecelik dilimler şeklinde oluşturulan sekiz ayrı bölmeye sıvı konulmuştur. Oluşan tasarım Şekil 3.41' de gösterilmiştir. Elde edilen tasarım senaryo 4 olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.42 Dengeleme halkasının içerisinde on altı ayrı bölmenin olduğu tasarım

Sıvının dengeleme halkası içerisindeki serbest hareketini oldukça sınırlandırmak amacıyla, senaryo 1' de anlatılan iki kanallı tasarım ile senaryo 4' te anlatılan sekiz bölmeli tasarım birleştirilmiştir. Ortaya on altı bölmeli bir tasarım ortaya çıkmıştır. Bu tasarım senaryo 5 olarak isimlendirilmiştir ve Şekil 3.42' de gösterilmiştir.

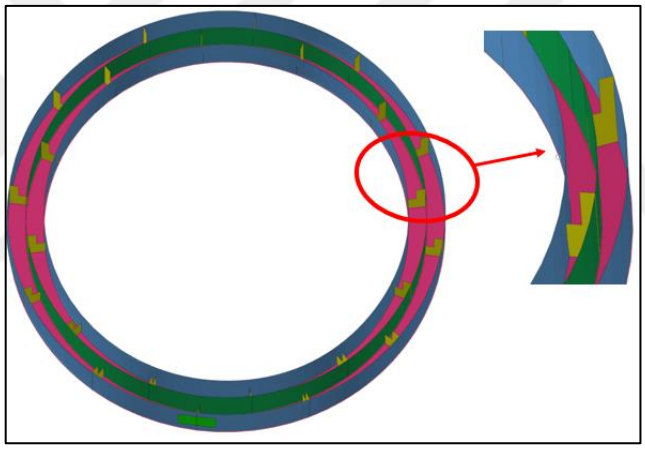


Şekil 3.43 Dengeleme halkasının içerisinde iki kanal ve kanallarda sekizer L şeklinde feder yapısı bulunan tasarım

Senaryo 5' te anlatılan on altı bölmeli tasarım farklılaştırılarak yeni bir senaryo türetilmiştir. Dengeleme halkasının feder yapılarının kesit iz düşümü L şeklinde olacak şekilde federler ile değiştirilmiştir. Dış kanalda bulunan feder yapılarının konumları sabit tutularak, iç kanalda bulunan feder yapıları konumları merkez

etrafında 22,5 derece döndürülerek ötelenmiştir. L şeklinde feder yapısı ile sıvının bazı devir aralıklarında dengeleme halkası içerisinde hareketine izin verilirken üst devir aralıklarında ise sıvının hareketi engellenmeye çalışılmıştır. Oluşturulan senaryo, senaryo 6 olarak isimlendirilmiş ve Şekil 3.43 'te gösterilmiştir.

Senaryo 7' de oluşturulan tasarım senaryo 6' da oluşturulan tasarıma oldukça benzemektedir. Sadece L şeklindeki feder sayısı arttırılmıştır. Dengeleme halkası içerisinde bulunan iki kanala da 30' ar derecelik açılarla 12' şer adet L şeklinde feder yerleştirilmiştir. Senaryo 6' dakine benzer bir şekilde dış kanal ile iç kanal içerisine yerleştirilen L federler asimetrik konumlandırılmıştır. Yani bu tasarımda dış kanalda bulunan L federler ile iç kanalda bulunan L federler arasında 15' er derecelik açı farklılığı bulunmaktadır. Elde edilen tasarım Şekil 3.44' de gösterilmiştir.



Şekil 3.44 Dengeleme halkasının içerisinde iki kanal ve kanallarda on ikişer L şeklinde feder yapısı bulunan tasarım

3.2.5.3 Tanecik Sayısının Dengelemeye Etkisi

Tek bir parametreyi değiştirerek, tanecik sayısının elde edilen analiz sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek amacıyla; dengeleme halkasının %30 su ile dolu olduğu durum referans alınmıştır. Bu durum için, basit kübik yapısı ile tanecik oluşturma metodunda tanecikler arası nominal mesafeyi belirleyen h değeri için sırasıyla h = 5 mm, h = 10 mm, h = 15 mm ve h = 20 mm için senaryolar oluşturulmuştur. Tanecikler arası mesafeyi belirleyen h değeri arttıkça yaratılan tanecik sayısı düşerken, taneciklerin ağırlıkları artacaktır. Tablo 3.11' de farklı h değerleri için elde edilen tanecik sayıları gösterilmiştir. H parametresine bağlı olarak değişen

tanecik sayısı için, analizlerin sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılması ve tanecik sayısının analiz sonuçlarına etkisinin gözlenmesi hedeflenmiştir.

Tablo 3.11 Farklı h değerleri için elde edilen tanecik sayıları

h değeri (mm)	Tanecik Sayısı	Taneciklerin Ağırlığına Bağlı Olarak Toplam Su Kütlesi (kg)
5	7342	0,9375
10	979	1,137
15	236	1,071
20	102	1,273

3.2.5.4 Tanecik Oluşturma Metodunun Dengelemeye Etkisi

Gerek teori kısmının anlatıldığı Bölüm 2.4' te gerekse de sıvı miktarının dengelemeye olan etkisinin araştırıldığı Bölüm 3.2.5.1' de detaylı anlatıldığı üzere tanecik oluşturma metodunun basit kübik ve yüzey merkezli kübik yapıda olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Başlangıç durumunda, taneciklerin iki farklı konumlandırılması sonucu elde edilen sonuçların kıyaslanması amaçlanmıştır.

Bu başlık altında oluşturulan analiz senaryoları, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelenmesi için oluşturulan analiz senaryoları ile aynıdır. Bu senaryolar Tablo 3.9' da görülmektedir. Elde edilen sonuçlar dengeleme halkasının doluluk oranına göre kıyaslanarak da değerlendirilecektir. Bu oranlar oluşturulurken hacme göre; basit kübik ve yüzey merkezli kübik yapıları için her bir yüzde oran senaryosunda sıvı ağırlıklarının mümkün oldukça sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Ancak tanecik ağırlıkları değiştiğinden toplam sıvı ağırlıklarında küçük farklılıklar olabilir.

4
BULGULAR

4.1 Analiz Değerlendirme Sürecinde Dikkat Edilen Hususlar

Gerçekleştirilen tüm analizleri kurgulama ve değerlendirme süreçlerinde aşağıdaki unsurlara dikkat edilmiştir.

- Birbirleri ile karşılaştırma yapılacak tüm senaryolarda, malzeme özellikleri, malzeme modelleri, sınır şartları, hareket koşulları, dengesiz yükün ağırlığı gibi unsurlar birbiri ile aynıdır.
- Oluşturulan komponentler, olayın fiziğine uygun hareket etmiştir.
- Tüm analizler 20 sn çözdürülmüş, 0,2 sn aralıklarla video dosyaları oluşturulmuştur.
- Karşılaştırılan tüm senaryolarda, aynı mass scale, aynı zaman adımı kullanılmıştır.
- Nodal time step (mass scale) kontrolü gerçekleştirildiğinden, ağırlık artışının toplam ağırlığın %3' ünü aşmamasına,
- Analiz süresince oluşan enerji hatalarının % ± (20 -25) aralığında olmasına,
- Analiz süresinin yeterli olmasına (Enerji eğrileri stabil hale gelmiştir.),
- Oluşan hourglass enerjinin toplam enerjinin %10' undan az olmasına,
- Toplam enerjinin değişimine dikkat edilmiştir.
- İç enerji ve kinetik enerji eğrileri beklenilen davranışı göstermiştir.

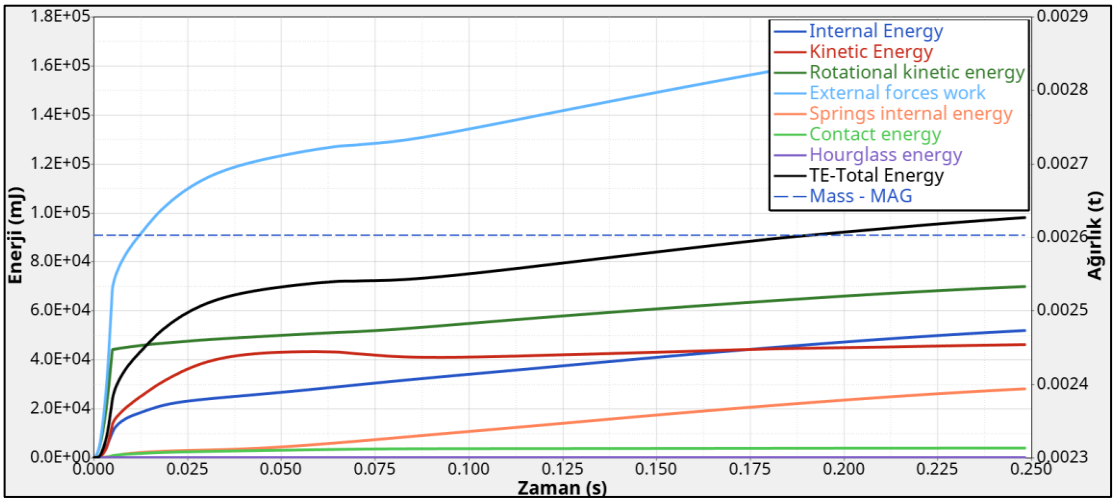
Şekil 4.1' de örnek bir senaryo için enerji grafikleri gösterilmiştir. Bu grafikte, toplam ağırlığın % 3' ünden daha düşük seviyede bir ağırlık değişimi olduğu, oluşturulan modelin fiziği gereği artan dönme hızı ile birlikte dönme kinetik enerjisinin arttığı, eğilme kuvvetlerinin artması sonucu yay iç enerjisinin arttığı, dengeleme halkasının rijit eleman ile rijitleştirilmesi sebebiyle deformasyon olmaması ve bundan dolayı da hourglass enerjinin mümkün oldukça küçük olduğu gözlenmiştir. Artan dönme ve normal kinetik enerjiden ötürü, toplam enerji

artmaktadır. Ayrıca devamlı olarak, model dönme hareketine maruz bırakıldığından "external forces work" artmaktadır. Bununla birlikte dönme kinetik enerjisi de artmaktadır. Bu da aslında analiz süresince bazı dönemlerde enerji hatalarının yükselmesine sebep olmaktadır. Yani enerji hatalarının ± (10 – 15) aralığından ± (20 – 25) aralığına çıkması beklenen bir durumdur. Bu gibi durumlarda yüksek enerji hataları kabul edilebilir [32].

Ayrıca enerji hatalarının ± (10 – 15) aralığının dışına çıkmasına, yayın rijit olduğu eksenlerde gelen kuvvetler, sadece tek eksende dönmeye izin veren mafsala diğer eksenlerde gelen kuvvetler ve taneciklerin yüksek hızlar sebebiyle kazandığı iç enerjilerin de neden olduğu söylenebilir.

$$\%\, Hata = 100\left(\frac{E_k + E_k^r + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^r + E_{i,1} + E_{wk} - E_{wk,1}} - 1\right) \tag{4.1}$$

(4.1) eşitliğinde E_k anlık öteleme kinetik enerjiyi, E_k^r anlık dönme kinetik enerjisini, E_i iç enerjiyi, E_{wk} dış kuvvetlerin yaptığı işi, $E_{,1}$ ise analiz başlangıcındaki enerjiyi göstermektedir. Enerji hatalarının pozitif olması sisteme bir enerji girişi olduğunu gösterirken, negatif enerji hatası sistemin enerji kaybettiği anlamına gelir. Bu denklem yardımıyla da analiz süresince oluşan enerji hataları yorumlanabilir.



Şekil 4.1 Gerçekleştirilen analizlerden, örnek olarak seçilen bir senaryo için enerji grafiği

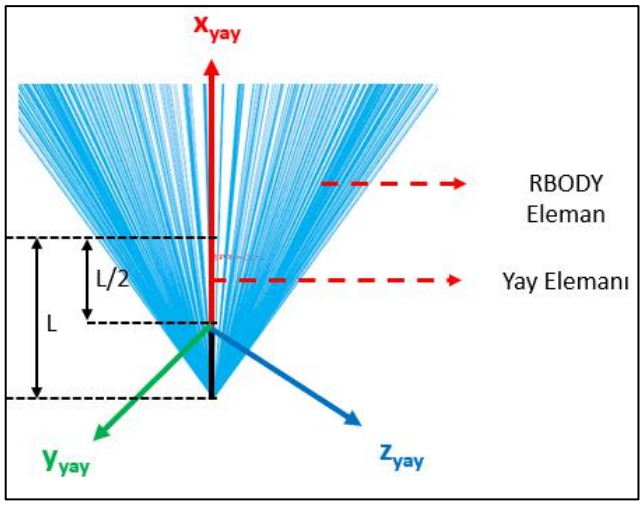
4.2 Analiz Sonuçları

Bu bölümde; 3. bölümde anlatılan, gerek ön doğrulama gerekse de dengeleme iyileştirme analiz senaryolarının sonuçları açıklanıp yorumlanacaktır.

4.2.1 Dengeleme Halkası Analizlerinin Analitik Ön Doğrulama Sonuçları

Bölüm 3.2.3' te de anlatıldığı üzere; ana model olarak isimlendirilen; dengeleme halkası, RBODY eleman, yay elemanı ve belirlenen sınır koşullarından oluşan model üzerinde öncül analizler yapılarak kurgulanan senaryoların fizik yasaları ile uyumuna yönelik yorumda bulunulmuştur. Bu amaçla, elde edilen sonuçlar, grafiksel açıklanmış ve basit analitik hesaplarla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan senaryolardan elde edilen sonuçlar sırasıyla açıklanmıştır.

Analiz sonuçlarında okunan eksenel kuvvet ve momentler, modelde konumlandırılan yayın eksenel takımına göre hesaplanmaktadır. Buna göre; yayın uzunluğunun, yayın sahip olduğu lokal eksen takımının x ekseninde tanımlandığı ve orijin noktasının da yayın uzunluğunun yarısında konumlandığı kabul edilmiştir. Yayın lokal olarak sahip olduğu eksen takımı Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Bu şekle göre, yayın L uzunluğunun tanımlandığı eksen x_{yay} ekseni olarak, orijinin ise L/2 yay uzunluğunda tanımlandığı söylenebilir. Yayın ya da modelin kendi etrafında döndüğü durumlarda, yayın sahip olduğu lokal eksen takımı da dönmektedir. Oluşturulan senaryolarda; hareket öncesi ilk durum için, global eksen takımının eksenleri ile yayın lokal y ya da z eksenleri aynı doğrultuda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Altair Hypermesh programının Radioss çözücüsü için olan ara yüzünde verilen sınır koşulları ise global eksen takımına göre verilmektedir. Dolayısıyla senaryolar kurgulanırken bu hususa, özellikle dikkat edilmiştir.

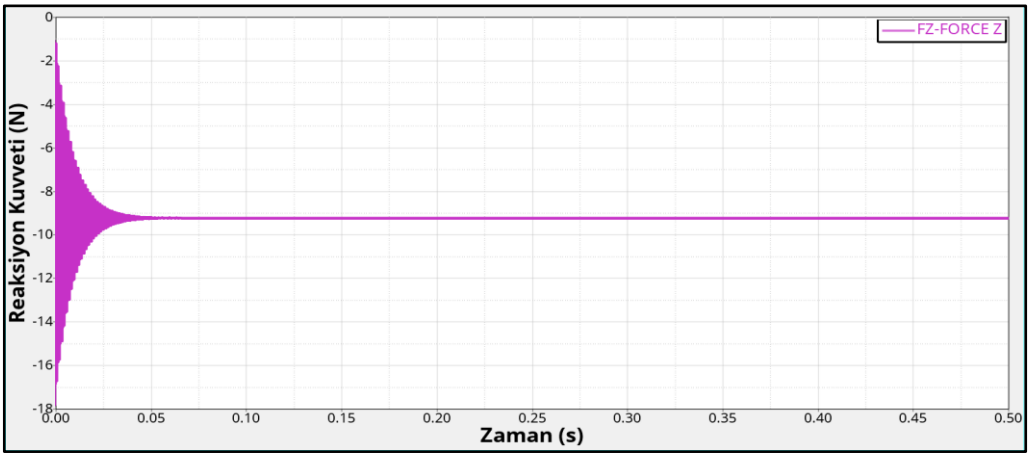


Şekil 4.2 Yay elemanı eksen takımı

Senaryo 1' de tamamen içi dolu, katı bir halka olarak modellenen ana model, yayın eksen takımına göre z_{yay} ekseninde düzgün hızlanan bir harekete tabi tutulmuş ve ana model üzerinde Newton' un 2. Hareket Yasası incelenmiştir. Buna göre; model üzerinden hesaplanan dengeleme halkası kütlesi $m = 4{,}625$ gr ' dır. Şekil 3.24' te gösterilen hız grafiğine göre hesaplanan ivme değeri ise; $a_{doğrusal} = 3$ m/s^2'dir. Buna göre modele etki eden kuvvet (4.2) eşitliği ile elde edilebilir.

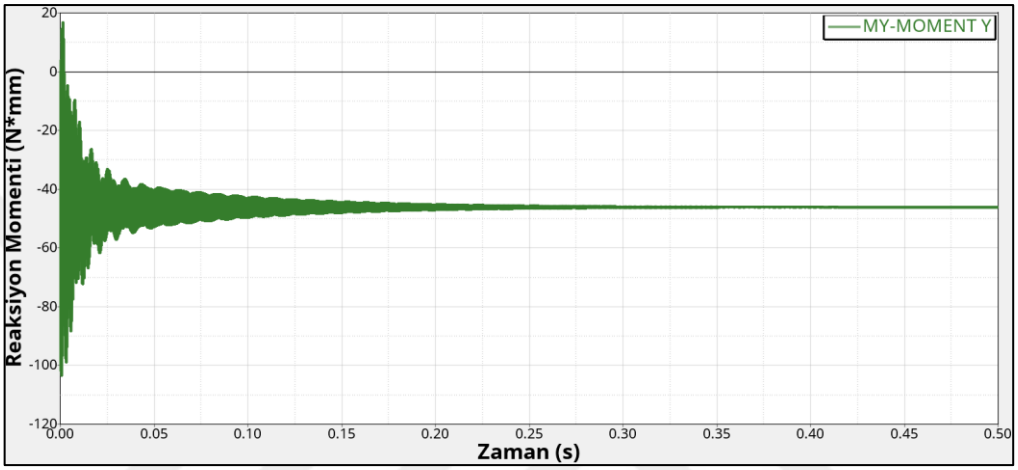
$$F = m.a_{doğrusal} = 9{,}224\ N \tag{4.2}$$

Oluşturulan analiz senaryosuna göre; hareket yaya ait lokal z_{yay} ekseninde gerçekleştiğinden; z_{yay} ekseninde kuvvet oluşurken, x_{yay} ve y_{yay} eksenlerinde herhangi bir kuvvet oluşmamıştır. Buna göre, z_{yay} ekseninde hesaplanan kuvvet Şekil 4.3' te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Senaryo 1 için z_{yay} ekseninde hesaplanan kuvvet

Harekettten dolayı oluşan bu kuvvetin, y_{yay} eksen etrafında da oluşturacağı söylenebilir. Oluşturulan ana modelde yayın uzunluğu 10 mm olarak belirlenmiştir. Yay lokal eksen takımının orijininin, yayın uzunluğunun yarısında konumlandığı düşünüldüğünde, harekettten dolayı oluşan kuvvetin oluşturduğu moment Şekil 4.4' te gösterilmiştir ve büyüklüğü 46,12 Nmm olarak hesaplanmıştır. Bu senaryoda yayın lokal eksen takımı sadece doğrusal hareket ettiği için, y_{yay} eksen etrafında oluşan moment de sabit olarak hesaplanmıştır.



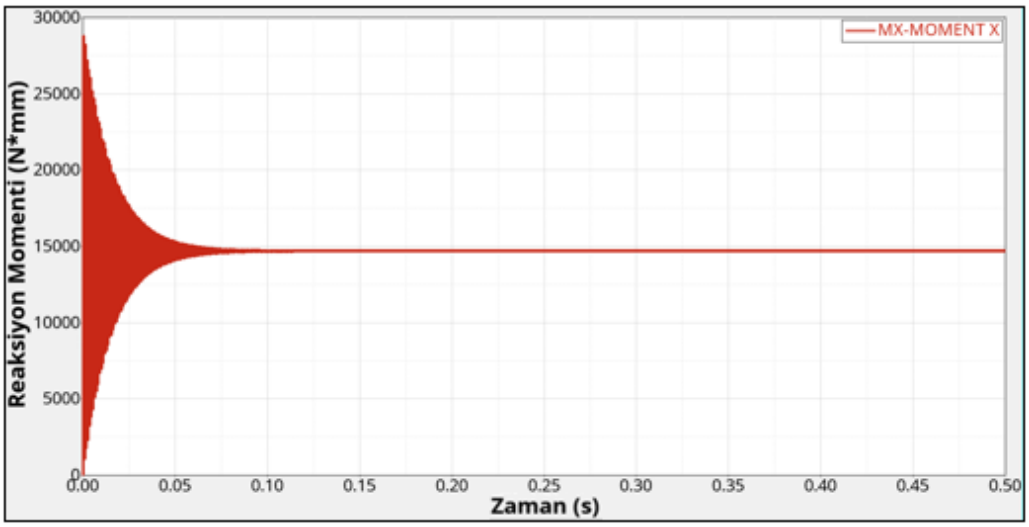
Şekil 4.4 Senaryo 1 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Senaryo 1 için elde edilen sonuçlar özetlenecek olunursa, analitik olarak hesaplanan kuvvet ve moment değerlerinin, analiz ortamında nümerik olarak hesaplanan değerler ile örtüştüğü söylenebilir. Kuvvet vektörel bir büyüklük olduğundan; analitik değerlerden elde edilen sonuçlar ile analizden elde edilen sonuçlar arasındaki işaret farkı, eksen takımlarının konumlandırılmasından kaynaklanmaktadır.

Senaryo 2' de tamamen içi dolu, katı bir halka olarak modellenen ana model, yayın eksen takımına göre x_{yay} ekseni etrafında açısal olarak düzgün hızlanan bir dönme hareketine tabi tutulmuştur. Şekil 3.25' te gösterilen hız grafiğine göre, hesaplanan açısal ivme değeri ise; $a = 75{,}4\ \mathrm{rad/s^2}$'dir. x_{yay} ekseni etrafındaki dönme atalet momenti de CAD modelden hesaplandığı üzere, $I_{xx_{yay}} = 0{,}195015\ \mathrm{kg}.m^2$ 'dir. x_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon dönme momenti (4.3) eşitliği ile hesaplanabilir.

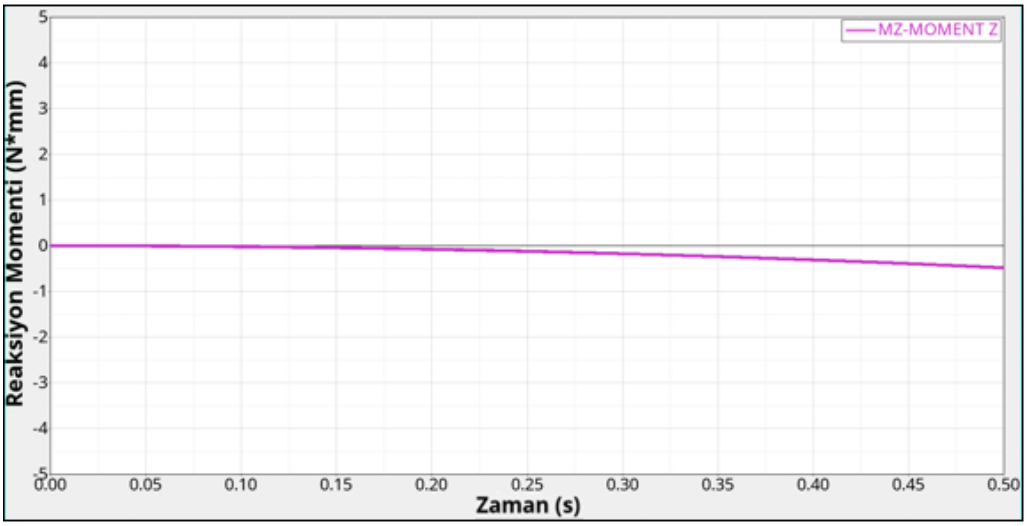
$$M = I_{xx_{yay}}.a = 14701{,}131\ Nmm \tag{4.3}$$

Senaryo 2 özelinde yapılan analiz sonuçları incelendiğinde x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} ekseni eksenlerinde hareketten kaynaklı kuvvetler oluşmayacaktır. x_{yay} ekseni etrafındaki dönme hareketinden ötürü oluşan moment Şekil 4.5' te gösterilmiş olup 14701,484 Nmm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuca göre, x_{yay} ekseni etrafındaki dönme momenti için analitik ve nümerik olarak hesaplanan değerler birbiri ile örtüşmektedir.



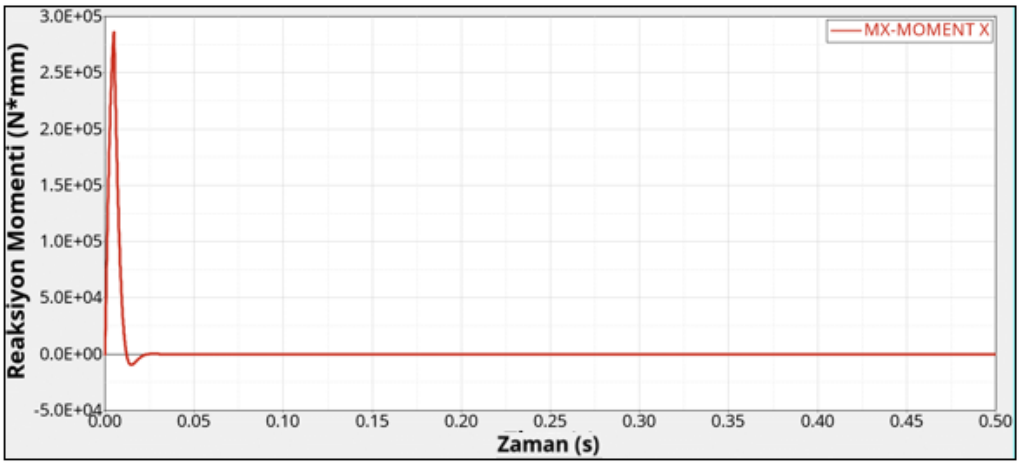
Şekil 4.5 Senaryo 2 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

İçi dolu dengeleme halkası, tek bir eksen etrafında dönerken, atalet kuvvetleri etkisi ile bir salınım ya da presesyon hareketi yapmaya çalışır.Bu sebeple, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında da momentler oluşabilir. Bu senaryoda, y_{yay} ekseni etrafındaki moment sıfıra yakın çıkmışken, z_{yay} ekseni etrafındaki moment Şekil 4.6' da gösterilmiştir. Büyüklük olarak x_{yay} ekseni etrafında oluşan momentten oldukça küçük olmasına rağmen, artan açısal hızla birlikte, yalpalama sonucu artacak merkezcil kuvvetler sebebiyle hesaplanan moment artma eğilimindedir. Açısal hareketle birlikte, lokal eksen takımı da döndüğünden herhangi bir işaret değişimi söz konusu değildir.



Şekil 4.6 Senaryo 2 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

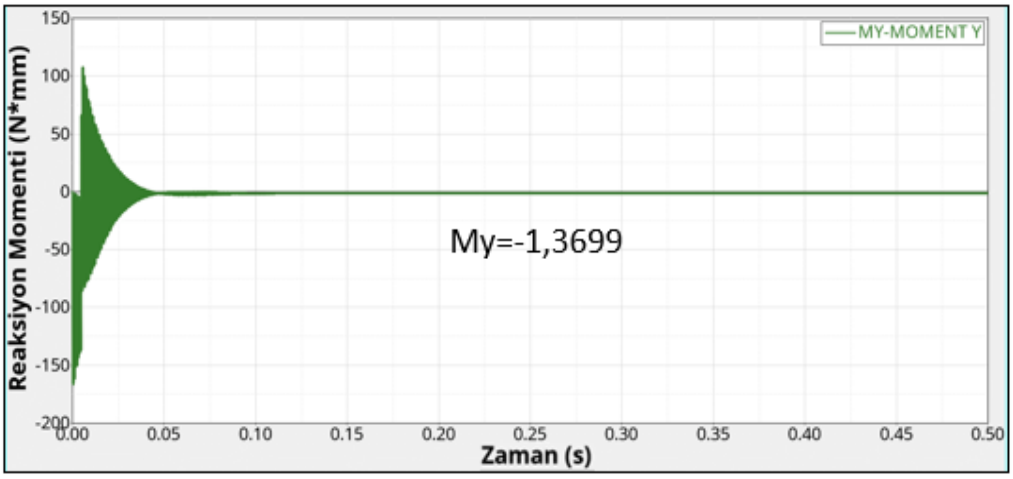
Senaryo 3'te içi dolu katı şeklindeki bir halka yerine dengeleme halkasının modellenmesi kısmında anlatılan, 2D shell elemanlarla modellenen ana model kullanılmıştır. Ayrıca, Şekil 3.26' da da gösterildiği üzere, senaryo 2' ye göre hız grafiğinde değişim yapılmıştır. Benzer şekilde, hareket sadece x_{yay} ekseni etrafında açısal hareketi içerdiğinden, x_{yay} , y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri sıfıra eşittir.



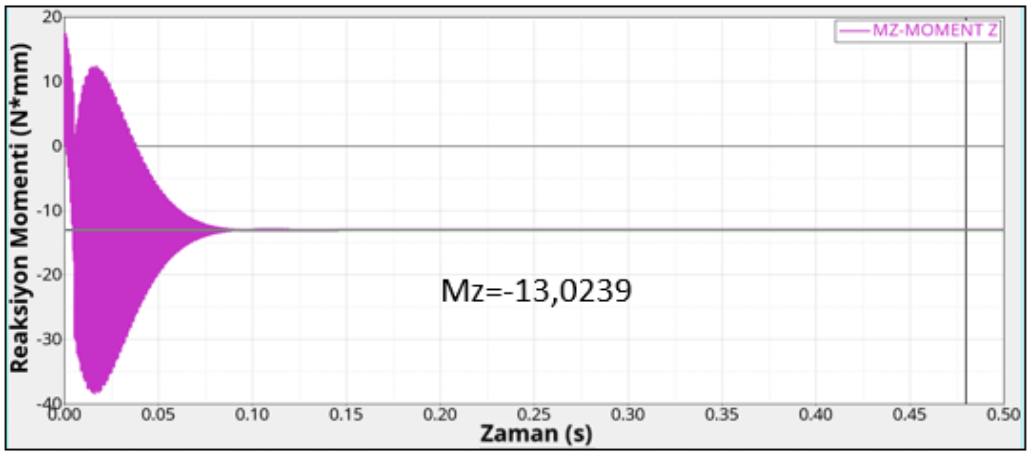
Şekil 4.7 Senaryo 3 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Şekil 4.7' de görülebileceği üzere, açısal hızdan ötürü x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment incelendiğinde; hareketin 0,05 sn' lik kısmı açısal ivme içerdiğinden ilk başta pik oluşturduğu gözlenmiştir. Modele ait kütle atalet momenti ve açısal ivme değerleri, (4.3) eşitliğine konulduğunda elde edilen değer ile aynıdır. Hareketin

hız grafiğine göre, 0,005 sn sonra ivme ortadan kaldırılıp sabit açısal hızla dönüş sağlandığından reaksiyon momenti de ortadan kalkmıştır.

