

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KULE KRENLERİN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ TEORİK VE DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ

**Hamit KENAN**

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU

Ocak, 2022

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KULE KRENLERİN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ TEORİK VE DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

Hamit KENAN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşe EDİNÇLİER, Üye  
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevat Erdem İMRAK, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem E. BOĞOÇLU, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Kule Krenlerin Deprem Etkisi Altındaki Dinamik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi 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.

Hamit KENAN

İmza

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FDK-2019-3694 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

*Eşim Berna'ya*

*ve*

*Kızım İnci'ye*

## TEŞEKKÜR

---

Tez konumun belirlenmesinden, tezimin sunumuna kadar bana yardımcı olan ve her aşamada maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU'na,

Doktora tezi izleme komitesinde bulunan saygıdeğer hocalarım, Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI'ya ve Prof. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER'e

Doktora süresince takıldığım yerlerde nokta atışı yönlendirmeleri ile heyecanımı geri kazanmamı sağlayan, çalışmamda bana büyük yardımları olan dostum Arş. Gör. Ramazan BAYRAK'a,

Eğitim-öğretim hayatıma kendi hayatlarından daha fazla önem gösterip beni her zaman destekleyerek yanımda olmuş annem Süreyya KENAN, babam Yüksel KENAN ve kardeşim Sinan KENAN'a,

Varlıklarından ötürü güç aldığım, benim en büyük heyecanlarım olan canım eşim Berna KENAN ve biricik kızım İnci KENAN'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hamit KENAN

# İÇİNDEKİLER

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xvii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.1.1 Deprem ve Transport Makineleri .....	3
1.1.2 Benzerlik Teoremi ve Model ile Çalışma .....	14
1.2 Tezin Amacı .....	17
1.3 Hipotez .....	18
<b>2 TEORİK ÇALIŞMALAR</b>	<b>20</b>
2.1 Genel Bilgiler .....	21
2.2 Prototip Kule Kren.....	22
2.3 Modal Analiz.....	24
2.3.1 Modal Genleşme Teorisi .....	30
2.3.2 Öz Vektörlerin Normalleştirilmesi.....	32
2.3.3 Kütleye Göre Normalleştirme.....	32
2.3.4 Kütle Katılım Faktörü .....	35
2.4 Yapılarda Sönüm.....	36
2.4.1 Modal Sönüm Oranlarının Hesaplanması .....	36
2.4.2 Sönüm Matrisinin Kurulması .....	39
2.4.3 Rayleigh Sönümü .....	39
2.4.4 Rayleigh Sönüm Katsayılarının Hesaplanması .....	41
2.5 Geçici Durum Analizi .....	42
2.5.1 Zaman Alanı Yöntemi .....	43
2.5.2 Duhamel İntegrali.....	44
2.5.3 Duhamel İntegralinin Çözümü.....	46
2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	50
2.6.1 Sonlu Elemanlarda Kullanılan Eleman Tipleri .....	52

2.6.2	Çerçeve Eleman Sonlu Elemanlar Modeli .....	55
2.6.3	Euler-Bernoulli ve Timoshenko Kiriş Teoremi.....	57
2.6.4	Sürekli Kütle ve Parçalı Kütle Matrisleri .....	59
2.6.5	Dönüşüm Matrisleri.....	61
2.7	Matlab İle Sonlu Elemanlar Programının Yazılması.....	64
2.7.1	Programın Girdileri ve Çıktıları.....	64
2.7.2	Modal Analiz Algoritması .....	67
2.7.3	Geçici Durum Analiz Algoritması .....	69
2.8	Benzerlik Teoremi .....	70
2.8.1	Benzerlik Teoremi Ve Uygulamaları .....	72
2.8.2	Buckingham $\pi$ (Pi) Teoremi .....	75
2.8.3	Benzerlik Oranlarının Elde Edilmesi .....	78
2.8.4	Prototip Kule Krenin Ölçeklenmesinde İzlenen Yol .....	84
2.8.5	Ölçek Değerinin Belirlenmesi.....	86
2.8.6	Ölçekleme Metodu Yaklaşımı.....	86
<b>3</b>	<b>DENEYSEL MODAL ANALİZ</b>	<b>96</b>
3.1	Model Tasarımı ve İmalatı.....	96
3.2	DeneySEL Modal Analiz Çalışmaları .....	98
3.3	DeneySEL Çalışmalardan Çıkarılan Sonuçlar .....	108
3.4	MATLAB İle Sonlu Elemanlar Programının Çalıştırılması ve DeneySEL Sonuçlar ile Karşılaştırılması .....	116
<b>4</b>	<b>KAFES SİSTEMLERİ</b>	<b>120</b>
4.1	Farklı Kafes Tiplerinin Uygulanması.....	125
4.2	Geçici Durum Analizlerinin Yapılması .....	126
4.2.1	Analizlerde Kullanılan Deprem Verileri .....	126
4.2.2	Senaryolar ve Analiz Sonuçları .....	127
4.3	Ölçekli Modelin Geçici Durum Analizi ve Gerçek Model İle Karşılaştırılması .....	143
4.4	Teorik Çalışmalardan Çıkarılan Sonuçlar .....	147
<b>5</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>149</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>155</b>
	<b>A DİNAMİK ANALİZ ÇIKTILARI</b>	<b>163</b>
	<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>205</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$r_y, r_z$	Atalet Yarıçapı
$l_x, l_y, l_z$	Birinci Eksen Yerel Vektörü
$\theta_{x1}, \theta_{x2}$	Birinci Eksende Dönme Açısı
$x_1, x_2$	Birinci Eksende Yer Değiştirme
U	Boylamsal Yer Değiştirme
J	Burulma Atalet Momenti
$x_g$	Deprem İvmesi
P	Dış Etki
$F_{(t)}$	Dinamik Kuvvet
$f_n$	Doğal Frekans
T	Dönüşüm Matrisi
$x_g, y_g$	Eksenlere Göre Ağırlık Merkezleri
E	Elastiklik Modülü
$t_1, t_2$	Et Kalınlıkları
r	Etki Vektörü
$M_i$	Etkin Modal Kütle
A	Fay Alanı
A	Faz Açısı
$h_{x,y}$	Frekans Cevap Fonksiyonu
$\dot{x}$	Hız
$m_x, m_y, m_z$	İkinci Eksen Yerel Vektörü
$\theta_{y1}, \theta_{y2}$	İkinci Eksende Dönme Açısı
$y_1, y_2$	İkinci Eksende Yer Değiştirme
$C_1, C_2$	İntegral Sabitleri
$\ddot{x}$	İvme
G	Kayma Modülü
A	Kesit Alanı
I	Kesit Atalet Momenti
V	Kesme Kuvveti
$I_c$	Kolon Atalet Momenti
$c_{cr}$	Kritik Sönüm Katsayısı

F	Kuvvet Matrisi
M	Kütle
L	Kütle Katsayı Vektörü
M	Kütle Matrisi
$a_0$	Kütle Sönüm Katsayısı
$\Phi$	Mod Şekli Vektörü
$\Gamma$	Modal Katılım Faktörü
q	Modal Koordinat
M	Moment
$\Lambda$	Ölçek Faktörü
$\Pi$	Pi Grubu
G	Rijitlik
k	Rijitlik Katsayısı
K	Rijitlik Matrisi
$a_1$	Rijitlik Sönüm Katsayısı
$M_0$	Sismik Moment
$M_w$	Sismik Moment Büyüklüğü
c	Sönüm Katsayısı
C	Sönüm Matrisi
Z	Sönüm Oranı
$w_d$	Sönümlü Sistem Açısal Frekansı
$w_n$	Sönümsüz Sistem Açısal Frekansı
$T_n$	Sönümsüz Sistem Periyodu
L	Uzunluk
$n_x, n_y, n_z$	Üçüncü Eksen Yerel Vektörü
$\theta_{z1}, \theta_{z2}$	Üçüncü Eksende Dönme Açısı
$z_1, z_2$	Üçüncü Eksende Yer Değiştirme
g	Yer Çekimi İvmesi
$\rho$	Yoğunluk
t	Zaman
$\varepsilon$	Zaman Aralığı
$x(t)$	Zamana Bağlı Yer Değiştirme

## KISALTMA LİSTESİ

---

AISC	American Institute of Steel Construction
ANSI	American National Standards Institute
BSSC	Building Seismic Safety Council
DN	Düğüm Noktası
EN	Eleman Numarası
FRF	Frequency Response Function (Frekans Cevap Fonksiyonu)
SEAOC	Structural Engineering Association of California
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
ICBO	Uniform Building Code

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Deprem ile ilgili terimler .....	4
Şekil 2.1 Temel Kule Kren Tipleri a)Luffing Jib b) Saddle Jib c)Self Erecting ....	21
Şekil 2.2 Kule kren temel bileşenleri ve hareketleri [66] .....	22
Şekil 2.3 Potain MDT 178 kule kren teknik bilgileri [67].....	23
Şekil 2.4 Tek serbestlik dereceli yapılar .....	25
Şekil 2.5 Sönümsüz sistemin serbest titreşim cevabı.....	26
Şekil 2.6 Farklı sönüm değerleri için cevap eğrileri.....	28
Şekil 2.7 Sönümün serbest titreşime etkisi.....	29
Şekil 2.8 Koordinat dönüşümleri .....	33
Şekil 2.9 Logaritmik azalma yöntemi ile sönüm oranının bulunması .....	38
Şekil 2.10 Rayleigh sönümü .....	41
Şekil 2.11 Tekil kuvvet ve sistem cevapları.....	44
Şekil 2.12 Duhamel integrali yöntemi a) Girdi b)Cevaplar .....	45
Şekil 2.13 Kısa zaman araklılarıyla idealleştirilmiş deprem hareketi.....	46
Şekil 2.14 Sonlu elemanlar yöntemi çözüm şeması.....	51
Şekil 2.15 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan başlıca elemanlar .....	53
Şekil 2.16 Eleman tipleri .....	54
Şekil 2.17 Çerçeve eleman serbestlik dereceleri.....	55
Şekil 2.18 Çerçeve eleman düğüm noktaları öteleme ve dönme hareketleri .....	56
Şekil 2.19 Euler - Bernoulli ve Timoshenko kirişleri farkı .....	57
Şekil 2.20 Kesit eksen takımının gösterilmesi .....	58
Şekil 2.21 Genel ve yerel koordinat takımlarının gösterilmesi .....	62
Şekil 2.22 3.Noktanın gösterimi.....	63
Şekil 2.23 Sonlu elemanlar programı akış diyagramı .....	64
Şekil 2.24 Örnek çerçeve yapı ve numaralandırılması.....	65
Şekil 2.25 Analiz adımları ve program girdi-çıktıları.....	67
Şekil 2.26 Modal analiz işlem adımları .....	68
Şekil 2.27 Geçici durum analizi işlem adımları .....	69
Şekil 2.28 Yapısal analizde uygulana yöntemler [85] .....	71
Şekil 2.29 Ölçekli model yaklaşımı .....	72
Şekil 2.30 Tam benzerlik .....	74

Şekil 2.31 Prototip kule kren modeli.....	78
Şekil 2.32 Prototip kule kren sonlu elemanlar modeli.....	85
Şekil 2.33 Mastı oluşturan kesitlere ait genel ölçüler .....	87
Şekil 2.34 Kesit ölçekleme aşamaları .....	88
Şekil 2.35 Masta ait kesit profilleri .....	89
Şekil 3.1 Ölçekli kule mastı kısımları .....	97
Şekil 3.2 Kule mast parçalarının birleştirilmesi .....	97
Şekil 3.3 1/30 ölçekli fiziksel model(a)Genel görünüş (b)Alt (c)Üst.....	98
Şekil 3.4 Deneysel modal analiz .....	100
Şekil 3.5 a) Ankastre giriş ve ölçüm noktaları b) Mod şekilleri [68] .....	102
Şekil 3.6 Ankastre giriş frekans cevap fonksiyonları [68].....	102
Şekil 3.7 Frekans cevap fonksiyonları [68] .....	102
Şekil 3.8 Frekans cevap fonksiyonu ile 1.modun çizdirilmesi[68].....	103
Şekil 3.9 Frekans cevap fonksiyonu ile 2.modun çizdirilmesi[68].....	103
Şekil 3.10 Nokta sayısının artırılması ile mod şekillerin çizdirilmesi.....	104
Şekil 3.11 Hızlı fourier dönüşümü [94] .....	104
Şekil 3.12 Yetersiz örnekleme hızı örneği .....	106
Şekil 3.13 Pencereleme.....	106
Şekil 3.14 Frekans cevap fonksiyonu ve tutarlılık (Coherence) [68] .....	107
Şekil 3.15 Genel olarak dinamik modelleme süreci.....	108
Şekil 3.16 Darbe çekici ve tek eksenli ivmeölçer .....	109
Şekil 3.17 Program ara yüzü.....	109
Şekil 3.18 Fiziksel model ve deney kurulumu .....	110
Şekil 3.19 Ölçüm 1'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu .....	112
Şekil 3.20 Ölçüm 2'ye ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu.....	112
Şekil 3.21 Ölçüm 3'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu .....	113
Şekil 3.22 Ölçüm 4'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu .....	113
Şekil 3.23 Ölçüm 5'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu .....	114
Şekil 3.24 Ölçüm 6'ya ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu.....	114
Şekil 3.25 6 Ölçüme ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu .....	116
Şekil 3.26 Masta ait elemanların numaralandırılması .....	117
Şekil 3.27 1/30 ölçekli model mod şekilleri.....	118

Şekil 4.1 Farklı tiplerdeki destek elemanları .....	122
Şekil 4.2 Farklı kafes tiplerine sahip mast örnekleri.....	124
Şekil 4.3 Deprem girdileri (a)El Centro-1940 (NS) (b)Kocaeli-1999 (NS) .....	127
Şekil 4.4 Geçici durum analizi .....	130
Şekil 4.5 Senaryo (Grup 1).1 yer değiştirme-zaman grafiği .....	131
Şekil 4.6 Senaryo (Grup 1).3 yer değiştirme-zaman grafiği .....	131
Şekil 4.7 Senaryo (Grup 1).2 yer değiştirme-zaman grafiği .....	131
Şekil 4.8 Senaryo (Grup 1).4 yer değiştirme-zaman grafiği .....	131
Şekil 4.9 Senaryo (Grup 1).1 ivme-zaman grafiği .....	132
Şekil 4.10 Senaryo (Grup 1).3 ivme-zaman grafiği .....	132
Şekil 4.11 Senaryo (Grup 1).2 ivme-zaman grafiği .....	132
Şekil 4.12 Senaryo (Grup 1).4 ivme-zaman grafiği .....	132
Şekil 4.13 Senaryo (Grup 1).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	133
Şekil 4.14 Senaryo (Grup 1).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	133
Şekil 4.15 Senaryo (Grup 1).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	133
Şekil 4.16 Senaryo (Grup 1).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	133
Şekil 4.17 Senaryo (Grup 2).1 yer değiştirme-zaman grafiği .....	134
Şekil 4.18 Senaryo (Grup 2).3 yer değiştirme -zaman grafiği .....	134
Şekil 4.19 Senaryo (Grup 2).2 yer değiştirme -zaman grafiği .....	134
Şekil 4.20 Senaryo (Grup 2).4 yer değiştirme -zaman grafiği .....	134
Şekil 4.21 Senaryo (Grup 2).1 ivme-zaman grafiği .....	135
Şekil 4.22 Senaryo (Grup 1).3 ivme-zaman grafiği .....	135
Şekil 4.23 Senaryo (Grup 2).2 ivme-zaman grafiği .....	135
Şekil 4.24 Senaryo (Grup 2).4 ivme-zaman grafiği .....	135
Şekil 4.25 Senaryo (Grup 2).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	136
Şekil 4.26 Senaryo (Grup 2).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	136
Şekil 4.27 Senaryo (Grup 2).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	136
Şekil 4.28 Senaryo (Grup 2).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	136
Şekil 4.29 Senaryo (Grup 3).1 yer değiştirme-zaman grafiği .....	137
Şekil 4.30 Senaryo (Grup 3).3 yer değiştirme-zaman grafiği .....	137
Şekil 4.31 Senaryo (Grup 3).2 yer değiştirme-zaman grafiği .....	137
Şekil 4.32 Senaryo (Grup 3).4 yer değiştirme-zaman grafiği .....	137

Şekil 4.33 Senaryo (Grup 3).1 ivme-zaman grafiği .....	138
Şekil 4.34 Senaryo (Grup 3).3 ivme-zaman grafiği .....	138
Şekil 4.35 Senaryo (Grup 3).2 ivme-zaman grafiği .....	138
Şekil 4.36 Senaryo (Grup 3).4 ivme-zaman grafiği .....	138
Şekil 4.37 Senaryo (Grup 3).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	139
Şekil 4.38 Senaryo (Grup 3).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	139
Şekil 4.39 Senaryo (Grup 3).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	139
Şekil 4.40 Senaryo (Grup 3).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği.....	139
Şekil 4.41 Ölçekli deprem girdisi .....	143
Şekil 4.42 Yer değiştirme-zaman grafikleri .....	145
Şekil 4.43 İvme-zaman grafikleri .....	145
Şekil 4.44 Hız-zaman grafikleri.....	145
Şekil 4.45 Normal gerilme-zaman grafikleri .....	146
Şekil 4.46 Maksimum birleşik gerilme-zaman grafikleri.....	146
Şekil A.1 Senaryo 1.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	164
Şekil A.2 K Tipi Mast için İlk 6 Frekansa Ait Mod Şekilleri.....	165
Şekil A.3 Senaryo 2.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	166
Şekil A.4 Senaryo 3.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	167
Şekil A.5 Senaryo 4.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	168
Şekil A.6 Senaryo 5.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	169
Şekil A.7 Senaryo 6.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	170
Şekil A.8 Senaryo 7.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	171
Şekil A.9 Senaryo 8.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	172
Şekil A.10 Senaryo 9.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	173
Şekil A.11 Senaryo 10.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	174

<b>Şekil A.12</b>	Senaryo 1.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	175
<b>Şekil A.13</b>	Senaryo 2.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	176
<b>Şekil A.14</b>	Senaryo 3.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	177
<b>Şekil A.15</b>	Senaryo 4.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	178
<b>Şekil A.16</b>	Senaryo 5.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	179
<b>Şekil A.17</b>	Senaryo 6.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	180
<b>Şekil A.18</b>	Senaryo 7.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	181
<b>Şekil A.19</b>	Senaryo 8.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	182
<b>Şekil A.20</b>	Senaryo 9.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum Normal Gerilme d)Maksimum Birleşik Gerilme Grafiği.....	183
<b>Şekil A.21</b>	Senaryo 10.2 a) Yer Değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	184
<b>Şekil A.22</b>	Senaryo 1.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	185
<b>Şekil A.23</b>	Senaryo 2.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	186
<b>Şekil A.24</b>	Senaryo 3.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	187
<b>Şekil A.25</b>	Senaryo 4.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	188
<b>Şekil A.26</b>	Senaryo 5.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum Normal Gerilme d)Maksimum Birleşik Gerilme Grafiği.....	189
<b>Şekil A.27</b>	Senaryo 6.3 a) Yer Değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	190
<b>Şekil A.28</b>	Senaryo 7.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	191
<b>Şekil A.29</b>	Senaryo 8.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	192
<b>Şekil A.30</b>	Senaryo 9.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	193