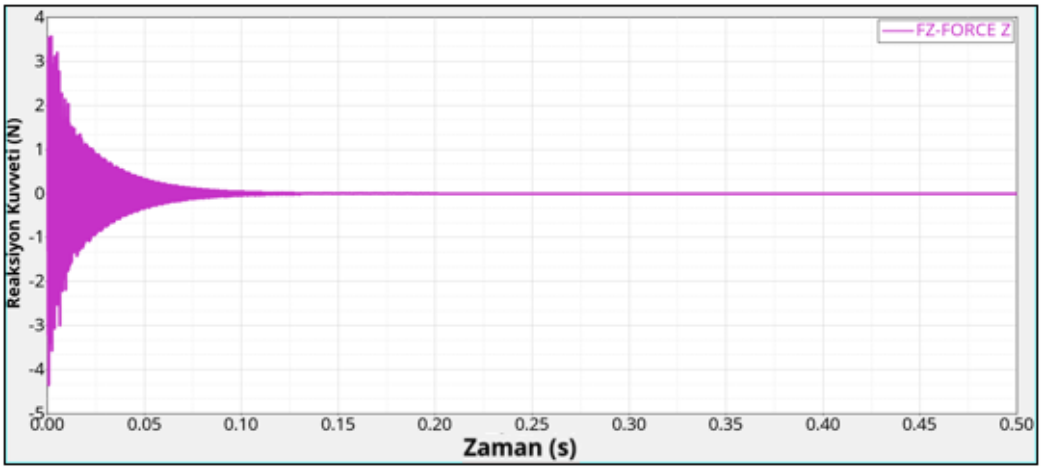


Şekil 4.8 Senaryo 3 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



Şekil 4.9 Senaryo 3 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

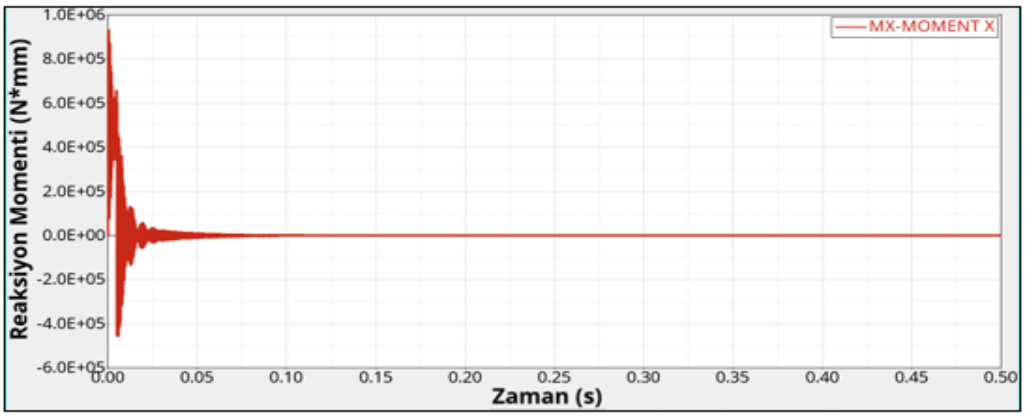
Senaryo 3 için ilk 0,005 sn' lik zaman diliminde; dengeleme halkasının yapmaya çalıştığı salınım ya da presesyon hareketi sebebiyle, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momenti senaryo 2' dekine benzer şekilde, x_{yay} ekseni etrafında hesaplanan momente göre oldukça düşüktür. Senaryo 2' den farklı olarak; hareket ilk 0,005 sn' lik zaman dilimindeki ivmeli sonrasında sabit açısal hızlı hareket olduğundan, hesaplanan moment değerleri sabit kalmıştır. Hesaplanan reaksiyon momenti değerleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



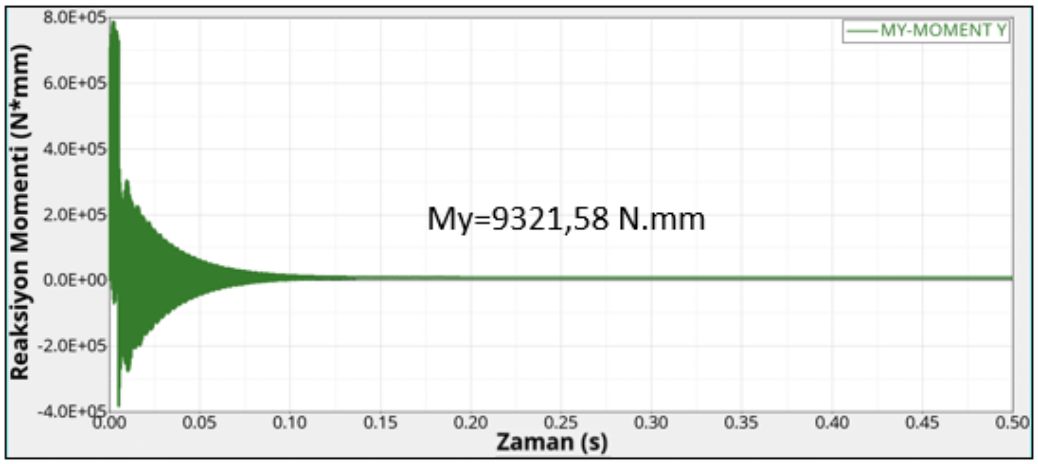
Şekil 4.10 Senaryo 4 için z_{yay} ekseninde oluşan reaksiyon kuvveti

Senaryo 4, senaryo 3 ile benzer analiz kurgusu olup, modele sadece 500 gr ağırlığında dengesiz yük eklenmiştir. Bu durumda senaryo 3'e benzer olarak x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri sıfıra eşittir. Ancak gerek senaryo 3' te gerekse senaryo 4' te yalpalanma hareketi sebebiyle y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde oluşan kuvvetlerde bir salının söz konusu olmuş sonrasında sıfıra eşitlenmiştir. Senaryo 4' te ekstra bir ağırlık olduğundan bu salınımlar daha fazladır. Örnek olarak Şekil 4.10' da senaryo 4 için z_{yay} eksenindeki reaksiyon kuvveti gösterilmiştir.

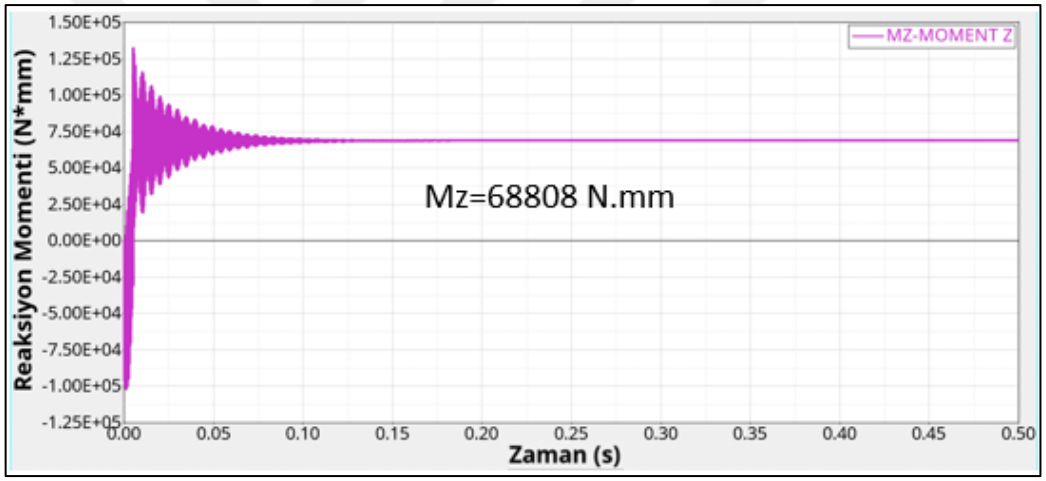
Senaryo 4 için, eksenler etrafındaki momentler incelendiğinde, elde edilen sonuçlar senaryo 3 ile benzerlik göstermektedir. Sırasıyla, Şekil 4.11' de x_{yay} ekseni, Şekil 4.12' de y_{yay} ekseni, Şekil 4.13' te ise z_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri gösterilmiştir. Dengesiz yük sebebiyle toplam kütlenin artması sonucu, hesaplanan değerlerin büyüklükleri de artmıştır.



Şekil 4.11 Senaryo 4 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



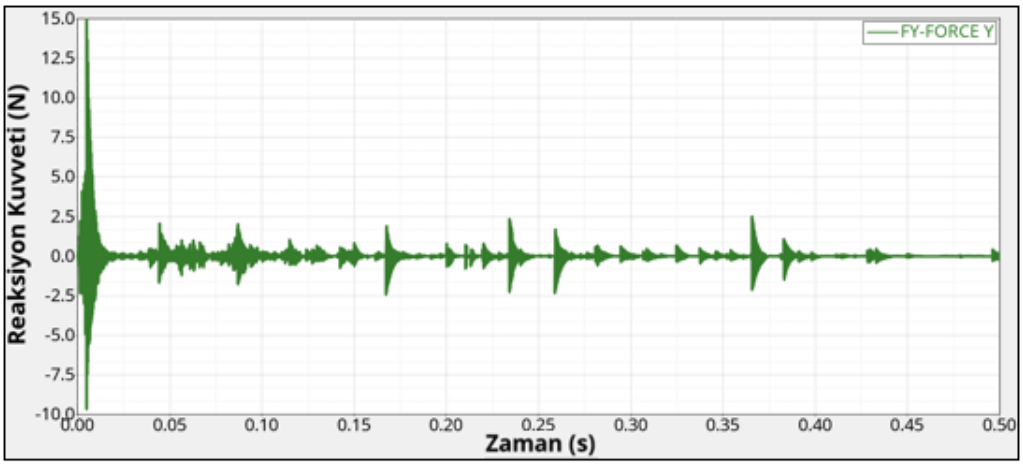
Şekil 4.12 Senaryo 4 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



Şekil 4.13 Senaryo 4 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

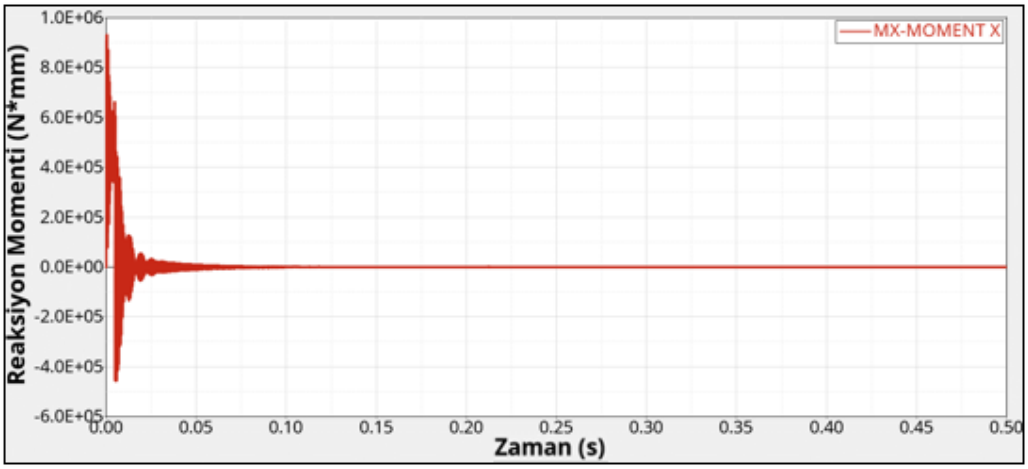
Senaryo 4' te, senaryo 3' e göre y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafındaki momentin işaretinin değiştiği gözlenmiştir. Bu durum; dengesiz yükün lokal eksen takıına göre ilk konumundan kaynaklanmaktadır. Yani dengesizlik oluşturan kütle modele eklendikçe, salınım hareketi eğilimi artmıştır. Dolayısıyla açısal dönme hareketi ile birlikte, lokal eksen takımının da döndüğü düşünüldüğünde; dengeleme halkasının dışa doğru daha fazla salınma eğiliminde olduğu söylenebilir. Üstten yüklemeli çamaşır makineleri olarak düşünüldüğünde, tambur daha çok salınıp kazana yaklaşıyor ya da kazan tambur arasındaki boşluk azalıyor şeklinde yorumlanabilir.

Senaryo 5, senaryo 4‘ ün içerisine %30 doluluk sağlanacak şekilde su konulmuş halidir. Yani dengeleme halkası üzerinde 500 gr dengesiz yük ve dengeleme halkası içerisinde su bulunur. Sınır koşulları da modelin kendi ekseni etrafında Şekil 3.26’ da gösterilen hız grafiği ile harekete izin vermektedir. Dengeleme halkası içerisinde su bulunduğundan ve hareket anında bu su dengeleme halkası içerisinde hareket ettiğinden, x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde elde edilen reaksiyon kuvvetleri sıfır değeri etrafında titreşimli olarak elde edilmiştir. Örnek olarak sadece y_{yay} eksenindeki reaksiyon kuvveti paylaşılmış ve Şekil 4.14’ te gösterilmiştir.

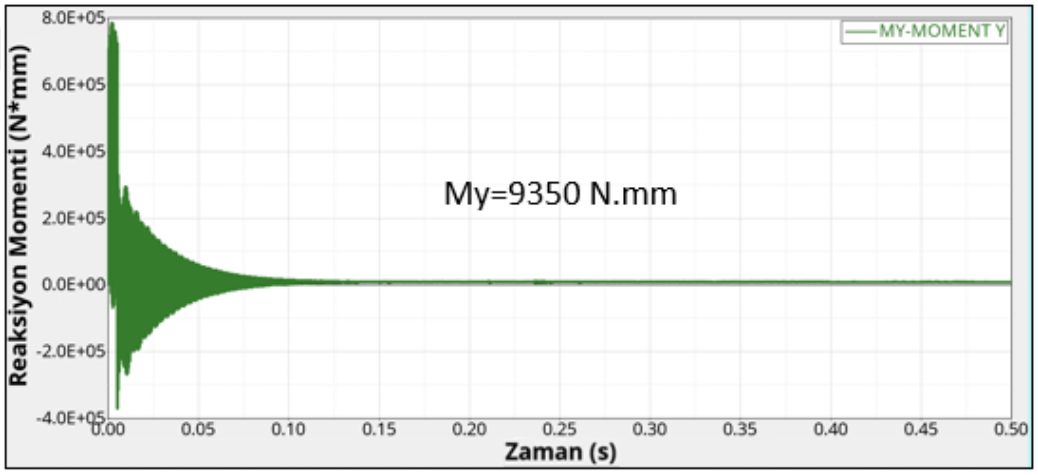


Şekil 4.14 Senaryo 5 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

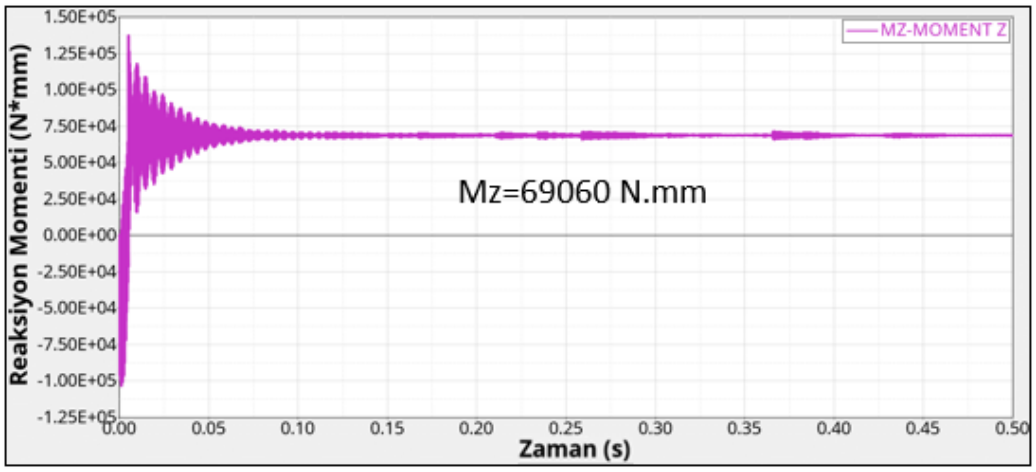
Senaryo 5 için eksenler etrafında hesaplanan momentler, senaryo 3 ve senaryo 4’ e benzer şekilde oluşmuştur. x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında hesaplanan reaksiyon monetleri sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Senaryo 4 ile kıyaslandığında; dengeleme halkası içerisine hacmin %30’ u oranında su eklenmesine, bu değer de yaklaşık ek 1 kg’ a denk gelmesine rağmen Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ den görülebileceği üzere, reaksiyon momentlerinde çok fazla artış gözlenmemiştir. Yani tanımlanan hız profili için su eklenmesi, modeli ekstra bir dengesizliğe ya da salınıma sokma eğiliminde değildir.



Şekil 4.15 Senaryo 5 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



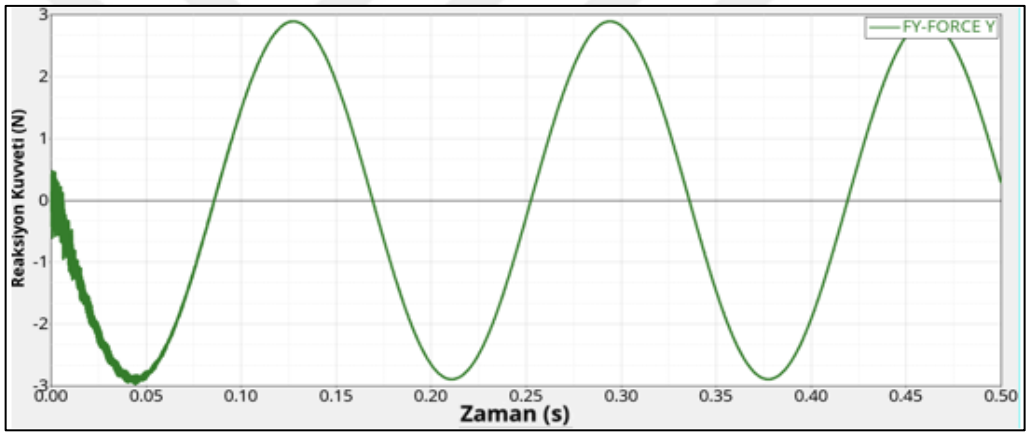
Şekil 4.16 Senaryo 5 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



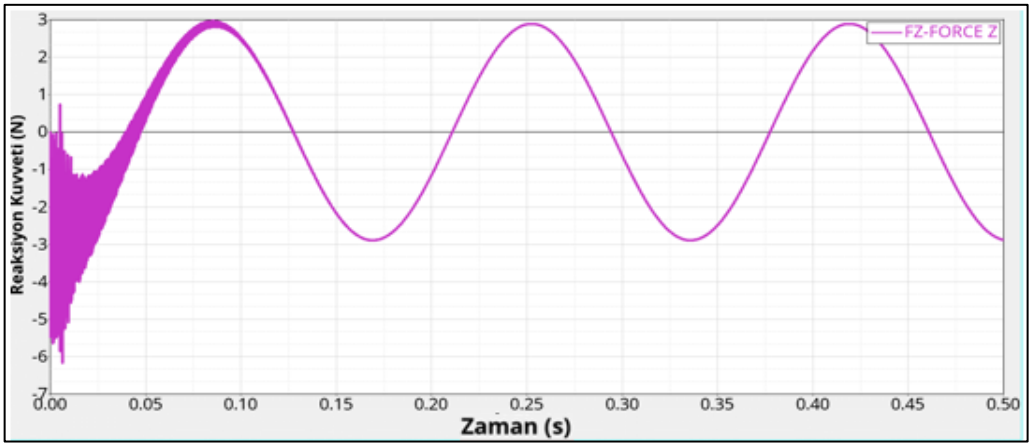
Şekil 4.17 Senaryo 5 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Senaryo 6' da, dengesiz yük içeren model kendi etrafında Şekil 3.26' da merkez ekseni etrafında tanımlanan açısal hız ve Şekil 3.27' de tanımlanan düzgün

doğrusal ivme ile artan hız ile kendi etrafında dönerek, tek bir eksende ve tek bir doğrultuda hareket etmektedir. Bu durum milin salınım anındaki tek bir doğrultudaki hareketi gibi düşünülebilir. Modele yerçekimi kuvvetleri dahil edilmediğinden, z_{yay} eksenindeki reaksiyon kuvveti sıfırdır. Artan hızla birlikte; Senaryo 1' den hatırlanacağı üzere, hareket doğrultuna ters yönde bir reaksiyon kuvveti oluşacaktır. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri gösterilmiştir. Modelin kendi etrafında döndüğü ve dolayısıyla yay elemanına ait lokal eksen takımının da modelle birlikte döndüğü düşünülürse, hesaplanan kuvvetler sinüzoidal bir görünüm alır. y_{yay} ve z_{yay} eksenleri arasında da 90 derecelik bir açı olduğundan faz farkı da 90 derecedir. y_{yay} ve z_{yay} eksenlerindeki yay katsayıları da aynı olduğundan bu eksenlerdeki kuvvetlerin genliği de aynıdır.

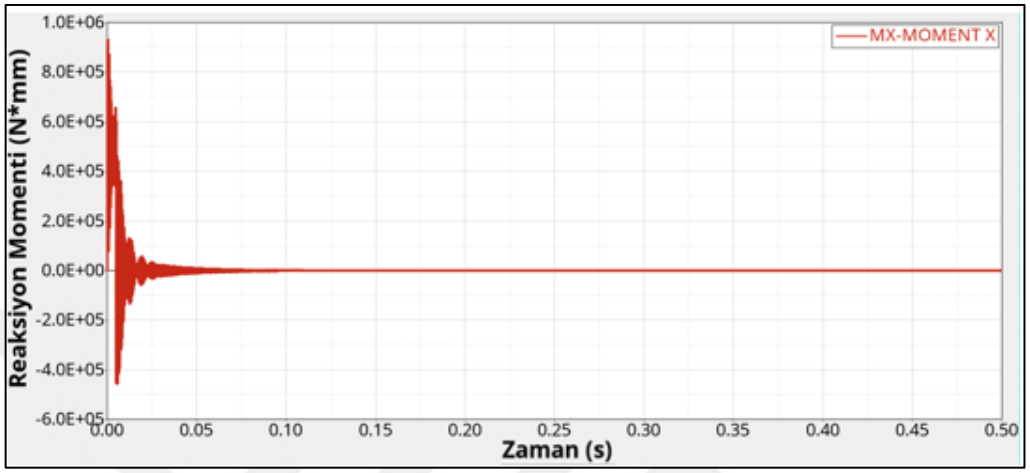


Şekil 4.18 Senaryo 6 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

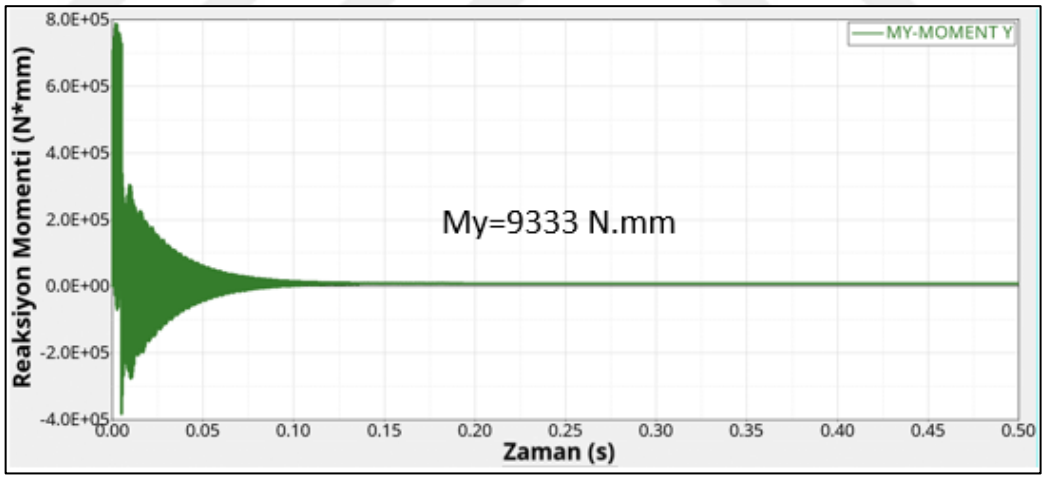


Şekil 4.19 Senaryo 6 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

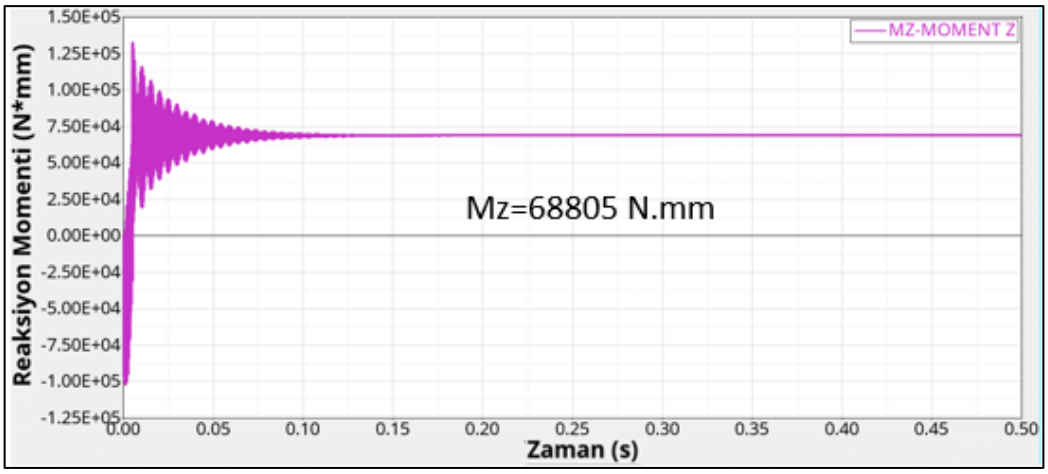
Senaryo 6 için x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de gösterilmiştir. Senaryo 4 ile kıyaslama yapıldığında; hesaplanan reaksiyon momenti mertebeleri benzer seviyelerdedir. Yani, tek yönde tanımlanan sabit ivme ile artan hız profilinden kaynaklanan kuvvetlerin, reaksiyon momentlerine etkisi oldukça azdır.



Şekil 4.20 Senaryo 6 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

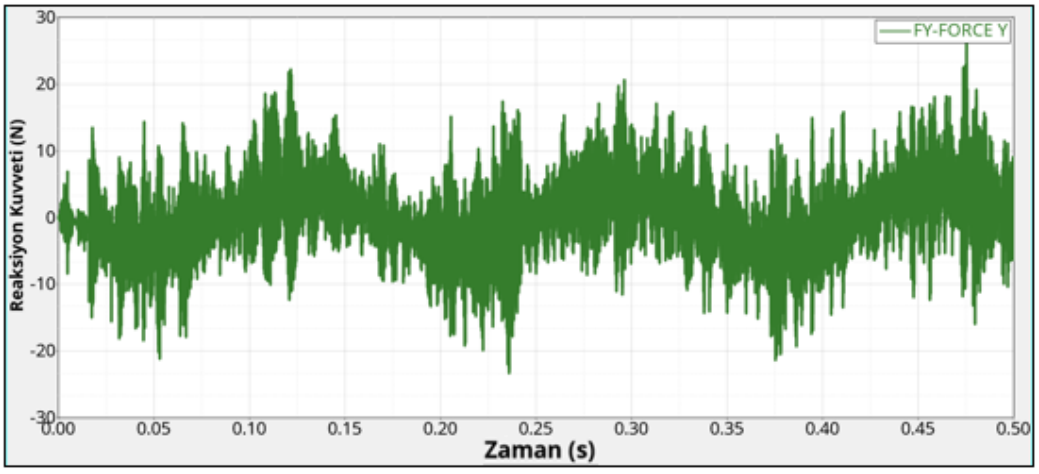


Şekil 4.21 Senaryo 6 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

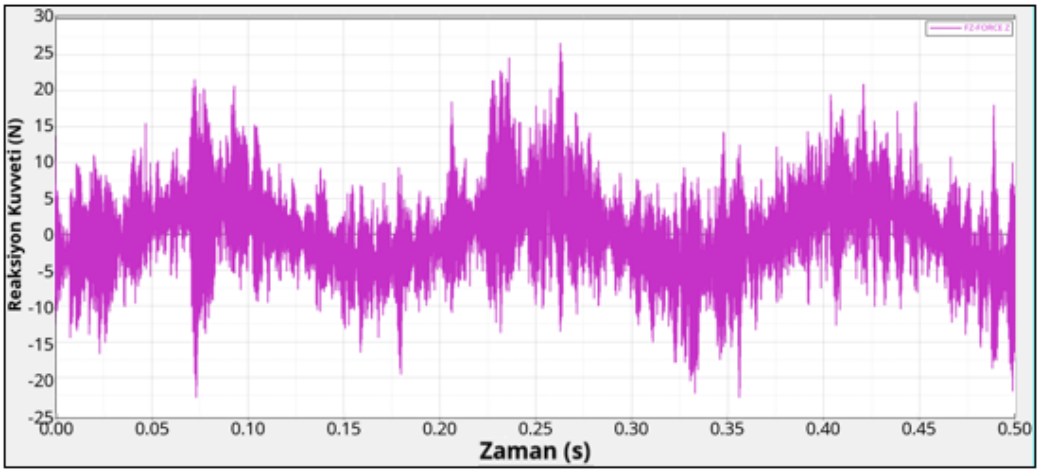


Şekil 4.22 Senaryo 6 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Senaryo 6' da bulunan denegeleme halkası içerisine %30 doluluk oranında su eklenerek senaryo 7 oluşturulmuştur. Senaryo 7' de hesaplanan reaksiyon kuvvetlerinin ve momentlerinin senaryo 6' dakine benzer şekilde oluşması öngörülmektedir. Senaryo 5' ten elde edilinin tecrübeye göre, dengeleme halkası içerisine su konulduğu senaryolarda, suyun kapalı kap içerisindeki hareketi sebebiyle, hesaplanan değerler titreşimli bir şekilde oluşmuştur. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' te, sırasıyla y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri gösterilmiştir. x_{yay} ekseninde oluşan reaksiyon kuvveti her ne kadar titreşimli olarak elde edilmiş olsa da, hesaplanan değerler sıfır etrafında dağılmıştır ve oldukça küçüktür.