<b>Şekil A.31</b>	Senaryo 10.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	194
<b>Şekil A.32</b>	Senaryo 1.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	195
<b>Şekil A.33</b>	Senaryo 2.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	196
<b>Şekil A.34</b>	Senaryo 3.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	197
<b>Şekil A.35</b>	Senaryo 4.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	198
<b>Şekil A.36</b>	Senaryo 5.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	199
<b>Şekil A.37</b>	Senaryo 6.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	200
<b>Şekil A.38</b>	Senaryo 7.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	201
<b>Şekil A.39</b>	Senaryo 8.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	202
<b>Şekil A.40</b>	Senaryo 9.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	203
<b>Şekil A.41</b>	Senaryo 10.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d)Maksimum birleşik gerilme grafiği .....	204

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 1.1</b> Büyüklüğe göre deprem frekansları .....	5
<b>Tablo 2.1</b> Önerilen sönüm değerleri .....	37
<b>Tablo 2.2</b> Eleman koordinat matrisi.....	65
<b>Tablo 2.3</b> Eleman bağlantı matrisi ve malzeme bilgileri.....	65
<b>Tablo 2.4</b> Sıkça karşılaşılan fiziksel niceliklerin boyutları .....	77
<b>Tablo 2.5</b> Ölçek değerleri.....	82
<b>Tablo 2.6</b> MDT 178 X doğrultusundaki kütle katılım faktörleri.....	85
<b>Tablo 2.7</b> Prototip kesitlerin özellikleri .....	89
<b>Tablo 2.8</b> 1/40 ölçek için model kesit değerleri .....	90
<b>Tablo 2.9</b> Prototip mast ve teorik ölçekli mast doğal frekansları (1/40) .....	91
<b>Tablo 2.10</b> 1/40 ölçek için güncellenmiş kesit değerleri .....	92
<b>Tablo 2.11</b> Prototip mast ve pratik ölçekli mast doğal frekansları (1/40) .....	92
<b>Tablo 2.12</b> 1/30 ölçek için model kesit değerleri .....	93
<b>Tablo 2.13</b> 1/30 ölçek için güncellenmiş kesit değerleri .....	94
<b>Tablo 2.14</b> Prototip mast ve teorik ölçekli mast doğal frekansları (1/30) .....	94
<b>Tablo 2.15</b> Prototip mast ve pratik ölçekli mast doğal frekansları (1/30) .....	95
<b>Tablo 3.1</b> Girdi/Çıktı sinyal dönüşümleri [67].....	105
<b>Tablo 3.2</b> Deneysel ölçüm tablosu .....	111
<b>Tablo 3.3</b> Deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar .....	115
<b>Tablo 3.4</b> 1/30 ölçekli model modal analiz sonuçları .....	117
<b>Tablo 3.5</b> Teorik ve deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması .....	119
<b>Tablo 4.1</b> Deprem hareketleri temel bilgileri .....	127
<b>Tablo 4.2</b> Farklı çerçeve tipleri .....	128
<b>Tablo 4.3</b> Analizlerde kullanılan senaryo bilgileri .....	128
<b>Tablo 4.4</b> Farklı K tipli tasarımlar .....	129
<b>Tablo 4.5</b> Grup 1'e ait senaryoların maksimum değerleri.....	141
<b>Tablo 4.6</b> Grup 2'ye ait senaryoların maksimum değerleri.....	141
<b>Tablo 4.7</b> Grup 3'e ait senaryoların maksimum değerleri.....	142
<b>Tablo 4.8</b> Doğal Frekansların karşılaştırılması .....	144
<b>Tablo A.1</b> Senaryo 1.1 genel bilgiler .....	164
<b>Tablo A.2</b> Senaryo 1.1 modal analiz çıktıları .....	164

<b>Tablo A.3</b> Senaryo 2.1 genel bilgiler .....	166
<b>Tablo A.4</b> Senaryo 2.1 modal analiz çıktıları .....	166
<b>Tablo A.5</b> Senaryo 3.1 genel bilgiler .....	167
<b>Tablo A.6</b> Senaryo 3.1 modal analiz çıktıları .....	167
<b>Tablo A.7</b> Senaryo 4.1 genel bilgiler .....	168
<b>Tablo A.8</b> Senaryo 4.1 modal analiz çıktıları .....	168
<b>Tablo A.9</b> Senaryo 5.1 genel bilgiler .....	169
<b>Tablo A.10</b> Senaryo 5.1 modal analiz çıktıları .....	169
<b>Tablo A.11</b> Senaryo 6.1 genel bilgiler .....	170
<b>Tablo A.12</b> Senaryo 6.1 modal analiz çıktıları .....	170
<b>Tablo A.13</b> Senaryo 7.1 genel bilgiler .....	171
<b>Tablo A.14</b> Senaryo 7.1 modal analiz çıktıları .....	171
<b>Tablo A.15</b> Senaryo 8.1 genel bilgiler .....	172
<b>Tablo A.16</b> Senaryo 8.1 modal analiz çıktıları .....	172
<b>Tablo A.17</b> Senaryo 9.1 genel bilgiler .....	173
<b>Tablo A.18</b> Senaryo 9.1 modal analiz çıktıları .....	173
<b>Tablo A.19</b> Senaryo 10.1 genel bilgiler .....	174
<b>Tablo A.20</b> Senaryo 10.1 modal analiz çıktıları .....	174
<b>Tablo A.21</b> Senaryo 1.2 genel bilgiler .....	175
<b>Tablo A.22</b> Senaryo 1.2 modal analiz çıktıları .....	175
<b>Tablo A.23</b> Senaryo 2.2 genel bilgiler .....	176
<b>Tablo A.24</b> Senaryo 2.2 modal analiz çıktıları .....	176
<b>Tablo A.25</b> Senaryo 3.2 genel bilgiler .....	177
<b>Tablo A.26</b> Senaryo 3.2 modal analiz çıktıları .....	177
<b>Tablo A.27</b> Senaryo 4.2 genel bilgiler .....	178
<b>Tablo A.28</b> Senaryo 4.2 modal analiz çıktıları .....	178
<b>Tablo A.29</b> Senaryo 5.2 genel bilgiler .....	179
<b>Tablo A.30</b> Senaryo 5.2 modal analiz çıktıları .....	179
<b>Tablo A.31</b> Senaryo 6.2 genel bilgiler .....	180
<b>Tablo A.32</b> Senaryo 6.2 modal analiz çıktıları .....	180
<b>Tablo A.33</b> Senaryo 7.2 genel bilgiler .....	181
<b>Tablo A.34</b> Senaryo 7.2 modal analiz çıktıları .....	181

<b>Tablo A.35</b>	Senaryo 8.2 genel bilgiler .....	182
<b>Tablo A.36</b>	Senaryo 8.2 modal analiz çıktıları .....	182
<b>Tablo A.37</b>	Senaryo 9.2 genel bilgiler .....	183
<b>Tablo A.38</b>	Senaryo 9.2 modal analiz çıktıları .....	183
<b>Tablo A.39</b>	Senaryo 10.2 genel bilgiler .....	184
<b>Tablo A.40</b>	Senaryo 10.2 modal analiz çıktıları .....	184
<b>Tablo A.41</b>	Senaryo 1.3 genel bilgiler .....	185
<b>Tablo A.42</b>	Senaryo 1.3 modal analiz çıktıları .....	185
<b>Tablo A.43</b>	Senaryo 2.3 genel bilgiler .....	186
<b>Tablo A.44</b>	Senaryo 2.3 modal analiz çıktıları .....	186
<b>Tablo A.45</b>	Senaryo 3.3 genel bilgiler .....	187
<b>Tablo A.46</b>	Senaryo 3.3 modal analiz çıktıları .....	187
<b>Tablo A.47</b>	Senaryo 4.3 genel bilgiler .....	188
<b>Tablo A.48</b>	Senaryo 4.3 modal analiz çıktıları .....	188
<b>Tablo A.49</b>	Senaryo 5.3 genel bilgiler .....	189
<b>Tablo A.50</b>	Senaryo 5.3 modal analiz çıktıları .....	189
<b>Tablo A.51</b>	Senaryo 6.3 genel bilgiler .....	190
<b>Tablo A.52</b>	Senaryo 6.3 modal analiz çıktıları .....	190
<b>Tablo A.53</b>	Senaryo 7.3 genel bilgiler .....	191
<b>Tablo A.54</b>	Senaryo 7.3 modal analiz çıktıları .....	191
<b>Tablo A.55</b>	Senaryo 8.3 genel bilgiler .....	192
<b>Tablo A.56</b>	Senaryo 8.3 modal analiz çıktıları .....	192
<b>Tablo A.57</b>	Senaryo 9.3 genel bilgiler .....	193
<b>Tablo A.58</b>	Senaryo 9.3 modal analiz çıktıları .....	193
<b>Tablo A.59</b>	Senaryo 10.3 genel bilgiler .....	194
<b>Tablo A.60</b>	Senaryo 10.3 modal analiz çıktıları .....	194
<b>Tablo A.61</b>	Senaryo 1.4 genel bilgiler .....	195
<b>Tablo A.62</b>	Senaryo 1.4 modal analiz çıktıları .....	195
<b>Tablo A.63</b>	Senaryo 2.4 genel bilgiler .....	196
<b>Tablo A.64</b>	Senaryo 2.4 modal analiz çıktıları .....	196
<b>Tablo A.65</b>	Senaryo 3.4 genel bilgiler .....	197
<b>Tablo A.66</b>	Senaryo 3.4 modal analiz çıktıları .....	197

<b>Tablo A.67</b> Senaryo 4.4 genel bilgiler .....	198
<b>Tablo A.68</b> Senaryo 4.4 modal analiz çıktıları .....	198
<b>Tablo A.69</b> Senaryo 5.4 genel bilgiler .....	199
<b>Tablo A.70</b> Senaryo 5.4 modal analiz çıktıları .....	199
<b>Tablo A.71</b> Senaryo 6.4 genel bilgiler .....	200
<b>Tablo A.72</b> Senaryo 6.4 modal analiz çıktıları .....	200
<b>Tablo A.73</b> Senaryo 7.4 genel bilgiler .....	201
<b>Tablo A.74</b> Senaryo 7.4 modal analiz çıktıları .....	201
<b>Tablo A.75</b> Senaryo 8.4 genel bilgiler .....	202
<b>Tablo A.76</b> Senaryo 8.4 modal analiz çıktıları .....	202
<b>Tablo A.77</b> Senaryo 9.4 genel bilgiler .....	203
<b>Tablo A.78</b> Senaryo 9.4 modal analiz çıktıları .....	203
<b>Tablo A.79</b> Senaryo 10.4 genel bilgiler .....	204
<b>Tablo A.80</b> Senaryo 10.4 modal analiz çıktıları .....	204

## **Kule Krenlerin Deprem Etkisi Altındaki Dinamik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi**

Hamit KENAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU

Kule krenlerin işletme durumunda taşıdıkları yüklerden veya rüzgâr, deprem gibi çevresel kaynaklardan meydana gelen dinamik zorlamalara maruz kalması ve diğer kren tiplerine göre narin yapıda olmaları dinamik yükler karşısında sergiledikleri davranışların araştırılması konusunda motivasyon sağlamaktadır. Bu çalışmada da kule krenlerin deprem etkisi altında göstereceği dinamik davranışın incelenmesi amacıyla teorik ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Teorik çalışmalar kapsamında, kule kren gibi kafes tipli yapıların dinamik analizlerinin yapılması için MATLAB ile bir sonlu elemanlar programı oluşturulmuş, deneysel çalışmalarda kullanılacak ölçekli fiziksel bir model benzerlik teorisi yardımıyla tasarlanmış ve modelin imalatı için izlenecek yöntem sunulmuştur. Öncelikle, yapıların dinamik karakteristiklerini sunan modal analiz konusuna değinilmiş ve sistemin hareket denkleminin sonlu elemanlar yöntemiyle kurulması ve dinamik bir girdi karşısında denklemin çözüm yöntemleri üzerine bilgi verilerek ilgili yapı için uygun olan çözüm yöntemine ait detaylar sunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kapsamında kafes yapılı bir sisteme ait modelin çerçeve elemanlar yardımıyla parametrik olarak nasıl oluşturulduğundan

bahsedilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan program yardımıyla kafes yapılı sistemlerin modal analizlerinin yapılması ve deprem girdisi karşısında yer değiştirme, hız ve ivme davranışlarının belirlenerek yapıya ait elemanlarda meydana gelen gerilmelerin hesaplanması mümkün olmuştur.

Deneysel çalışmalar kapsamında, ölçekli bir model ile çalışılması uygun görüldüğünden benzerlik teoremi hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Teoremin uygulanmasına ait yöntemlerden bahsedilerek çalışmaya konu olan probleme ait çözümler sunulmuş ve deneysel çalışma için uygun bir ölçek değeri belirlenmiştir. Öncelikle ölçeklendirme sonrası belirlenmiş olan kesit ölçülerine ve yapı boyutlarına göre fiziksel model tasarımı ve imalatından bahsedilmiştir. Daha sonra deneysel modal analiz hakkında bilgi verilerek fiziksel model üzerinde modal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları ile teorik çalışma kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modelinin yapıyı ne derecede temsil ettiğinden bahsedilmiştir.

Son olarak deneylerle doğrulanmış sonlu elemanlar modeli ile farklı kafes tipleri ve farklı deprem girdileri kullanılarak çeşitli senaryolarla ilgili yapının sismik performanslarına ait sonuçlar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kule Kren, benzerlik teoremi, sonlu elemanlar yöntemi, modal analiz, deprem etkisi

## **Investigation of Dynamic Behaviors of Tower Cranes under Earthquake Effect Theoretically and Experimentally**

Hamit KENAN

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. C. Oktay AZELOĞLU

The fact that tower cranes are exposed to dynamic stresses caused by the loads they carry or environmental sources such as wind and earthquake in the operating state and their delicate structure compared to other crane types provide motivation to investigate their behavior in the face of dynamic loads. In this study, theoretical and experimental studies were carried out in order to examine the dynamic behavior of tower cranes under earthquake effect.

Within the scope of theoretical studies, a finite element program was created with MATLAB for dynamic analysis of lattice type structures such as tower cranes, a scaled physical model to be used in experimental studies was designed with the help of similitude theory and the method to be followed for manufacturing of the model was presented. Within the scope of the finite element method, it is mentioned how the model of a lattice system is created parametrically by frame elements. With the help of the program created in this context, it was possible to carry out modal analyzes of the lattice-structured systems and to calculate the stresses occurring in the elements of the structure against the earthquake input.



Within the scope of experimental studies, similitude theory is explained since it is deemed appropriate to work with a scaled model. By mentioning the methods of applying the theorem, a suitable scale value was determined for the experimental study. First of all, physical model design and manufacturing according to the cross-section dimensions and structure dimensions determined after scaling is mentioned. Then, modal analysis tests were carried out on the physical model. Theoretical and experimental modal analysis results were compared and it was mentioned to what extent the finite element model represents the structure.

Finally, the results of the seismic performances of the structure to various scenarios including different lattice types and different earthquake inputs are presented by using the finite element model verified by experiments.

**Keywords:** Tower Crane, Similitude Theory, Finite Element Method, Modal Analysis, Earthquake Effect.

### 1.1 Literatür Özeti

Yer kabuğunun derin katmanlarının kırılıp yer değiştirmesi veya yanardağların püskürme durumuna geçmesi yüzünden oluşan yer sarsıntısı olarak tanımlanan depremler en tehlikeli doğal afetler arasında yer almaktadır. Hem insan hayatına hem ekonomiye büyük ölçüde olumsuz yönde etkisi olan depremlerin tarihsel süreçte istatistiksel olarak tekrar edilebilirliği öngörülebilir olsa da meydana gelebilecekleri yer ve zaman konusunda bir tahminde veya tespitinde bulunmak henüz mümkün değildir. Fakat yaşanan depremler ve bu depremlerin yıkıcı etkileri sebebiyle hasar gören veya yıkılan yapılardan edinilen deneyimler, yapıların davranışlarının anlaşılmasını sağlamıştır. Bu sayede yeni binalar veya mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesi mümkün olmaktadır[1].