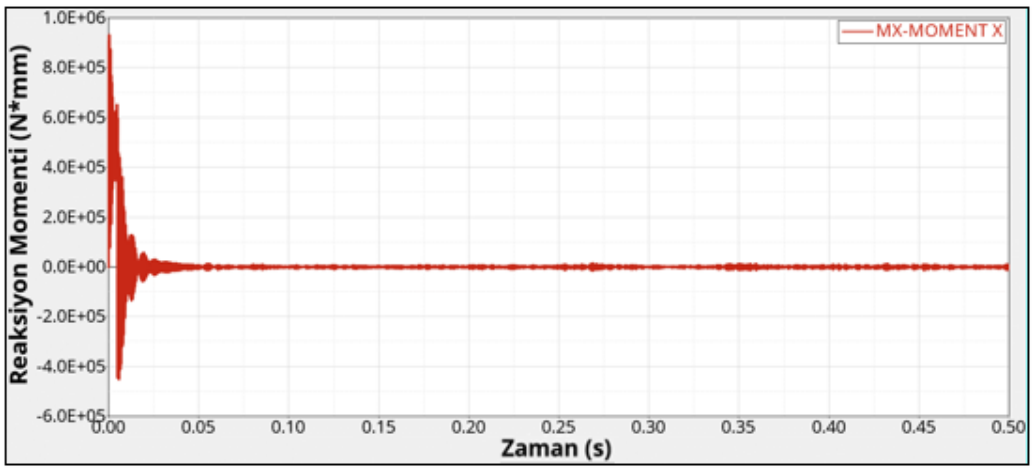
Şekil 4.23 Senaryo 7 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti



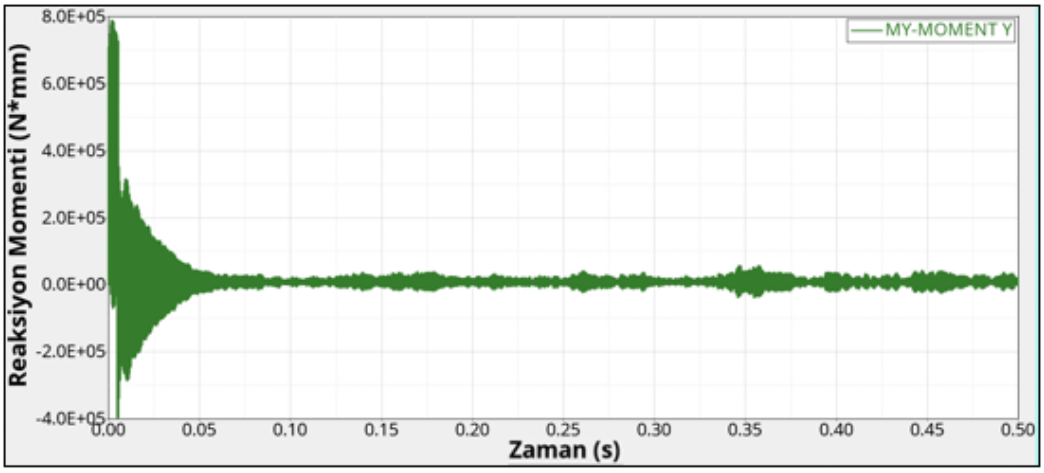
Şekil 4.24 Senaryo 7 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

Senaryo 7' de hesaplanan reaksiyon kuvveti değerleri, senaryo 6' da hesaplanan reaksiyon kuvveti değerleri ile karşılaştırıldığında genel dağılım öngörüldüğü üzere, sinüzoidal oluşmuştur. Veriler filtrelenmeden paylaşılmış olup, filtrelendiği zaman yine aralarında 90 derecelik bir faz farkı olduğu görülmüştür. Modeldeki artan kuvvet sebebiyle genlikler bir miktar artmıştır. Fakat genel dağılımın senaryo 6' da için elde edilen değerler etrafında olduğu söylenebilir.

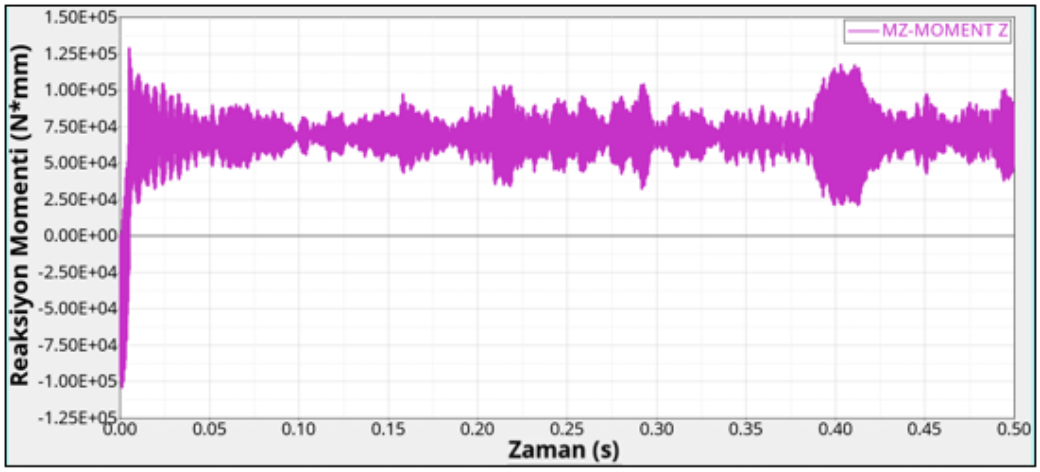
Senaryo 7 için hesaplanan reaksiyon momentleri Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27' de gösterilmiştir. Reaksiyon kuvvetlerinde gözlendiği gibi, reaksiyon momentlerinde de sonuçlar titreşimli elde edilmiş olup, elde edilen değerler senaryo 6 ' da hesaplanan değerler etrafında dağılmıştır.



Şekil 4.25 Senaryo 7 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

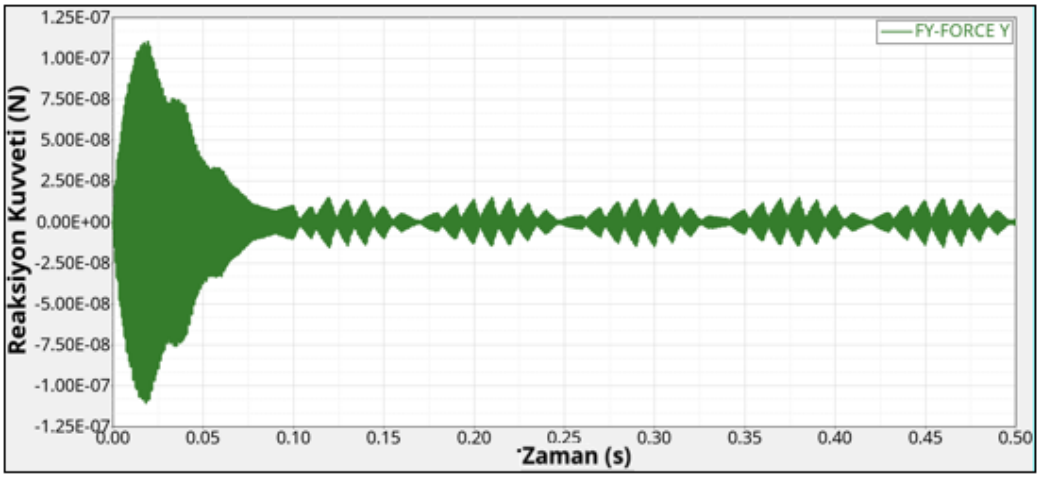


Şekil 4.26 Senaryo 7 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

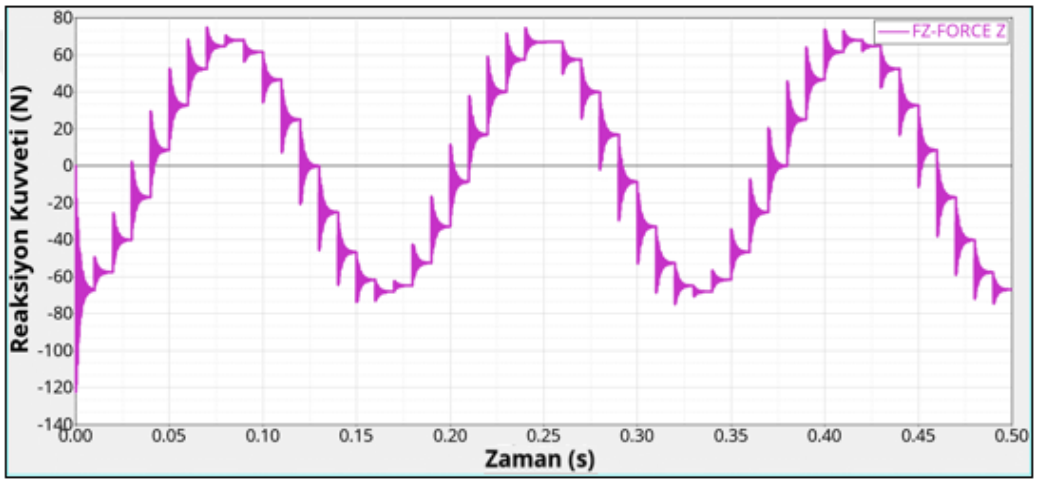


Şekil 4.27 Senaryo 7 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

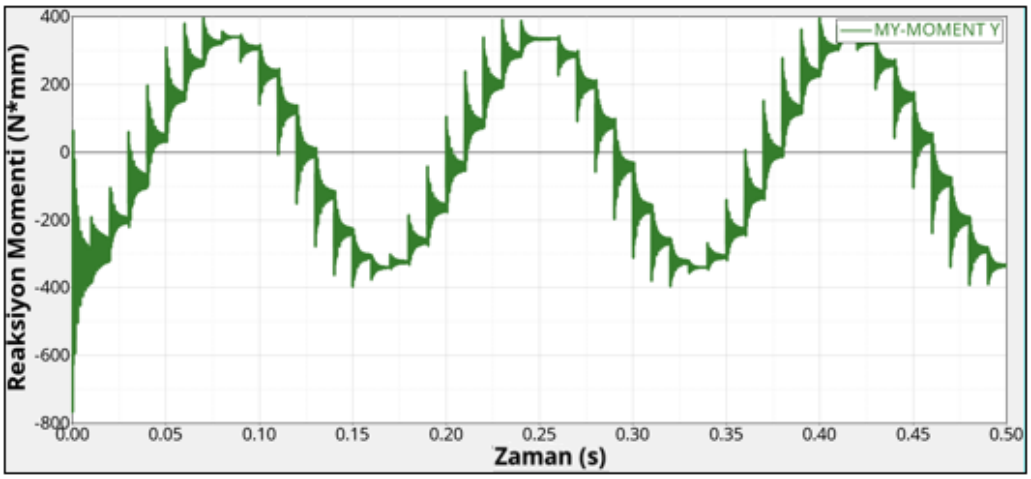
Senaryo 8' de dengesiz yük bulunmayan ana model, tek bir eksende Şekil 3.28' de gösterilen eğriye göre sinüzoidal bir harekete maruz kalmıştır. Hareket süresince elemanların titreşiminden ötürü, hesaplanan değerler belirli bir titreşimde elde edilmiştir. x_{yay} ve y_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri yine sıfırdır. Örnek olarak Şekil 4.28' de y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti gösterilmiştir. Senaryo 1' den farklı olarak sinüzaoidal bir hareket verildiğinden, z_{yay} ekseninde hesaplanan rekasiyon kuvveti sinüzoidal olarak hesaplanmıştır ve Şekil 4.29' da gösterilmiştir. Bu kuvvetten ötürü oluşan ve Şekil 4.30' da gösterilen, y_{yay} ekseni etrafında oluşan reaksiyon momenti de sinüzoidaldir. Şekil 4.31' de gösterilen z_{yay} ekseni etrafında oluşan reaksiyon momentinin de sıfıra oldukça yakın olduğu aşikardır. Bu eksen etrafındaki momentin, y_{yay} eksenindeki titreşimli kuvvetlerden oluştuğu, eğrilerin benzerliğinden ötürü söylenebilir.



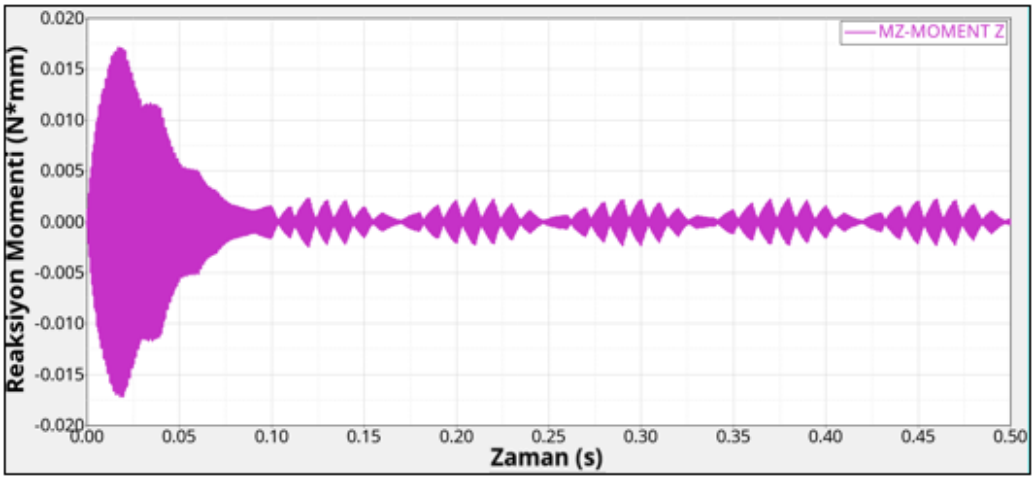
Şekil 4.28 Senaryo 8 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti



Şekil 4.29 Senaryo 8 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

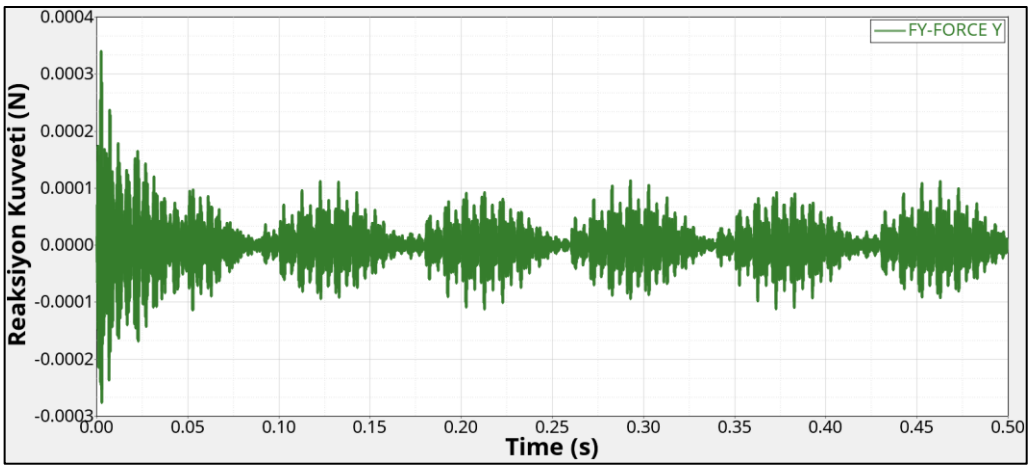


Şekil 4.30 Senaryo 8 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

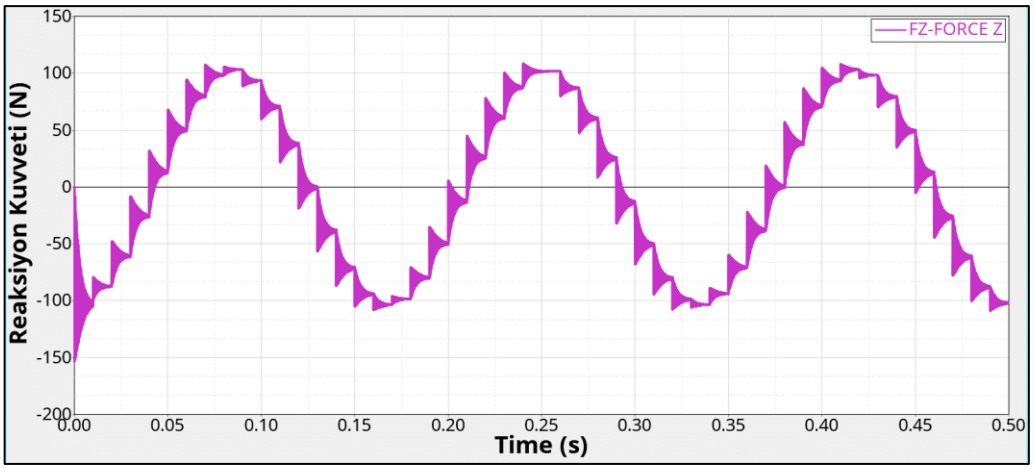


Şekil 4.31 Senaryo 8 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

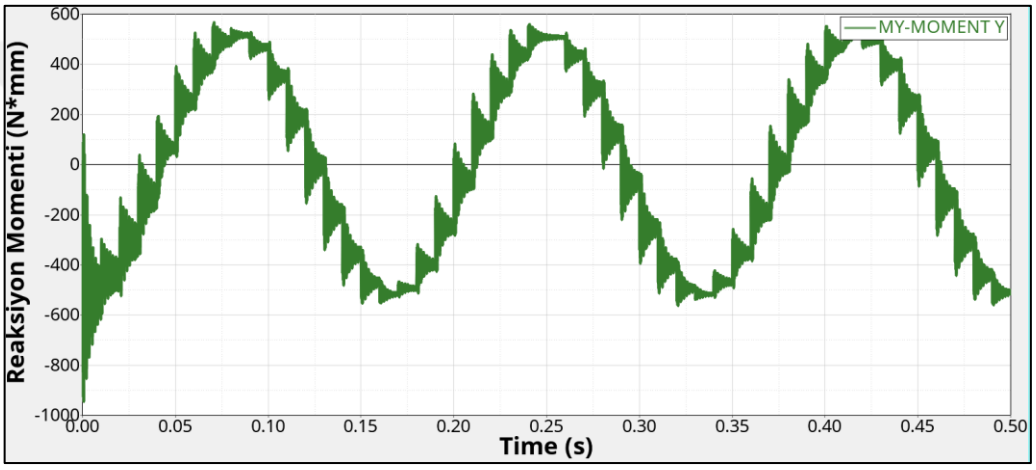
Senaryo 9' da, senaryo 8' de kullanılan modele dengesiz yük eklenmiştir. Modele dengesiz yük eklendiğinden ve toplam kütle arttığından hesaplanan reaksiyon kuvvetlerinin ve reaksiyon momentlerinin büyüklükleri, sinüzoidal eğrilerin genlikleri artan kütle ile orantılı olarak artmıştır. x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti ve x_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri sıfıra oldukça yakın olup titreşimli veriler elde edilmiştir. Senaryo 8' e benzer şekilde; y_{yay} eksenindeki reaksiyon kuvveti de sıfıra oldukça yakındır. Şekil 4.32'de y_{yay} ekseninde, Şekil 4.33' te z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri ve Şekil 4.34' te y_{yay} ekseni etrafında, Şekil 4.35' te z_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momenti değerleri gösterilmiştir. Senaryo 8 ile kıyaslandığında bu değerlerde büyüklük olarak bir artış gözlenmiştir.



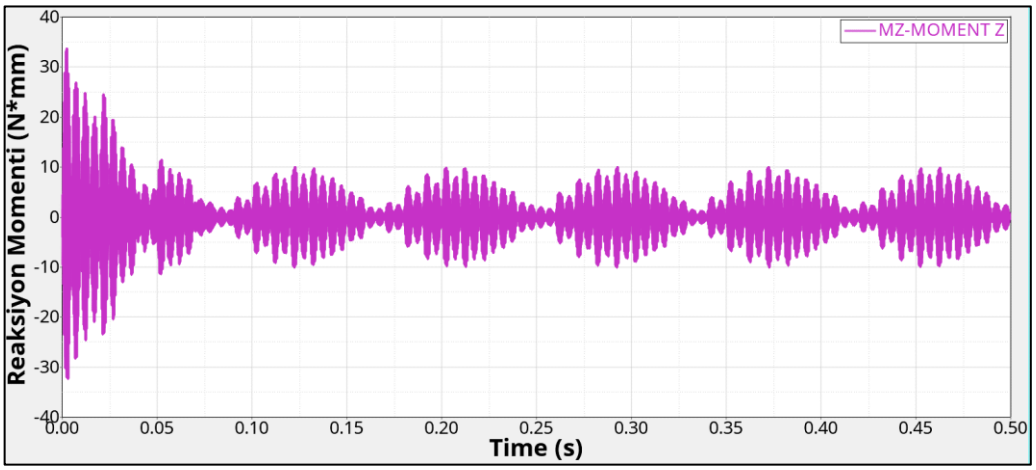
Şekil 4.32 Senaryo 9 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti



Şekil 4.33 Senaryo 9 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti



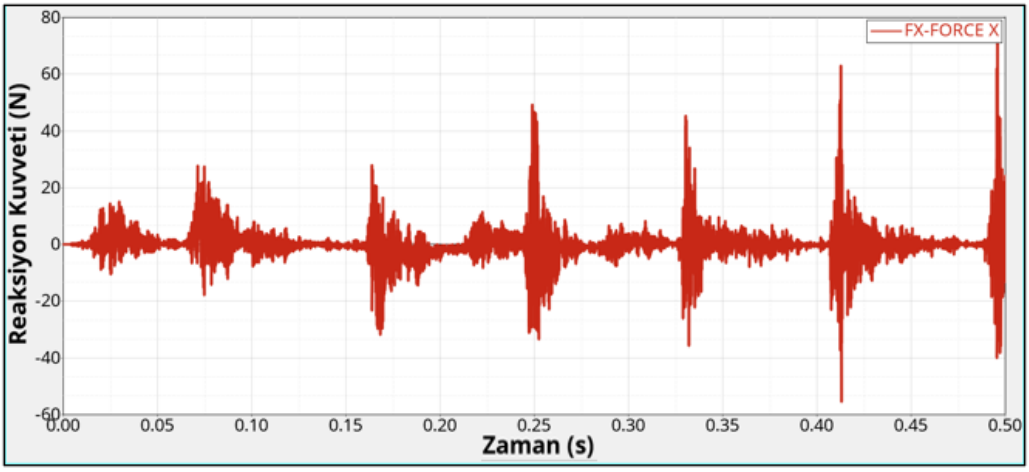
Şekil 4.34 Senaryo 9 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



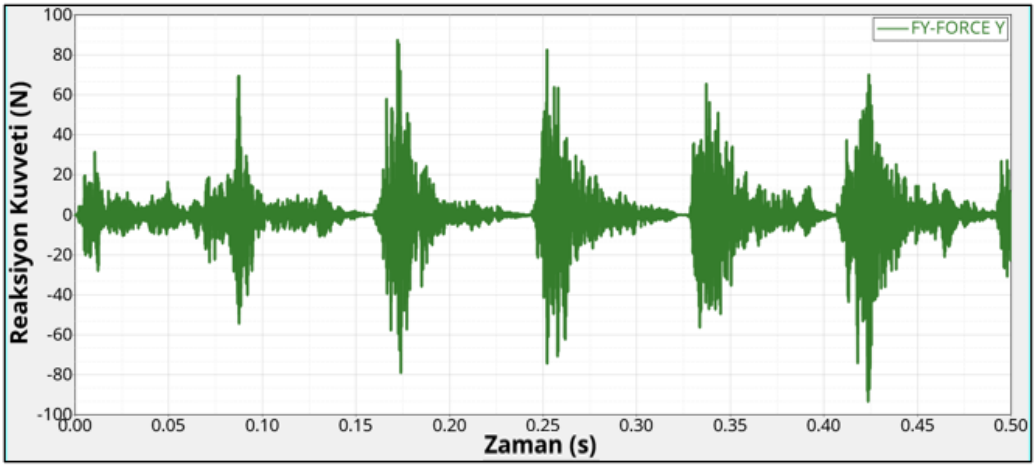
Şekil 4.35 Senaryo 9 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Senaryo 10' da senaryo 9' da kullanılan modeldeki dengeleme halkası içerisine su konulmuştur. Yani ana modelde, dengeleme halkası, dengesiz yük ve su vardır. Bu

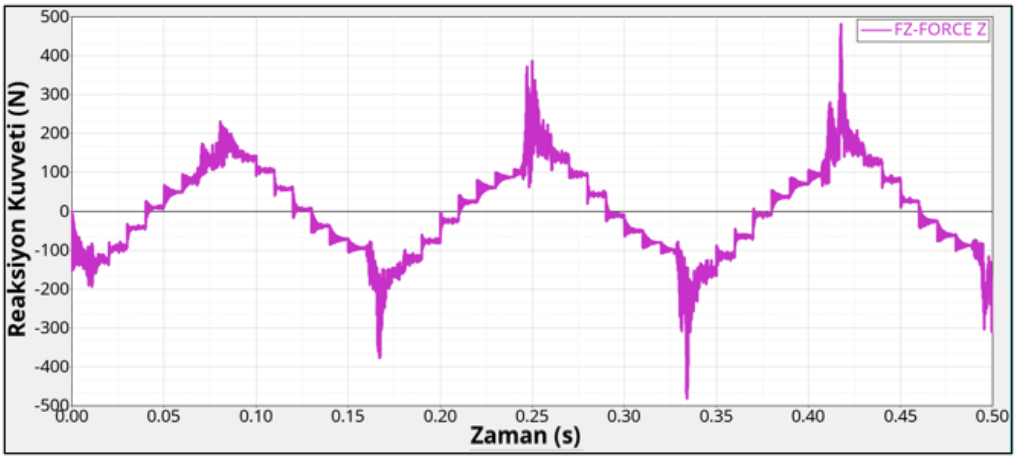
model senaryo 8 ve senaryo 9' da kugulanan şekilde sinüzoidal olarak hareket ettirilmektedir. Hakeket süresince; sıvının ani hareketleri ve genel anlamda modelin kütle artışı olduğundan reaksiyon kuvvetleri ve reaksiyon momentlerindeki, anlık hesaplanan değerler ve titreşimden filtrelenmiş eğrinin sahip olduğu değerler artmıştır. Sıvının dengeleme halkası içerisindeki hareketi, modelin ağırlık merkezinin değişmesine dolayısıyla x_{yay} ekseninde de reaksiyon kuvvetlerinin ve bu eksen etrafında reaksiyon momentlerinin oluşmasına sebep olmuştur. Şekil 4.36' da x_{yay} ekseninde, Şekil 4.37' de y_{yay} ekseninde ve Şekil 4.38' de z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri gösterilmiştir.



Şekil 4.36 Senaryo 10 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

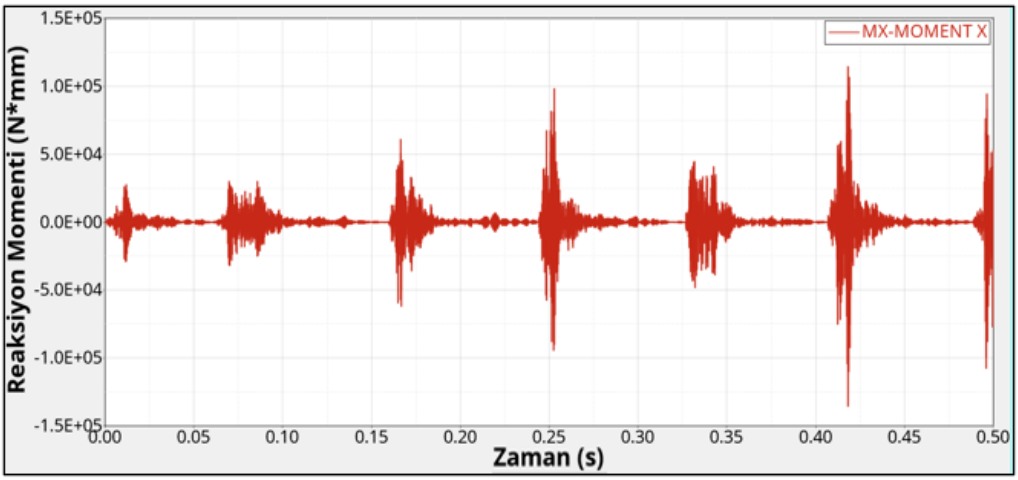


Şekil 4.37 Senaryo 10 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

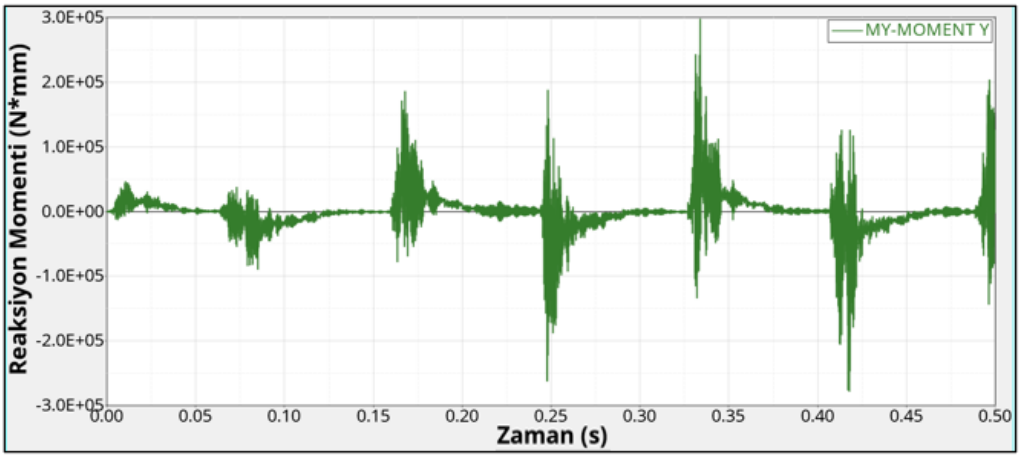


Şekil 4.38 Senaryo 10 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

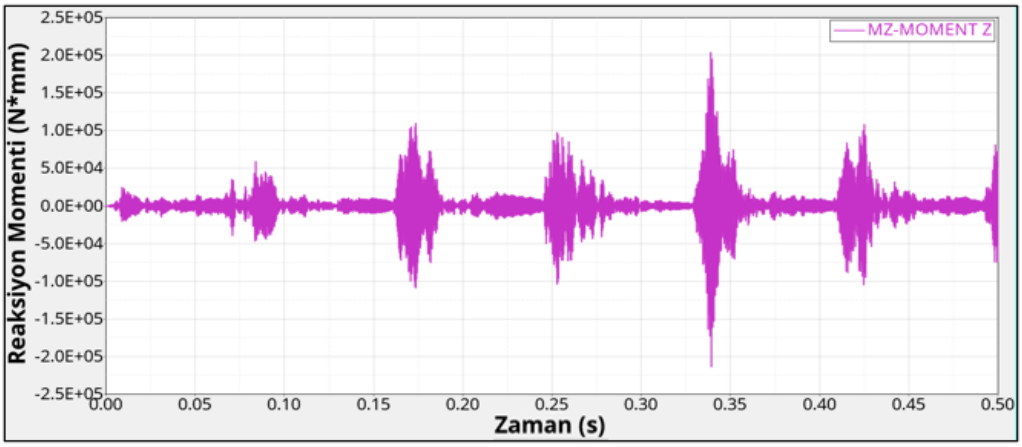
Şekil 4.39'da x_{yay} ekseni etrafında, Şekil 4.40' da y_{yay} ekseni etrafında ve Şekil 4.41' de z_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri gösterilmiştir. y_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momenti değerleri, senaryo 8 ve senaryo 9' daki gibi sinüzoidal eğrisini korumaktadır. Ancak eğrinin pik noktalarında okunan değerler artmıştır.