Gerekli önlemler alınmadığı takdirde can ve mal kaybıyla sonuçlanan depremlerin krenler üzerindeki etkisinin araştırılması ise 1995 yılında gerçekleşen Kobe depremi sonrasında önem kazanmıştır. Bu deprem sonrasında krenlerin hasar görüp kullanılamaz hale gelmesi krenlerin sismik performanslarının artırılmasını gündeme getirmiş, bu tarihten sonra krenler üzerine depremle ilgili araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalara literatür kısmında değinilecektir. Literatür çalışmalarında da görüleceği üzere Kobe dünyanın en büyükleri arasına giren önemli bir liman merkezine sahip olduğundan burada yaşanan deprem limanlara gelen gemilerdeki konteynerlerin yüklenmesi ve boşaltılmasında kullanılan krenlerde hasara ve yıkıma sebep olmuştur. Bu sebeple literatürde özellikle bu tip krenlerin sismik performansları üzerine gerek teorik gerek deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Teze konu olan kule krenler, inşaat sektöründe ve benzer sektörlerde çok yaygın olarak kullanılan kren tipleridir. Özellikle diğer kren tiplerinden farklı olarak kule krenler şehir içinde, insanların yaşam alanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca bu tip

krenler narin yapılara sahip olduklarından oluşacak dinamik etkilere karşı oldukça hassastırlar. Dengesiz yük dağılımı, rüzgâr etkisi, deprem etkisi gibi nedenlerle kule krenlerin hasara uğradığı ve bunun sonucunda ciddi anlamda can ve mal kayıplarının yaşandığı görülmektedir. Dolayısıyla kule krenlerde dinamik etkilere neden olan önemli problemlerden birinin deprem etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Şehirlerin yaşam alanı içerisinde kullanılan kule krenlerin deprem etkisi altında nasıl davranış sergileyeceğinin araştırılması olası bir deprem sonrası meydana gelebilecek can ve mal kayıplarını en aza indirmek için önem arz etmektedir. Literatürdeki çalışmalar ağırlıklı konteyner krenleri üzerine olduğundan kule krenlerin sismik performanslarının incelenmesiyle alakalı olarak literatürde eksiklik bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle kule krenlerin sismik performanslarının arttırılması için gerekli araştırmaların yapılması gerek insan hayatı gerekse de ekonomik kayıpların engellenmesini sağlayacaktır. Araştırma çalışmaları sadece kule krenler için değil, aynı zamanda kule krenlerin inşaat faaliyetleri esnasında inşa edilen yapıya bağlandığı da düşünüldüğünde, bu yapıların da kararlılığı ve güvenliğiyle ilgili çalışmalara katkı sağlayacaktır. Literatürde, çok katlı yapıların inşasında kullanılan kule krenlerin statik ve dinamik davranışları, kararlılık analizleriyle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fakat kule krenlerin deprem etkisi altındaki davranışlarıyla ilgili çalışmaların azlığı göze çarpmaktadır. Üstelik şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaların sadece teorik olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu konuda hem teorik hem deneysel olarak gerçekleştirilmiş bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu tez konusunun seçilmesiyle, kule krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını ortaya koyan ve deneysel çalışmalarla doğrulanmış bir nümerik modelin literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

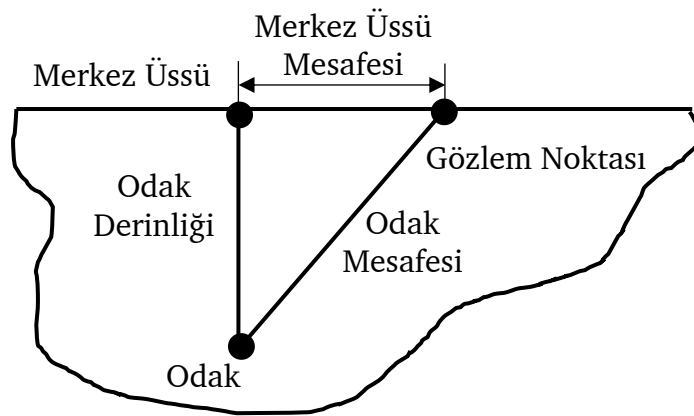
Bu amaç doğrultusunda, teorik ve deneysel çalışmalar beraber yürütüleceğinden ve çalışmaya konu olan kule krenin boyutları göz önüne alındığında gerçek bir model ile çalışılması mümkün olmadığından ölçekli bir model ile çalışma zorunluğu doğmuştur. Büyük ve ağır sistemlerle yapılacak testler için gerçek çalışma koşullarını sağlamak neredeyse imkânsızdır. Mümkün olması durumunda bile maliyet ve kontrol edilebilirlik açısından tercih edilmemektedir. Bundan

dolayı, prototip modelin üzerinde çalışılmasından ziyade basit bir ölçekli model kurmak ve bunun üzerinde testler gerçekleştirmek hem ekonomik anlamda hem de zaman anlamında daha kazançlıdır. Literatürde ölçekli modeller ile çalışma çok çeşitli araştırma konularında kullanılan bir yöntemdir. Prototip (ele alınan gerçek ürüne ait numune) ve model (ele alınan gerçek ürünü temsil eden ölçekli model) arasındaki benzerlik durumlarının kurulmasında iki yaklaşım kullanılabilir. Bu modeller küçültülmüş model olabileceği gibi büyütülmüş modeller de olabilmektedirler. Aynı zamanda yapısal modeller; elastik model, dolaylı model, doğrudan model, kuvvet modeli, rüzgâr modeli ve dinamik modeller olmak üzere çeşitli tiplerde olabilmektedir. Bu modeller kurulurken prototip ile model arasındaki benzerlik koşullarının sağlanması yönünde bir yaklaşım sergilenmektedir. Bu noktada iki farklı yöntem ile benzerlik ilişkisi kurulmaktadır; sistemin karakteristik denkleminin analiziyle ve boyut analiziyle. Bu çalışmada her iki yöntem de kullanılarak benzerlik ilişkisi kurulmuştur. Boyut analizi ile yapılan benzerlikte Buckingham Pi ( $\pi$ ) Teoremi kullanılmıştır. Bu teoreme ait detaylara daha sonra değinilecektir.

### **1.1.1 Deprem ve Transport Makineleri**

Binalar, köprüler, barajlar, krenler vb. büyük boyutlu yapısal sistemler çok çeşitli titreşim kaynaklarından etkilenmektedirler. Bunlardan en yaygın ve önemli olanları ise rüzgâr, deprem gibi dinamik etkiye sahip doğa olaylarıdır. Şiddeti, etki alanı ve zarar verme potansiyeli açısından deprem, insanoğlunun tarih boyunca zarar gördüğü ve günümüzde de en fazla önlem aldığı önemli bir dinamik etkidir[2]. Yerkürenin periyodik değişiminde önemli yeri olan fakat meydana gelmesi öncesinde herhangi bir işaret vermeyen depremler tarih boyunca önemli derecede yıkıma ve can kaybına mâl olmuştur. Geçmişte yaşanan bu acı tecrübeler ise var olan yapıların ve gelecekte inşa edilecek yapıların depreme karşı dayanıklı olması için bilim insanlarını bir araya getirmiş ve disiplinler arası çalışmalara sevk etmiştir. Bu açıdan depreme dayanıklı yapı tasarımı zemin, yapı ve yapı-zemin etkileşimi açısından çok farklı bilim dallarının konusu olmaktadır.

Deprem, yerküre içerisinde meydana gelen bozulma kaynaklı dalgaların sebep olduğu yerküre titreşimleridir. Yerküre, yüzeyden merkeze kabaca üç kısımdan oluşmaktadır; kabuk, manto ve çekirdek. Sıvı fazda olan çekirdek ve katı fazda olan kabuk arasında kalan mantoda yüksek sıcaklık ve basınç farkından dolayı konveksiyon akımları meydana gelmektedir. Bu akım kabuk ve mantonun çekirdek üzerinde kaymasına sebep olmaktadır. Kayan bu parçalar ise tektonik plakalar olarak adlandırılmaktadır. Yerkürede yedi ana tektonik plaka yanında birçok ufak tektonik plaka mevcuttur. Birbirlerine göre izafi olarak hareket eden bu plakalar arasında temelde üç tip etkileşim vardır; yakınsak, ıraksak ve dönüşüm sınırları. Bu etkileşimler sonucu en üst kısım olan kabuk tektonik kuvvetlere maruz kalmakta ve gelen kuvvete karşı koyamadığı durumlarda kırılarak üzerinde biriken enerjiyi açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan bu enerji ise sismik dalga olarak adlandırılan, yerküre ve yerküre yüzeyi boyunca yayılan deprem hareketine sebep olmaktadır. Kabuğun kırılarak enerjisini boşalttığı bölgeler ise fay hattı olarak adlandırılmaktadır. Depremin meydana gelmesine sebep olan fay hattı bölgesi odak, bu odağın yerküre üzerindeki izdüşümüne ise merkez üssü denilmektedir. Depremler odak mesafesine göre 60 km'ye kadar sığ, 60-185 km arası orta düzey ve 185-300 km arası derin olarak sınıflandırılmaktadır. Bir depremin nicelik olarak ifade edilmesi ise önce 1931 yılında Wadati daha sonra 1935 yılında Charles Richter tarafından gerçekleştirilmiştir [2].



**Şekil 1.1** Deprem ile ilgili terimler

Bir depremin büyüklüğünü ve etkisini temsil etmek için kullanılan birden fazla parametre vardır. Bu parametrelerinin herhangi biri veya tümü ile bir depremin büyüklüğü açıklanmaktadır. Bu parametrelerin bazıları doğrudan ölçülürken, diğerleri deneysel ilişkiler yardımıyla dolaylı olarak ölçülmektedir. Dolayısıyla, parametreler arasında bağlantılar kurulabilmesi için birçok deneysel ilişki geliştirilmiştir [3]. Richter, bir depremin büyüklüğünü, bir depremin merkez üssünden 100 km uzaklıktaki Wood Anderson sismografi tarafından kaydedilen mikrometre boyutundaki maksimum sismik dalga genliğinin onluk tabandaki logaritması olarak tanımlamaktadır [2]. Çeşitli sismik büyüklük ifadeleri tanımlanmıştır fakat sismik moment, kırılma yüzeyinden salınan gerinim enerjisinin bir ölçüsü olduğundan, sismik momenti temel alan bir büyüklük ölçeği büyük depremlerin boyutunu en doğru şekilde tanımlamaktadır [3].  $A$  [ $m^2$ ] fay alanını,  $U$  [ $m$ ] faydaki boylamsal yer değiştirmeyi ve  $G$  [ $N/m^2$ ] rijitlik modülünü ifade etmek üzere sismik moment denklem (1.1)deki gibi hesaplanır.

$$M_o = GUA \quad (1.1)$$

Sismik moment büyüklüğü ise denklem (1.2) ile hesaplanmaktadır.

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_o - 6.0 \quad (1.2)$$

**Tablo 1.1** Büyüklüğe göre deprem frekansları

Tanım	Richter Büyüklüğü	Frekans
Çok Büyük	8.7	1
Büyük	7-7.9	18
Büyük yıkım	6-6.9	120
Orta Hasar	5-5.9	1000
Az Hasar	4-4.9	6000
Hissedilen	3-3.9	49000
Algılanabilir	2-2.9	300000
Algılanamaz	<2	600000+

Richter deprem büyüklüğüne göre meydana gelen depremlerin frekansı Tablo 1.1'de görülmektedir. Bu depremlerin büyüklük değerlerini ifade eden sayılar arasında fazla fark olmamasına rağmen logaritmik tabanlı olduklarından

gerçekteki büyüklük ve açığa çıkan enerji miktarları arasında çok büyük farklar bulunmaktadır.

Buraya kadarki kısımda genel olarak depremi tarif eden terimler konusunda bilgi verilmiştir. Aşağıdaki kısımda ise öncelikle konteyner ve portal tipteki krenler ve bunların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının araştırıldığı teorik ve deneysel çalışmalar sonrasında ise kule kren özelinde yürütülen ve kule krenlerin dinamik davranışlarını konu alan teorik ve deneysel çalışmalar sunulmuştur.

Kanayama ve Kashiwazaki [4] 1/25 ve Kanayama vd [5] 1/8 ölçekli bir konteyner krenin raydan çıkması, kren ayaklarında meydana gelebilecek burkulma hasarı ve krenin devrilmesi durumlarını odak noktasına alarak sarsma masası testleri gerçekleştirmiş ve bu kapsamda konteyner krenlerin dinamik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir.

Kobayashi vd. [6], 1/8 ölçekli bir konteyner kreni sarsma masası testlerinde gerçek deprem verileri kullanarak tek ekseninde deprem girdisine maruz bırakıp tekerlek-ray bağlantısının dinamik davranışını incelemişlerdir.

Soderberg ve Jordan [7], Koshab ve Jacobs [8], Jacobs vd. [9], Tarafından yapılan ve yine konteyner krenlerin ele alınarak yapıldığı sarsma masası testlerinde tek ekseninde olmak üzere deprem girdileri uygulanmıştır. Aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapının modellenmesi ile teorik çalışmalar da yürütülmüştür. Bu sayede bu tarz kren yapılarının deprem hareketi karşısında karşılaştıkları problemlere tasarımsal yaklaşımlar ile çözümler sunulmuştur.

Sugano vd. [10] 1/5 ölçekli bir kren modelinin dinamik davranışlarını hem deneysel hem teorik olarak incelemiştir. Yapıyı tek serbestlik dereceli olarak modellemesinin yanı sıra sonlu elemanlar yöntemini kullanarak iki ve üç boyutlu olarak modelleyerek teorik çalışmalar yürütmüştür. Tek ekseninde gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri ve teorik çalışmalar neticesinde bir zemin izolasyonu kullanmış ve deprem hareketinden kaynaklanan ve yapıya etki eden ivmelerin bu izolasyon yardımıyla azaldığını göstermiştir.

Sağırılı, Edinçliler ve Azeloğlu [11], konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin zeminde yapılacak iyileştirmeler yoluyla azaltılması üzerine odaklanmıştır. Sarsma masası testlerinden elde edilen bulgular kren zemini üzerinde yapılacak bir iyileştirmenin sismik performansı artırdığını göstermiştir.

Sağırılı ve Azeloğlu [12], 1/20 ölçekli portal kreni teorik olarak modelleyerek deprem hareketi karşısındaki dinamik davranışını incelemiştir. Bu kapsamda çok serbestlik dereceli ve doğrusal olmayan bir model geliştirilmiştir. Tek eksenli uygulanan deprem girdileri karşısında yapılan analizler neticesinde ve deneyler yoluyla elde edilen sonuçlar ile teorik modelin yapının dinamiğini etkin bir şekilde temsil edebildiği gösterilmiştir.

Azeloğlu vd. [13], ölçekli bir fiziksel modelini tasarladıkları konteyner krenler için çok serbestlik dereceli bir doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. Hem fiziksel model ile yapılan sarsma masası testleri hem çok serbestlik dereceli model ile yapılan teorik çalışmalar ile modelin etkinliği sorgulanmıştır. Zemin ve tekerlek-ray dinamiğini de içeren teorik modelin yapıyı etkin bir şekilde temsil ettiği gösterilmiş ve bu modelin krenlerin sismik performanslarını artırmaya yönelik aktif, pasif kontrol çalışmalarında kullanılması önerilmiştir.

Azeloğlu [14], doktora tezinde konteyner krenleri için çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir dinamik model oluşturmuş, dinamik modelin doğruluğunu ölçekli bir fiziksel model üzerinde yaptığı sarsma masası deneyleri ile doğrulamış ve mevcut problemin çözümü için kren yapısına geliştirilen dinamik modeli kullanarak aktif titreşim kontrolü uygulamıştır. Yöntemin, kren yapısındaki titreşimleri azalttığı benzetim çalışmaları yoluyla gösterilmiştir.

Sağırılı vd. [15], deprem karşısında portal krenlerde meydana gelen hareketin aktif titreşim kontrolü ile azaltılmasını amaçlamışlardır. Daha önce dinamik modeli oluşturulan ve etkinliği deneysel çalışmalarla gösterilen modele Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrol uygulanmış ve portal krenlerde aktif titreşim kontrolünün başarıyla uygulanabileceğini gösterilmiştir.



Azeloğlu ve Sağırlı [16], Azeloğlu'nun doktora tezinde [14] konteyner krenler için geliştirdiği dinamik modeli kullanarak yapıya aktif titreşim kontrolü ile yapısal titreşimlerin azaltılması için Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolü uygulanmışlardır.

Azeloğlu vd. [17], konteyner krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemi için daha önce uygulanan kontrol yönteminden farklı olarak Bulanık Mantık PID kontrol algoritması tasarlamış ve modele uygulamışlardır.

Azeloğlu ve Sağırlı [18], konteyner krenlerinde depremden kaynaklı yapısal titreşimlerin azaltılması için geri beslemeli karma  $H_2/H_\infty$  kontrol algoritması ile aktif titreşim kontrolü önermişlerdir. Daha önceki deneysel çalışmalarla etkinliği gösterilen dinamik model kullanılarak aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Sonuçlar konteyner krenlerinin aktif titreşim kontrolünde karma  $H_2/H_\infty$  kontrolörlerin başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir.

Solazzi [19], kıyı ve gemi arasında çalışan bir konteyner krenin deprem etkisi altında göstereceği dinamik etkiyi araştırmak için yaptığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çeşitli senaryolara göre statik, modal ve deprem analizleri yapılmıştır. Analizler sonucu elde edilen doğal frekanslar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu makalede deneysel çalışma yapılmamış, teorik çalışma ile sınırlı kalınmıştır.

Krenler özelinde yapılan çalışmalar depremlerin krenlerde meydana getirdiği hasarların incelenmesi ve hasar mekanizmalarına karşılık önlemlerin alınması adına önemlidir. Aşağıda ise kule kren özelinde yapılan ve bu yapıların dinamik karakteristiklerinin incelenmesini konu alan çalışmalar sunulmuştur.

Li-Jeng vd.[20], bir kule krenin deprem etkisi karşısında sergilediği dinamik davranışı incelemiştir. Yapılan çalışmada, ele alınan kule krenin SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesiyle deprem girdisi karşısında sergilediği davranış araştırılmıştır. Çalışmada, 1940 El Centro'un NS bileşeni ve 1995 Kobe olmak üzere iki farklı tip deprem girdisi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda krende meydana gelen yer değiştirme ve ivme değerleri

elde edilmiştir. Bu çalışma teorik içerikli olup deneysel çalışma ile izlenen yöntemin etkinliği kontrol edilmemiştir.

Ju vd [21], kule krenlerin dinamik davranışlarını inceleyen bir çalışmada bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada esas olarak yük kaldırma halatlarının, yük kaldırma hızına göre sergilediği dinamik cevap incelenmiştir. Makaralar üzerinden geçen halatların, krenin statik gerilme ve dinamik özellikleri üzerinde büyük bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca bom açısı ve krenin destekleme elemanlarının doğal frekansı nasıl değiştirdiği sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bom açısının hem ataleti hem rijitlik dağılımını, destekleme elemanlarının ise sistemin global rijitliğine katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Ai vd. [22], bir kule krenin bina ile olan etkileşimini de ele alarak dinamik davranışı üzerine çalışmışlardır. Teorik olarak gerçekleştirilen çalışmada, deprem etkisi altında bina ile bağlantılı ve bağlantısız olmak üzere iki durum için yapıda meydana gelen yer değiştirme, ivme ve iç kuvvet değerlerini analiz edilip karşılaştırılmıştır.

An vd. [23], bir kule krenin ilk sekiz titreşim frekansını ve mod şekillerini bir sonlu elemanlar programı kullanarak araştırmışlardır. Deprem etkisini benzetim için gerçek deprem verileri kullanılarak sonlu elemanlar programı ile deprem spektrum analizi yapmışlardır. Çalışma sadece teorik olarak yürütülmüştür.

Andras P. [24], bir kule krenin sırasıyla stabilite analizi, destek kuvvetlerinin hesaplanması ve kule üzerindeki yük ve gerilmelerin tespiti için üç farklı dinamik model geliştirmiştir. Deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla kren, deneysel çalışmalarda oluşabilecek maksimum statik ve dinamik yüklemelere maruz bırakılmıştır. Böylece, kule krenin dinamik modelinin geliştirilmesinde kullanılması muhtemel parametrelerin ve etkili kren elemanlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın sonunda, geliştirilen dinamik modelin etkinliği simülasyondan elde edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir.