Şekil 4.39 Senaryo 10 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



Şekil 4.40 Senaryo 10 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

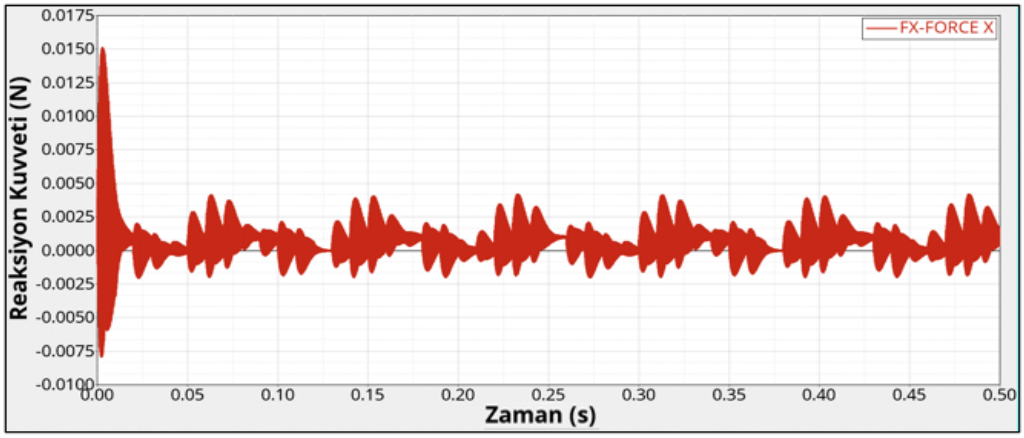


Şekil 4.41 Senaryo 10 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

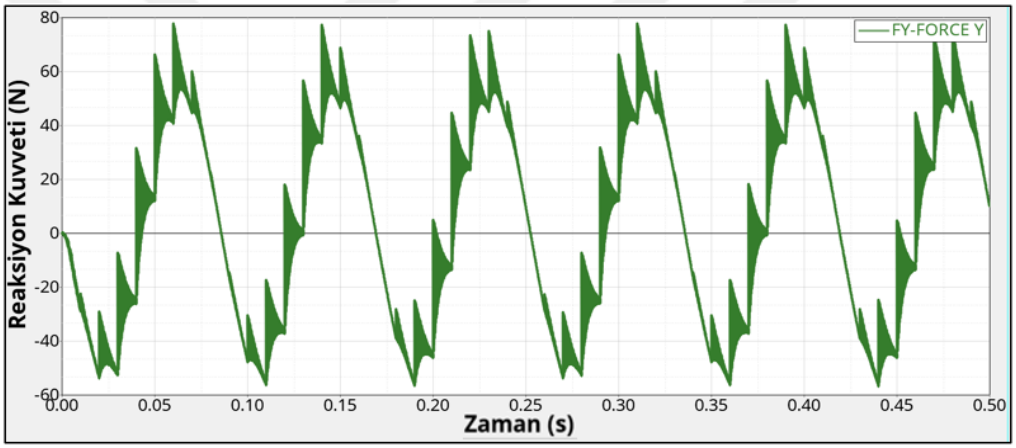
Senaryo 11 ve senaryo 12' de dengeleme halkasının kendi etrafında dönmesi sağlanırken, aynı zamanda da tek eksende sinüzoidal bir konum değişimi modele eklenmiştir. Senaryo 12, senaryo 11' in su eklenmiş halidir. Her iki senaryoda da dengesiz yük bulunmaktadır. Senaryo 6 ve senaryo 7 ile modelin tek bir doğrultuda hareket etmesi sağlanırken yani yarı salınım yapması sağlanırken, senaryo 11 ve senaryo 12 ile tek bir eksende modelin salınım yapması modellenmiştir.

Senaryo 11 için; x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri sırasıyla Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44' te gösterilmiştir. Şekil 4.42' den görülebilceği üzere, yerçekimi kuvvetleri ihmal edildiğinden, x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri oldukça küçüktür ve sıfır olarak kabul edilebilir. y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde ise, hesaplanan reaksiyon kuvvetleri sinüzoidal hareketten

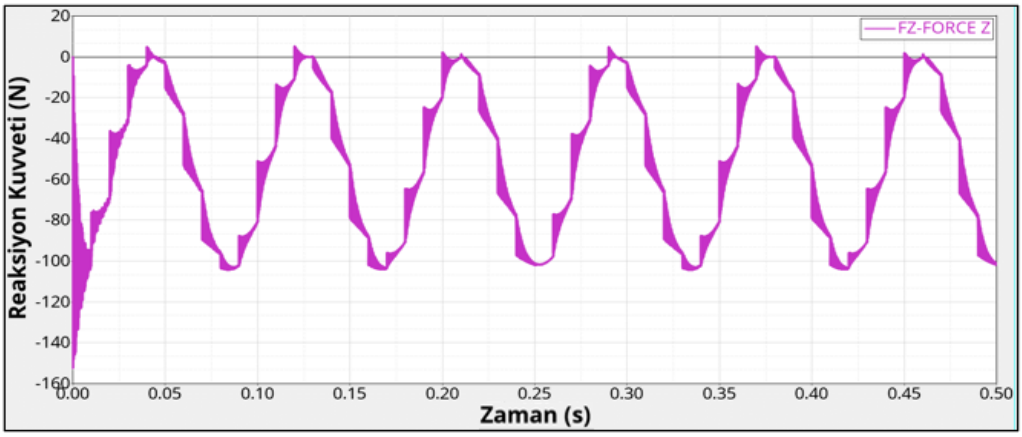
kaynaklanmaktadır ve lokal eksen takımının dönmesinden ötürü sinüzoidal bir görünüm almıştır.



Şekil 4.42 Senaryo 11 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

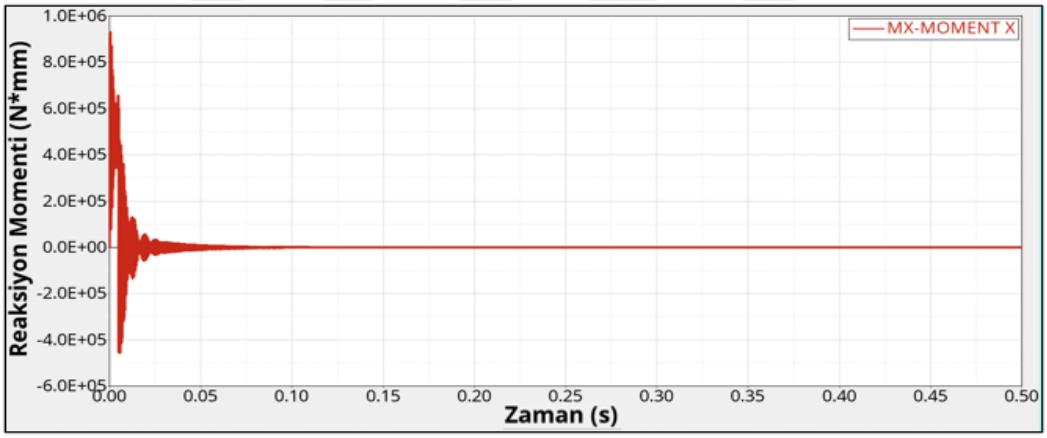


Şekil 4.43 Senaryo 11 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

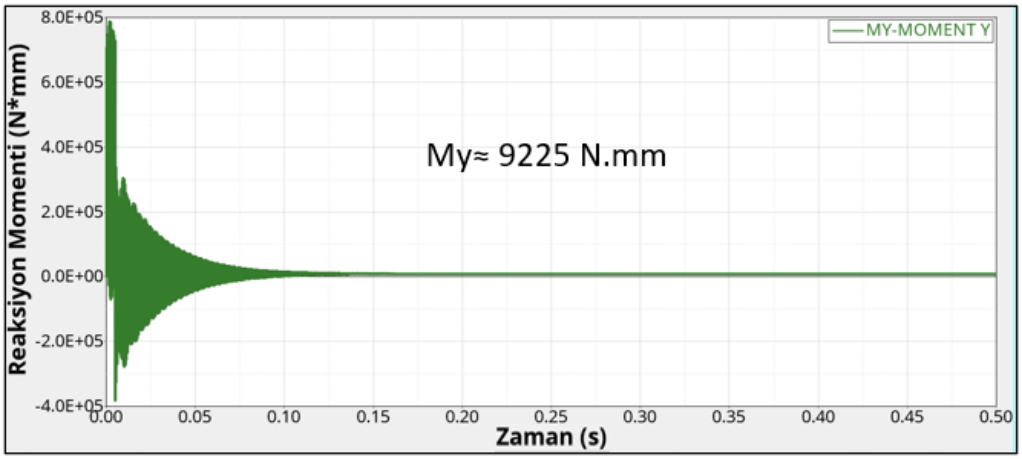


Şekil 4.44 Senaryo 11 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

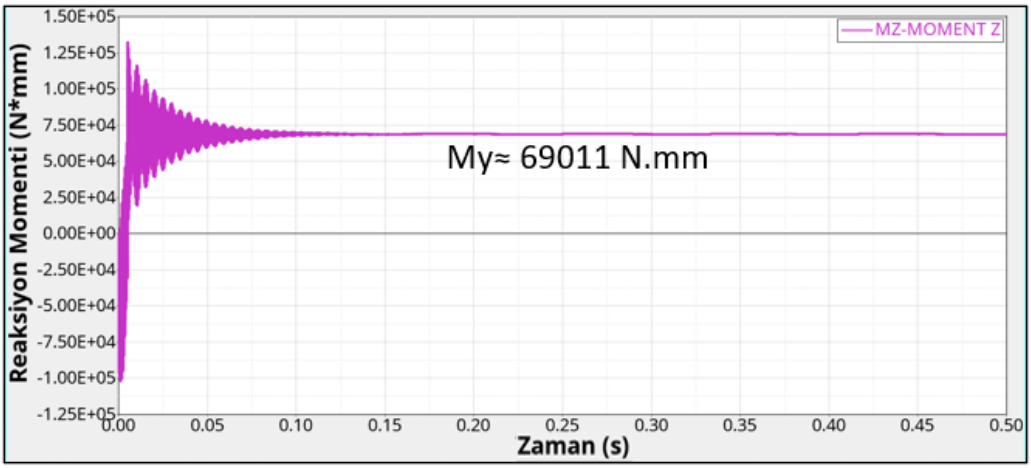
Senaryo 11 için; x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri sırasıyla Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47' de gösterilmiştir. x_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti grafiğindeki pik; açısal hız tanımlamasındaki ilk 0,005 sn' deki ivmeli hareketten kaynaklanmış, sonrasında ise sabit açısal hız sebebiyle sıfıra düşmüştür. y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında hesaplanan reaksiyon momentlerini değerlendirmek için, senaryo 4, senaryo 6, senaryo 9 ve senaryo 11' i birlikte incelemek gerekir. Buna göre; sinüzoidal hareketten ya da tek yönde doğrusal hareketten kaynaklı eksenler etrafında oluşan momentler, dengeleme halkasının kendi etrafındaki açısal hızı ve salınım hareketi sonucu oluşan momentlerden oldukça küçüktür. Bu yüzden grafiklere, dengeleme halkasının salınım hareketinden kaynaklı değerler baskın olarak yansımıştır. Tek yöndeki doğrusal hareketten ya da sinüzoidal hareketten kaynaklı momentler sadece bileşke momentlerin büyüklüklerine küçük bir oranda etki etmiştir.



Şekil 4.45 Senaryo 11 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

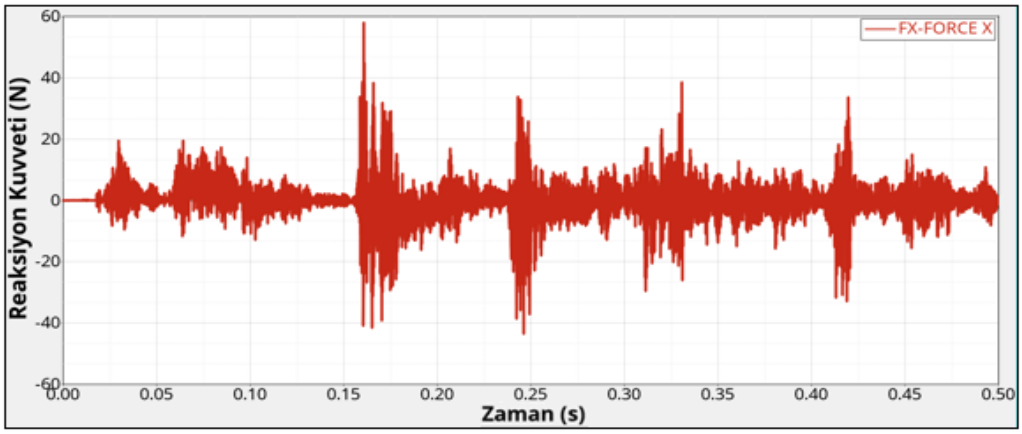


Şekil 4.46 Senaryo 11 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

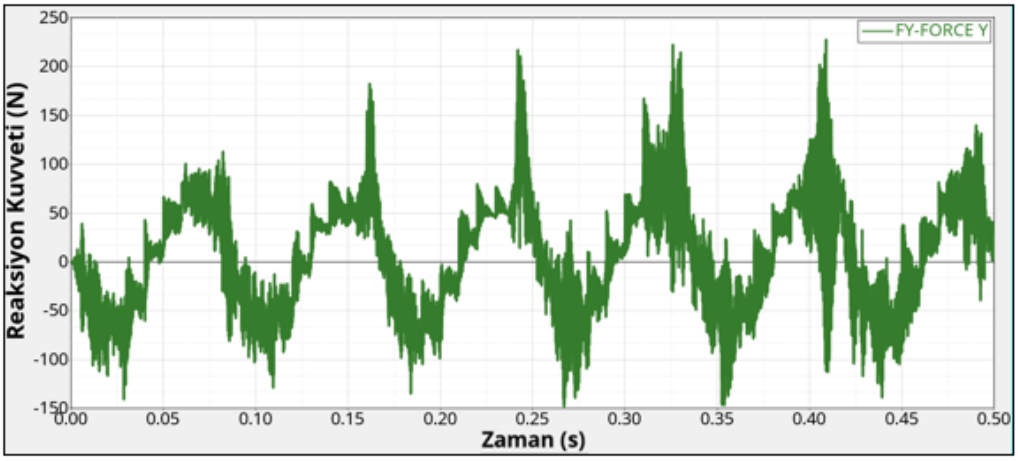


Şekil 4.47 Senaryo 11 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

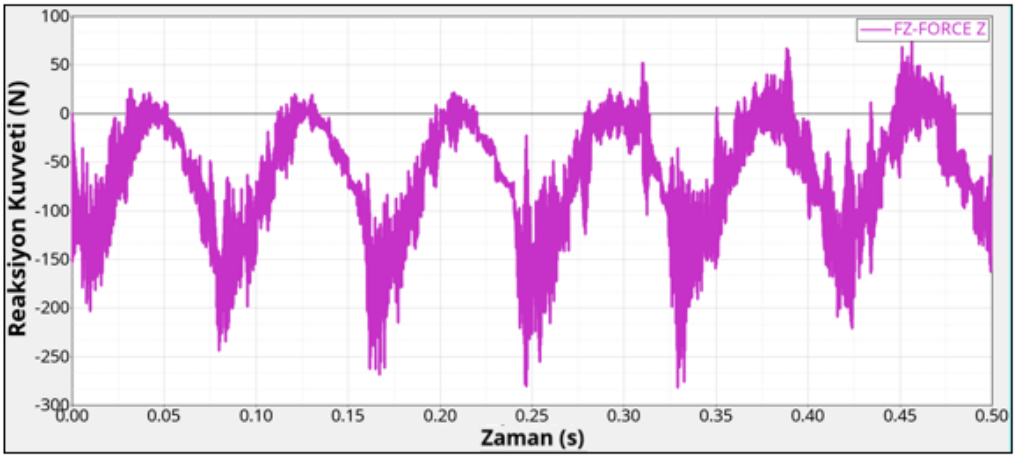
Senaryo 12 için; x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenlerinde hesaplanan reaksiyon kuvvetleri sırasıyla Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50' de gösterilmiştir.



Şekil 4.48 Senaryo 12 için x_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

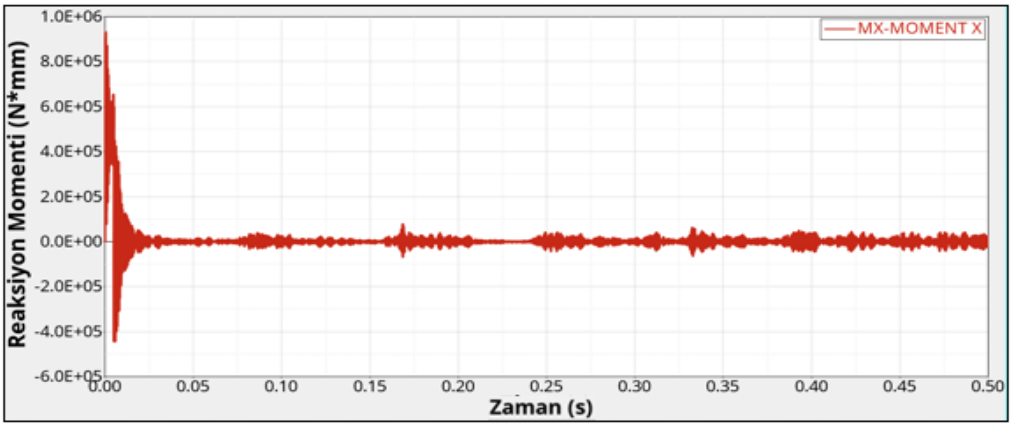


Şekil 4.49 Senaryo 12 için y_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

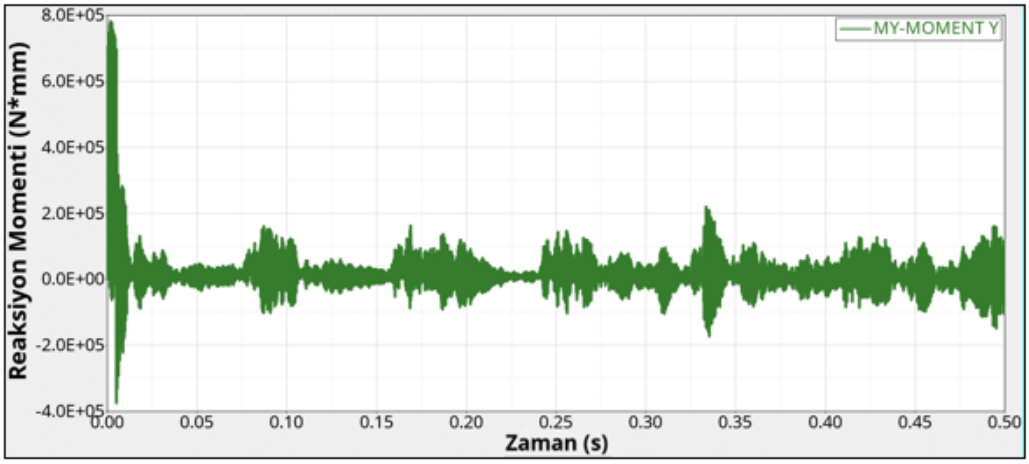


Şekil 4.50 Senaryo 12 için z_{yay} ekseninde hesaplanan reaksiyon kuvveti

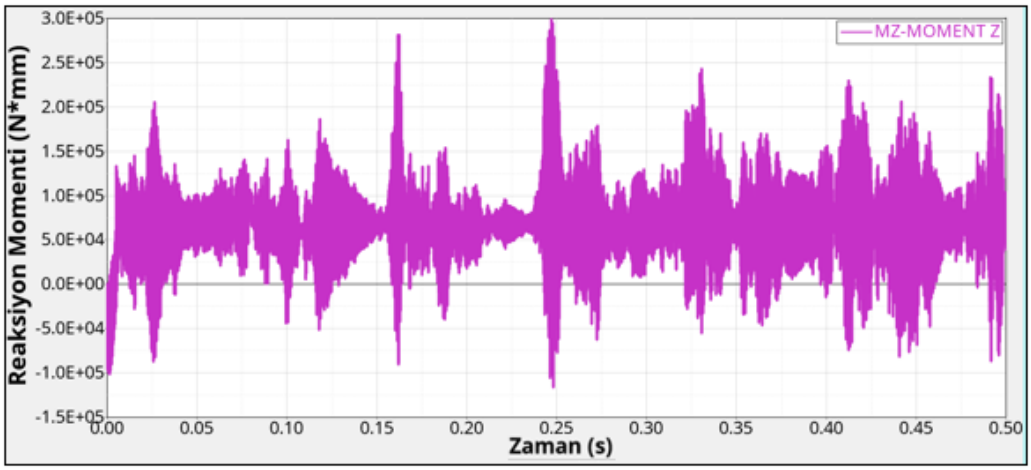
Senaryo 12 için; x_{yay}, y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri sırasıyla Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53' te gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Senaryo 12 için x_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



Şekil 4.52 Senaryo 12 için y_{yay} ekseni etrafında oluşan moment



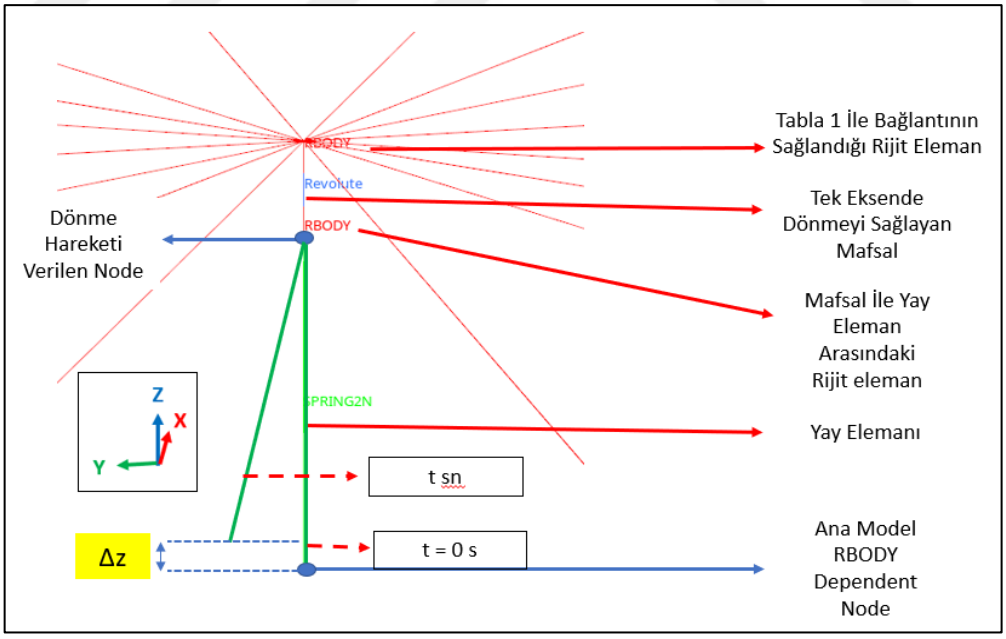
Şekil 4.53 Senaryo 12 için z_{yay} ekseni etrafında oluşan moment

Senaryo 12 ve senaryo 11 ile kıyaslandığında; senaryo 12' de suyun dengeleme halkası içerisindeki hareketi sebebiyle hesaplanan reaksiyon kuvveti ve reaksiyon momenti değerleri titreşimli olarak elde edilmiştir. Senaryo 12' ye geçiş ile birlikte artan model kütlesi sebebiyle reaksiyon kuvvetleri büyüklük olarak artmıştır. Reaksiyon momentleri kıyaslandığında ise, eğrilerdeki anlık titreşimler artmıştır. Ancak eğriler filtrelendiği zaman, artan kütleye göre reaksiyon momenti değerlerinde daha düşük değişimler gerçekleşmiştir. Yani suyun kütlesinin de modele eklenmesiyle birlikte dengesizliğin dolayısıyla reaksiyon momentlerinin artması beklenirken, reaksiyon momentleri suyun kütlesi ile orantılı olacak şekilde artmamıştır. Dolayısıyla suyun dengesizliğin giderilmesine olumlu etkisi olduğu söylenebilir.

4.2.2 Dengeleme İyileştirme Amacıyla Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

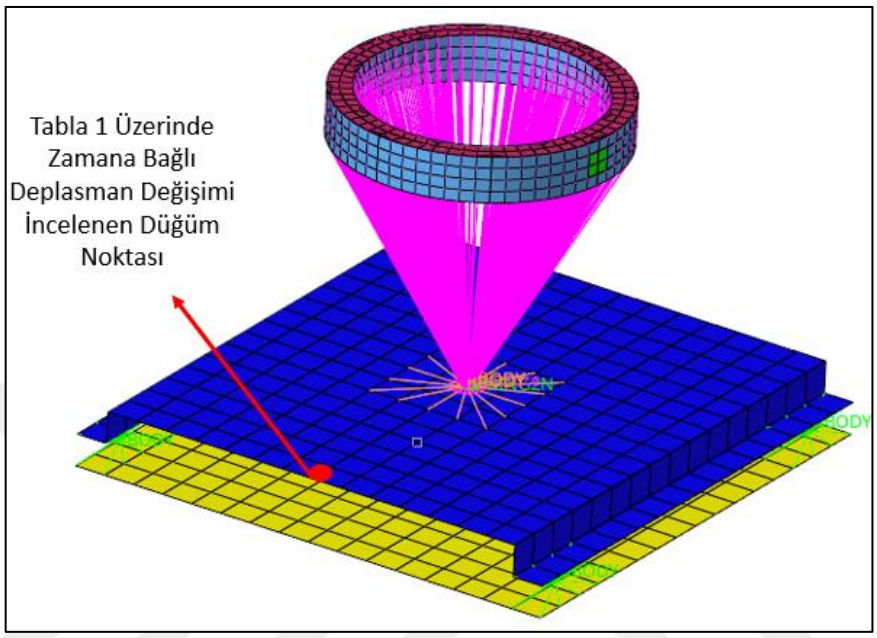
Bu bölümde, bölüm 3.2.5' te anlatılan dengeleme iyileştirme amacıyla kurgulanan analiz senaryolarının sonuçları açıklanacaktır. Sonuçlar; belirtilen başlıklarda, kendi aralarında değerlendirilecektir.

Her bir başlık altında sonuçlar incelenirken, üç konu üzerinde durulmuştur. Bunlardan birincisi, ön doğrulama analizlerinde olduğu gibi ana modeldeki yay elemanının lokal y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momentleri karşılaştırılmıştır. Bu reaksiyon momentleri, modelin eğilmesine ya da başka bir deyişle, sallanmaya sebep olan momentlerdir. İkinci olarak; ana modeldeki yay elemanının, rijit elemanın bağımlı düğüm noktasına bağlandığı düğüm noktasının global eksenel takımında düşey z ekseninde bağıl konum değişimi incelenmiştir. Yaklaşımın daha iyi anlaşılabilmesi açısından Şekil 4.54' te gösterilmiştir. Oluşturulan modelde, motor mil eksenini temsil eden yay elemanı oldukça rijit modellenmiştir. Dolayısıyla yay elemanı ile RBODY rijit elemanın birleştiği düğüm noktası düşey eksende, ilk konumuna göre ne kadar çok ve ne kadar sık konum değiştirirse, o kadar çok titreşim oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.54 Düşey z ekseninde Δz konum değişimi incelenen düğüm noktası ve bağıl konum değişimi

Üçüncü olarak incelenen nokta ise; tabla bir üzerinde belirlenen bir düğüm noktasında, global eksenlerde zamana bağlı oluşan deplasman değişimidir. Finalize model üzerinde belirlenen düğüm noktası, Şekil 4.55' te gösterilmiştir. Bu ve benzeri noktalardan sensörler ile toplanan deplasman ya da ivme değerleri, modelin doğrulamasında kullanılabilir.



Şekil 4.55 Tabla 1 üzerinde zamana bağlı deplasman değişimi incelenen düğüm noktasının finalize model üzerinde gösterimi

Kısaca özetlenecek olunursa; kurgulanan her bir analiz senaryosu için, yay lokal y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momentleri, yay elamanının düğüm noktasının düşey eksende yaptığı konum değişimi ve tabla üzerinden belirlenen bir düğüm noktasında (8806 numaralı düğüm noktası) hesaplanan deplasman değerleri incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

4.2.2.1 Sıvı Miktarının Dengelemeye Etkisinin Değerlendirilmesi

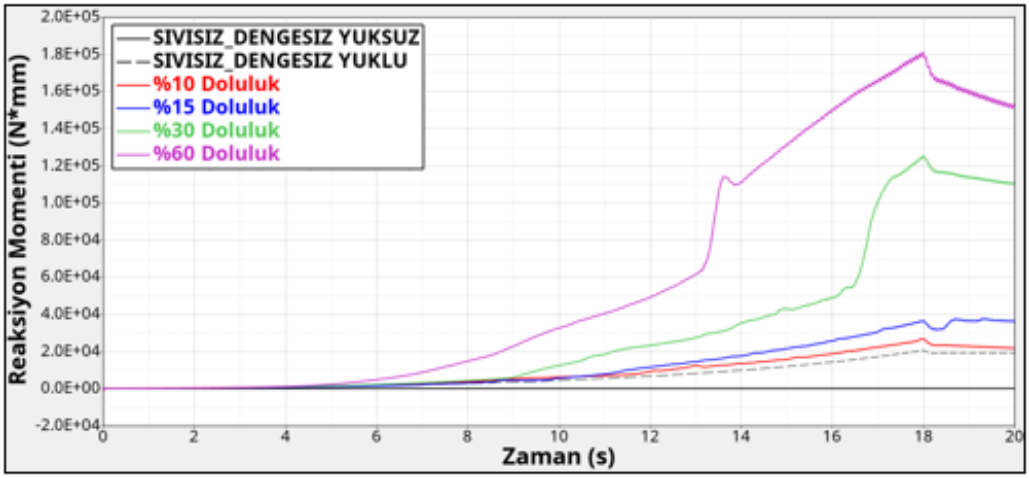
Sıvı miktarının dengelemeye olan etkisini incelemek amacıyla, detayları bölüm 3.2.5.1' de anlatılan, Tablo 4.1 ve Tablo 4.2' de gösterilen senaryolar kurgulanmıştır. Referans olarak; dengeleme halkası içerisinde sıvı bulunmayan ama dengesiz yük bulunan senaryo ve hem dengesiz yük hem de dengeleme halkası içerisinde sıvı bulunmayan senaryo kullanılmıştır.

Tablo 4.1' den de görülebileceği üzere; dengeleme halkası içerisinde rakip ürünlerde genel bir kullanım oranı olan % 30 doluluk oranı ve bu doluluk oranının belirli katlarındaki doluluk oranlarında analizler tekrarlanmıştır.