Feng Yu vd. [21], basitleştirilmiş 2-boyutlu kule krene parametrik olarak ifade edilen süper eleman modelinin uygulanması üzerine çalışmışlardır. Kule krenlerin statik ve dinamik davranışları üzerinde makaralar üzerinden geçen halatların mekanik etkisini incelemek amacıyla süper eleman modelini içeren bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Yük etkisi altında kren modelinin dinamik cevabı ve doğal titreşimi krenin destekli ve desteksiz durumları için nümerik olarak hesaplanmıştır. Çalışma neticesinde, makaraların kule krenin dinamik özellikleri üzerinde dikkate değer bir etkisi olduğundan dolayı önerilen süper eleman modelinin daha gerçekçi sonuçlar sağlayabileceği gösterilmiştir.

Jovanovic vd. [25] kafes örgülü yapıların statik ve dinamik özelliklerini incelemek üzere geliştirilen dinamik modellerin kalitesi üzerine çalışmışlardır. Özel bir kafes yapılı sistem örneği olarak kule kren seçilmiş ve bu yapı üzerinde hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kule krenin sonlu elemanlar modeli ile serbest titreşim analizi yapılarak yapının doğal frekans değerleri ve mod şekilleri teorik olarak bulunmuştur. Çalışmanın devamında gerçek bir kule kren üzerinde yapılan modal analiz ile yapıya bağlanan ivmeölçerler yardımıyla frekans cevapları elde edilerek deneysel olarak doğal frekans değerleri bulunmuştur. Sonlu elemanlar metodundaki yaklaşımların deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla mukayesesi yapılarak dinamik bir model geliştirmede dikkat edilmesi gereken durumları maddeler halinde sunmuşlardır.

Feng Yu vd. [26], kaldırılan yükün sarkaç hareketi yaptığı durumun ele alındığı bir kule krenin dinamik davranışı üzerine odaklanmışlardır. Sarkaç hareketinin özel iki durumu olarak küresel salınım ve düzlemsel salınım hareketleri ele alınmıştır. Kule kren sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve yapının dinamik davranışını temsil eden hareket denklemi Lagrange yöntemiyle elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, yapının ilk iki doğal frekanslarının ve küresel hareketli salınımın doğal frekansının kule krenin dinamik davranışı üzerinde hâkim olduğu gösterilmiştir. Düzlemsel hareket durumunda ise, yapının ilk üç doğal modunun ve salınım hareketinin ikinci harmoniğinin yapının dinamik cevabında etkili olduğu belirtilmiştir.

Mircea Alămoreanu ve Andrei Vasilescu [27] kren bomunun sismik etki yönünde herhangi bir ekseninde konumlandırılması durumunu hesaba katarak 3 serbestlik dereceli bir kule kren dinamik modeli geliştirmişlerdir. Krenin bir yapıya bağlantılı olması, çalışıyor veya çalışmıyor olması, bomun sismik dalga yönü boyunca ve dalga yönüne dik doğrultuda uzanması durumları varsayımlarıyla kule krenin dinamiğini yansıtan analitik denklemleri kurmuşlardır.

Mircea Alămoreanu ve Andrei Vasilescu [28] yapının desteksiz olması durumunu göz önüne alarak prototip bir kule krenin sinusoidal deprem hareketi etkisindeki dinamik davranışının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Mutlak ve bağıl yer değiştirme, hız ve ivme değerleri geliştirilen matematik model ile elde edilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Mircea Alămoreanu ve Andrei Vasilescu [29] daha önceki çalışmalara ek olarak n sayıda rijit desteğe sahip bir kule krenin dinamik modelini tekrardan düzenlemişlerdir. Böylece, 3 serbestlik dereceli kren modeli ve 1 serbestlik dereceli bina modeli sunulmuştur. Çalışma, yapının elastik giriş davranışına sahip olduğu, kule krenin binaya n adet destek ile bağlandığı, deprem hareketinin kule krene doğrudan zeminden ve dolaylı olarak da desteklerden ve binadan etki ettiği temel varsayımlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Rubio-Avila vd. [30] bir kule krende kullanılan ağırlıkların azaltılması ve kule krenin bir yapıya bağlantısının olmaması için konumu değişen karşı ağırlık tasarımı üzerine çalışmada bulunarak karşı ağırlığın konum kontrolünü yapmışlardır.

Karpe vd. [31] bir kule krenin çalışma dışında ve çalışırken jib üzerindeki elemanlarda meydana gelen kuvvetleri tespit etmek amacıyla bir sonlu elemanlar programı kullanarak teorik olarak statik ve dinamik analiz gerçekleştirmişlerdir.

Jerman vd. [32] bir kule krenin dönme hareketi esnasında yük salınımında kaynaklanan dinamik yüklerin kren üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla lineer olmayan bir matematiksel model kurarak bu model üzerinde yük salınımının etkisini araştırmışlardır.

Xue-yu Lu [33] sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen bir kule krenin yorulma davranışını mevcut ağırlıktan kaynaklanan statik zorlama ve kaldırılan yükten veya farklı çalışma koşullarından kaynaklanan dinamik zorlama durumlarını göz önünde bulundurarak incelemiştir. Çalışma ticari bir sonlu elemanlar programı olan ANSYS ile yapılmış ve izlenen adımlar akış diyagramları şeklinde sunulmuş sonuçlar paylaşılmıştır.

Ning Sun vd. [34] kule krenlerin çalışma şartlarında çeşitli belirsizlikler neticesinde meydana gelen salınım için bir kontrol sistemi tasarlamış ve bu sistemi deneysel olarak kule kren benzeri bir modelde uygulayarak sistemin etkinliğini göstermişlerdir. Bu sayede kule kren dinamiği üzerine çalışarak muhtemel dış etkilerden veya içyapıdaki belirsizliklerden kaynaklanabilecek ve yapının dengesinin bozulmasına sebep olabilecek etmenlerin ortadan kalkmasını sağlamışlardır.

Yine kule krenlerin dinamik davranışlarının incelenmesi konusunda gerek sonlu elemanlar programları kullanarak gerek farklı nümerik yöntemler kullanarak çeşitli araştırmacılar tarafından modellenen prototip kule krenler ile statik, modal veya transient analizler gibi çeşitli analizler yapılarak bu yapıların statik ve dinamik karakteristikleri araştırılmış ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır[35]–[45].

Kazuya Itoh vd. [46] kule krenlerin deprem kaynaklı hasara uğramalarını kule-zemin ilişkisi açısından ele alarak incelemiştir. Bu kapsamda ölçekli bir kule krenin yumuşak bir zemin modeline silindirik borularla bağlantısının yapılması sağlanarak sarsma masası testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarını ise yer değiştirme ve kuvvet çıktıları ile değerlendirerek sunmuşlardır.

Voisin vd. [47] ise kule krenlerin dinamik karakteristiklerini rüzgâr etkisi altında incelemiştir. Bu amaçla bir kule kren 1/80 ölçekli olarak tasarlanmış ve rüzgâr tüneline teste tabi tutulmuştur. Ölçekleme yapılırken ele edilen benzerlik oranları ile gerçek modelde meydana gelebilecek etkiler ölçekli model aracılığı ile araştırılmıştır.

Ushio vd. [48] yapım aşamasındaki yüksek katlı binalara bağlanan tırmanma tipi kule krenlerin deprem tepkilerini çeşitli durumlar göz önünde bulundurularak araştırmışlardır. Taipei 101 gökdeleni inşa edilirken gerçekleşen deprem sonrası hasara uğrayan kule krenler çalışmada referans alınmıştır. Yapıya farklı yüksekliklerden bağlanmış olan kule krenler için sismik simülasyonlar yapılarak kule krenlerin hasara uğramaması için gerekli önerilerde bulunmuşlardır. Bu önerilere göre iki şekilde önlem alınabilmektedir. Birincisi, binanın doğal frekansını ayarlamak için binanın rijitliğini değiştirmek. İkincisi ise kule krenin doğal frekansını ayarlamak için kule kren mastının rijitliğini değiştirmek.

Yao vd. [49] farklı açılarda çalışabilen jibe sahip bir kule krenin dinamik karakteristiğini ve sismik cevabını araştırmak için deprem girdisi kullanmışlardır. Gerçek boyutlu olarak modellenen kule kren ile yapılan teorik modal analiz sonuçlarıyla deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modelinin etkinliği gösterilmiştir. Daha sonra bu sonlu elemanlar modeli ile farklı jib açıları için yapıya deprem girdisi uygulayarak çeşitli noktalardaki yer değiştirme verilerini elde etmişlerdir. Jib açısının yüksek olduğu durumda daha az yer değiştirmenin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Kule krenlerle ilgili yukarıdaki çalışmalara bakıldığında önemli sayıdaki çalışmanın yalnızca teorik olarak yürütüldüğü ve bu çalışmaların da ticari programlar kullanılarak yapıldığı görülmektedir. Kule krenlerin boyut, ağırlık ve kullanım yeri açısından deneysel çalışmalar için uygun olmamasının araştırmacıların teorik çalışmalara yönelmesinde büyük ölçüde etkisi olduğu açıktır. Az sayıda gerçekleştirilen deneysel çalışma ise gerçek boyutlu kule kren ile yapıldığından deneylerin çok sayıda tekrarlanması hususunda bir dezavantaj oluşturmaktadır. Genel itibarıyla kule krenlerin dinamik davranışlarının tespiti amacıyla yapılan çalışmalara bakıldığında çok farklı konulara değinilmesine rağmen kule krenin bir dış etki sonucu yapacağı salınım hareketinde hareketi yöneten kısım olan mast ile ilgili detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada da bu sebeple bir kule krenin deneysel çalışmalarda kullanılacak ölçekli modelinin kurulması ve özellikle kafes yapıdan oluşan mast kısmının dinamik

davranışının detaylı olarak incelenmesi adına sonlu elemanlar modelinin kurulması üzerine odaklanılmıştır.

### 1.1.2 Benzerlik Teoremi ve Model ile Çalışma

Bu kısımda benzerlik teoremini kullanarak ölçekli modeller ile yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Moncarz ve Krawinkler [50], deprem mühendisliğindeki araştırma ve uygulamalarda kullanılacak ölçekli modellerin sınırları ve uygulanabilirliği üzerine yaptıkları geniş çaplı çalışmanın sonuçlarını bir rapor olarak sunmuşlardır. Kullanılacak modelin malzemesinin mekanik özellikleri, uygun model yapım teknikleri ve model çalışmalarından prototip cevabının tahminindeki etkinliğin belirlenmesi çalışmanın ana unsurlarıdır.

Jha vd. [51], ölçekli modeller ile dinamik testlerin yürütülmesi üzerine çalışarak örnek olarak ele aldıkları yapılar için ölçek değerleri belirlemişlerdir. Bu kapsamda hem tam benzerliğin sağlanabildiği hem de kısmi benzerliklerin sağlanarak elde edilen modellerin ele alındığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve deneysel modal analiz ile modeller üzerinde test yapılarak hem sonlu elemanlar modelinin etkinliği araştırılmış hem de gerçek ve ölçekli modeller arasında kurulan benzerlik oranlarının tutarlılığı incelenmiştir.

Coutinho [52], doktora tezinde benzerlik teorisi merkezinde yapısal ölçekli modeller üzerine geniş kapsamlı bir çalışmada bulunmuştur. Öncelikle yöntemin amacı, avantajları ve dezavantajlarından bahsederek konu hakkında detaylı bir literatür arşivi sunmuştur. Sonrasında yapısal benzerlik için yeni yöntemlere değinerek bir plaka örneği ile gerçek model ile ölçekli model arasındaki benzerlik ilişkisini farklı ölçek değerleri için teorik ve deneysel çalışmalarla incelemiş ve modellerin etkinliğini araştırmıştır.

Raja vd. [53], yapısal benzerlik kapsamında elastik modeller için geliştirdikleri yapısal benzerliğin bazı temel örnekler üzerinden analitik ve sayısal çözümler ile doğrulanması üzerine çalışmışlardır.

Shehadeh vd. [54], yapısal olarak büyük bir yapı olan bir petrol sondaj kulesi için Buckingham pi teorisini kullanarak yapının ölçekli modelini oluşturmuşlardır. Bu ölçekli model ile yapının gerilme dağılımı ve elastik şekil değiştirme gibi değerlerini hesaplayarak gerçek model ile yapılamayacak çalışmaları teorik olarak gerçekleştirmişlerdir.

Balawi vd. [55], örnek olarak seçtikleri kiriş ve plakaların statik ve dinamik davranışlarını benzerlik ve ölçekleme kuralları çerçevesinde incelemişlerdir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bu temel elemanların teorik olarak statik ve dinamik analizlerini yapmış ve deneysel olarak da statik ve dinamik yüklemeler yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır.

Oshiro ve Alves [56], dinamik yüklere maruz kalan yapıların, malzeme gerilme oranına duyarlı olduğu zaman olağan benzerlik yasalarına uymadığı durum için bir çözüm sunarak ölçek faktöründen bağımsız olarak prototip ve model arasında etkili bir benzerlik kurulabileceğini göstermişlerdir.

Li [57], bir plaka çiftinin yüksek frekans titreşim cevabının elde edilmesi için ölçekleme yaklaşımı üzerine çalışmıştır. Bu kapsamda özel ölçeklendirme şekillerinin birbirinden tamamen farklı iki gerçeklemesini kullanarak sonuçları karşılaştırmıştır.

Torkamani vd. [58], dikey olarak sertleştirilmiş silindirik kabukların serbest titreşimleri için gerekli olan benzerlik koşulları veya ölçekleme yasalarını benzerlik teorisi kullanılarak elde etmişlerdir. Teorik ve deneysel serbest titreşim analizleri ile hem teorik modelin hem de ölçekli modelin etkinliğini incelemişlerdir.

Zhang vd. [59], büyük bir titreşim eleğinin fiziksel özelliklerini ölçekli model aracılığı ile tahmin etmek için, prototip ile ölçekli model ekranı arasındaki frekans cevabı fonksiyonları, mod şekilleri ve dinamik gerilmelerin benzerlik oranlarını benzerlik teorisini kullanarak oluşturmuşlardır. Deneysel modal analiz ile yapılan testlerden elde edilen frekans cevabı ile doğal frekans ve mod şekilleri edilmiş ve prototip ile model sonuçları arasındaki doğal frekansların farklarının %9'dan daha az olduğunu belirterek mod şekillerinin ise tutarlı olduğunu göstermişlerdir.



Rezaeepazhand ve Simites [60], katmanlı plakaların serbest titreşim analizlerinin ölçekli modeller üzerinden yapılabilmesi için sistemi yöneten denklemleri kullanma temeline dayanan yaklaşım ile ölçek kurallarını belirleyerek teorik bir çalışma yürütmüşlerdir.

Wang vd. [61], yapısal dinamik özellikler ve cevaplar üzerindeki ölçek etkilerini kemerli bir baraj örneği ile incelemişlerdir. Bu kapsamda prototip olarak belirlenen barajın 1/1500 ve 1/3000 ölçekli iki modelini kullanarak bu modellerin yapısal özelliklerini teorik ve deneysel serbest titreşim analizi yardımıyla belirlemişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki yüksek tutarlılık, nümerik simülasyon çalışmalarının ölçekli yapılarının dinamik özelliklerini ve tepkilerini değerlendirmek için etkili bir yöntem olduğunu sonucuna varmışlardır.

Jin ve Li [62], bir konteyner kreninin 1/50 ölçekli modelini tasarlayarak dinamik performansı ve sismik davranışını incelemişlerdir. Gerçek boyutlu kren ile çalışmak mümkün olmadığından ölçekli modeli kullanarak yaptıkları deneysel modal analiz ve sarsma masası testleri ile gerçek modelin sismik performansı hakkında tahminde bulunmuşlardır.

Lu vd. [63], yapı-zemin bağlantılı bir sistemin dinamik davranışını incelemek için yapacakları deneysel çalışmada laboratuvar şartlarında ve deneysel ekipmanların ölçüm sınırları ve kapasiteleri dâhilinde benzerlik teorisi ile elde ettikleri ölçek katsayılarını kullanarak ölçekli bir model tasarlamışlar ve deneysel modal analiz ve sarsma masası testleri yapmışlardır.

Lu vd. [64], mevcut test ekipmanları ile benzerlik konseptini uygulamak ve göstermek için öncelikle farklı ölçeklerde iki betonarme yapı modeli kullanılmışlardır. Daha sonra buradaki benzerliği 33 katlı betonarme bir yapının ölçeklenmesinde kullanarak sarsma masası testleri ile ölçekli model üzerinden alınan sonuçların gerçek modeldeki karşılıklarını belirlemişlerdir.

Baran [65], yapıların dinamik davranışlarının deneysel ve teorik olarak belirlenmesi kapsamında yaptığı doktora çalışmasında sarsma masası tasarımı yapmış ve benzerlik teorisini kullanarak elde ettiği ölçekli bina modellerini bu sarsma masasında kullanmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Kule krenlerin işletme durumunda taşıdıkları yüklerden kaynaklı veya rüzgâr, deprem gibi çevresel kaynaklardan meydana gelen dinamik zorlamalara maruz kalması ve diğer kren tiplerine göre narin yapıda olmaları dinamik yükler karşısında sergiledikleri davranışların araştırılması konusunda motivasyon sağlamaktadır. Özellikle diğer kren tiplerinden farklı olarak kule krenler şehir merkezlerinde, insanların yaşam alanlarında kullanılmaktadır. Dengesiz yük dağılımı, rüzgâr etkisi, deprem etkisi gibi nedenlerle kule krenlerin hasara uğradığı ve bunun sonucunda ciddi anlamda can ve mal kayıplarının yaşandığı örnekler sebebiyle kule krenler üzerine odaklanmak ve dinamik davranışlarını incelemek araştırmacıların çalışmalarına konu olmuştur. Bu çalışmada da kule krenlerin deprem etkisi altında göstereceği dinamik davranışın incelenmesi amaçlanmaktadır. Kule krenlerin dinamik davranışının incelenmesi olası bir deprem etkisi altında meydana gelebilecek can ve mal kayıplarını en aza indirmek adına önem arz etmektedir.

Bu kapsamda tez çalışmasının teorik ve deneysel olarak iki aşamada yürütülmesi amaçlanmıştır. Teorik çalışmalar kapsamında kule kren ve kule kren gibi kafes tipli yapıların dinamik analizlerinin yapılması için MATLAB yazılımı ile bir sonlu elemanlar programı yazılması, deneysel çalışmalarda kullanılacak ölçekli fiziksel bir modelin benzerlik teorisi uygulanarak tasarlanması ve imalat detaylarının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu sayede ölçekli fiziksel modele ait parametreler yardımıyla ve belirlenen senaryolar altında geliştirilen sonlu elemanlar modelinden frekans ve zaman alanında yürütülecek benzetim çalışmaları ile teorik sonuçların alınması da hedeflenmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında ise benzerlik teorisi ile tasarlanıp imal edilecek ölçekli kule kren modeli üzerinde modal analiz testleri yapılarak deneysel sonuçların alınması amaçlanmaktadır. Bu sayede, deneysel ve teorik çalışmalar karşılaştırılarak ortaya konan sonlu elemanlar modelinin etkinliğinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak, her iki aşamada yürütülen çalışmalar ile deneysel çalışmalarla doğrulanmış, kule krenlerin deprem hareketi karşısında sergiledikleri dinamik davranış hakkında bilgi veren bir sonlu elemanlar programının yazılması ve bu sayede kule kren veya benzer yapıların deney yapmaya gerek duymaksızın deprem karşısındaki dinamik davranışlarının araştırılması hedeflenmektedir. Deneysel çalışmalarda gerçek boyutlu bir kule krenin ele alınması, laboratuvar ortamında test yapılmasına, gerçekçi ortam koşullarının sağlanabilmesine ve tekrar edilebilirliğe imkân vermemesi ve de maliyetli olması sebebiyle uygun değildir. Bu sebeple ölçekli bir model ile çalışılması uygun görüldüğünden benzerlik teorisinin ilgili probleme uygulanması ve yöntemin etkinliğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kurgulanan program ile yapının daha küçük elemanlara ayrılabilmesi, modal analizinin yapılarak yapıya ait dinamik karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve zaman alanında yapılacak analiz ile deprem girdisi karşısında yapının yer değiştirme, hız ve ivme davranışının belirlenerek yapıya ait elemanlarda meydana gelen gerilmelerin hesaplanması amaçlanmıştır.

### **1.3 Hipotez**

Depremler can ve mal kaybına sebep olan yıkıcı dinamik etkilerdir. Depreme dayanıklı yapıların tasarımı ile olası can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi, deprem sonrasında yapı veya yapıya ait işlevsel sistemlerin sorunsuz bir şekilde çalışmaya devam etmelerinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu noktada ele alınan yapıların deprem gibi bir dinamik etki karşısında nasıl davranacağını önceden bilinmesi yapısal iyileştirmelerin belirlenmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bir yapının gerçek bir deprem davranış cevabı ise ancak deneysel bir çalışma ile belirlenebilmektedir. Depreme konu olan yapıların boyutları düşünüldüğünde ise deneysel bir çalışmanın hem maliyetli hem zaman alıcı olacağı aşikârdır. Aynı zamanda deneylerde önemli bir kıstas olan tekrar edilebilirlik açısından da uygun bir yaklaşım olmamaktadır.

Büyük boyutlu yapıların deprem gibi dinamik bir etki karşısında nasıl bir davranış sergileyeceklerini deneysel olarak araştırmak benzerlik teoreminin kullanılmasıyla mümkün olabilecektir. Benzerlik teoremiyle laboratuvar ortamında kullanılabilir boyutlara indirgenen yapı üzerinde yapılacak deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar yine benzerlik teoremi yardımıyla gerçek boyutlu yapının cevaplarını alınmasına yardımcı olacaktır. Bu sayede gerçek boyutlu bir yapı ile deney yapmaksızın ölçekli model üzerinden yapılan deneyler ile hem zamandan hem maliyetten kazanç sağlanmış olacaktır.

Deneysel çalışmalarla eşgüdümlü şekilde yürütülen teorik çalışmalar yardımıyla da deneysel çalışmalarla doğrulanmış bir teorik model elde edilmesi amaçlanmaktadır. Mühendislik, bir anlamda doğayı anlamaya ve onu günlük yaşama uyarlamaya dayanan bir bilim dalıdır. Bu nedenle hesaplamalar, yaklaşımlar, kabul veya ihmal edilen durumlar doğadaki karşılığını bulmalıdır. Bu sebeple modelleme aşamasındaki yaklaşım ve kabullerde yapılabilecek hatalar gerçek olmayan sonuçların elde edilmesine sebep olabilir. Bunu önlemenin yolu da deneysel çalışmalarla desteklenmiş bir teorik model oluşturmaktır. Bu çalışma kapsamında kafes yapıdan oluşan kule kren mastının dinamik davranışını temsil eden bir sonlu elemanlar modelinin kurulması ve deneysel çalışmalara dayanarak doğrulanması hedeflenmiştir. Bu sayede benzer yapıların dinamik davranışlarının araştırması amacıyla deneye de gerek duymaksızın oluşturulan sonlu elemanlar modeli yardımıyla yalnızca teorik olarak çalışmalar yapmak mümkün olacaktır.

Aynı zamanda, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile yapılacak teorik çalışmalarla farklı tasarıma sahip kafes yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranış analizlerinin yapılarak uygun bir tasarımın elde edilmesi mümkün olacaktır.

Bu bölümde kule krenlerin dinamik davranışlarının araştırılması amacıyla yapıyı temsil eden bir sonlu elemanlar modelinin kurulması aşamalarından bahsedilmiştir. Öncelikle Bölüm 2.1’de kule krenler hakkında genel bilgiler sunularak Bölüm 2.2’de çalışmada örnek olarak alınan kule krene ait teknik bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2.3’de dinamik analizlerin ilk basamağı olan ve yapıların doğal frekansları, mod şekilleri gibi dinamik karakterleri hakkında bilgi veren modal analiz konusunda bilgi verilmiştir.

Bölüm 2.4’de yapıların hareket denklemlerinde önemli bir değişken olan sönüm mekanizması üzerine bilgi verilerek, dinamik davranışa olan etkisinden bahsedilmiştir. Yapılar için ön görülen sönüm mekanizmaları hakkında bilgi verilerek ve çalışmaya konu olan yapı için sönüm etkisinin hareket denkleminde nasıl ekleneceği gösterilmiştir.

Bölüm 2.5’de hareket denkleminin kurulmasından sonra dinamik bir girdi karşısında bu denklemin çözüm yöntemleri üzerine bilgi verilerek ilgili yapı için uygun olan çözüm yöntemine ait detaylar sunulmuştur.

Bölüm 2.6’da teorik çalışmalar kapsamında yöntem olarak seçilen sonlu elemanlar yöntemine ait temel bilgiler sunularak, özellikle kafes yapılı bir sistemin çerçeve elemanlar yardımıyla sonlu elemanlar modelinin parametrik olarak nasıl oluşturulduğundan bahsedilmiştir. Model oluşturulmasında izlenen yol, akış diyagramları halinde sunularak detaylandırılmıştır.

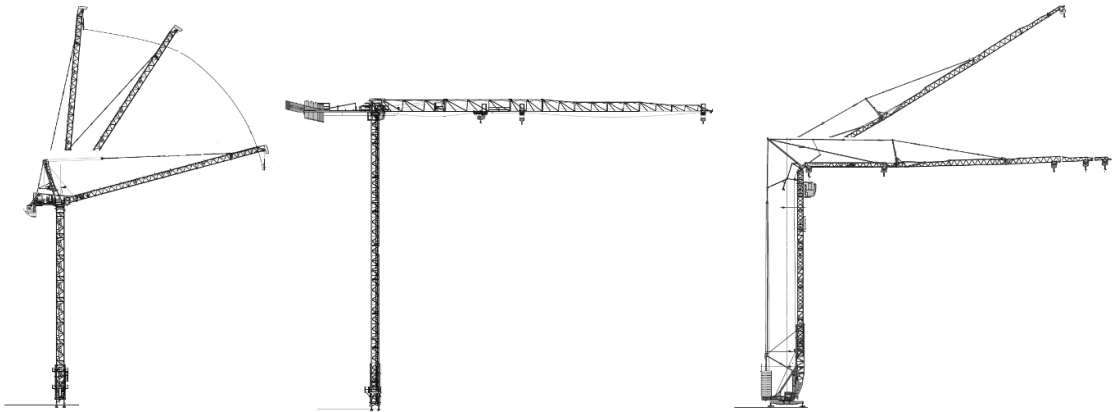
Bölüm 2.7’de bir önceki bölümde oluşturulan algoritma MATLAB programı yardımıyla koda dönüştürülmüş ve bu kodun hangi girdiler ile çalıştırıldığı ve hangi çıktıları sunduğu açıklanmıştır.

Bölüm 2.8’de çalışmanın temel unsurlarından olan benzerlik teoremi hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Teoremin uygulanmasına ait yöntemlerden

bahsedilerek çalışmaya konu olan probleme ait çözümler sunulmuş ve deneysel çalışma için uygun bir ölçek değeri belirlenmiştir.

## 2.1 Genel Bilgiler

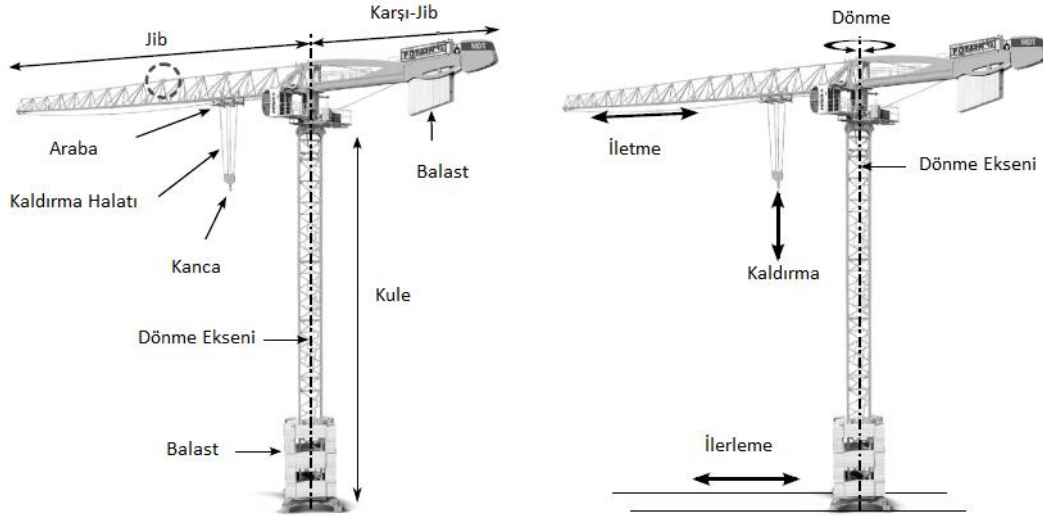
Kule krenler, kullanıldığı çalışma sahasında belirli bir yükü bir yerden alıp istenilen yere yatay ve düşey ekseninde taşımaya yarayan iş makineleridir. Kule kren yapıları esas olarak kaynak ile bağlanan çelik levha ve kirişlerden oluşmaktadır. Şantiyelerde kullanılan kule krenler, insanların kaldıramayacağı ağırlıktaki yüklerin bir yerden bir yere taşınması veya diğer iş makinelerin kaldırdıkları fakat erişemedikleri yükseklikteki yerlere yük iletimi için kullanıldıklarından inşaat sahalarında sıklıkla tercih edilen bir kren tipidir. Kule krenler hem kullanım esnasında hem kullanım dışında gerek statik gerek dinamik yüke maruz kalan yapılardır. Kule krenlerin kullanım amacına, yerine, kaldırılacak yüke göre çeşitli tipleri mevcuttur. Şekilde görülen kule kren tipleri sırasıyla “luffing jib”, “saddle jib” ve “self erecting” kule kren olarak adlandırılmaktadır.



**Şekil 2.1** Temel Kule Kren Tipleri a) Luffing Jib b) Saddle Jib c) Self Erecting

Çalışma bölgesinde sınırlı bir alan mevcut olduğunda yük kaldırma kolunun eğilebilme özelliği olduğundan “luffing jib” kule krenler tercih sebebi olmaktadır. “Saddle jib” kule krenler, orta ve büyük ölçekli şantiyelerde yaygın olarak kullanılan tiptir. Bu krenlerin en önemli özelliği yatay ve düşey doğrultuda farklı şekillerde kullanılabilmesidir. Bu özellik, bu tip kule krenlerin inşa edilecek yapının boyutlarına bağlı olarak ayarlanabilir hale gelmesine olanak sağlamaktadır. “Self erecting” kule krenler ise kendiliğinden kurulabilen

tiptedirler. Küçük ve orta ölçekli şantiyelerde tercih edilmektedirler. Bahsedilen kule kren tipleri kendi içerisinde de farklı yükseklik, yük taşıma kabiliyeti, jib uzunluğu gibi değişkenlere göre farklılık arz etmektedir.



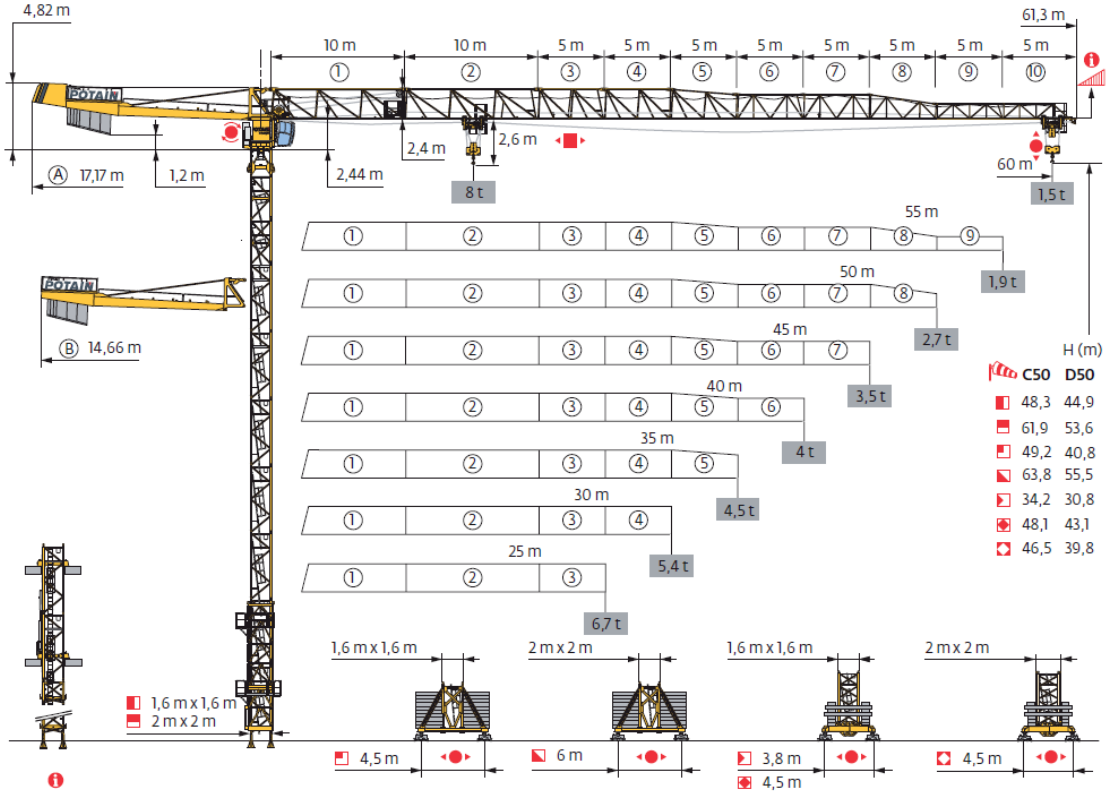
**Şekil 2.2** Kule kren temel bileşenleri ve hareketleri [66]

Şekilde bir kule kreni oluşturan temel bileşenler görülmektedir; jib, karşı-jib, kule, araba, kaldırma halatı, kanca ve balast. Kule krende toplamda 4 farklı hareket mevcuttur. Jib ve karşı-jib bir bütün olarak kule dönme eksenini etrafında dönebilmektedir. Kanca ve kaldırma halatı ile yük düşey doğrultuda yükseltilip indirilebilmektedir. Kanca bloğu ve halatın bağlı bulunduğu araba ise yükün yatay doğrultuda hareket ettirilmesinin sağlamaktadır. Son olarak kule krenin zemine bağlantı durumuna göre kule kren tekerlekler yardımıyla bir bütün halinde belirli doğrultularda hareket edebilmektedir.

## 2.2 Prototip Kule Kren

Tez çalışması kapsamında örnek olarak seçilen kule kren Potain firmasına ait MDT-178 isimli kule krendir. MDT-178 "saddle jib" kule kren kategorisinde orta ve büyük ölçekli şantiyelerde sıklıkla tercih edilen bir modeldir. 66 metrelik kanca yüksekliği ve düşük profilli "üstsüz" tasarımıyla yükseklik kısıtlamalarının ya da aşırı salınımlı işlemlerin gerçekleştiği şantiyeler için ideal bir kule kren çeşididir. Kaldırma kapasitesi 8 ton olan MDT 178, 60 metre bom uzunluğuna sahiptir. Bom

ucunda kaldırma kapasitesi ise 1.5 tondur. Şekil 2.3'de prototip krenin teknik bilgileri sunulmuştur. Kule kreni oluşturan modüllere ait ölçü bilgileri, bom uzunluğuna bağlı olarak kaldırılabilir yük miktarları, bom uzunluğuna göre tercih edilecek karşı-jib tipi ve şantiye alanındaki zemin durumuna göre tercih edilebilecek zemin bağlantı şekilleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Potain MDT 178 kule kren teknik bilgileri [67]



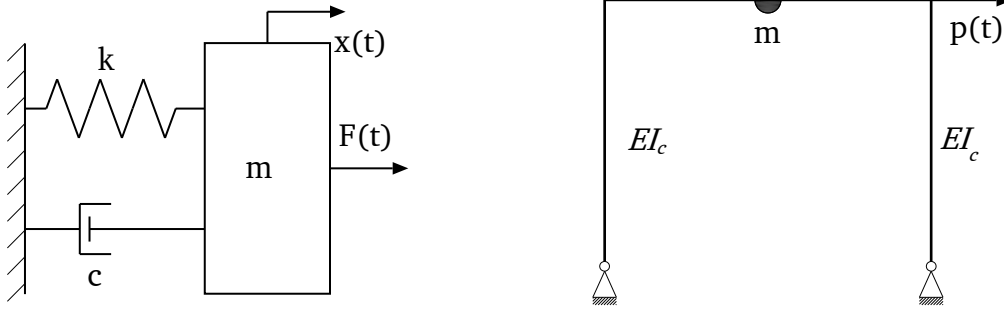
### 2.3 Modal Analiz

Tüm yapı ve sistemlerde, tepki vermelerine sebep olacak uyarıcı etkilere sahip işletme koşulları bulunmaktadır. Bu etkiler statik veya dinamik olabilir, fakat bu etkilere karşılık yapının tepkisi kabul edilebilir seviyede olmayabilir. Böyle bir durumda yapıda meydana gelen istenmeyen tepkilerin en aza indirilerek kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu durumda yapısal dinamik konusu, uygulanan yüklere karşılık bir sistemin cevabının araştırılması olarak ifade edilmektedir. Uygulanan bu yükler, yapının dinamik karakteristiklerine göre farklı frekanslarda tepkiye sebep olabilir. Burada dinamik karakteristik olarak bahsedilen kavramlar ise frekans, sönüm ve mod şekilleridir. Yapıya ait modların her biri, yapının tepki cevabına farklı oranlarda katkıda bulunabilirler.