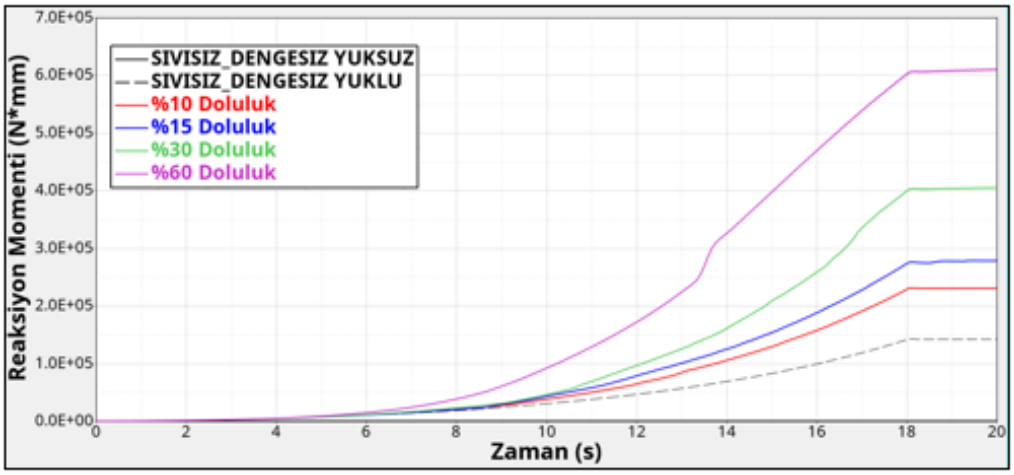
Tablo 4.1 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

Basit Kübik Yapı İçin Sıvı Miktarının Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • % 10 Doluluk Oranlı • % 15 Doluluk Oranlı • % 30 Doluluk Oranlı • % 60 Doluluk Oranlı

Dengeleme halkası hacminin aynı doluluk oranını sağlayacak şekilde, hem basit kübik yapılı tanecik oluşturma yöntemi ile, hem de yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan senaryolardan elde edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

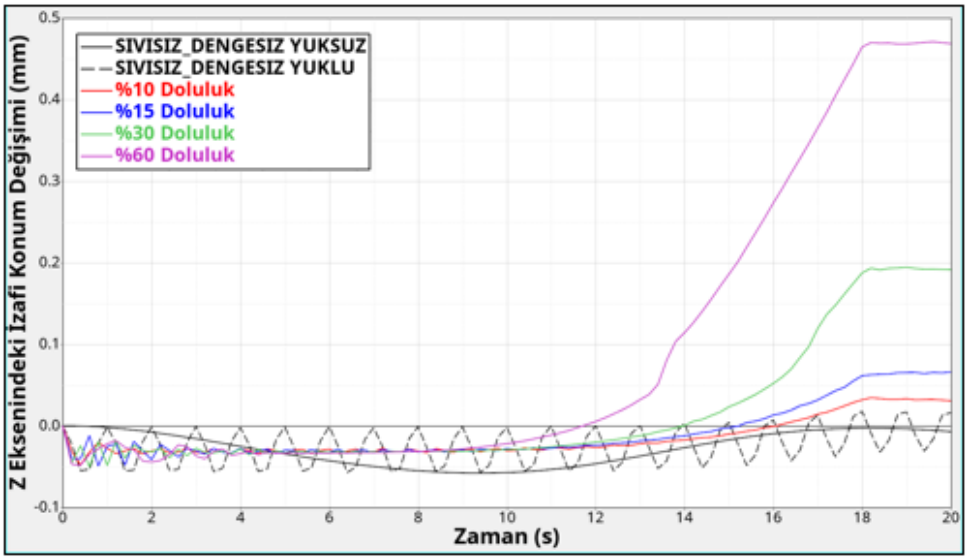


Şekil 4.56 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti



Şekil 4.57 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

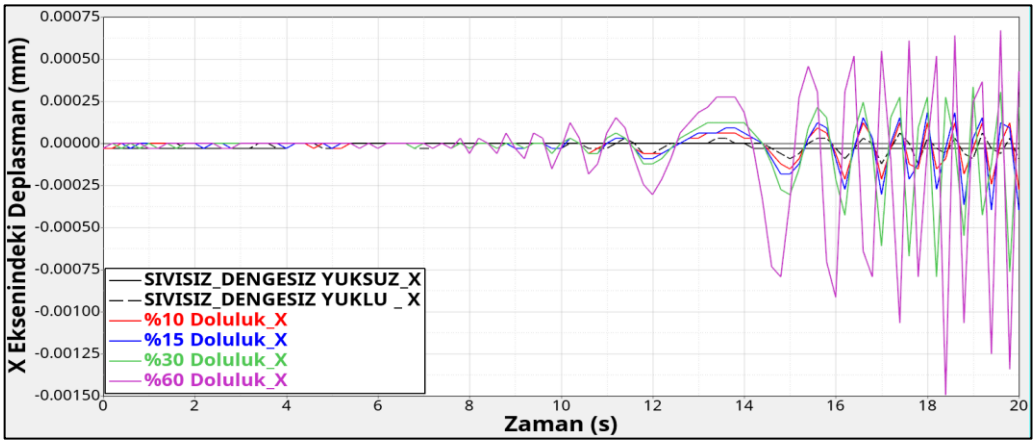
Basit kübik yapı için gerçekleştirilen senaryolarda; beklenildiği üzere doluluk oranı ve açısal hız arttıkça, yay lokal eksen takımında y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momenti artmıştır. Şekil 4.56 ve Şekil 4.57 detaylı incelendiğinde yaklaşık 5. saniye' ye kadar reaksiyon momentlerinin birbirine yakın seyrettiği gözlenmektedir. Bu süre zarfında dengeleme halkası içerisindeki kütlenin, dengeleme yönünde bir katkısı olmuştur.



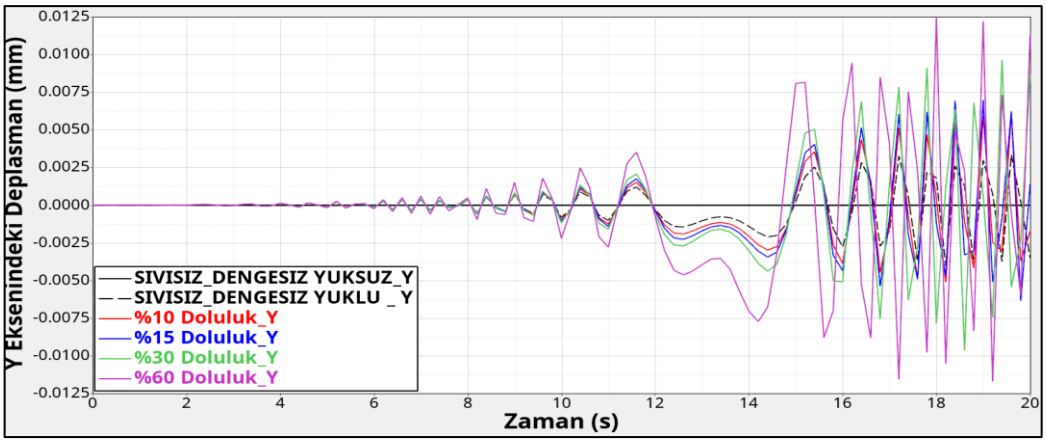
Şekil 4.58 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

Analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında referans olarak kullanılan düğüm noktasının düşey z eksenindeki izafi konum değişimi incelendiğinde; basit kübik yapıda oluşturulan SPH taneciklerinin hareketinin, düşey eksendeki titreşimleri önemli oranda azalttığı görülmüştür. Sıvısız ve dengesiz yüksüz senaryo ile sıvısız ve dengesiz yüklü senaryo kıyaslandığında; zamana bağlı düşey eksendeki izafi konum değişiminin periyodu, modele dengesiz yük eklenmesi ile birlikte düşmüştür ve daha sık konum değişimi gerçekleşmiştir. Bu da titreşimin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Şekil 4.58' de 0-10 sn arasındaki düşey yöndeki konum değişimine odaklanılırsa, eğrilerin yatay olduğu zaman dilimi aralıklarında düşey yöndeki izafi konum değişimi sabittir. % 60 doluluk oranında izafi konum değişimi daha azken, bu izafi konum değişiminin sabit olduğu süre aralığı daha kısadır. % 60 doluluk oranı için maksimum dengeleme 5 - 8,5 sn sn' leri arasında gözlenmiştir. % 30 doluluk oranında ise, maksimum dengeleme 5 – 10,5 sn aralığındadır.

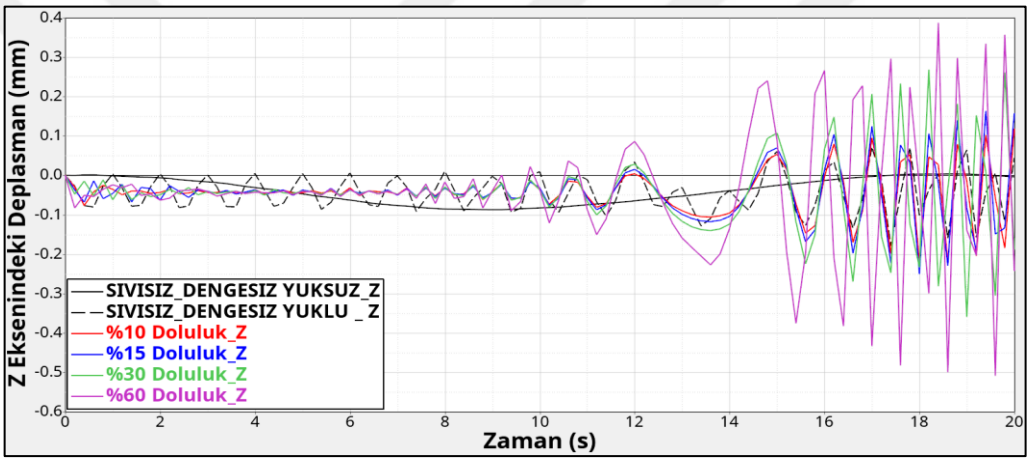
Oluşturulan modelde, yayın katılığı ya da rijitliği ne kadar yüksek belirlenmiş olsa da, yay elemanı olmasından kaynaklı, yay bir miktar burulmalara ve eğilmelere maruz kalmaktadır. Yay katılığının arttırılması durumunda ise, yüksek enerji hataları ve uzun çözüm süreleri ile karşılaşılmıştır. Bu yüzden tabla 1 üzerinden seçilen herhangi bir düğüm noktasının zamana bağlı deplasman değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.59 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.60 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.61 Basit kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global takımında z eksenindeki deplasman değişimi

Basit kübik yapı ile kurgulanan senaryolarda, tabla 1 üzerinden seçilen 8806 numaralı düğüm noktasının global x, y ve z eksenlerindeki deplasman değişimleri sırasıyla Şekil 4.59, Şekil 4.60 ve Şekil 4.61' de gösterilmiştir. Bu düğüm noktasının eksenlerdeki deplasman değişimleri incelendiğinde, x ve y eksenlerinde hesaplanan deplasman değişim miktarları farklı doluluk oranı senaryoları için yaklaşık 8. sn' ye kadar aynı olmakla birlikte, bu zamandan sonra dengeleme halkası içerisindeki dengeleme sıvısının artması ile elde edilen deplasman değişim grafiklerinin genlikleri artmış ve daha yüksek deplasman değişiklikleri gözlenmiştir. z ekseninde ise, öngörüldüğü üzere, 3 ve 7. saniyeler arasında düşey

yöndeki deplasman değişiklikleri birbirine oldukça yakın olup yaklaşık 7,5. saniyeden itibaren doluluk oranı arttıkça düşey yöndeki deplasmanlar artmıştır.

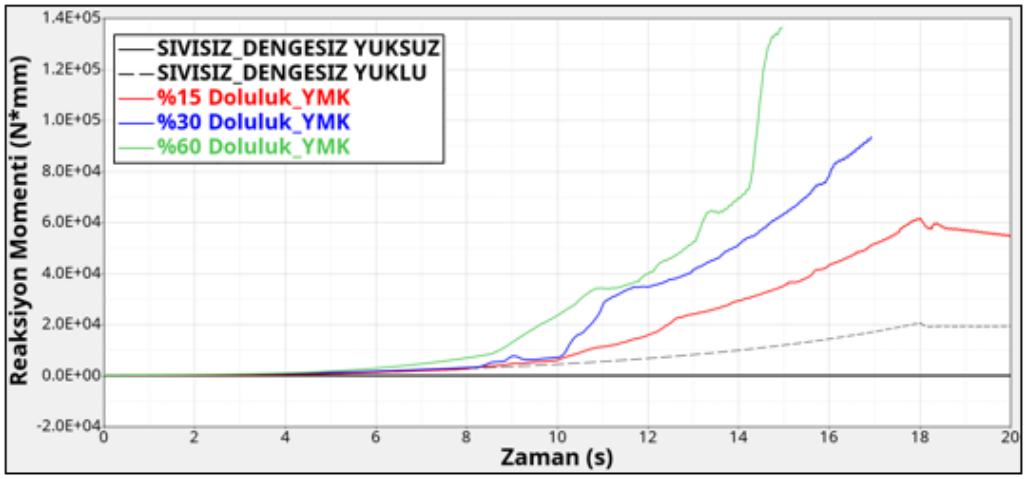
Hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar; genel anlamda x ve y eksenlerindeki deplasmanlar artsa da, z eksenindeki deplasmanlarla kıyaslandığında oldukça düşüktür. Genel anlamda; x ve y eksenlerinde oluşan deplasmanlar, z yönünde oluşan deplasmanların 1/10' undan daha düşüktür.

Doluluk oranı için elde edilen bu değerlerin, tanecik oluşturma metoduna bağlı olup olmadığının incelenmesi amacıyla, Tablo 4.2' de gösterilen senaryolarda analizler tekrarlanmıştır.

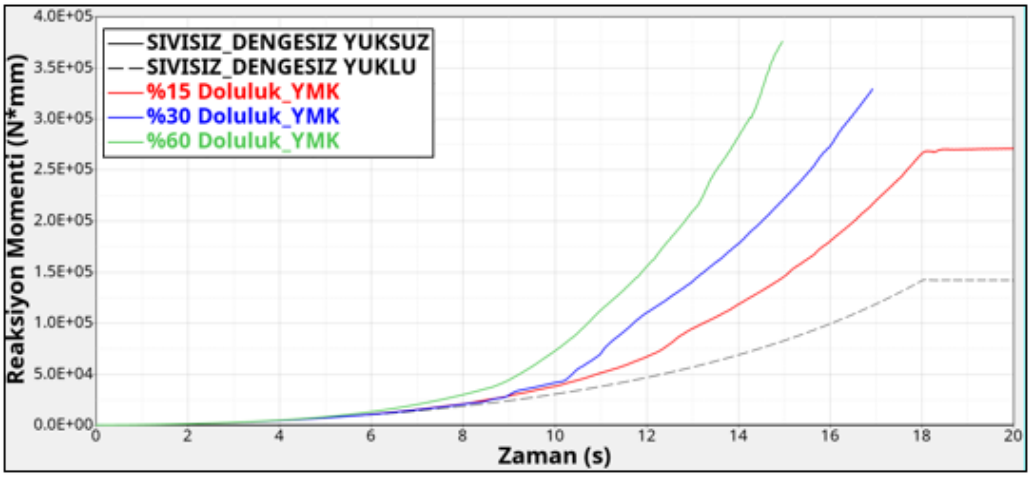
Tablo 4.2 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

Yüzey Merkezli Kübik Yapı İçin Sıvı Miktarının Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • % 10 Doluluk Oranlı • % 15 Doluluk Oranlı • % 30 Doluluk Oranlı • % 60 Doluluk Oranlı

Yüzey merkezli kübik yapıdaki tanecik oluşturma metodu ile oluşan tanecik sayısı, basit kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile oluşan tanecik sayısından genel anlamda daha yüksek (Tablo 3.9' da sayılar verilmiştir) ve dolayısıyla tanecik ağırlığı daha düşük olduğundan, yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile tanecik oluşturulup başlatılan analizler daha uzun sürmüştür. Kısacası yüzey merkezli kübik yapı ile tanecik oluşturulduğunda zaman adımları daha düşüktür. Bu sebeple % 30 ve % 60 doluluk oranları için 20 saniyeden daha kısa çözümler yapılmıştır.

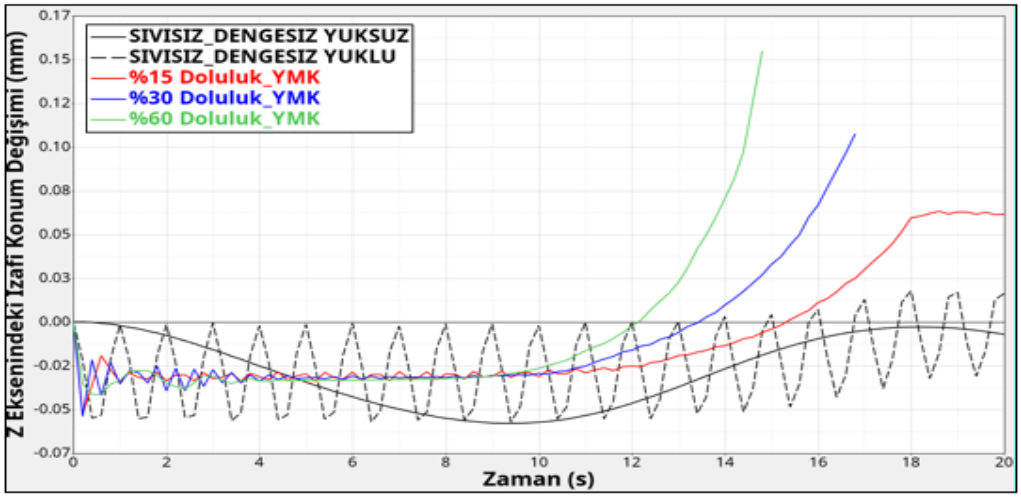


Şekil 4.62 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti



Şekil 4.63 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

Yüzey merkezli kübik yapıda oluşturulan SPH tanecikleri ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarında yaklaşık 10. saniyeye kadar y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafındaki reaksiyon momentleri % 15 ve % 30 doluluk oranları için oldukça yakın çıkmıştır. Yaklaşık 6. saniyeye kadar farklı senaryolar için yakın seyreden reaksiyon momenti, dengeleme halkası doluluk oranı arttıkça artmıştır ve bu zamandan sonra sıvı kütlesi dengelemenin yanında yeni dengesizlik oluşturmuştur.

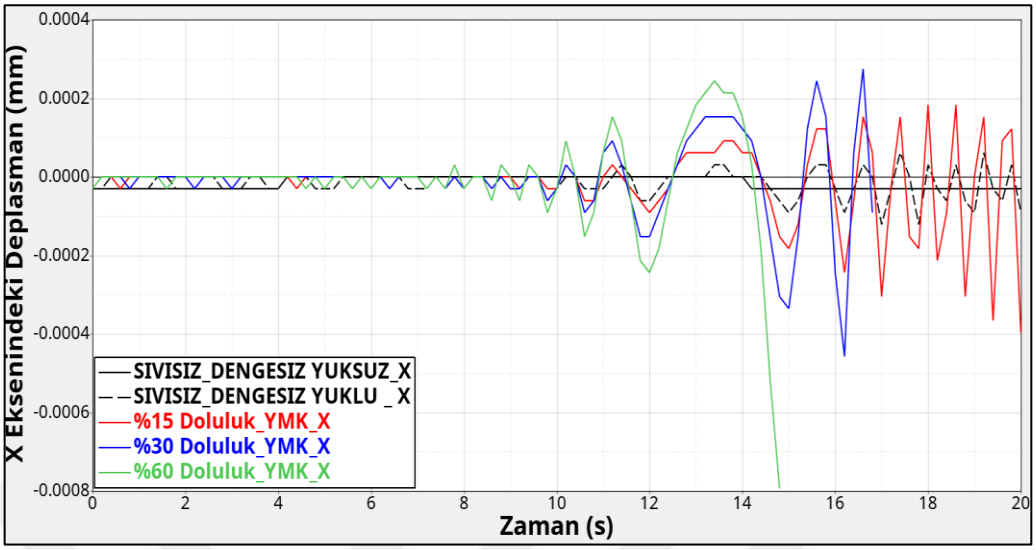


Şekil 4.64 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

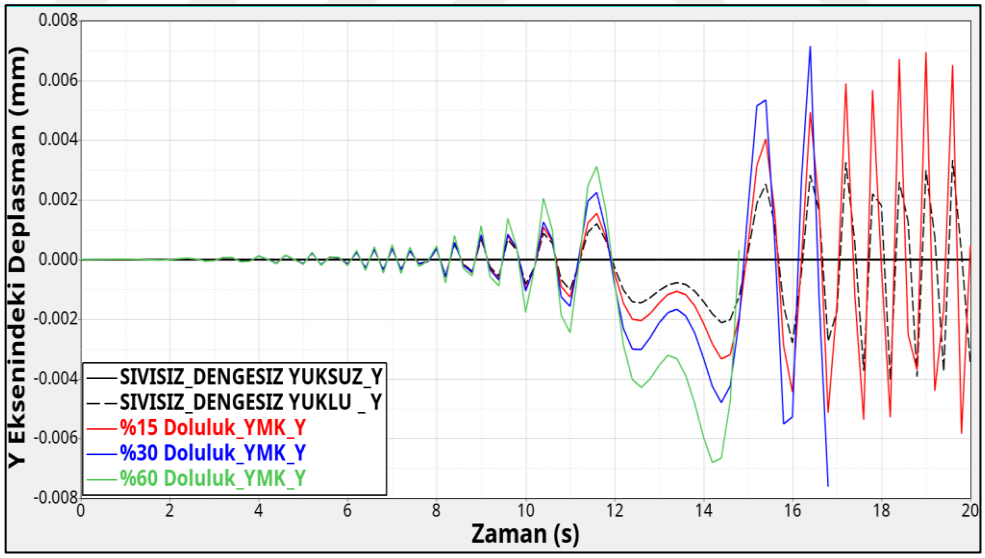
Yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler ile kurgulanan analiz sonuçları da incelendiğinde, basit kübik yapı ile oluşturulan tanecikler ile kurgulanan analiz senaryolarına benzer şekilde sonuçlar çıkmıştır. Yayın karşılaştırma için kullanılan düğüm noktasının izafi konum değişimi incelendiğinde, yaklaşık 4 ile 9. saniyeler etkili olacak şekilde en iyi dengeleme oranının % 60 doluluk oranı ile sağlandığı gözlenmiştir. %30 doluluk oranındaki izafi konum değişimleri %15 doluluk oranına göre daha azken, %60 doluluk oranına göre daha fazladır. % 30 doluluk oranında en iyi dengelemenin 5 – 10,5 saniyeleri arasında sağlandığı öngörülmektedir.

Yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile gerçekleştirilen analizlerde, Tabla 1 üzerindeki karşılaştırma düğüm noktasının eksenlerdeki deplasman değişimleri Şekil 4.65, Şekil 4.66 ve Şekil 4.67' de gösterilmiştir. Basit kübik yapıda oluşturulan taneciklerle gerçekleştirilen analiz senaryolarına benzer şekilde; her üç doluluk oranında gerçekleştirilen analizlerde, x ve y eksenlerindeki deplasman değişimleri z ekseninde gerçekleşen deplasman değişiminden oldukça küçüktür. Hatta z ekseninde oluşan deplasman değişimi genel anlamda x ve y eksenlerinde oluşan deplasman değişiminden yaklaşık on kat daha fazladır. Farklı doluluk senayoları için; z ekseninde oluşan deplasman değişimi 4 – 6 sn aralığında

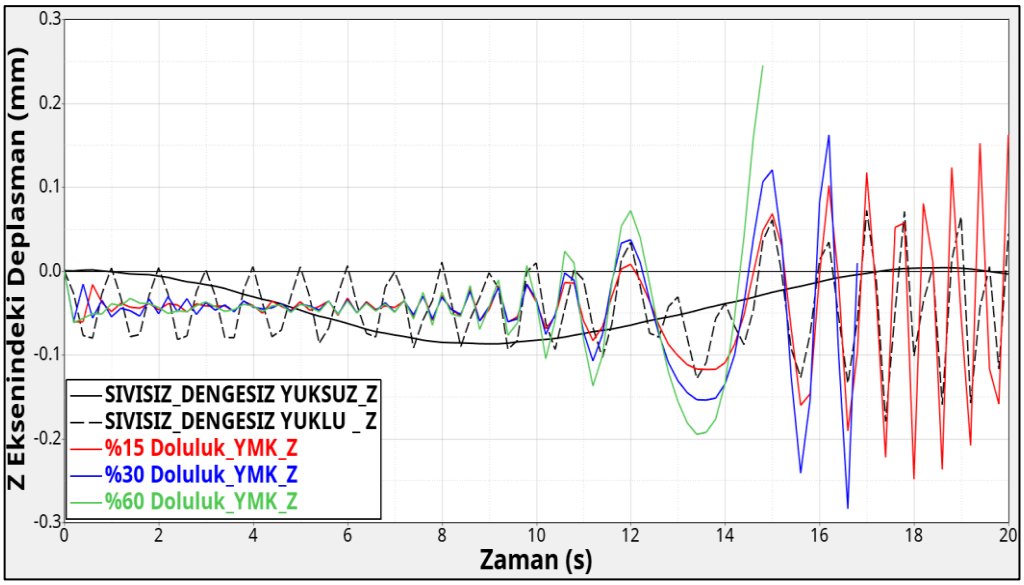
birbirine oldukça yakın iken, 6. saniyeden itibaren doluluk oranının artması ile artmıştır.



Şekil 4.65 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.66 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.67 Yüzey merkezli kübik yapı için, sıvı miktarının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

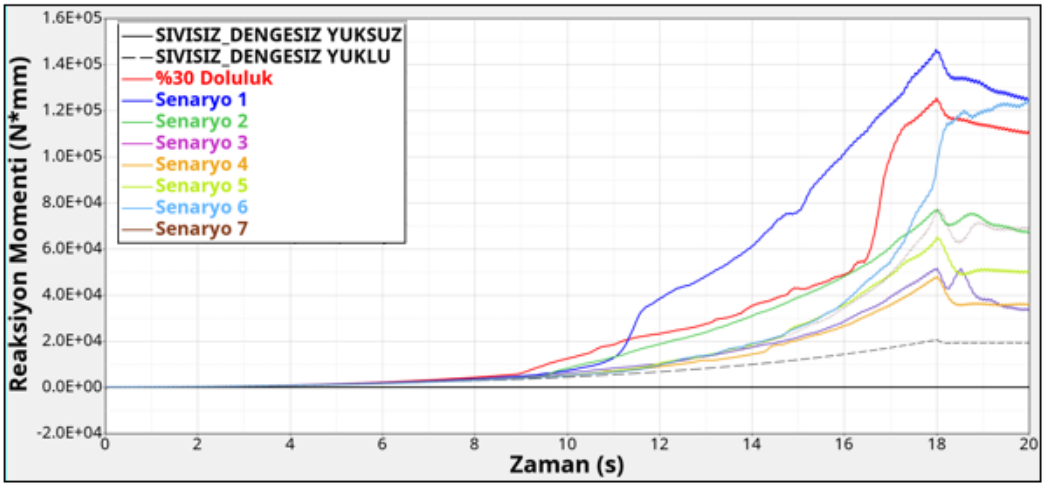
Dengeleme halkası doluluk oranları ile ilgili kurgulanan analiz senaryoları kısaca özetlenecek olunursa, daha düşük devirlerde, hız grafiğine göre 3,5 – 7 sn aralığında, yani yaklaşık 8 – 16,5 rad/s açısal hız aralıklarındaki çalışma koşullarında % 60 doluluk oranı 500 gr dengesiz yük için en iyi dengelemeyi sağlamıştır. Bu zaman aralığı biraz daha uzatılmak istenirse, yani 10. sn ya da yaklaşık 23 rad/ sn açısal hıza kadar uzatılmak istenilirse, % 30 doluluk oranı seçilebilir. Oluşturulan tasarımda % 30 doluluk oranı da yaklaşık 0,94 kg ağırlığa tekabül etmektedir. Doluluk oranları için, farklı tanecik oluşturma metodu ile oluşturulan analiz senaryoları kendi aralarında Bölüm 4.2.2.4' te karşılaştırılacaktır.

4.2.2.2 Konstrüktif Yapının Dengelemeye Etkisinin Değerlendirilmesi

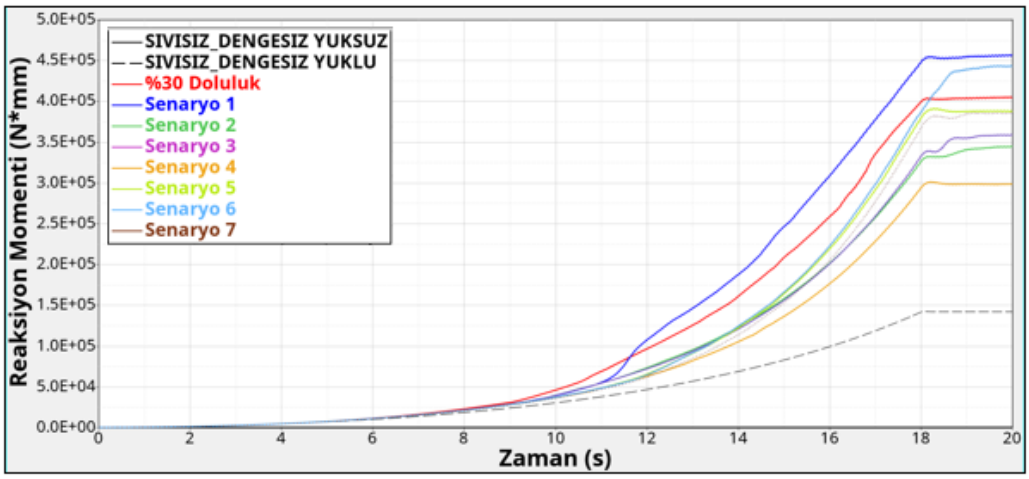
Bu bölümde, dengeleme halkası konstrüktif yapısının dengelemeye olan etkisini incelemek amacıyla, bölüm 3.2.5.2' de anlatılan senaryoların sonuçları aktarılacaktır. Karşılaştırma yapılan senaryolar Tablo 4.3' te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

Konstrüktif Yapının Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar	
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz (Senaryo 0.1) • Sıvısız – Dengesiz Yüklü (Senaryo 0.2) • Sıvılı – Dengesiz Yüklü (Referans) (%30 Doluluk)	• Senaryo 1 • Senaryo 2 • Senaryo 3 • Senaryo 4 • Senaryo 5 • Senaryo 6 • Senaryo 7



Şekil 4.68 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

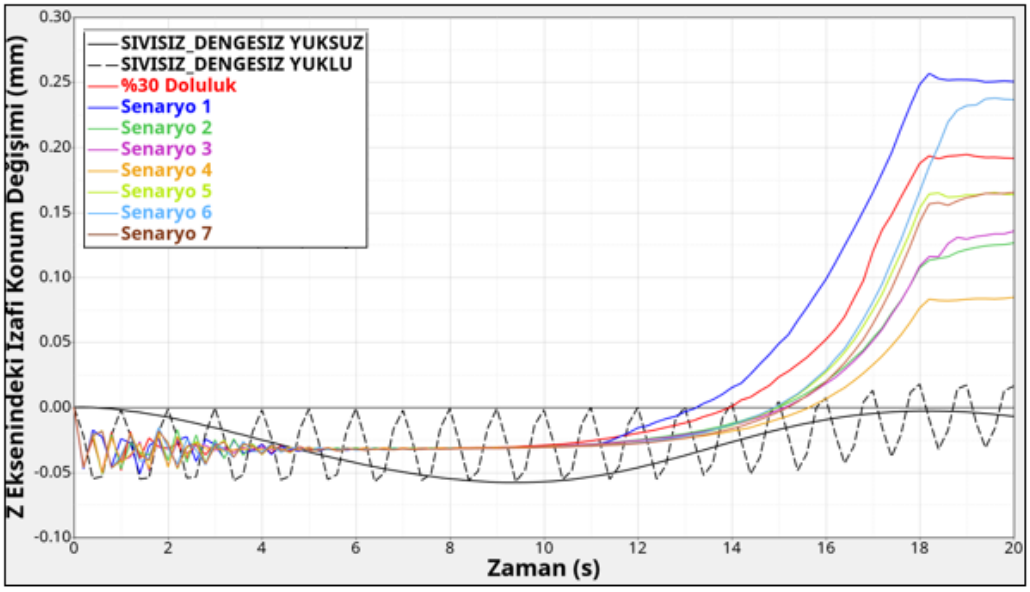


Şekil 4.69 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

İçi tamamen boş, basit dengeleme halkası tasarımının, tasarımsal olarak farklılaştırılarak oluşturulan modellerde, yay elemanının lokal y_{yay} ve z_{yay} eksenleri etrafındaki reaksiyon momentleri incelenmiştir.