Modal analiz, bir sisteme uygulanan yüklerden bağımsız olarak tanımlanan, sistemin dinamik karakterinin ve sistemin tepkisinin incelenmesidir. Sisteme ait modların her biri, bir frekansa, belirli bir sönümlenmeye ve en önemlisi karakteristik bir şekil değişimine sahiptir. Bu şekil değişiminin fiziksel bir karşılığı yoktur, fakat ilgili modda tetiklenen bir sistemin nasıl şekil değişimine uğrayacağı hakkında bilgi vermektedir. Modal analiz, bir yapının veya sistemin sadece karakteristik özelliklerinin elde edilmesini sağlar. Bu özellikler tek başlarına iyi veya kötü olarak nitelendirilemezler. Böyle bir sonuca varılması için ilgili yapı ve ilgili çalışma koşulları için referans alınacak tasarım değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır[68].

Modal analizin matematiksel temelinde serbest titreşim probleminin çözümü yatmaktadır. Bu kısımda sistem tarifinden yola çıkarak tek serbestlik dereceli bir sistem için matematiksel yaklaşım ile modal analiz adımları açıklanacaktır. Sistemler sahip oldukları serbestlik dereceleri ile tarif edilmektedirler. Bir titreşimli sistemin geometrik konfigürasyonu, bir dizi bağımsız koordinat ile belirlenebilir. Çoğu sistem için bu bağımsız koordinat sayısı, sistemin serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Kısaca, serbestlik derecesi genel bir hareketi temsil etmek için gereken bağımsız, genelleştirilmiş koordinatların sayısına eşittir [69].

Serbest titreşim ile herhangi bir dinamik etki olmaksızın meydana gelen hareketten bahsedilmektedir. Serbest titreşim, yapının başlangıç yer değiştirmeleri ile denge konumundan bozulması ve/veya başlangıç hızlarının verilmesi ile başlatılabilmektedir.



**Şekil 2.4** Tek serbestlik dereceli yapılar

Bir yapının statik denge konumuna müdahale edildiğinde serbest titreşime maruz kaldığı ve daha sonra herhangi bir harici dinamik uyarma olmaksızın titreşime devam ettiği söylenebilir. Dış kuvvet etkisi altındaki tek katlı bir yapı veya bir kütle, yay ve sönüm elemanlarından oluşan tek serbestlik dereceli bir sistem olarak düşünüldüğünde (Şekil 2.4) dış kuvvetin olmadığı ve yapılarda herhangi bir sönüm mekanizmasının (harekete direnç gösterecek herhangi etmen) olmadığı varsayımı ile hareket denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

Serbest titreşim yapıların statik denge konumlarının bozulmasıyla başlatıldığından başlangıç koşulları aşağıdaki gibi olur.

$$x = x(0) \quad \dot{x} = \dot{x}(0) \quad (2.2)$$

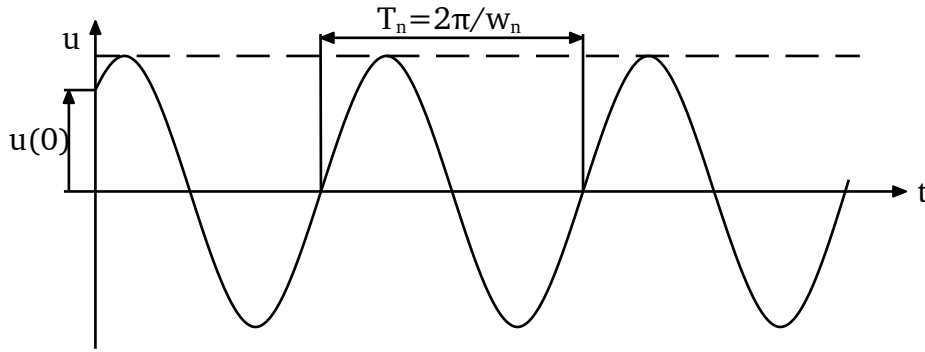
Homojen diferansiyel denklem olan bu hareket denklemi yukarıdaki başlangıç sınır koşulları ve  $x(t) = A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)$  kabulü ile çözülürse sistemin cevap fonksiyonu elde edilir.

$$x(t) = x(0)\cos w_n t + \frac{\dot{x}(0)}{w_n}\sin w_n t \quad (2.3)$$

Burada  $w_n$  sistemin açısal doğal frekansını ifade etmektedir.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

Sisteme ait cevap fonksiyonu grafiksel olarak Şekil 2.5’de ifade edilmektedir. Statik denge durumunun bozulmasıyla başlayan hareket belli bir periyotta kendini tekrar etmektedir ve sistemde sönüm olmadığı kabul edildiği için bu hareket teoride sonsuza kadar sürmektedir.



**Şekil 2.5** Sönümsüz sistemin serbest titreşim cevabı

Sistem pozitif ve negatif yer değiştirme yapmakta ve bu yer değiştirmeler maksimum değere ulaştığında hız sıfırlanmakta ve aksi yönde hareket başlamaktadır. Döngüsel olarak gerçekleşen bu harekette bir döngü için geçen zamana doğal titreşim periyodu denir ve  $T_n$  [s] ile ifade edilir. Dairesel doğal frekans ile aralarında aşağıdaki gibi ilişki vardır.

$$T_n = \frac{2\pi}{w_n} \quad (2.5)$$

Döngüsel doğal frekans olarak ifade edilen  $f_n$  [Hz] ise şu şekilde bulunur.

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} \quad (2.6)$$

Bu denklemlerden de görüldüğü üzere bir yapının doğal frekansı kütlesine ve rijitliğine bağlıdır. Her yapı kendine has kütle ve rijitlik özelliklerine sahip olduğundan doğal frekanslar, yapıların parmak izleri olarak adlandırılmaktadır. İleri-geri hareket ederek Şekil 2.5 'de görüldüğü gibi bir cevap eğrisine sahip sistemde hareketin genliği denklem (2.7) ile hesaplanabilir.

$$x_0 = \sqrt{[x(0)]^2 + \left[\frac{\dot{x}(0)}{w_n}\right]^2} \quad (2.7)$$

Bu denklemden görülmektedir ki hareketin genliği başlangıç hızına ve konumuna bağlıdır. Eğer sistemde harekete direnç gösteren bir mekanizma yani sönüm mekanizması bulunsaydı tekrarlı hareket sonsuza gitmez zamanla azalarak biterdi. Sönüm mekanizmasına sahip sistemin hareket denklemi ise aşağıdaki gibi yazılır.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.8)$$

Denklem kütleyle bölünürse,

$$\ddot{x} + (c/m)\dot{x} + (k/m)x = 0 \quad (2.9)$$

hâlini alır ve aşağıdaki gibi yeni formunda yazılabilir.

$$\ddot{x} + 2\xi w_n \dot{x} + w_n^2 x = 0 \quad (2.10)$$

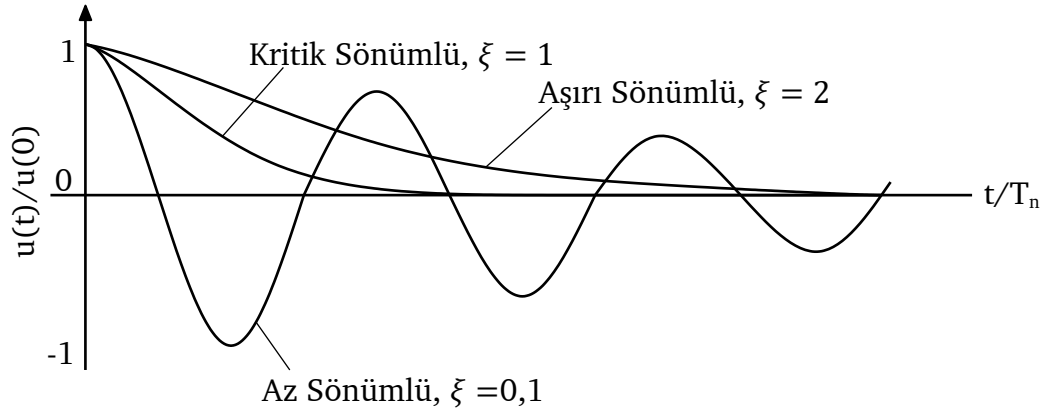
$$w_n = \sqrt{k/m} \quad (2.11)$$

$$(c/m) = 2\xi w_n \quad (2.12)$$

$$\xi = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.13)$$

Denklem (2.11) daha önce ifade edilmişti. Denklem (2.13)'de  $\xi$ , sönüm oranını,  $c_{cr}$  ise kritik sönüm katsayısını temsil etmektedir. Sönümlü sistemlerin cevap fonksiyonları sönüm oranına göre farklı şekillerde olabilir. Şekil 2.6'de farklı sönüm oranı değerleri için cevap eğrileri gösterilmiştir.

- Eğer bir sisteme ait sönüm katsayısı kritik sönüm katsayısından küçükse yani sönüm oranı 1'den küçük olursa sistem dögüsel bir hareket yaparak zamanla denge konumunda durur (Az sönümlü durum).
- Eğer bir sisteme ait sönüm katsayısı kritik sönüm katsayısına eşitse yani sönüm oranı 1'e eşit olursa sistem dögüsel bir hareket yapmadan denge konumuna gelir (Kritik sönümlü durum)
- Eğer bir sisteme ait sönüm katsayısı kritik sönüm katsayısından büyükse yani sönüm oranı 1'den büyük olursa sistem yine dögüsel bir hareket yapmadan denge konumuna gelir (Aşırı sönümlü durum).



**Şekil 2.6** Farklı sönüm değerleri için cevap eğrileri

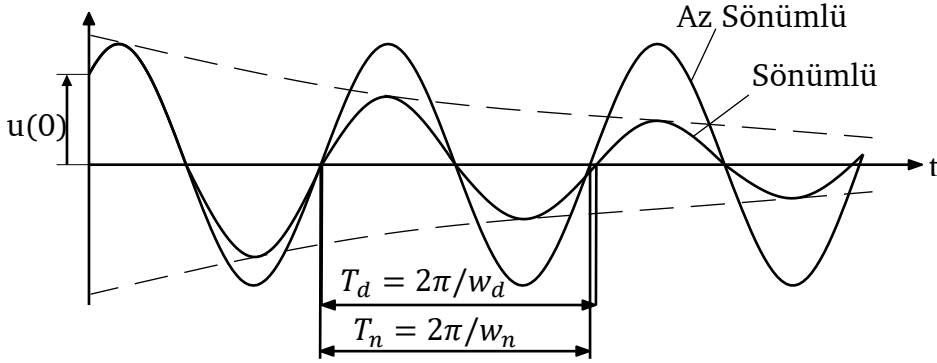
Mühendislik yapılarının geneli az sönümlü sistem davranışı sergilemektedir. Bu yapılar için yine aynı başlangıç koşulları denklem (2.8) ile sistemi yöneten hareket denklemini çözümlerse cevap fonksiyonu şu şekilde elde edilir.

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ x(0)\cos w_d t + \frac{\dot{x}(0) + \xi\omega_n x(0)}{w_d} \sin w_d t \right] \quad (2.14)$$

Burada  $w_d$  sönümlü sistemin dairesel doğal frekansını ifade etmektedir ve sönümlü doğal frekans ile sönümsüz doğal frekans arasındaki ilişki şu şekildedir.

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.15)$$

Sönümlü ve sönümsüz sistemin cevap fonksiyonları bir arada aşağıdaki şekilde olduğu gibi gösterilebilir. Aynı başlangıç koşullarına sahip olmalarına rağmen sönüm mekanizmasının olduğu sistemin hareketi zamanla azalır ve tamamen biter. Sönüm mekanizmasına sahip olmadığı varsayılan sistem ise her döngüde aynı genlik değeri ile sonsuza kadar yer değiştirmeye devam etmektedir.



**Şekil 2.7** Sönümün serbest titreşime etkisi

Sönümlü sistemin cevap eğrisine bakıldığında her döngüden sonra genliğin azaldığı ve bu azalmanın üssel bir eğri şeklinde olduğu görülmektedir. Sönümün etkisiyle meydana gelen bu grafik yardımıyla aynı zamanda sönüm oranı da hesaplanabilmektedir [70]. Bu konu yapılarında sönüm başlığında açıklanmıştır.

Yukarıdaki işlemler tek serbestlik dereceli bir sistem için geçerli olan ve tek bir diferansiyel denklemin çözülmesiyle elde edilen sonuçları içeren bir süreçtir. Eğer bir sistem  $n$  sayıda serbestlik derecesine sahipse, sistemin hareket denklemi de  $n$  sayıda hareket denklemi içermektedir. Sistem doğrusal ise denklemler matris

formunda gösterilebilirler. Farklı yöntemlerle hareket denklemlerinin elde edilmesi mümkün olmasına rağmen sonuç olarak ulaşılan hareket denklemleri aynıdır ve serbest titreşim analizi için bu denklemlerin matris formu kullanılmaktadır [71].

### 2.3.1 Modal Genleşme Teorisi

Modal analizin en temel ön kabulü modal genleşme teoremidir. Bu teoreme göre bir sistemin hareket cevabı her bir modun katkıda bulunduğu hareket cevaplarının süperpozisyonudur. Her moda ait bir mod şekli mevcuttur. Mod şekli vektörüne  $\{\phi\}$  dersek ve mod şekli genliği  $q$  ile ifade edilirse,  $n$  adet mod içeren bir sistemin cevabı denklem (2.16)'daki gibi hesaplanır.

$$\{x(t)\} = \{\phi^{(1)}\}q_1(t) + \{\phi^{(2)}\}q_2(t) + \dots + \{\phi^{(n)}\}q_n(t) \quad (2.16)$$

Buna göre sistemin cevabı her bir moda ait cevap fonksiyonlarının toplamıdır. Sistemin hareket denklemleri kurulurken referans olarak alınan koordinatlar sistemin genelleştirilmiş koordinatları olarak adlandırılırken, her bir moda ait koordinatlar ise modal koordinatlar olarak adlandırılmaktadır.

$$\{x\} = [\phi]\{q(t)\} \quad (2.17)$$

$x$ : genelleştirilmiş koordinatlar

$q$ : modal koordinatlar

$$\{x\} = [\phi]\{q(t)\} \quad (2.18)$$

$$\{\dot{x}\} = [\phi]\{\dot{q}(t)\} \quad (2.19)$$

$$\{\ddot{x}\} = [\phi]\{\ddot{q}(t)\} \quad (2.20)$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (2.21)$$

Çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi (2.21)'de denklem (2.18), (2.19) ve (2.20) yerine yazılırsa ve her taraf  $\phi^T$  ile çarpılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} [\phi]^T[M][\phi]\{\ddot{q}(t)\} + [\phi]^T[C][\phi]\{\dot{q}(t)\} + [\phi]^T[K][\phi]\{q(t)\} \\ = [\phi]^T\{F(t)\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Buradaki matris çarpımlarında  $i \neq j$  için modların ortogonal (dik açılı) özelliği sebebiyle denklem (2.23) ve (2.24) yazılabilir.

$$\phi^{(i)T}[M]\phi^{(j)} = 0 \quad (2.23)$$

$$\phi^{(i)T}[K]\phi^{(j)} = 0 \quad (2.24)$$

Bununun sonucu olarak  $[u]^T[M][u]$ ,  $[u]^T[K][u]$  matris çarpımlarının diagonal olmayan elemanları 0 değerini alır. Modların ortogonal olması sebebiyle denklem aşağıdaki halini alır. Modların ortogonal olması daha sonra açıklanacaktır.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & M_{nn} \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & C_{nn} \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \{q\} = Q(t) \quad (2.25)$$

Bu sayede  $n$  serbestlik derecesine sahip bir sistemin hareket denklemi bütün halden ayrık hale getirilmiş olur ve  $n$  adet tek serbestlik dereceli hareket denklemlerine indirgenmiş olur. Bu hareket denklemlerinin her biri sisteme ait modları temsil eden denklemlerdir. Birbirinden bağımsız hale gelen bu denklemlere tek serbestlik dereceli sistemlerin çözümü uygulanarak her mod için bir cevap fonksiyonu elde edilir ve daha önce bahsedildiği üzere modların süperpozisyonu ile tüm sisteme ait cevap fonksiyonu elde edilir.

Çok serbestlik dereceli sistemin doğal frekans ve mod şekilleri yapıda sönüm olmadığı düşünülerek sadece kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak lineer cebir yardımıyla hesaplanmaktadır.



$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2.26)$$

$\{\ddot{x}\} = \{\phi\}^{i\omega t}$  kabulü yapılırsa,  $[-\omega^2[M] + [K]]\{\phi\}^{i\omega t} = 0$  olur.

Bu eşitliği sağlanması için  $\det[-\omega^2[M] + [K]] = 0$  olmalıdır.

Bu determinantın çözümü ile sisteme ait doğal frekans değerleri ( $\omega$ ) yani öz değerleri ve mod şekli vektörleri ( $\phi$ ) yani öz vektörleri elde edilmiş olur.

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$[\omega] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

### 2.3.2 Öz Vektörlerin Normalleştirilmesi

Bulunan mod şekli vektörleri mutlak büyüklükler değildirler. Serbestlik derecelerinin birbirlerine göre yer değiştirme oranları olarak elde edilirler. Bundan dolayı bu değerlerin normalleştirilmesi gerekmektedir. Normalleştirme için birden fazla yöntem mevcuttur.

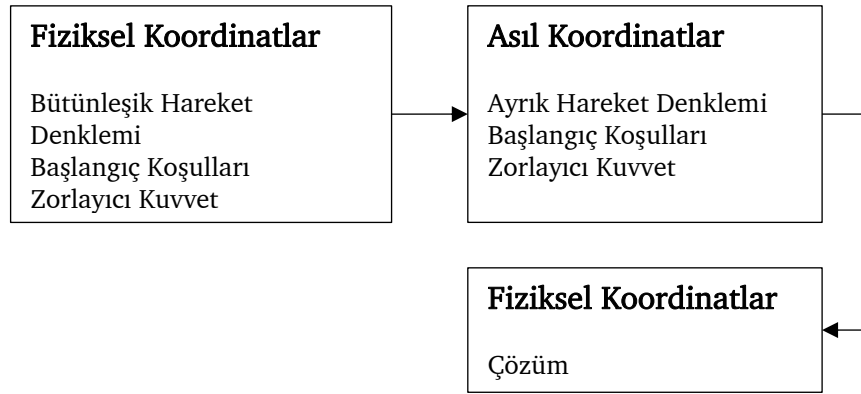
- Mod şekilleri, modal kütle  $M_i=1$  olacak şekilde normalleştirilebilir.
- Mod şeklinin en büyük elemanı 1 olarak belirlenir ve diğer değerler bu değere göre oranlanır.
- Mod şeklinin belirli bir elemanı 1 olarak belirlenir ve diğer değerler bu değere göre oranlanır.

Yaygın olarak kullanılan yöntem modal kütlelerin 1 olacak şekilde ayarlanması olduğundan bu çalışmada da bu yöntemde bahsedilecektir[72].

### 2.3.3 Kütleye Göre Normalleştirme

Bir sistemin geçici durum veya frekans cevabının bulunması gerektiğinde bütünlük yapıya sahip hareket denkleminin çözülmesi zor olacağından

ayrıklaştırma yapılmaktadır. Geçici durum veya frekans cevaplarının çözülmesini kolaylaştırmak için, n adet bağımlı ikinci dereceden diferansiyel denklemlerin, fiziksel koordinat sisteminden asıl koordinat sistemine dönüştürülerek ayrıştırılmış ikinci dereceden diferansiyel denklemlere dönüştürülmesi daha mantıklıdır. Lineer cebirde, fiziksel koordinatlardan asıl koordinatlara dönüşüm, temel değişimi olarak tanımlanmaktadır. Bu değişim için yukarıda bahsedildiği üzere birçok seçenek vardır. Fiziksel koordinatlara sahip bağımlı denklemlerin ayrıklaştırılarak asıl koordinatlara sahip tek serbestlik dereceli denklemler haline dönüştürülmesi öz vektörlerin kullanılmasıyla anlam kazanmaktadır. Bu sayede, asıl koordinat sistemindeki ayrık denklemler ayrı ayrı çözülür ve tekrar fiziksel koordinatlara dönüştürülerek sistemin gerçek cevabı elde edilir[72].



**Şekil 2.8** Koordinat dönüşümleri

Bu kısımda öz vektörlerin ortogonal (dik açılı) özelliklerinden bahsedilerek kütleye göre normalleştirme adımları açıklanacaktır. Bir sistemin öz değer ve öz vektörlerinin aşağıdaki denklemin çözümüyle elde edildiği daha önce belirtilmişti.

$$-w^2[M]\phi + [K]\phi = 0 \quad (2.29)$$

Aynı denklem i ve j numaralı modlar için şu şekilde yazılabilir.

$$[K]\phi_i = w_i^2[M]\phi_i \quad (2.30)$$

$$[K]\phi_j = w_j^2[M]\phi_j \quad (2.31)$$

Denklem (2.30)  $\phi_j^T$  ile soldan çarpılırsa denklem (2.32) elde edilir.

$$\phi_j^T [K] \phi_i = w^2_i \phi_j^T [M] \phi_i \quad (2.32)$$

Denklem (2.31)'in transpozesi alınır ve lineer cebirden  $[AB]^T = B^T A^T$  dönüşüm özelliğinden faydalanılırsa denklem aşağıdaki halini alır.

$$\phi_j^T [K]^T = w^2_j \phi_j^T [M]^T \quad (2.33)$$

Kütle ve rijitlik matrisleri simetrik olduğundan  $[K]^T = [K]$  ve  $[M]^T = [M]$  yazılabilir.

$$\phi_j^T [K] = w^2_j \phi_j^T [M] \quad (2.34)$$

Eşitliğin her iki tarafı sağdan  $\phi_i$  ile çarpılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\phi_j^T [K] \phi_i = w^2_j \phi_j^T [M] \phi_i \quad (2.35)$$

Denklem (2.35), denklem (2.32)'den çıkartılırsa denklem (2.36) bulunur.

$$0 = (w^2_i - w^2_j) \phi_j^T [M] \phi_i \quad (2.36)$$

$i \neq j$  eşitsizliği için  $(w^2_i - w^2_j)$  sifira eşit olamayacağı için  $\phi_j^T [M] \phi_i$  ifadesi sifira eşit olmak zorundadır. Bu çarpımın sonucunda tek elemanlı bir vektör elde edilir,  $[M_{ij}]$ . Bu ifade ise kütle matrisinde diagonal olmayan modal kütle değerlerinin sifir olduğu anlamına gelir. Bundan dolayı kütleyle bağlı kalarak iki öz vektörün ortogonal oldukları görülmektedir.  $i = j$  durumunda ise  $(w^2_i - w^2_j)$  sifira eşit olur ve  $\phi_j^T [M] \phi_i$  ifadesi kütle matrisindeki herhangi bir diagonal elemana eşitlenebilir.

$$\phi_j^T [M] \phi_i = M_{ii} \quad (2.37)$$

Kütleye göre normalleştirmenin temelinde bu eşitlik yatmaktadır ve aşağıdaki ifade ile normalleştirme yapılabilir. Kütleye göre normalleştirmede kütle matrisindeki diagonal elemanların 1'e eşit olması amaçlanmaktadır.

$$\phi_j^T [M] \phi_i = 1 \quad (2.38)$$

Aşağıdaki denklem ile bu istek yerine getirilebilir.

$$\phi_{ni} = \phi_i / q_i \quad (2.39)$$

$$q_i = \left[ \sum_{k=1}^n M_k \phi_{ki}^2 \right]^{1/2} \quad (2.40)$$

Bu şekilde yapılan normalleştirme ile diagonal modal kütle değerleri 1 olarak belirlenmiş olur ve hareket denklemleri ayrık biçimde ifade edilerek ayrı ayrı tek serbestlik dereceli sistem gibi çözülebilir hale gelmektedir.

#### 2.3.4 Kütle Katılım Faktörü

Modal analizin bir çıktısı da kütle katılım faktörleridir. Kütle katılım faktörü, yapının bir doğal frekansında toplam kütlelerinin ne kadarının o frekansa ait mod şeklinin meydana gelmesi için etkin olarak harekete katıldığını ifade etmektedir. Aşağıda izlenen yol ile hesaplanabilmektedir.

- Katsayı vektörünün hesaplanması

$$[L] = \{\phi\}^T [M] [r] \quad (2.41)$$

Denklem (2.41)'de bulunan  $[r]$ , etki vektörü olarak ifade edilmektedir ve bir serbestlik derecesinin statik etki ile birim yer değiştirmesini tanımlar[73].

- Modal katılım faktörünün hesaplanması

$$[\Gamma_i] = [L] / \{M_{ii}\} \quad (2.42)$$

- Etkin modal kütlelerinin hesaplanması

$$M_i = [L_i]/\{M_{ii}\}^2 \quad (2.43)$$

Kütleyle göre normalleştirme yapıldığından tüm  $M_{ii}$  değerleri 1'e eşittir. Bu sebeple kütle katılım faktörü doğrudan modal katılım faktörünün karesine eşit olmaktadır. Literatürün genelinde, modal analiz yapılırken sistemin 3 eksen için de en az %90 oranında kütle katılımına sahip olması istenmektedir. Bu sayede sistemi bütünüyle temsil eden mod sayısına ulaşılmış olur. İlgili mod sayılarından da hangilerinin etkin olarak harekete katıldığı belirlenmesi için de yine her biri için kütle katılım faktörlerine bakılmaktadır.

## 2.4 Yapılarda Sönüm

Yapıların sönümleme kabiliyetleri sadece sönümleyici elemanların kullanılıp kullanılmamasına bağlı değildir. Bütünleşik yapıyı oluşturan her eleman, bu elemanların bağlantı tipleri (cıvatalı bağlantı, kaynaklı bağlantı gibi), kullanılan farklı malzemelerin atomik boyuttaki özellikleri gibi birçok değişken, yapıya gelen zorlayıcı etkiye karşılık verilen tepkide rol oynamaktadır[74]. Bu nedenle sönüm matrisi katsayılarının yapısal ölçülerden, eleman boyutlarından ve kullanılan malzemelerin sönüm özelliklerinden elde edilmesi pratik anlamda mümkün olmadığından sönüm, genellikle sayısal değerlerle tanımlanır ve bu değerler klasik sönümlü lineer sistemlerin analizi için yeterlidir [75].

### 2.4.1 Modal Sönüm Oranlarının Hesaplanması

Mevcut bir yapının sismik analiz hesaplamalarında normalde sönümü de içeren önemli yapı özellikleri deneysel olarak hesaplanmaktadır. Fakat zaman ve maliyet deneysel çalışmalara her zaman imkân vermemektedir. Henüz tasarım aşamasındaki yapılar için ise deneysel çalışma zaten mümkün olmamaktadır. Bu sebeple tasarım aşamasındaki bir yapının modal sönüm oranları benzer yapılardan alınan ölçümlerle elde edilen referans sönüm değerleri kullanılarak bulunmaktadır. En kullanışlı ölçümler ise güçlü bir şekilde sallanan ve elastik olmayan deformasyonun olmadığı durumlarda elde edilmektedir. Bununla birlikte, küçük genlikli hareketlerden elde edilen sönüm oranları büyük genlikli hareketlerde meydana gelecek sönümü temsil edememektedir. Diğer yandan,

büyük genlikli hareketlerden dolayı yapısal olarak hasara uğramış yapılardan elde edilen sönüm de hasarlar sebebiyle meydana gelen enerji kaybından dolayı yapıyı temsil edememektedir. Bu sebeple sağlıklı bir ölçüm almak için mevcut yapılarda ölçüm aletlerinin hazır olması ve hasar vermeyen bir yer hareketi bu aletler yardımıyla elde edilen deprem cevabı kayıtlarının analiz edilmesi gerekmektedir. Farklı malzemelerden inşa edilmiş farklı tipteki yapılardan elde edilen bu kayıtlar ile yeterli sayıda veri toplanmasıyla sönüm oranlarının seçilmesi mümkün olmaktadır. Bu kapsamda yapıda meydana gelen gerilme seviyesine, yapının durumu ve tipine göre yapılan sınıflandırma sonucunda aşağıdaki tablo elde edilmiştir. Tablodaki yüksek sönüm değerleri sıradan yapılar için düşük sönüm değerleri ise daha konservatif yapılar için kullanılmaktadır[75].

**Tablo 2.1** Önerilen sönüm değerleri

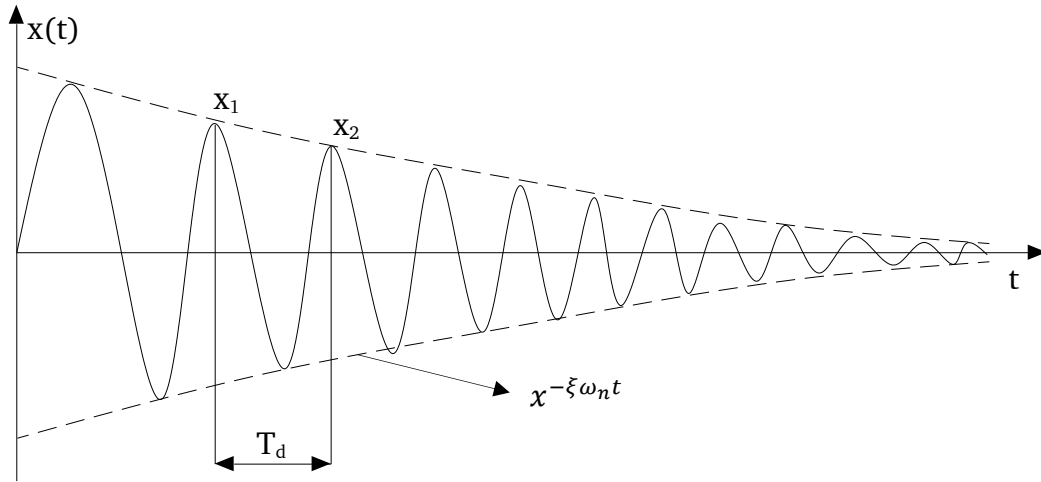
Gerilme Seviyesi	Yapı Tipi ve Durumu	Sönüm oranı [%]
İşletme Durumunda Akma Gerilmesinin Çok Altında	• Kaynaklı Çelik, Ön Gerilmeli Beton, İyi Güçlendirilmiş Beton	2-3
	• Önemli Çatlaklara Sahip Güçlendirilmiş Beton	3-5
	• Cıvatalı/Perçinli Çelik, Cıvatalı veya Çivi Bağlantılı Ahşap Yapı	5-7
	• Kaynaklı Çelik, Ön Gerilmede Kayıp Olmayan Ön Gerilmeli Beton	5-7
İşletme Durumunda Akma Gerilmesinin Biraz Altında	• Ön Gerilme Kalmamış Ön Gerilmesi Beton	7-10
	• Güçlendirilmiş Beton	7-10
	• Cıvatalı/Perçinli Çelik, Cıvatalı Ahşap Yapı	10-15
	• Çivi Bağlantılı Ahşap Yapı	15-20

Sönüm katsayısının deneysel olarak bulunmasında ise iki yöntem kullanılmaktadır.

- Logaritmik Azalma Yöntemi
- Yarı-genlik Yöntemi

Genel olarak mühendislik sistemleri elastik özelliğe sahip olduklarından belirli bir sönümlenme kabiliyetine sahiptir. Malzemelerin içyapısındaki sürtünme

mekanizmalarının, bağlantı noktalarındaki sönümlenme etkilerinin beraber hareket etmesiyle yapıyı zorlayıcı etkinin enerjisi zamanla azaltılır ve tam olarak sönümlenir. Logaritmik azalma ( $\delta$ ) yönteminde yapıların zorlayıcı bir etki karşısında sergiledikleri titreşim cevabı ile oluşturulan grafikten yararlanılır (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9** Logaritmik azalma yöntemi ile sönüm oranının bulunması

Yapının zaman alanındaki cevabına bakıldığında genliğin zamanla azalarak tamamen sönümlendiği görülmektedir. Grafiği temsil eden denklem  $x$  (genlik),  $\zeta$  (sönüm oranı),  $\omega_n$  (açısal doğal frekans),  $t$  (zaman),  $\omega_d$  (sönümlü açısal doğal frekans) ve  $\alpha$  (faz açısı) olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$x(t) = x^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t - \alpha) \quad (2.44)$$

Grafikten de görüleceği üzere genlikler üstel olarak azalan fonksiyona temas edip azalmaktadır. Temas noktalarında cevap fonksiyonu ile üstel fonksiyon aynı değerde olmaktadır. Buna göre cevap grafiğindeki herhangi iki tepe noktası  $x(t)_1$  ve  $x(t)_2$  olarak referans alınır (2.45) ve (2.46) eşitlikleri yazılabilir.

$$x_1 = x_1^{-\xi\omega_n t} \quad (2.45)$$

$$x_2 = x_1 e^{-\xi \omega_n (t+T_d)} \quad (2.46)$$

Burada  $T_d$  sönümlü sistemin periyodunu ifade etmektedir.

$$\delta = \ln \frac{x_1 e^{-\xi \omega_n t}}{x_2 e^{-\xi \omega_n (t+T_d)}} = \xi \omega_n T_d \quad (2.47)$$

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{(1 - \xi^2)}} \quad (2.48)$$

$$\frac{2\pi\xi}{\sqrt{(1 - \xi^2)}} = \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right) \quad (2.49)$$

Denklem (2.49)'da ilgili değerler yerine konarak sönüm oranı ( $\zeta$ ) bulunabilmektedir [74]. Yarım genlik yöntemi de logaritmik azalma yöntemine benzemektedir. Bu yöntem daha pratik bir yöntem ile uygulanmaktadır ve üstel olarak azalan eğrinin genliği ile ilişkilidir.

#### 2.4.2 Sönüm Matrisinin Kurulması

Sönüm matrisi, rijitlik matrisinde olduğu gibi yapıyı oluşturan her elemanın sönüm özellikleri kullanılarak oluşturulamamaktadır. Malzemelere ait sönüm mekanizmasının tam olarak kurulamaması, kurulmuş olsa dahi yapının bağlantı noktalarında sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybı, elemanlar üzerindeki mikro çatlaklar, yapısal olmayan elemanlar üzerine etkiyen gerilmeler oluşturulacak matris içerisine tanımlanamayacağı için sönüm matrisi oluşturulamamaktadır. Bu sebeple bir yapının sönüm matrisi, tüm enerji kaybı mekanizmalarını içeren modal sönüm oranlarından bulunmaktadır. Daha önce belirlenen referans sönüm değerleri kullanılarak benzer yapılara ait sönüm oranları hesaplanabilmektedir[75].

#### 2.4.3 Rayleigh Sönümü

Eğer benzer sönüm mekanizmaları yapı boyunca mevcutsa klasik sönüm uygun bir idealleştirmedir. Rayleigh sönümü de çok yaygın olarak tercih edilen klasik



sönüm yaklaşımlarından birisidir. Pratik uygulamalardaki avantajlarından dolayı sönüm mekanizması olarak Rayleigh sönüm yaklaşımı kabul edilmiştir.