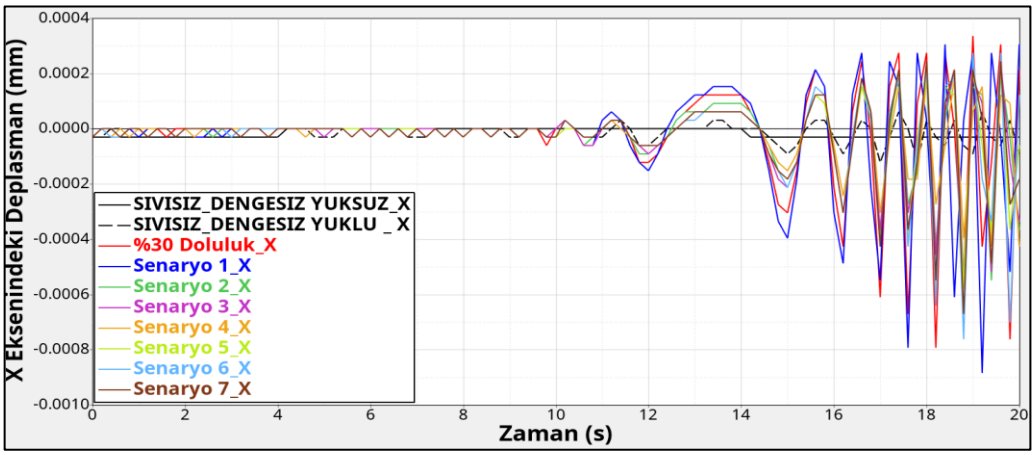
y_{yay} ekseni etrafında yaklaşık 8,8. saniyeye kadar hesaplanan reaksiyon momentleri tüm senaryolarda birbirine yakın mertebelerdedir. 8,8. saniyeden sonra sıvının dengeleme halkası içerisindeki hareketi sebebiyle artan açısal hızla birlikte reaksiyon kuvvetleri de artmıştır. Referans senaryo olan, % 30 doluluk senaryosu ve senaryo 1 yani dengeleme halkasının iki kanallı olması durumu, sıvının dengeleme halkası içerisinde rahatlıkla dolaşmasına izin vermektedir. Dolayısıyla, 8,8 – 20 saniyeler arasındaki daha düşük hızlarda, sıvının dengesizlik oluşturmaya çalıştığı söylenebilir. Dikkat edilirse, sıvının hareketinin kısıtlandığı senaryo 3, senaryo 4, senaryo 5, senaryo 6 ve senaryo 7' de 8,8 – 17 .sn zaman aralığında reaksiyon momentleri daha düşüktür. Senaryo 6' da hesaplanan reaksiyon momenti eğrisinin 17. saniyede daha önceki cümlede belirtilen senaryolardan ayrışması sıvının L şeklindeki engelleri aşması olabilir.

z_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momentleri ise; yaklaşık 9. saniyeye kadar birbirine oldukça yakındır. Benzer şekilde, sıvı hareketinin engellenmediği senaryolarda belirli bir zamanda daha yüksek reaksiyon momentleri gözlenmiştir. Sıvı tarafından dengesizliğin iyice arttığı 18 – 20 saniyeleri arasında en düşük reaksiyon momenti senaryo 4' te gözlemiştir.

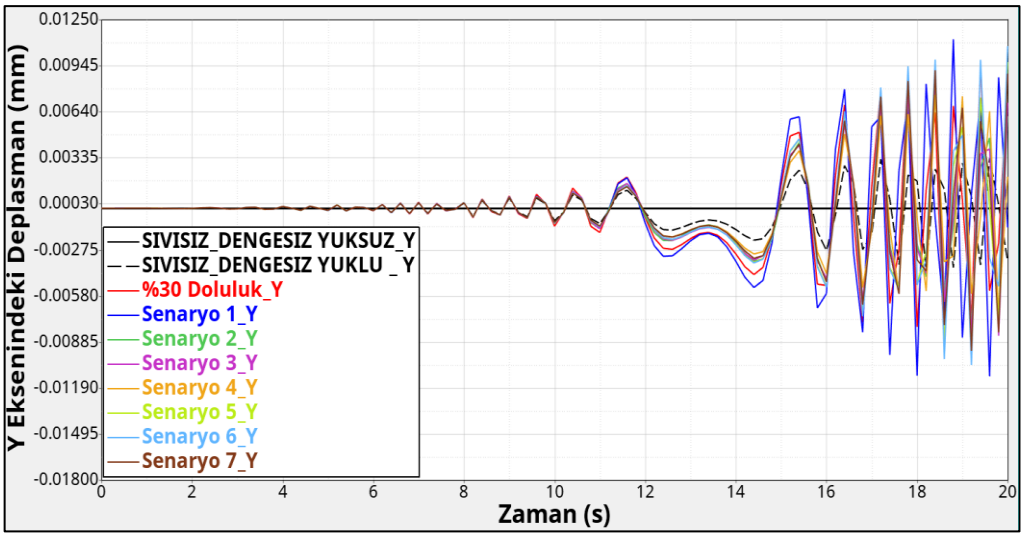


Şekil 4.70 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

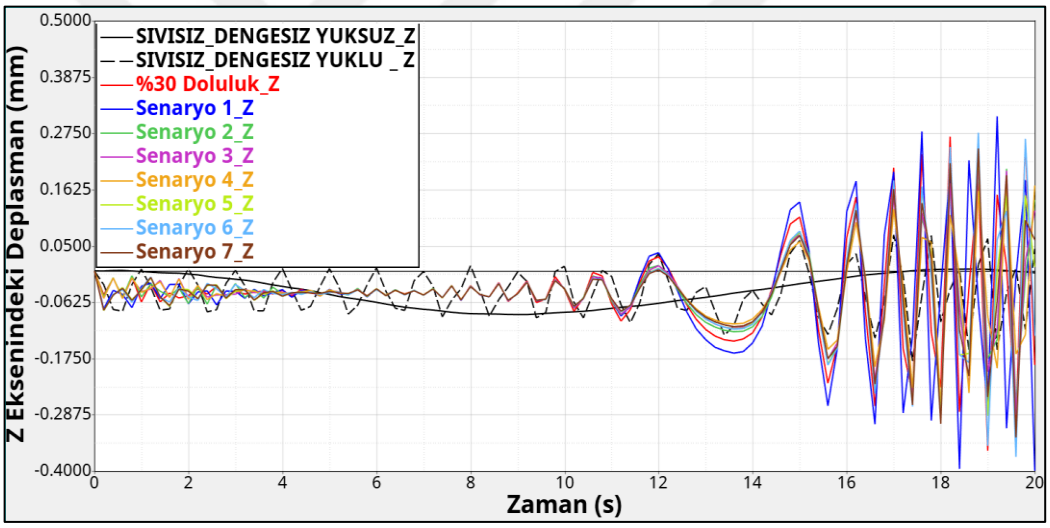
Yay elemanı ve RBODY elemanın birleşimini sağlayan düğüm noktasının düşey eksende izafi konum değişimi incelenecek olunursa; en uzun dengelemenin senaryo 4' te olduğu öngörülmektedir. Sıvı tarafından oluşan dengelemenin ise en erken senaryo 1' de bozulduğu söylenebilir. En iyi dengeleme performansının 3,5 - 8 saniyeleri arasında oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 4.71 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.72 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.73 Konstrüktif yapının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

Tabla 1 üzerinden seçilen 8806 numaralı düğüm noktasında x ekseninki deplasmanlar 9,5. saniyeye kadar tüm senaryolarda birbirine yakın mertebelerdedir. Bu zamandan sonra sıvının dengeleme halkası içerisinde dairesel hareket yapmasına izin veren % 30 doluluk oranına sahip referans senaryo, senaryo 1 ve senaryo 2' de daha yüksek oranda artacak şekilde tüm senaryolarda zamana bağlı olarak artan açısal hızla birlikte artmıştır. Global y eksenindeki deplasman ise, hareketin 3,7. saniyesinden itibaren sıvının dengeleme halkası

içerisinde dairesel hareket yapmasına izin veren % 30 doluluk oranına sahip referans senaryo, senaryo 1, senaryo 2' de ve sıvının engelleri aşıp kısmen hareket edebileceği senaryo 2 ve senaryo 3' te daha yüksek oranda artacak şekilde tüm senaryolarda zamana bağlı olarak artan açısal hızla birlikte artmıştır. Global y ekseninde en az deplasman artışı, senaryo 4 ve senaryo 7' de gözlenmiştir. Global z ekseninde hesaplanan deplasmanlar incelenecek olunursa, en iyi dengeleme performansının 3,5 - 8 saniyeleri arasında oluştuğu bu yöntemle de ispat edilmiştir. Sıvı tarafından dengesizliğin en son oluştuğu düşünülen senaryo 4' te, yaklaşık 12,8. saniyeden itibaren sıvı dengeleme yerine dengesizlik oluşturacak yönde konumlanmıştır. En iyi dengeleme performansının 3,5 – 8 saniyeleri arasındaki zaman diliminde gerçekleştiği tabla 1 üzerindeki düğüm noktasının z eksenindeki deplasman değişiminden görülmektedir. Sıvısız ve dengesiz yüklü senaryonun oluşturduğu grafikte genliği oluşturan eğri diliminin dışına çıkıldığında sıvı tarafından dengesizliğin oluştuğu söylenebilir. Dolayısıyla dengelemenin öncelikle senaryo 1'de, sonrasında ise %30 doluluğa sahip referans senaryoda bozulduğu bu inceleme yönteminde de kanıtlanmıştır. Bu senaryoların ortak noktası ise, sıvının dengeleme halkası içerisinde dairesel hareketine kontrolsüz olarak izin vermeleridir.

Senaryo 4, senaryo 5, senaryo 6 ve senaryo 7' de diğer senaryolara göre daha iyi dengeleme performansı gözlense de, kendi aralarında kıyaslama yapabilecek kadar bir fark gözlenmemiştir.

4.2.2.3 Tanecik Sayısının Dengelemeye Etkisinin Değerlendirilmesi

Basitçe değerlendirilecek olunursa, interpolasyonlu tanecik metodunda kullanılan tanecik sayısı, sonlu elemanlar metodunda kullanılan eleman sayısı gibi düşünülebilir. Sonlu elemanlar yönteminde; eleman sayısı arttıkça, incelenen gerilme, gerinim ve deformasyon gibi analiz sonuçlarının doğrululuğu artmakla birlikte, ve belirli bir ağ sayısından sonra belli bir değere yakınsamaktadır. İnterpolasyonlu tanecik yönteminde de benzer durumun olduğu söylenebilir. Tanecik sayısı artıkça, katı tanecikler olarak modellenen sıvı, birbirinden bağımsız daha çok tanecik ile temsil edilir. Tanecik sayısının artmasıyla; birim tanecik başına düşen kütle azalır, bu yüzden zaman adımlarının da düşeceği

unutulmamalıdır. Sonlu elemanlar analizlerinde gerçekleştirilen, ağdan bağımsızlık ya da başka bir deyişle eleman sayısından bağımsızlık incelemesi (belirli eleman sayısından sonra değerlerin belli bir değere yakınsaması), benzer şekilde interpolasyonlu tanecik metodunda da yapılmalıdır. Yani tanecik sayısı arttıkça sonuçlar incelenmelidir. En basit anlamda tanecik sayısının ne kadar fazla olursa, sonuçların o kadar doğru olacağı söylenebilir. Ancak çözüm sürelerinin düşürülmesi bakımından farklı tanecik sayıları ile çözümler yapılmalıdır.

Bu amaçla, farklı tanecik sayıları ile analiz senaryoları kurgulanmıştır. Bunun en basit yöntemi, basit kübik yapıda tanecik oluşturma yöntemi ile oluşturulan senaryolardan birinde (%30 doluluk oranı ve tamamen içi boş dengeleme halkası kullanılmıştır) tanecikler arası nominal mesafenin değiştirilmesidir. Tablo 3.11' de gösterildiği üzere, tanecik sayısı değişirken toplam sıvı kütlesinin de bir miktar değişebileceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla tanecik sayısı azaldıkça, genellikle gerçek sıvı kütlesinden uzaklaşılır.

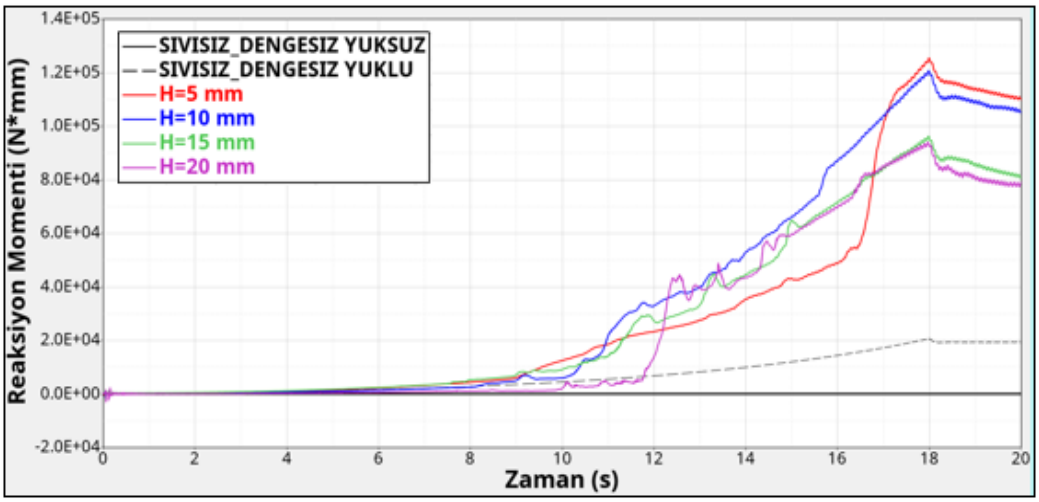
Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin gözlenmesi amacıyla kurgulanan analiz senaryoları Tablo 4.4' te gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

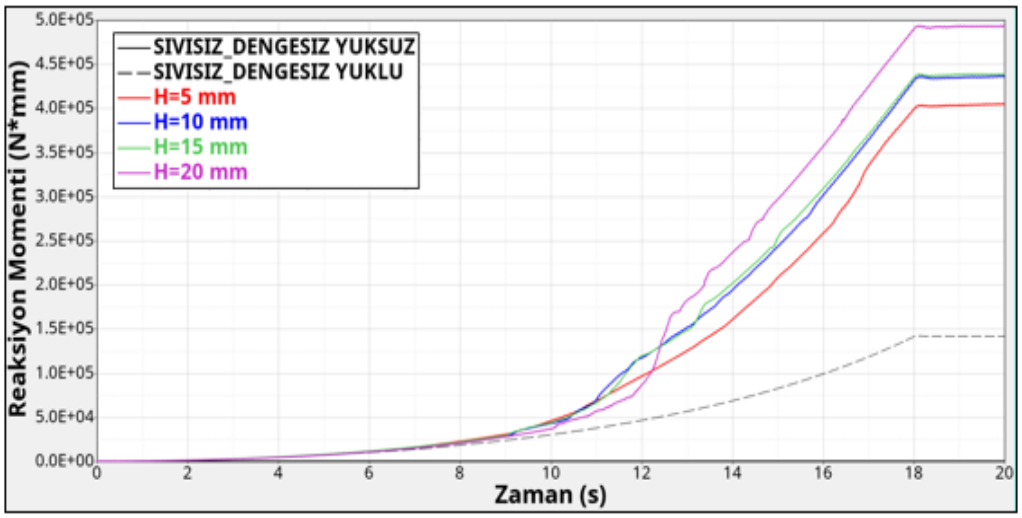
Tanecik Sayısının Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • h = 5 mm • h = 10 mm • h = 15 mm • h = 20 mm

h = 20 mm senaryosunda tanecik başına düşen kütle daha fazla olduğu ve bu taneciklerin dengeleme halkası içerisindeki hareketi sırasında oluşan kuvvetler daha büyük olduğu için, 10 – 18 sn zaman aralığında, y_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momenti ivmeden bağımsız olarak daha dalgalı şekilde oluşmuştur. Dikkat edilirse, tanecik sayısının daha fazla olduğu h = 5 mm

senaryosunda artan ivme ile doğru orantılı olarak reaksiyon momenti de artmaktadır. z_{yay} ekseni etrafında hesaplanan reaksiyon momenti ise, tüm senaryolarda beklenildiği üzere artan açısal hızla birlikte artmıştır.

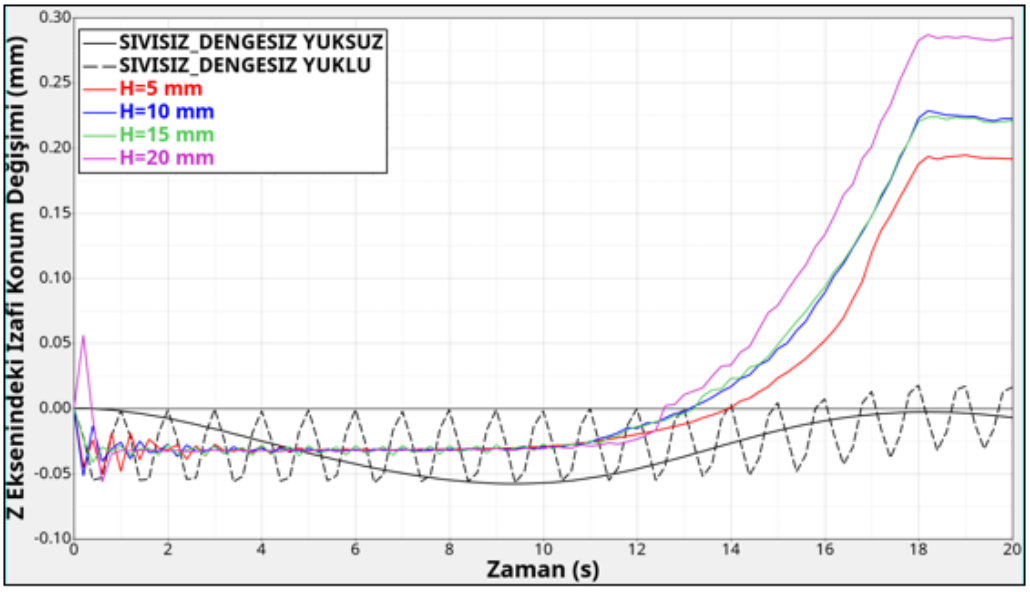


Şekil 4.74 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

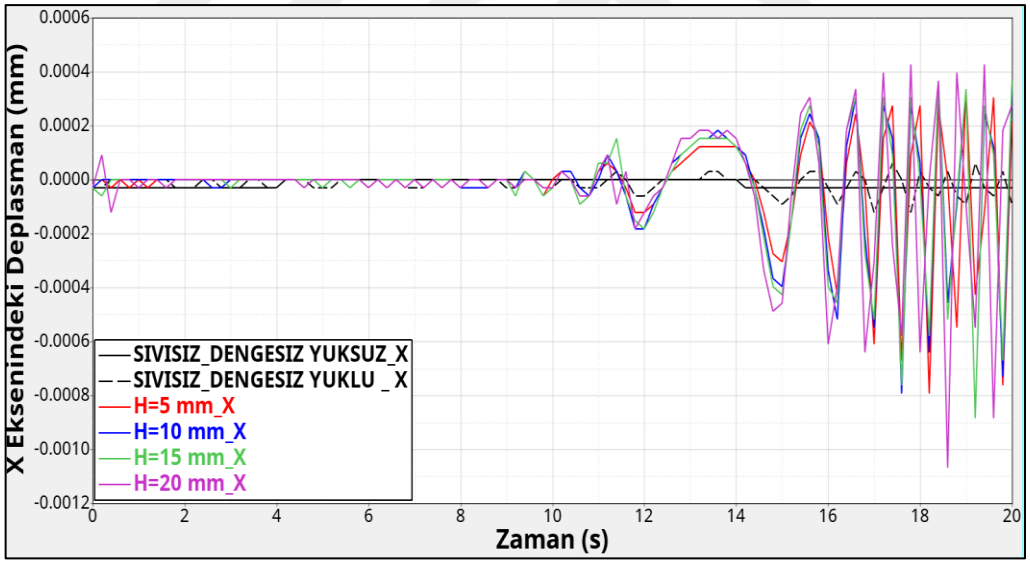


Şekil 4.75 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

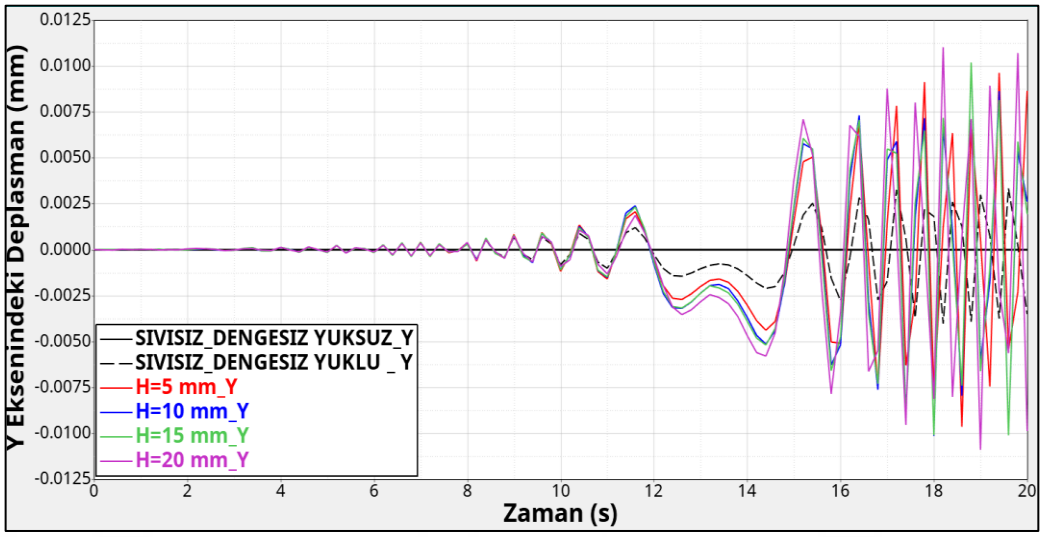
Yay üzerinde belirlenen düğüm noktasının düşey z eksenindeki izafi değişimi incelendiğinde; 0 – 3,5 sn zaman aralığında en fazla dengesizlik h = 5 mm senaryosundayken, tüm senaryolarda 4 – 10 sn zaman aralığında en çok dengeleme gerçekleşmiştir. Bu zaman aralığında; h = 5 mm ve h = 10 mm senaryolarının eğrilerinin birbirine oldukça benzer ve hesaplanan değerlerinin mertebeleri oldukça yakındır.



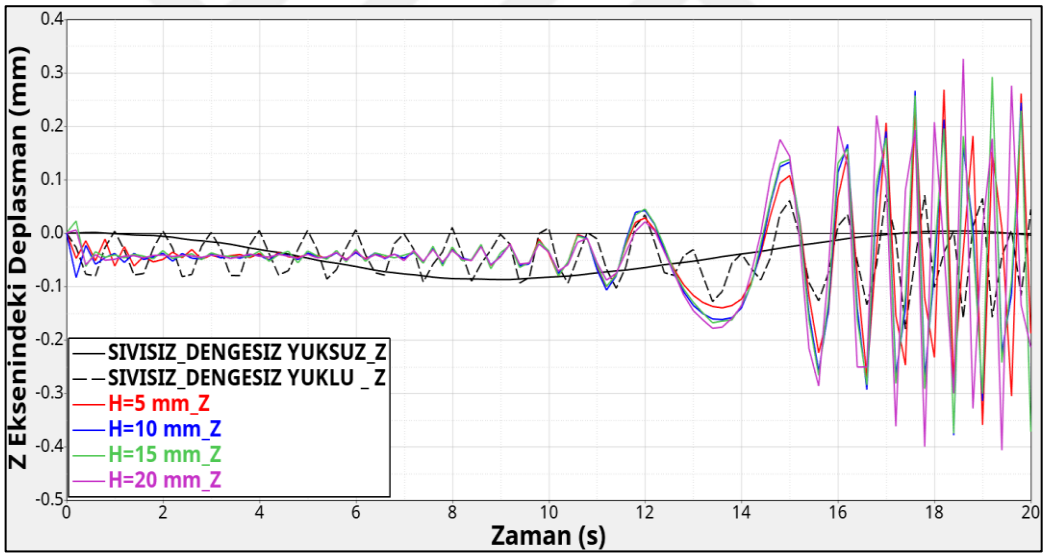
Şekil 4.76 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi



Şekil 4.77 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.78 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.79 Tanecik sayısının dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar için, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

Tabla üzerinde belirlenen 88806 numaralı düğüm noktasının eksenlerdeki deplasmanları incelendiğinde; x eksenindeki deplasmanlar, 10. saniyeye kadar yakın mertebelerde olup sonrasında azalan tanecik sayısı ile genellikle artmıştır. y ekseninde hesaplanan deplasmanlarda da benzer durum söz konusudur. Düşey z ekseninde ise 4 – 10 sn zaman aralığında en iyi dengeleme sağlanmıştır. Her dört senaryonun da dengeleme performanslarının birbirine yakın olduğu söylenebilir.

Yaklaşık 12,5. saniyeden sonra ise artan tanecikler arası nominal mesafe ya da başka bir deyişle azalan tanecik sayısıyla birlikte oluşan deplasmanlar artmıştır. Tüm eksenlerde oluşan deplasman değerleri birbirleri ile kıyaslandığında, hem x hem de y eksenlerinde gerçekleşen deplasmanlar z ekseninde gerçekleşen deplasmana göre oldukça düşüktür.

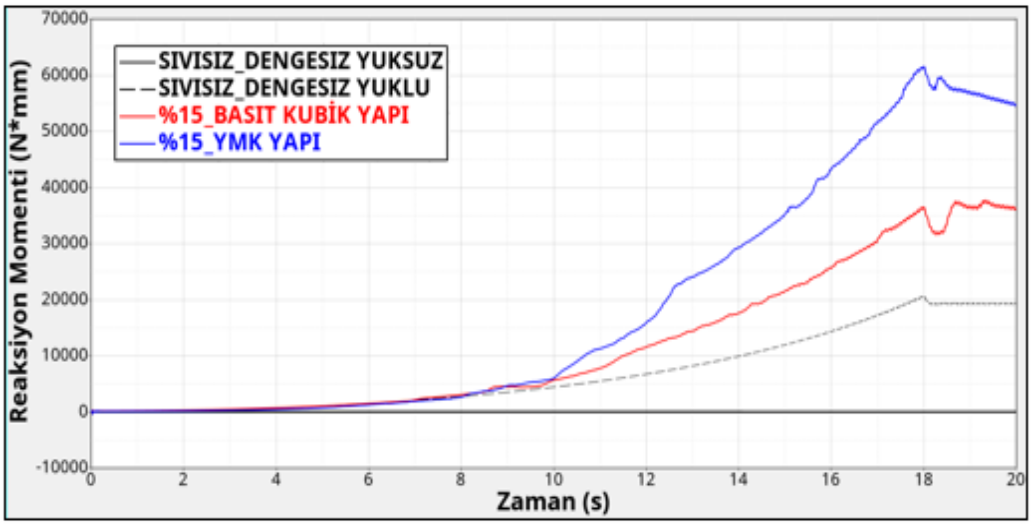
4.2.2.4 Tanecik Oluşturma Metodunun Dengelemeye Etkisinin Değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen analizlerde; farklı tanecik oluşturma metotları ile oluşturulmuş SPH taneciklerinin, modelin dengeleme kabiliyetini nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Literatürde, yüzey merkezli kübik yapı formatında üretilen tanecikler ile yapılan sonuçların daha doğru sonuçlar verdiği yönünde bilgi vardır [32]. Bu nedenle, basit kübik yapısı ile oluşturulan tanecikler içeren modeller ile, yüzey merkezli kübik yapıda oluşturulan tanecikler içeren modellerde analiz sonuçları incelenmiştir.

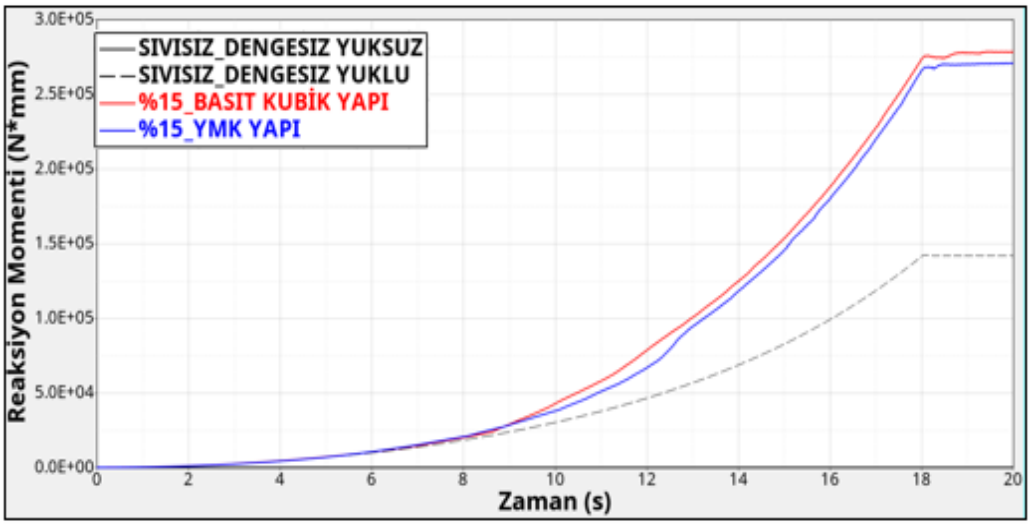
% 15, % 30 ve % 60 doluluk oranında kurgulanan analiz senaryoları, farklı tanecik oluşturma yöntemlerine göre oluşturularak kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Tablo 4.5, Tablo 4,6 ve Tablo 4.7' de sırasıyla % 15, % 30 ve % 60 doluluk oranları için karşılaştırılan analiz senaryoları görülmektedir.

Tablo 4.5 Yüzde 15 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

% 15 Doluluk Oranı İçin, Tanecik Oluşturma Metodunun Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • % 15 Doluluk Oranlı Basit Kübik Yapı • % 15 Doluluk Oranlı Yüzey Merkezli Kübik Yapı

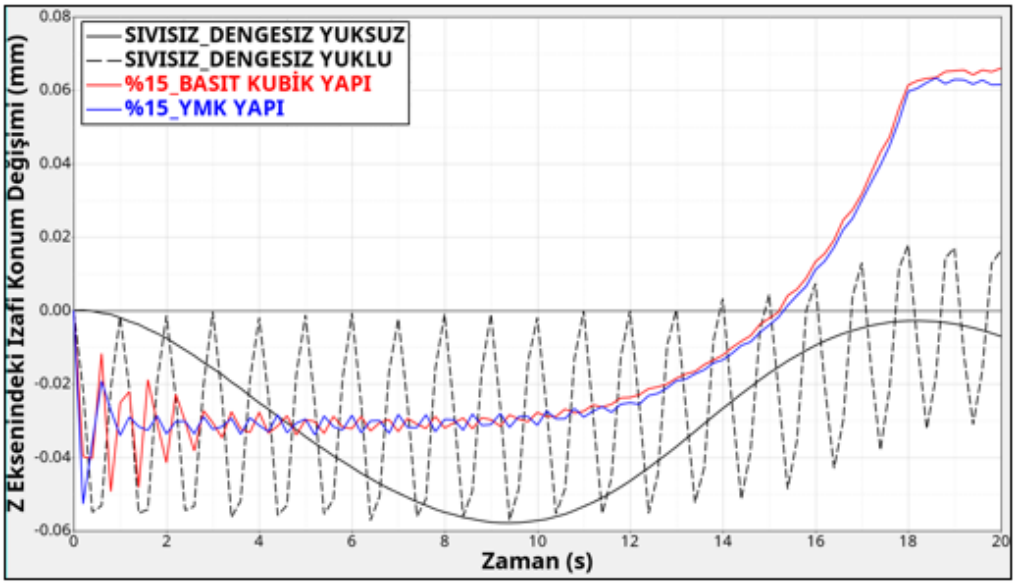


Şekil 4.80 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti



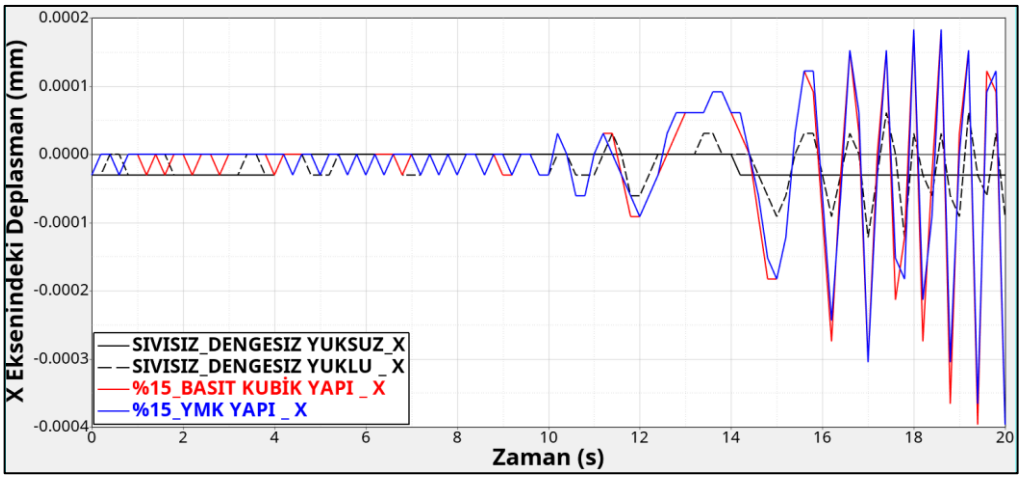
Şekil 4.81 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

Dengeleme halkasının % 15 doluluk oranı için; yay lokal eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momentleri incelendiğinde; y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon moment değerleri 10. sn' ye kadar büyük oranda yakın değerler alırken, 10. sn' den sonra yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde daha yüksek reaksiyon momentleri hesaplanmıştır. z_{yay} ekseni etrafında ise, hesaplanan reaksiyon moment değerleri birbirine yakın değerlerde olup grafiklerin formu da birbirine oldukça benzerdir.

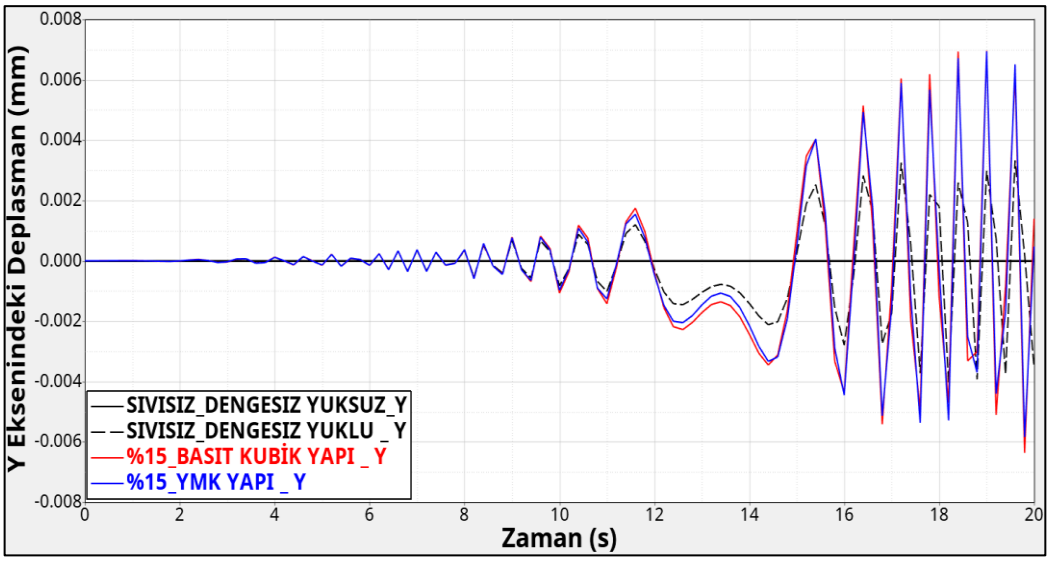


Şekil 4.82 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

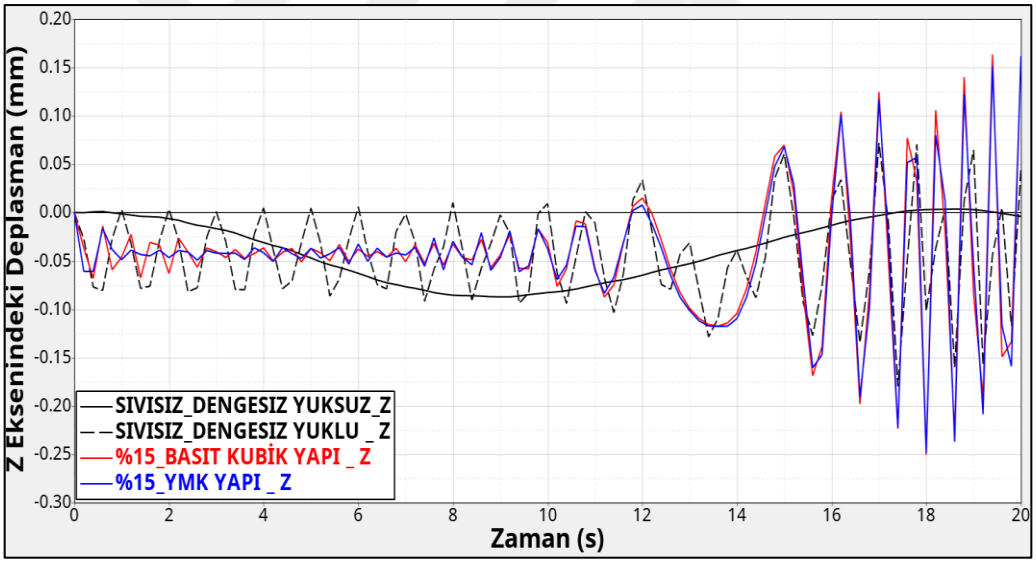
Dengeleme halkasının % 15 doluluk oranı için; yay elemanının belirlenen düğüm noktasının düşey eksendeki izafi konum değişimi de her iki senaryoda birbirine oldukça yakın olmasına rağmen 0 - 3 sn zaman aralığında basit kübik yapılı tanecik oluşturma yöntemi ile oluşturulmuş modelde daha yüksek dengesizlik öngörülmektedir.



Şekil 4.83 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.84 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



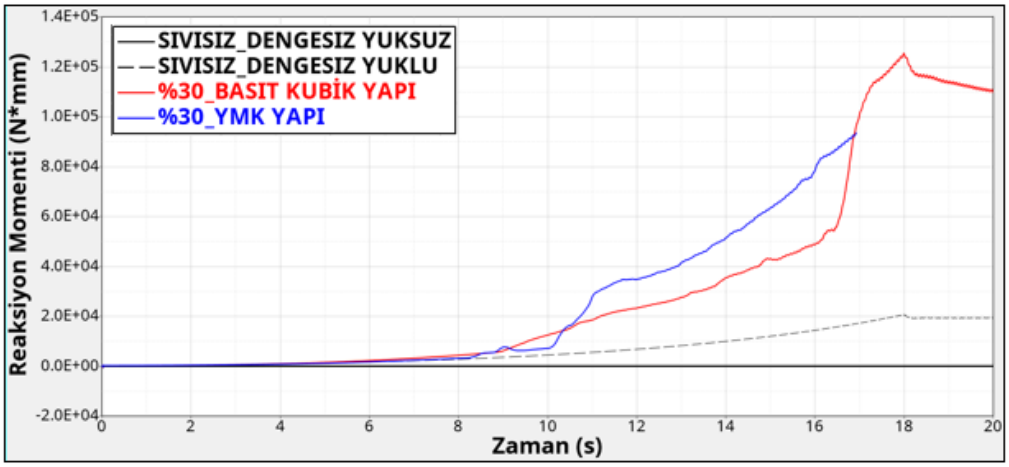
Şekil 4.85 Dengeleme halkasının %15 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

Dengeleme halkasının % 15 doluluk oranı için; tabla 1 üzerinden belirlenen düğüm noktasının, eksenlerdeki deplasmanları incelendiğinde, her iki senaryo için hesaplanan değerlerin birbiri ile genel anlamda örtüştüğü gözlenmiştir. Şekil 4.85 ‘ te gösterilen z eksenindeki deplasman değişimleri grafiğinde de görülebileceği

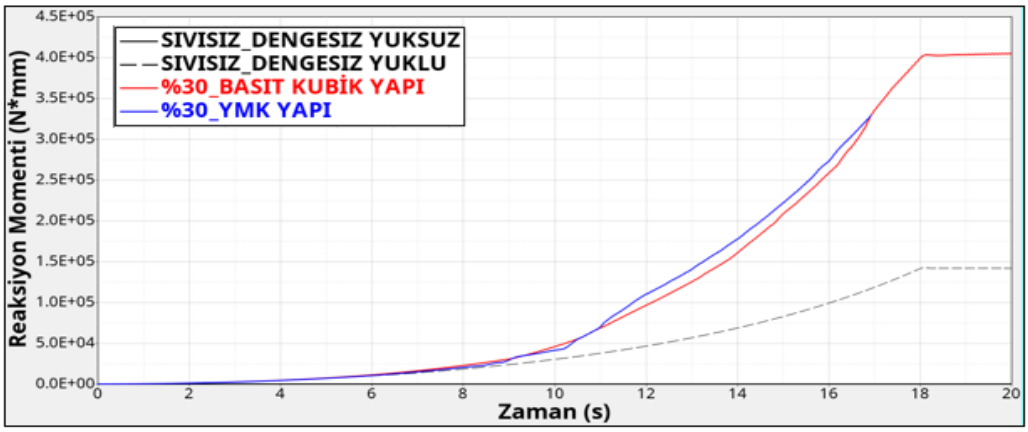
üzere, tanecik oluşturma metoduna göre deplasmanda oluşan farklılıklar 0 - 3 sn zaman aralığında gözlenmektedir.

Tablo 4.6 Yüzde 30 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

% 30 Doluluk Oranı İçin, Tanecik Oluşturma Metodunun Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • % 30 Doluluk Oranlı Basit Kübik Yapı • % 30 Doluluk Oranlı Yüzey Merkezli Kübik Yapı

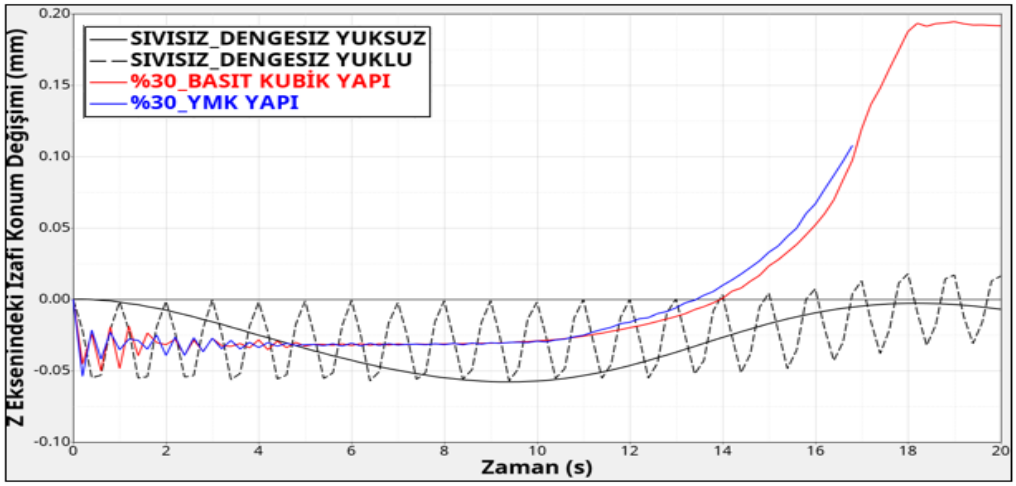


Şekil 4.86 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti



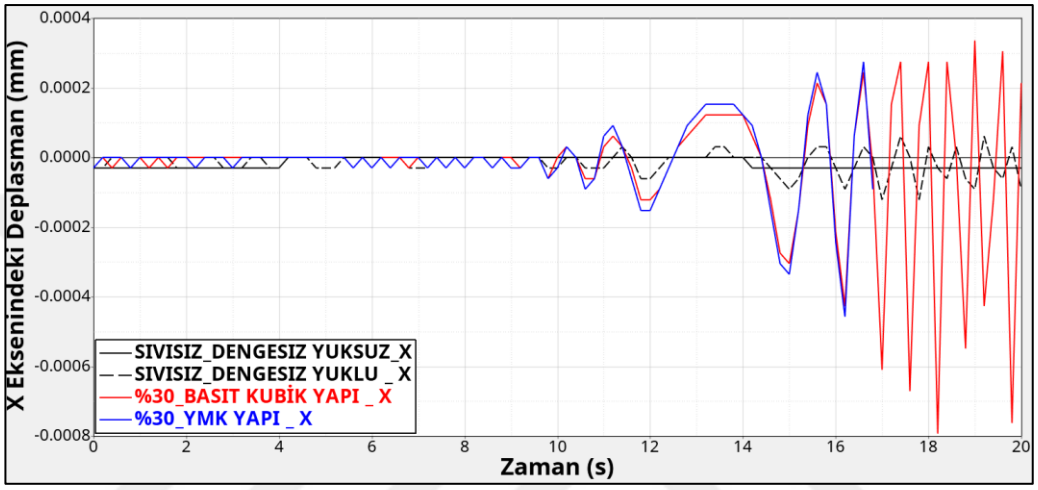
Şekil 4.87 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

Dengeleme halkasının % 30 doluluk oranı için; yay lokal eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momentleri incelendiğinde; y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon moment değerleri 10. sn' ye kadar büyük oranda yakın değerler alırken, 9. sn' den sonra yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde hesaplanan reaksiyon momentleri farklılaşmaya 10,5. saniyeden itibaren ise daha yüksek değerler almaya başlamıştır. z_{yay} ekseni etrafında ise, hesaplanan reaksiyon moment değerleri birbirine yakın değerlerde olup grafiklerin formu da birbirine oldukça benzerdir.

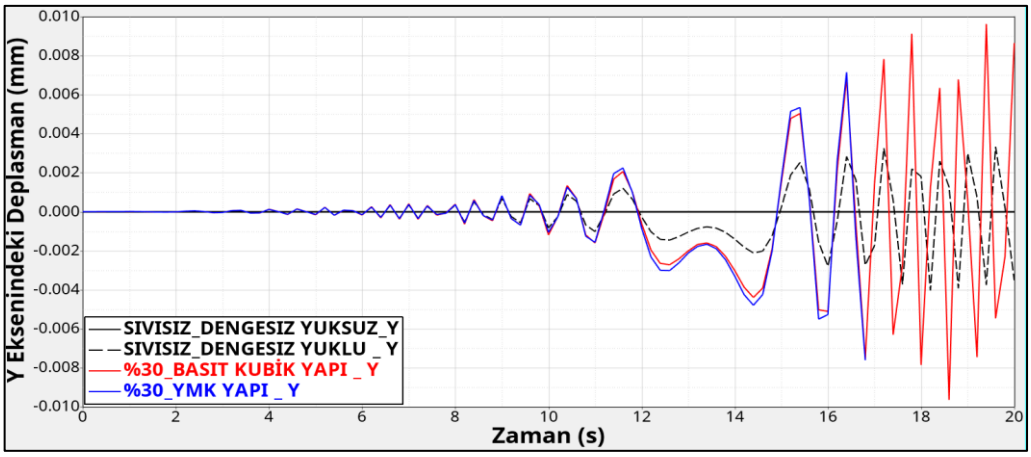


Şekil 4.88 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

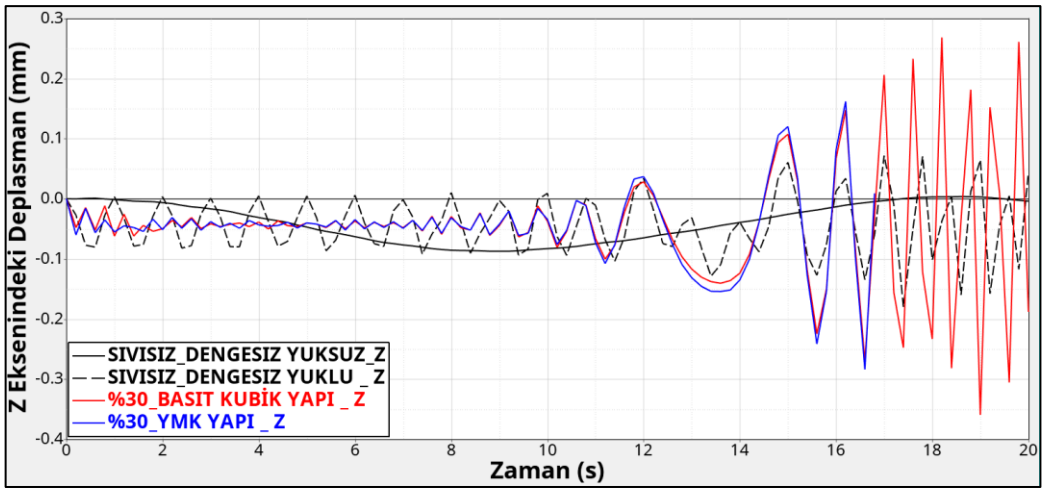
Dengeleme halkasının % 30 doluluk oranı için; yay elemanının belirlenen düğüm noktasının düşey eksendeki izafi konum değişimi; 0 - 3 sn zaman aralığında basit kübik yapılı tanecik oluşturma yöntemi ile oluşturulmuş modelde daha yüksek değerler alırken, 11. saniyeden itibaren yüzey merkezli kübik yapı ile tanecik oluşturulmuş modelde daha yüksek değerler almıştır. Ancak çizdirilen grafiklerin formu birbirleri ile oldukça yakındır. 3 – 11 sn zaman aralığında ise sonuçlar her iki senaryoda birbirine oldukça yakın hesaplanmıştır.



Şekil 4.89 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.90 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi

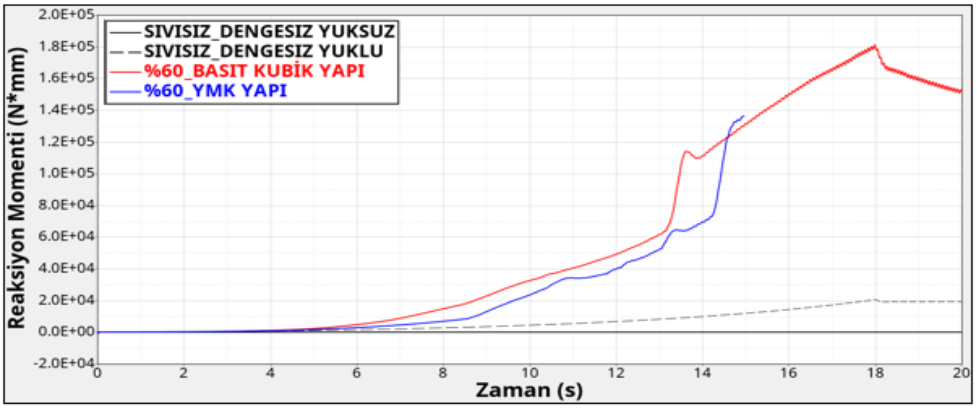


Şekil 4.91 Dengeleme halkasının %30 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

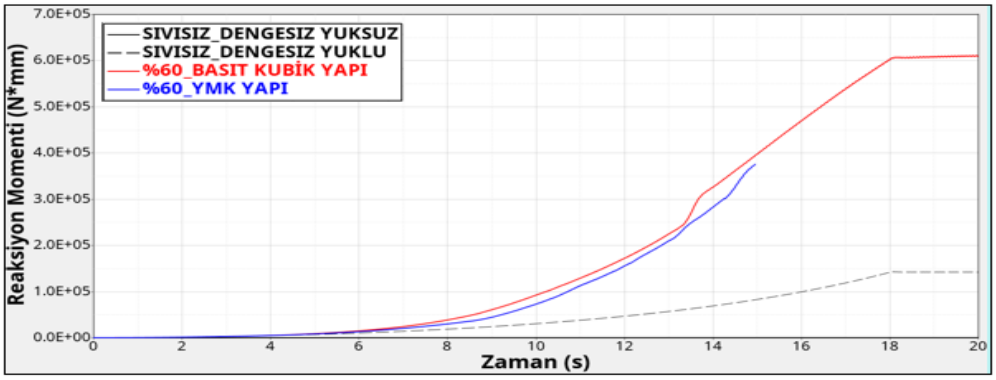
Dengeleme halkasının % 30 doluluk oranı için, tabla 1 üzerinden belirlenen düğüm noktasının, eksenlerdeki deplasmanları incelendiğinde; her iki senaryo için hesaplanan değerlerin birbiri ile genel anlamda örtüştüğü gözlense de, x ve y eksenlerinde yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde hesaplanan değerler daha yüksektir. Ancak hesaplanan değerlerin mertebeleri incelendiğinde hesaplanan farklılık ihmal edilebilecek büyüklüktedir. Şekil 4.91' de gösterilen z eksenindeki deplasman değişimleri grafiğinde görülebileceği üzere, benzer farklılık z ekseninde hesaplanan deplasmanlarda da gözlenmektedir. 3 – 10 sn zaman aralığında tanecik oluşturma yönteminden bağımsız hesaplanan deplasman değerleri oldukça yakın çıkarken, diğer zamanlarda yüzey merkezli kübik yapı olarak konumlandırılan taneciklerin yer aldığı modelde daha yüksek deplasmanlar çıkmıştır. Bu deplasman farkının da, yay elemanında oluşan daha yüksek reaksiyon momentlerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 4.7 Yüzde 60 doluluk oranı için, tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolar

% 60 Doluluk Oranı İçin, Tanecik Oluşturma Metodunun Dengelemeye Etkisinin İncelendiği Senaryolar
• Sıvısız – Dengesiz Yüksüz • Sıvısız – Dengesiz Yüklü • % 60 Doluluk Oranlı Basit Kübik Yapı • % 60 Doluluk Oranlı Yüzey Merkezli Kübik Yapı

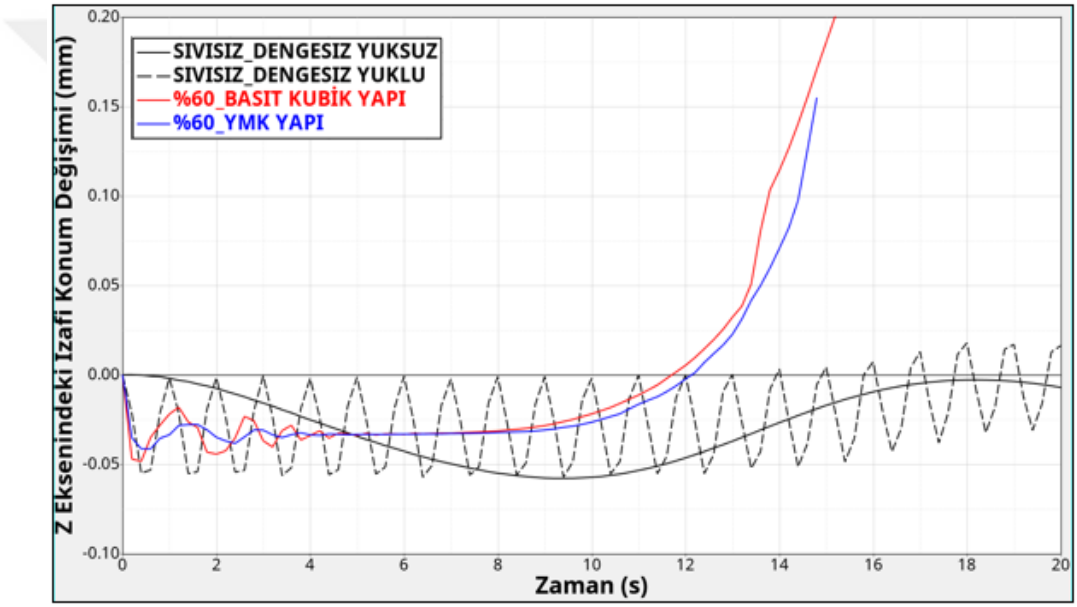


Şekil 4.92 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti



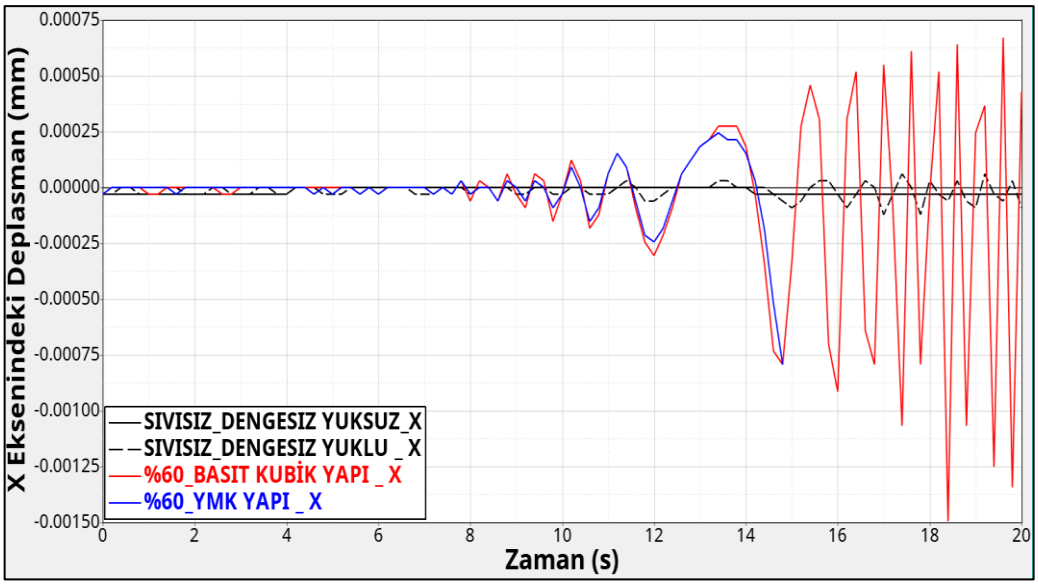
Şekil 4.93 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay lokal eksen takımında z_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon momenti

Dengeleme halkasının % 60 doluluk oranı için; yay lokal eksenleri etrafında oluşan reaksiyon momentleri incelendiğinde; y_{yay} ekseni etrafındaki reaksiyon moment değerleri 5. sn' ye kadar büyük oranda yakın değerler alırken, 7. sn' den sonra yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde hesaplanan reaksiyon momentleri farklılaşmaya ve daha yüksek değerler almaya başlamıştır. z_{yay} ekseni etrafında ise, hesaplanan reaksiyon moment grafiklerinin formu da birbirine oldukça benzer olmasına rağmen, 7. sn' den itibaren yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde hesaplanan reaksiyon momentleri, basit kübik yapıda oluşturulan tanecikler içeren modelden daha yüksek değerler almıştır.

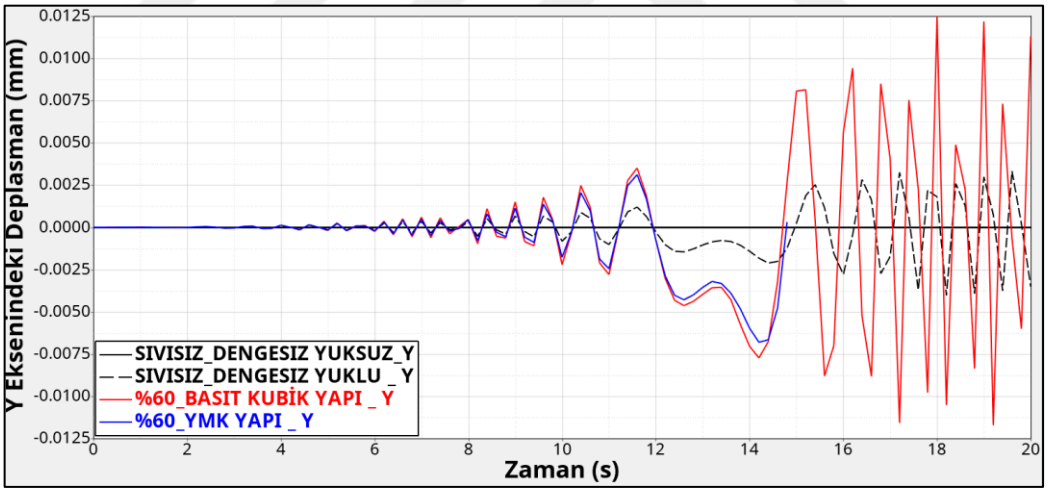


Şekil 4.94 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, yay elemanı ile RBODY elemanının birleşimini sağlayan düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki izafi konum değişimi

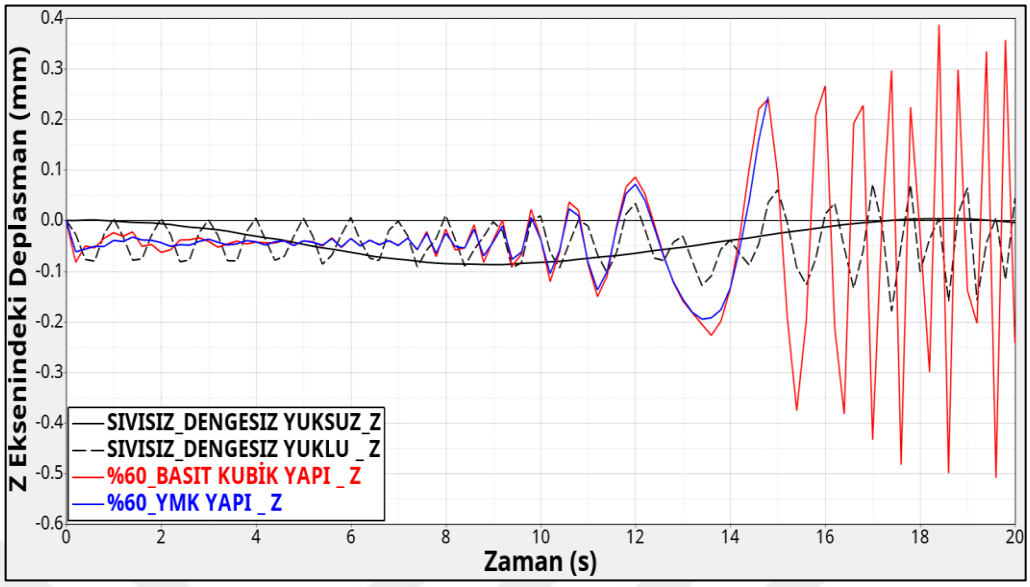
Dengeleme halkasının % 60 doluluk oranı için; yay elemanının belirlenen düğüm noktasının düşey eksendeki izafi konum değişimi; 0 - 5 sn zaman aralığında basit kübik yapılı tanecik oluşturma yöntemi ile oluşturulmuş modelde daha yüksek değerler alırken, yaklaşık 8. saniyeden itibaren yüzey merkezli kübik yapı ile tanecik oluşturulmuş modelde daha yüksek değerler almıştır. Ancak izafi konum değişimi için grafiklerin formu birbirlerine oldukça benzerdir. 5 – 8 sn zaman aralığında hesaplanan değerler birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.95 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında x eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.96 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında y eksenindeki deplasman değişimi



Şekil 4.97 Dengeleme halkasının %60 doluluk oranı için tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelendiği senaryolarda, tabla 1 üzerindeki 8806 numaralı düğüm noktasının global eksen takımında z eksenindeki deplasman değişimi

Dengeleme halkasının % 60 doluluk oranı için, tabla 1 üzerinden belirlenen düğüm noktasının, eksenlerdeki deplasmanları incelendiğinde; her iki senaryo için izafi konum değişimi için çizdirilen grafiklerin genel formunda benzerlik görülmektedir. x ve y eksenlerinde yüzey merkezli kübik yapı ile oluşturulan tanecikler içeren modelde hesaplanan değerler, özellikle 7,5. saniyeden sonra basit kübik yapıda oluşturulan tanecikler içeren modele göre daha yüksektir. Ancak hesaplanan değerlerin mertebeleri arasındaki farklılık her iki senaryo arasında ihmal edilebilecek büyüklüktedir. 7,5. saniyeden sonra, tanecik içeren senaryolarda sıvı bulunmayan ama dengesiz yük bulunan senaryoya göre hem x hem de y eksenlerinde deplasman değişimleri artmıştır. Şekil 4.96' da gösterilen z eksenindeki deplasman değişimleri grafiğinden görülebileceği üzere, z ekseninde hesaplanan deplasmanlar 0 – 4 sn aralığında basit kübik yapıda oluşturulan tanecikler içeren senaryoda daha yüksek değerler alırken, 4 – 7,5 sn aralığında iki farklı tanecik oluşturma metodu ile üretilen tanecikler içeren modellerden oldukça yakın deplasmanlar elde edilmiş ve yaklaşık 7,5. saniyeden

itibaren ise basit kübik yapı oluşturulan tanecikler içeren modelde daha yüksek değerler hesaplanmıştır.

Dengeleme halkasının % 15, % 30 ve % 60 doluluk oranlarında; tanecik oluşturma metodunun dengelemeye etkisinin incelemek için oluşturulan senaryolarda elde edilen sonuçlar kısaca özetlenecek olunursa; sıvı tarafından dengelemenin gerçekleştirilemediği, hareketin ilk anlarında ve sıvı tarafından dengesizliğin bozulduğu andan itibaren, basit kübik yapıda oluşturulan tanecikler içeren modellerde hesaplanan deplasmanlar daha yüksektir. Dengeleme halkasının, dengelemeye olumlu yönde katkısının bulunduğu zaman aralığında ise, hem basit kübik yapıda hem de yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma metodu ile tanecikler içeren modellerde hesaplanan deplasman değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, üstten yüklemeli çamaşır makinelerinin stabilizasyonunda katkı sağlayan dengeleme halkalarının, analiz ortamında modellenmesi amaçlanmıştır. Dengeleme halkası içerisindeki sıvının çalkalanma haretketi, sonlu hacimler yöntemleri yerine, akışkanlar mekaniğinde Lagrange Yasalarını temel alan ve ağsız bir yöntem olan interpolasyonlu tanecik yöntemi ya da diğer adı ile smoothed particle hydrodynamics (SPH) yöntemi ile modellenmiştir. Kullanılan bu yöntem ile birlikte; çamaşır makinesi tamburu etrafına monte edilen ve içerisindeki sıvı ile pasif dengeleme sağlayan dengeleme halkasının analiz metodolojisi oluşturulmuştur. Tamburun tamamen rijit olduğu kabul edilerek; çamaşır makinesindeki gerek dengesizlik gerekse de atalet kuvvetleri sebebiyle, dengeleme halkasının kendi etrafında dönerken aynı zamanda üç eksen etrafında salınım hareketi ve bu hareket anında dengeleme halkası içerisindeki sıvının da çalkalanma hareketi modellenmiştir. Oluşturulan modelleme metodolojisi, bu hareketleri içerecek şekildedir.

Çalışmanın ilk iki bölümünde; sırasıyla, literatürdeki ve rakip ürünlerdeki çalışmalara değinilmiş, çamaşır makinesi, dengeleme halkası ve hesaplamalı mühendislik hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, interpolasyonlu tanecik metodu teorisine, dengesizlik teorisine ve dengeleme halkasının çalışma teorisine değinilmiştir. Kısacası, problemin çözümüne geçilmeden önce genel kavramlar ve dengeleme halkasının hareketi hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü ve dördüncü bölümler, modelleme metodolojisinin oluşturulduğu bölümlerdir. Öncelikle, dikdörtgenler prizması şekilinde basit bir kabın hareket ettirilip durudurulması sonucu, kap içerisindeki suyun hareketinin SPH metodu ile CFD metodunun karşılaştırıldığı çalışmaya yer verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında literatürden yararlınılıp Khezzar ve arkadaşları' nın deneysel ve nümerik sonuçlarla elde ettikleri sonuçlar referans alınmıştır. Aynı zamanda; bu çalışmanın katkıları ve dengeleme halkasının tek eksendeki hareketi dikkate alınarak,

“Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Tek Eksendeki Titreşim Hareketinin İnterpolasyonlu Tanecik Yöntemi ile Modellenmesi” isimli bildiri yayını yapılmış ve literatüre ayrıca katkıda bulunulmuştur. Gerek tez çalışmasının bu kısmında, gerekse de bahsi geçen bildiride, farklı tanecik sayılarında SPH metodu kullanılarak, Khezzar ve arkadaşları’ nın deneysel ve CFD metodu ile elde ettikleri anlık kesit görüntüler karşılaştırılmıştır. Bu kısımda, tanecik sayısı artıkça; sonuçların görsel olarak gerçeğe daha yaklaştığı sonucuna varılmıştır. Ancak tanecik sayısının arttırılması çözüm sürelerini de olumsuz etkilemiştir [34], [35].

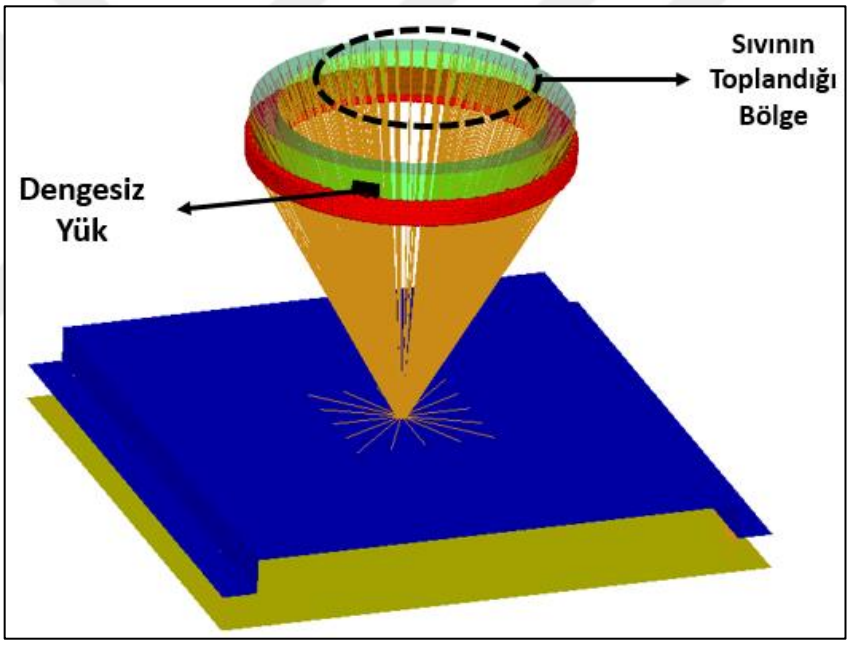
Tez çalışmasının bir sonraki aşaması; kanal içi akış problemlerinde SPH metodunun kullanılıp bu metodun Arçelik A.Ş bünyesinde farklı çalışmalara uyarlanabilmesini ve çözümlerde kullanılan SPH özellikleri, parametrelerinin kavranmasını içermiştir. Bu kapsamda, kompresör emme valfi yaprağının açılması SPH metodu ile modellenmiştir. Fakat gerek kurumsal gizlilik gerekse de ana konudan uzaklaşılmaması amacıyla çalışmanın detaylarına ve çıktılarına yer verilmemiştir.

Dengeleme halkası için metodoloji oluşturma aşamasında, öncelikle basit bir model hazırlanmıştır. Bu model üzerinde explicit analizler için önemli enerji hataları kontrol altına alınmıştır. Çözüm sürelerini sürelerini kısaltmak amacıyla zaman adımı düzenlemeleri yapılmıştır. Ayrıca basit model üzerinde farklı ivmeler ile açısal ve doğrusal hareketler verilerek, en basit anlamda Newton’ un Hareket Yasaları analitik olarak hesaplanıp analiz çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Model üzerinden hesaplanan reaksiyon kuvveti, reaksiyon momenti gibi değerler hakkında yorumda bulunulmuştur. Dengeleme halkası hareketi daha karmaşık hale geldikçe, elde edilen bu kuvvet ve momentlerin hangi durumlardan kaynaklanabileceği açıklanmıştır. Bu çalışmalar sırasında, dengeleme halkasına sabit açısal hız, ivmeli açısal hız, tek eksende doğrusal hız, tek eksende sinüzoidal hız gibi farklı hız tanımlamaları yapılmış, böylece her bir harekette modele etki edecek kuvvet ve momentler gösterilmiştir.

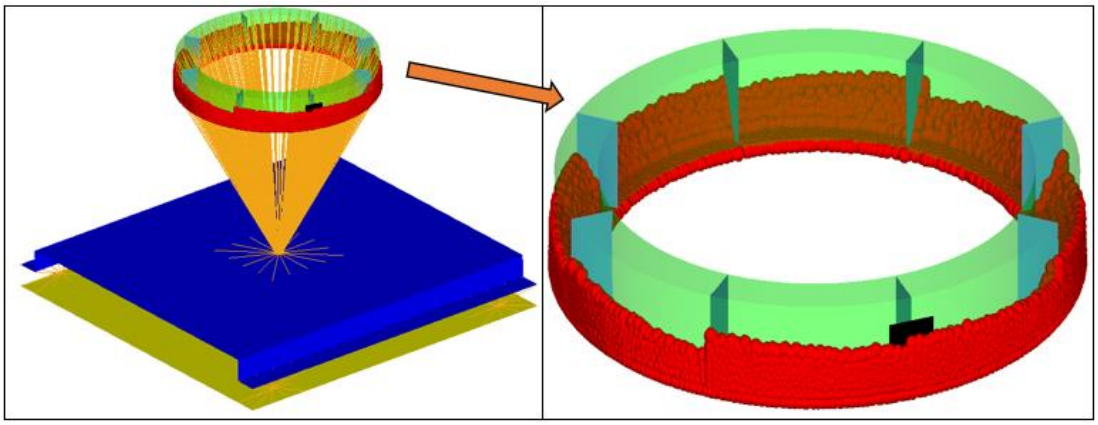
Bu tez kapsamında yer almasa da; hazırlanan modelin doğrulanabilmesi açısından, sönüm elemanları, tablalar, motor ve dengeleme halkasından oluşan basit bir deney düzeneği öncül tasarımı yapılmıştır. Metodoloji geliştirmek için

hazırlanan basit model, bu modele uygun olacak şekilde revize edilmiştir. Böylece finalize model elde edilmiştir.

Geliştirilen model ve metodolojide, sabit ivme ve artan açısal hızla dönmekte olan dengeleme halkası, dengesiz yük sebebiyle salınıma uğramakta ve belirli bir zaman aralığında (ilk doğal frekansın üstündeki hızlarda) sıvının dengeleme halkasında konumlanması ile dengeleme sağlanmaktadır. Ancak artan hızla birlikte; yüksek hızlarda, dengeleme halkası içerisinde sıvının hareketini sınırlayacak engel olmaması durumunda sıvı dengesiz yükün olduğu bölgeye toplanmakta ve ekstra bir dengesizlik oluşturmaktadır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de dengeleme halkası içerisinde konumlanan sıvının görsel görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 5.1 Yüzde 30 doluluk oranına sahip, içi boş dengeleme halkası içerisindeki sıvının 4. saniyedeki konumlanması



Şekil 5.2 Yüzde 30 doluluk oranına sahip, sekiz bölmeli dengeleme halkası içerisindeki sıvının 4. saniyedeki konumlanması

Hazırlanan finalize model üzerinde dengeleme halkasının dengeleme kabiliyetini arttırmak için farklı paramatreler üzerinde durulmuştur. Bu parametreler; sıvı yoğunluğu, dengeleme halkası doluluk oranı, dengeleme halkası tasarımıdır. Ayrıca SPH tanecik sayısının ve tanecik oluşturma metodunun dolayısıyla tanecikler arası nominal mesafenin dengelemeye olan etkisi de araştırılmıştır.

Dengeleme halkası içerisinde kullanılan sıvının yoğunluğu, değerlendirilen parametrelerden biridir. Sıvı yoğunluğu arttıkça dengelemenin arttığı teori kısmında açıklanmıştır. Ayrıca, benzer şekilde piyasadaki ürünlerde sıvı ve bilya kullanımına yönelik örneklerin de olduğu çalışmanın çeşitli bölgelerinde belirtilmiştir.

Dengeleme yönünde etkisi olan bir diğer parametre, dengeleme halkası doluluk oranıdır. Bu parametre için farklı tanecik oluşturma metotları ile senaryolar kurgulanmıştır. Basit kübik yapıda gerçekleştirilen analizlerde % 30 doluluk oranı için; maksimum dengeleme hareketin 5. – 10,5. saniyeleri arasında yani 111,41 rpm – 233,96 rpm devir aralığında iken, % 60 doluluk oranı için maksimum dengeleme hareketin 5. - 8,5. sn' leri arasında yani 111,407 rpm – 189, 39 rpm devir aralığında gözlenmiştir. 7,5. saniyeden yani 167,11 rpm' den itibaren ise; doluluk oranı arttıkça dengesizlik artmıştır. Yani dengeleme halkası içerisindeki sıvı yeni bir dengesizlik oluşturmuştur. Yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma yöntemi ile yapılan analizlerde ise; hareketin 3,5 – 7 sn aralığında yani 77,99 rpm – 155,97 rpm devir aralığında % 60 doluluk oranı ile en iyi dengelemenin sağlandığı, % 30 doluluk oranı ile ise, 77,98 rpm – 219,64 rpm

devir aralığında en iyi ikinci dengelemenin sağlandığı hesaplanmıştır. Buna göre, gerek basit kübik yapıda gerekse de yüzey merkezli kübik yapıda tanecik oluşturma metotları kullanılarak; en iyi dengelemelerin % 60 ve % 30 doluluk oranları ile sağlandığı söylenebilir. Verilen hız grafiğine göre, % 30 doluluk oranında dengeleme oranı daha düşük olsa da, dengeleme süresi daha uzundur.

Farklı doluluk oranları için tanecik oluşturma metotlarının sonuçlara etkisi de incelenmiştir. Özellikle sıvı tarafından dengelemenin etkili olduğu zaman aralığında çok büyük farklılıklar gözlemlenmese de, dengelemenin başlangıcında ve sıvı tarafından dengesizlik oluşan devirlerde, hesaplanan reaksiyon momenti ve deplasman değerleri tanecik oluşturma metoduna göre farklılaşmıştır.

Dengeleme halkası tasarımı, literatürden ve rakip ürünlerden esinlenerek değiştirilmiş ve kontrüktif yapının dengelemeye olan etkisi de incelenmiştir. En kötü dengeleme performanslarının; dengeleme halkasının açısal hareketi ile birlikte, dengeleme halkası içerisinde sıvının dairesel hareket yapmaya çalıştığı tasarımlarda oluştuğu söylenebilir. Dengeleme halkasının % 30 doluluk oranının referans olarak kullanıldığı analizlerde, 3,5 – 8 saniyelerdeki hareket zaman aralığında ya da 77,98 rpm – 178, 25 rpm hızlarda en iyi dengeleme performası gözlemlenmiştir. Sıvının dengeleme halkası içerisinde dairesel hareketini engelleyen senaryolar arasında ise, dengeleme performansı olarak belirgin bir farklılık gerçekleştirilen analizlerde gözlenmemiştir. Ancak bu farklılığın gözlenememesinin nedeninin, analiz süresince yazdırılan sonuç dosyası adedi olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, yazdırılan sonuç dosyası sayısı arttırıldığında, tasarım farklılığının dengeleme performansına etkisine yönelik sonuçların gözlenebileceği öngörülmektedir. Dengeleme halkası içerisindeki sıvının dairesel hareketini engelleyecek senaryolar arasında, dengeleme performansı açısından çok fazla kıyaslama yapılamasa da, dengeleme süresi bakımından kıyaslandığında dengelemenin öncelikle tamamen içi boş tasarlanan senaryoda ve iki kanal şeklinde tasarlanan senaryoda bozulduğu gözlenmiştir. Bu tür tasarımlar, daha büyük dengesiz ağırlık içeren sistemlerde kullanılabilir.

Tanecik sayısının analiz sonuçlarına etkisinin incelendiği tüm senaryolarda, 4. ve 10. saniyeler yani 89,13 rpm - 222,82 rpm devirleri arasında en iyi dengeleme

oluştuğu görülmüştür. Hareketin yaklaşık 12,5. saniyesinden yani 278,45 rpm' den sonra tanecikler arası nominal mesafenin artması ya da tanecik sayısının azalması ile birlikte oluşan deplasmanların ve dengesizliğin arttığı hesaplanmıştır. Tanecik sayısının değiştirilmesi ile birlikte; sıvı ağırlığının değiştiği ve doğru karşılaştırılma için, mümkün oldukça sıvı ağırlığının sabit tutulması gerektiği vurgulanmıştır.

Gerçekleştirilen analiz senaryolarında sıvısız duruma göre; basit modelin bağlı olduğu tabla üzerindeki bir düğüm noktasında, düşey z ekseninde hesaplanan deplasmanlar genel olarak düştüğü, x ve y eksenlerinde hesaplanan deplasmanların arttığı hesaplanmıştır. Ancak, x ve y eksenlerinde hesaplanan deplasmanlar, düşey z ekseninde hesaplanan deplasman değerlerine göre düşük büyüklüktelerdir.

Gerçekleştirilen tüm analiz senaryolarına göre; en iyi senaryonun, % 30 ya da % 60 doluluk oranına ve sıvının dengeleme halkası içerisinde mil ekseni etrafındaki dönüş hızını sınırlayacak tasarıma sahip olacak şekilde düşünmek doğru olmayacaktır. Çapraz kombinasyonlarda da analizler ve deneyler kurgulanmalıdır. Dolayısıyla farklı doluluk oranlarında, farklı tasarımlarda daha iyi dengelemeler sağlanabilir.

Tüm bu özet bilgiler ışığında; bu çalışmanın ardından çalışılabilecek, geliştirilmeye açık noktalar aşağıda özetlenmiştir:

- Dengelemenin gerçekleştiği sabit bir devirde, farklı tanecik oluşturma metotları ile çözümler yapılarak dengeleme süresince tanecik oluşturma metotlarının etkisi daha yakından incelenebilir.
- Farklı tanecik sayıları ile çözümler yapılarak, sonuçların tanecik sayısından bağımsızlığı incelenebilir.
- Çok yüksek tanecik sayıları kullanıldığında, zaman adımları çok düştüğünden çözüm süreleri çok uzamıştır. Gerçekleştirilen analizlerde her ne kadar zaman adıma müdahale edilmiş olsa da, bu yöntem düğüm noktalarına ağırlık yüklediğinden, yani problemin fiziğini değiştirebileceğinden çok fazla müdahale edilmemiştir. Dolayısıyla, 20 saniyelik çözüm süreleri, her ne kadar katı sıvı etkileşimli analiz (Fluid –

Structural Interaction) senaryolarına göre kısalmış olsa da, özellikle % 60 doluluk oranları için iki haftaları bulan çözüm süreleri olmuştur. Bu yüzden, zaman adımı ve tanecik sayısı kombinasyonları üzerine başka çalışmalar tetiklenebilir.

- Dengeleme halkasının farklı konstrüktif tasarımları ile dengeleme performansı arttırılabilir.
- Öncül tasarımı yapılmış deney düzeneğinde ivme ya da deplasman ölçerler ile çalışmanın doğrulaması yapılabilir. Analiz sonuç dosyalarının yazdırılma sıklığı arttırılarak sonuçlar daha hassas incelenebilir. Doğrulama çalışmasının doğruluk oranı incelemek açısından, verilerin daha sık alınması daha uygun olacaktır.
- Finalize modele sönüm ve yay elemanları eklenerek; finalize model, öncül tasarımı yapılmış deney düzeneğine ya da çamaşır makinesi için hazırlanmış modele revize edilebilir. Sonuçlar daha büyük bir model üzerinde incelenebilir. Hatta bu modelden elde edilen kuvvetler, çamaşır makinesi dinamik modeline aktarılarak çamaşır makinesi dinamiğine direk katkı sağlanabilir.
- Dengeleme halkası rijit olarak kabul edilmeyip, dengeleme halkası üzerinde oluşan deformasyonlar ve gerilemeler incelenebilir.
- Gerçekleştirilen tüm analizlerde, dengeleme halkası içerisindeki hava ihmal edilmiştir. Dengeleme halkası içerisindeki hava da SPH tanecikleri ile modellenip akışkanlar iki fazlı olarak modellenebilinir.
- Tez çalışmasının kısa bir bölümünde yer verilen, valf yaprağı gibi katı – akışkan etkileşimi içeren problemlerde yöntem kullanılıp alternatif çözümlerle kıyaslamalar yapılabilir.

KAYNAKÇA

[1] A. T. Salinas, “Global Appliance Manufacturer Mabe Analyzes Spin Cycle with HyperWorks to Improve Washing Machines and Bring Them to Market Faster,” Altair Engineering Inc., 26 Ocak 2012. Erişim Tarihi: 10.01.2020. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://blog.altair.co.kr/5195

[2] S. L. Urbiola, S. A. Thompson, B. M. Ortega “Hydrodynamic balance ring for centrifugal rotation machines,” US Patent 8276406, Ekim, 02, 2012.

[3] C. Vatansever, “Çamaşır Makinelerinde Titreşimi Sönümlemek Amaçlı Kullanılan Pasif Dengeleme Halkalarının Çalışma Prensibi ve Alternatif Tasarımları” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.

[4] M. Müller, D. Charypar, M. Gross, “Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications,” *Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation,* D. Breen ve M. Lin, Ed., 2003.

[5] S.R. Idelsohn, E. Onate, F. Del Pin, N. Calvo, “Fluid–Structure Interaction Using the Particle Finite Element Method,” Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Cilt. 195, Sayı. 17-18, pp. 2100–2123, 2006, doi:10.1016/j.cma.2005.02.026.

[6] C. Antoci, M. Gallati, S. Sibilla, “Numerical Simulation of Fluid–Structure Interaction by SPH,” Computers and Structures, Cilt. 85, Sayı. 11-14, pp. 879-890, 2007, doi:10.1016/j.compstruc.2007.01.002.

[7] Ha H. Bui, K. Sako, R. Fukagawa, “Numerical Simulation of Soil–Water Interaction Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method,” Journal of Terramechanics, Cilt. 44, Sayı. 5, pp. 339–346, 2007, doi:10.1016/j.jterra.2007.10.003.

[8] S. Potapov, B. Maurel, A. Combescure, J. Fabis, “Modeling Accidental-Type Fluid–Structure Interaction Problems with the SPH Method,” Computers and Structures, Cilt. 87, Sayı. 11-12, pp. 721-734, 2009, doi: 10.1016/j.compstruc.2008.09.009.

[9] J.H. Jung, H.S.Yoon, C.Y.Lee, S.C.Shin, “Effect of the Vertical Baffle Height on the Liquid Sloshing in a Three-Dimensional Rectangular Tank,” Ocean Engineering, Cilt. 44, pp. 79-89, 2012, doi:10.1016/j.oceaneng.2012.01.034.

[10] M. Özbulut, “İnterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yöntemi ile Serbest Su Yüzeyli Şiddetli Akış Problemlerinin İncelenmesi” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.

[11] K. Szmidt, B. Hedzielski, “Modeling ofWater Flows around a Circular Cylinder with the SPH Method,” Archives of Hydro-Engineering and

Environmental Mechanics, Cilt. 61, Sayı. 1-2, pp. 39-60, 2014, doi: 10.1515/heem-2015-0003.

[12] O. Dede, “Investigation of Effects of Bird Strike on Wing Leading Edge by Using Explicit Finite Element Method” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.

[13] R. Rajagounder, G. V. Mohanasundaram, P. Kalakkath, “A Study of Liquid Sloshing in an Automotive Fuel Tank under Uniform Acceleration,” Engineering Journal, Cilt. 20, Sayı. 1, pp. 71-85, 2016, doi: 10.4186/ej.2016.20.1.71.

[14] E. Erzan Topçu, E. Kılıç, K. Çavdar, “Experimental Investigation of a Vehicle Fuel Tank Sloshing Behavior,” Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, Cilt. 17, Sayı. 1, pp. 292-301, 2017, doi: 10.5578/fmbd.54008.

[15] E. Güray, G. Yazıcı, M. Aksel, “Prizmatik Sıvı Tanklarında Oluşan Sismik Çalkalanmaların SPH Yöntemiyle İncelenmesi,” Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, Cilt. 18, Sayı. 1, pp. 375-381, 2018, doi: 10.5578/fmbd.66714.

[16] S. Lee, J. W. Hong, “Parametric Studies on Smoothed Particle Hydrodynamic Simulations for Accurate Estimation of Open Surface Flow Force,” International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Cilt. 12, pp. 85-101, 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.07.003.

[17] A. Trimulyono, H. Hashimoto, “Experimental Validation of Smoothed Particle Hydrodynamics on Generation and Propagation of WaterWaves,” Journal of Marine Science and Engineering, Cilt. 7, Sayı. 1, pp. 17, 2019, doi: 10.3390/jmse7010017.

[18] “TÜRKBESD Son 5 Yıl Rakamları.” Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği. http://www.turkbesd.org/bilgiler.php?P=22 (Erişildi: 20.08.2021).

[19] “Çamaşır Makinesi Tarihi Nedir?.” Çamaşır Makinesi Tarihi. https://camasirmakinetarihi.wordpress.com/2014/12/09/camasir-makinesinin-tarihi-nedir/ (Erişildi: 20.08.2021).

[20] “Arçelik Tarihçe.” Arçelik Global. https://www.arcelikglobal.com/tr/sirket/hakkimizda/tarihce/ (Erişildi: 20.08.2021).

[21] T. Ikeda, K. Nakagawa, A. Takenaka, Y. Tsunomoto, “Washing Machine,” US Patent 6418758B1, Temmuz, 16, 2002.

[22] T. Kawaguchi, Y. Hirasawa, “Drum Type Washing Machine,” JP Patent 2007209502A, Ağustos, 23, 2007.

[23] D. M. Jones, “Automatic Balancing Device,” GB Patent 2388849A, Kasım, 26, 2003.

[24] Q. Yuan, Z. Fan, X. Cui, Y. Wu, “Washing Machine and Balancing Ring Used for the Washing Machine,” CN Patent 107366131A, Kasım, 21, 2017.

[25] P. J. Zaixian, “Ball Balance System of Washing Machine,” CN Patent 1782186A, Haziran, 06, 2007.

[26] L. Yang, G. Zhang, Y. Tian, X. Yang, “Balance Ring and Washing Machine,” CN Patent 104562554A, Nisan, 29, 2015.

[27] Y. Lv, S. Xu, H. Song, “Balance Ring Structure at Inner Tub Bottom,” WO Patent 2018099421A1, Haziran, 07, 2018.

[28] H. Chen, Q. Zhang, “Magnetorheological Fluid Balance Ring,” CN Patent 102537186A, Temmuz, 04, 2012.

[29] Altair University - Practical Aspect of Finite Element Simulation – A Study Guide, 3. Baskı, Altair Engineering Inc., Michigan, ABD, 2015.

[30] “Sonlu Elemanlar Yönteminde Implicit vs Explicit Yaklaşımı.” Yasin Çapar. https://yasincapar.com/tr/sonlu-elemanlar-yontemde-implicit-vs-explicit-yaklasimi/ (Erişildi: 10.09.2021).

[31] *Altair Radioss™ Theory Manual,* Altair Engineering Inc., Michigan, ABD, 2021.

[32] *Altair Radioss™ User Guide,* Altair Engineering Inc., Michigan, ABD, 2021.

[33] I. T. Sümer, “Dönel Dengeleme Sistemleri,” Arçelik AŞ, İstanbul, Türkiye. Rapor. 039, 1994

[34] L. Khezzar, A. Seibi, A. Goharzadeh, “Water Sloshing in Rectangular Tanks–an Experimental Investigation & Numerical Simulation,” International Journal of Engineering, Cilt. 3, Sayı. 2, pp. 174-184, 2009.

[35] E.Ö. Şengün, B. Aşçıoğlu Temiztaş, “Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Tek Eksendeki Titreşim Hareketinin İnterpolasyonlu Tanecik Yöntemi ile Modellenmesi”, *International Marmara Sciences Congress (IMASCON Spring 2020),* Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020, pp. 37-38. [Çevrimiçi]. Mevcut: http://imascon.com/dosyalar/imascon2020bahar/imascon_fen_bildiriler_tammetin_bahar_2020.pdf

[36] Femto Engineering, Hollanda. LNG tanker in wave - SPH method.(8 Kasım 2011). Erişildi: (08 Ağustos 2021). [Çevrimiçi Video] Mevcut: https://www.youtube.com/watch?v=EcAZv5xcvn8

Konferans Bildirileri

1. E.Ö. Şengün, B. Aşçıoğlu Temiztaş, “Çamaşır Makinesi Dengeleme Halkasının Tek Eksendeki Titreşim Hareketinin İnterpolasyonlu Tanecik Yöntemi ile Modellenmesi”, *International Marmara Sciences Congress (IMASCON Spring 2020),* Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020, pp. 37-38. [Çevrimiçi].Mevcut:http://imascon.com/dosyalar/imascon2020bahar/imascon_fen_bildiriler_tammetin_bahar_2020.pdf