Kütle oranlı ve rijitlik oranlı sönüm varsayımı yapılırsa denklem (2.50) yazılabilir.

$$c = a_0 m \text{ ve } c = a_1 k \quad (2.50)$$

Burada  $c, m$  ve  $k$  sırasıyla sönüm, kütle ve rijitliği ifade etmektedir.  $a_0$  ve  $a_1$  ise sırasıyla kütle ve rijitlik oranlı sönüm katsayılarıdır ve birimleri  $[s^{-1}]$ 'dir. Kütle-oranlı veya rijitlik-oranlı sönüm mekanizmaları tek başlarına kullanıldıklarında deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre yapıyı temsil edemedikleri belirtilmiştir. Fakat her iki mekanizmanın da dâhil olduğu durum ise (Rayleigh Sönümü) deneylerle kabul görmüş bir yaklaşımdır.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (2.51)$$

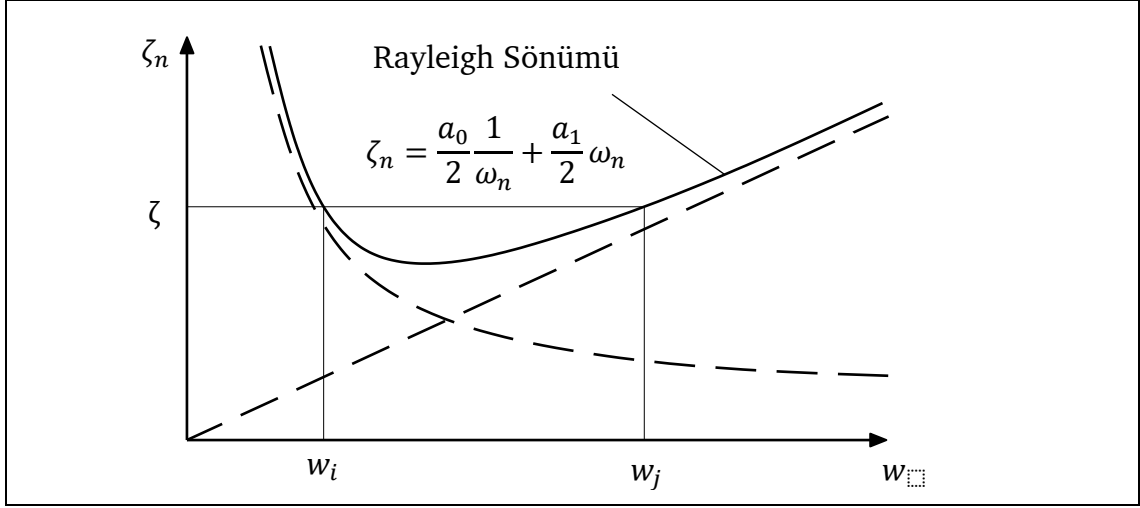
$n$ . mod için sönüm oranı,

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (2.52)$$

Buradaki  $a_0$  ve  $a_1$  katsayıları  $i$ . ve  $j$ . mod için belirlenmiş sönüm oranları ile bulunabilmektedir.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

Bu katsayılar bulunurken belirli sönüm oranlarına sahip  $i$  ve  $j$  modları, yapının cevabına önemli ölçüde katkıda bulunan tüm modlardaki sönüm oranları için makul değerler sağlamak üzere seçilmelidir[75].



Şekil 2.10 Rayleigh sönümü

Bu modların seçimi yapının gerçek sönüm oranının hesaplanması konusunda önem arz etmektedir. Yapının dinamik cevabına çok sayıda modun önemli oranda katkıda bulunduğu yapılarda, Rayleigh sönüm katsayılarının hesaplanması için referans olarak alınan bu modların seçiminde doğru bir yaklaşım sergilenmezse, uygun olmayan katsayılar yapının sismik cevaplarının hesaplarında yanlış sonuçlara sebep olabilir [76]. Bu modların seçiminde kütle katılım faktörleri önemli bir kıstastır. Bu sebeple bir yapının tümünü temsil edecek bir sönüm oranının hesaplanmasında anahtar faktör olarak ele alınmaktadır.

#### 2.4.4 Rayleigh Sönüm Katsayılarının Hesaplanması

Mühendislik analizlerin birçoğunda sönüm oranlarının seçimi konusunda deneyime ve literatüre dayalı olarak her mod için sabit bir sönüm oranı kabulü yapılmaktadır. Fakat modal kütle katılım faktörleri artan mod sayısı ile azalmaktadır. Yani ilk frekanslarda kütle katılımı fazla iken ilerleyen frekanslarda kütle katılımı azalmaktadır. Bunun yanında kritik sönüm değeri ( $c_c = 2\sqrt{km}$ ) ele alındığında ilerleyen modlardaki modal kütlenin azalması kritik sönüm değerinin azalmasına sebep olacaktır. Bir yapının sönüm oranı gerçek sönüm değerinin kritik sönüm değerine oranı olduğundan ( $\xi = c/c_c$ ) artan modlarda azalan kritik sönüm nedeniyle sönüm oranının arttığı sonucuna varılmaktadır. Bu durumda gerçeklikten uzaklaşan şu durum görülmektedir. Analizin başında tahmin edilen bir sönüm oranı değerine sahip her bir modla sönüm artmaya devam ederken, her

bir mod için sönüm oranı sabit kalmaktadır. Yüksek modlarının katılımının etkili olduğu sistemler için tahmin edilen sönüm oranına dayanarak elde edilen sonuçlar gerçekçi olmayacaktır[77]. Daha mantıklı sönüm oranı değerleri elde etmek için önerilen yöntem aşağıdaki gibidir.

- Birinci mod için sönüm oranının seçilmesi( $\xi_1$ )
- n. mod için sönüm oranının seçilmesi ( $\xi_n$ )
- Birinci ile n. mod arasında kalan modlar için lineer interpolasyon yapılarak sönüm oranlarının hesaplanması ( $\xi_i$ ),  $1 < i < n$
- n. moddan sonraki modlar için ekstrapolasyon yapılarak sönüm oranlarının hesaplanması ( $\xi_i$ ),  $n < i$

Burada n. modun seçimi bir yapının ilgilenilen doğrultudaki kütle katılım oranının %90-95 oranında sağlandığı duruma göre yapılmalıdır [76]. Kabul edilen sönüm oranı ve seçilen birinci mod ile n. mod değerlerine göre denklem (2.53) kullanılarak yapının sönüm matrisinin oluşmasında kullanılacak  $a_0$  ve  $a_1$  Rayleigh sönüm katsayıları hesaplanabilmektedir. Bu katsayılar ile yapıyı ait sönüm matrisi denklem (2.54) ile elde edilmektedir.

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (2.54)$$

## 2.5 Geçici Durum Analizi

Geçici durum analizi, ani durum değişikliklerinin yapı veya sistemler üzerindeki etkisinin incelendiği bir analiz tipidir. Ani durum değişikliğine sebep olan dış etkiler patlama, deprem, rüzgâr, kısa süreli yükleme, tekrarlı yükleme gibi çeşitli şekillerde olabilmektedir. Yapıların geçici durum cevaplarının analizi için ihtiyaç duyulan gereksinimler uygulamaya göre değişmektedir. Kimi zaman yapılar modelleme teknikleriyle tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenirken çok serbestlik dereceli sistem olarak da modellenmek durumunda kalabilmektedirler. Yapıdaki lineer olmayan davranışların da incelenmesi istenildiğinde yine farklı yaklaşımlar ile modelleme yapılabilir. Bundan dolayı, hem zaman alanında hem frekans alanında olmak üzere birçok farklı yöntem geliştirilmiştir.

Yöntemlerin bazıları yapının sadece maksimum cevabı hakkında bilgi verirken bazıları da analiz sürecindeki tüm anlara ait cevapları vermektedir[78].

Yapıya etki edecek mevcut girdi bilgilerine bağlı olarak, yapıların sismik cevap analiz yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir: (i) zaman alanı analizi; (ii) yanıt spektrumu analiz yöntemi ve (iii) frekans alanı spektral analizi. Zaman alanı analizi hem elastik hem de elastik olmayan cevap aralıkları için uygulanabilirken, diğer iki yöntem temelde elastik aralık içinde geçerlidir. Bununla birlikte, her iki yöntem de esnek olmayan aralıktaki yaklaşık cevap analizi için genişletilebilir. Zaman alanı analizi, Duhamel integrasyonu, adım adım sayısal integrasyon ve Fourier dönüşüm yaklaşımı gibi farklı teknikler kullanılarak yapıların belirli bir zaman alanındaki girdilere karşılık cevap fonksiyonlarını elde etmek için kullanılmaktadır. Yanıt spektrum analiz yöntemi, depremlerin davranış spektrumlarını girdi olarak kullanır ve zemin hareketinden kaynaklanan ve yapıda maksimum etkiye neden olacak bir dizi yanal statik kuvvetin analizi ile yapıdaki iç kuvvetler hesaplanır. Frekans alanı spektral analizi ise yer hareketi durağan rastgele bir süreç olarak modellendiğinde kullanılır. Rastgele titreşim analiz ilkelerinin kullanılmasıyla, girdi olarak verilen bir spektral güç yoğunluk fonksiyonu için ilgilenilen herhangi bir cevap miktarının spektral güç yoğunluk fonksiyonu elde edilir[3].

Bu çalışmada mevcut yapı sayısal olarak modellenemediğinden ve zemin hareketi olarak literatürde sayısal olarak mevcut olan hazır deprem girdi bilgileri kullanılacağından zaman alanı yöntemi kullanılmıştır.

### **2.5.1 Zaman Alanı Yöntemi**

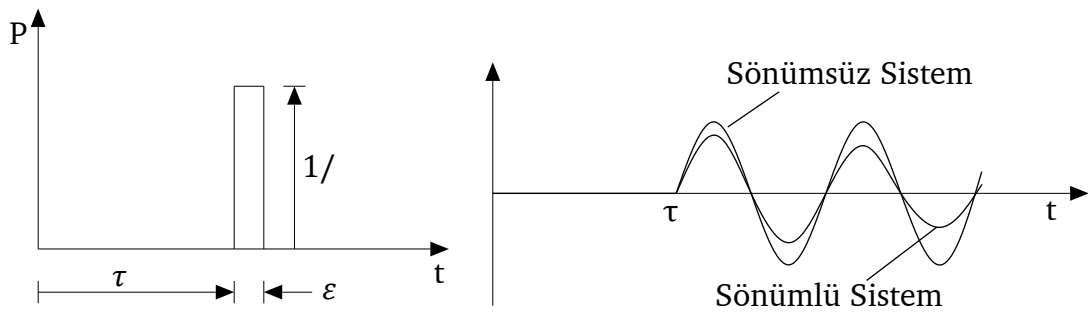
Zaman alanı yöntemi, girdi ve cevabın birbirini takip eden zaman aralıklarında adım adım değerlendirildiği bir yöntemdir. Her adımda cevap, adımın başlangıcında mevcut olan başlangıç koşulları ( yer değiştirme, hız ve ivme) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu sayede her adımda yapısal özelliklerin değiştirilme imkânı olması sebebiyle lineer olmayan davranışların hesaplanması da mümkündür. Diğer yöntemlere göre yapıların lineer olmayan cevaplarının elde edilmesi adına etkili yöntemlerden birisidir[79].

Zaman alanı yönteminde hareket denklemlerinin farklı zaman aralıklarındaki çözümü için çeşitli sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Lineer sistemler için, deprem mühendisliğinde kullanımı yaygın olan Duhamel ve Newmark integrasyonu yaklaşımları tercih edilmektedir. Bunların haricinde, Wilson- $\theta$  yöntemi, Houbolt's yöntemi, Adam integrasyonu, Alpha metodu ve Argary'nin geniş zaman aralık integrasyonu gibi çeşitli yöntemler mevcuttur[3]. Bu çalışmada Duhamel integrasyonu kullanılmıştır.

### 2.5.2 Duhamel İntegrali

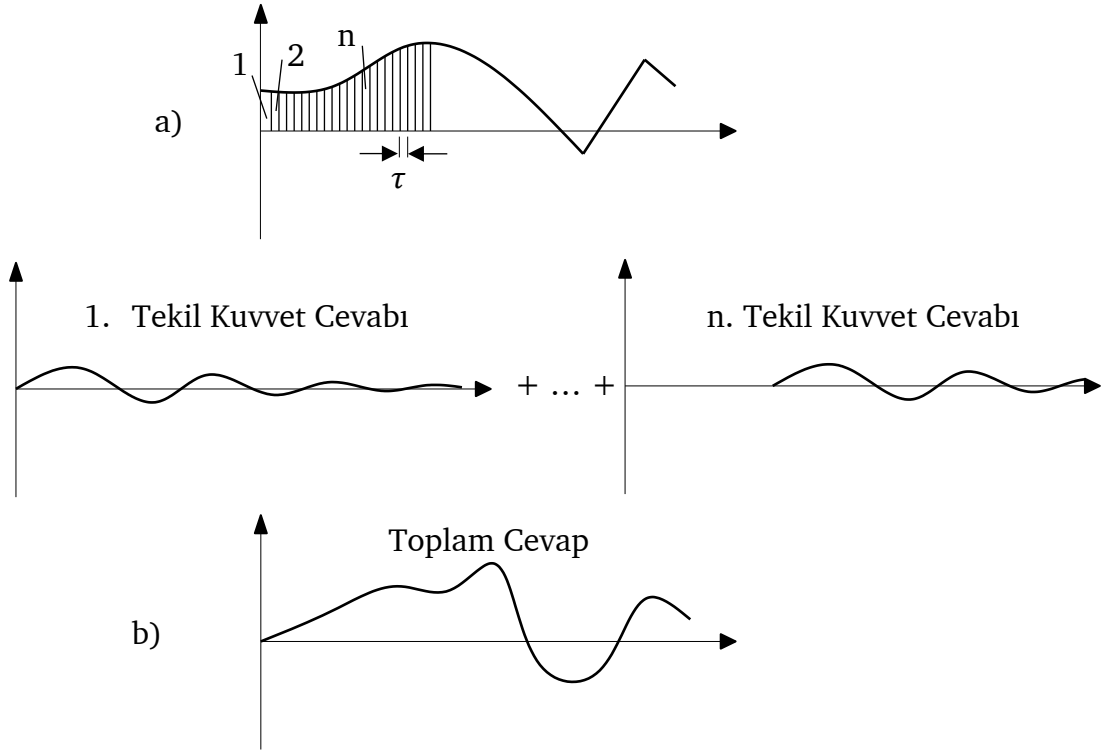
Duhamel integrali, herhangi bir düzende olmayan fakat belirli zaman aralıklarında sayısal verilere dönüştürülebilen girdilerin ayrı ayrı tekil bir kuvvet gibi yapıya etki ettiği yaklaşımı ile yapının her tekil kuvvet için cevabının hesaplanması ve bu cevaplardan yapının nihai cevabının elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Çok kısa bir süre içinde etki eden büyük bir kuvvet tekil kuvvet olarak adlandırılmaktadır. Şekilde,  $t=\tau$  anında ve  $\varepsilon$  zaman aralığı boyunca  $1/\varepsilon$  büyüklüğünde bir kuvvet etki etmektedir.  $\varepsilon$  zaman aralığı değeri sıfıra yaklaştıkça kuvvet de sonsuza gitmektedir; bununla birlikte, zaman aralığı ile tanımlanan kuvvetin büyüklüğü ise 1'e eşit olarak kalır.  $\varepsilon$  değerinin sıfıra yaklaştığı durumdaki kuvvet tekil kuvvet olarak adlandırılır. Bu gibi bir tekil kuvvetin cevabı yapının sönümlü veya sönümsüz kabul edilmesine göre Şekil 2.11'deki gibi olmaktadır.



**Şekil 2.11** Tekil Kuvvet ve Sistem Cevapları

Bu durumda hareket denklemleri bilinen bir yapının tekil bir kuvvet karşısındaki cevabı hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşımla keyfi olarak tanımlanan birden fazla kuvvet için de yapının toplam cevabı elde edilebilmektedir (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12** Duhamel integrali yöntemi a) Girdi b) Cevaplar

Yapının toplam cevabı tüm cevapların toplamı ile hesaplanabilmektedir.

$$x(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (2.55)$$

Bu denklem, lineer sistemlere uygulanabilen “convolution” integrali olarak bilinmektedir. Sönümlü, tek serbestlik dereceli bir sistemin tekil kuvvet karşısındaki cevabı aşağıda gösterilen Duhamel integrali ile hesaplanabilmektedir.

$$x(t) = \frac{1}{mw_d} \int_0^t p(\tau)e^{-\xi w_n(t-\tau)} \sin[w_d(t - \tau)]d\tau \quad (2.56)$$

Duhamel'in integrali, lineer bir tek serbestlik dereceli sisteminin keyfi kuvvet karşısındaki tepkisi elde etmek için kullanılır. Bu integral, üst üste binme ilkesine

dayandığı için lineer sistemlerle sınırlıdır. Bu nedenle lineer elastik sınırlarının ötesinde deforme olan yapılar için geçerli olmamaktadır.  $P(\tau)$  basit bir fonksiyon ise, integralin kapalı formda değerlendirilmesi mümkündür ve Duhamel'in integrali, diferansiyel denklemleri çözmek için geleneksel yöntemlere alternatif bir yöntem olarak tercih edilebilir. Bununla birlikte,  $P(\tau)$ , sayısal olarak karmaşık bir fonksiyonsa, integralin değerlendirilmesi için sayısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır[70].

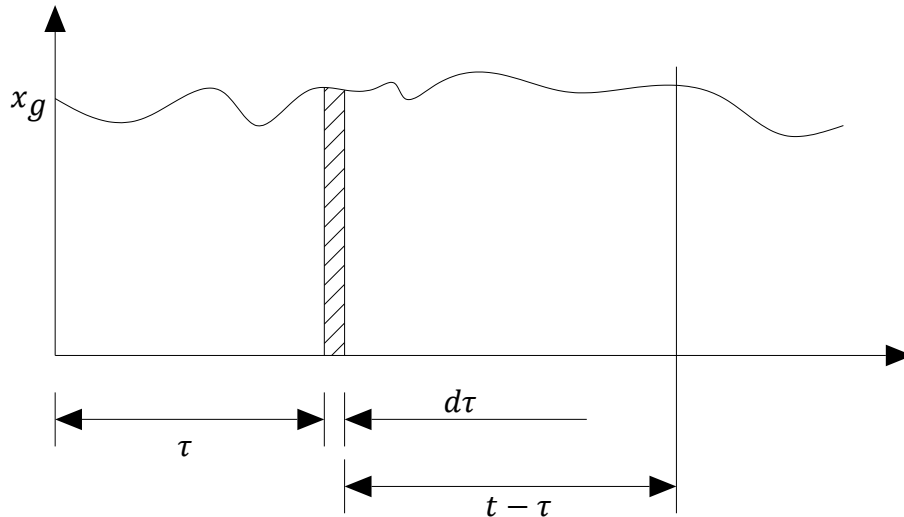
### 2.5.3 Duhamel İntegralinin Çözümü

Bu yöntemde, deprem tarafından tetiklenen kuvvet kısa zaman aralıklarıyla tanımlanmaktadır(Şekil 2.13). Homojen bir hareket denkleminde (Denklem (2.8)) sahip tek serbestlik dereceli bir sistemin yer değiştirme ve hız cevap fonksiyonları aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$x(t) = e^{-\xi w_n(t)}(C_1' \cos w_d t + C_2' \sin w_d t) \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = e^{-\xi w_n(t)} [ & (-\xi w_n C_1' + C_2' w_d) \cos w_d t \\ & + (-w_d C_1' - \xi w_n C_2') \sin w_d t ] \end{aligned} \quad (2.58)$$

Bu denklemlerdeki ifadeler bir önceki bölümde açıklanmıştır. Denklemdeki  $C_1$  ve  $C_2$  değerleri integral sabitleridir.



Şekil 2.13 Kısa zaman aralıklarıyla idealleştirilmiş deprem hareketi

Eğer başlangıç koşulları kullanılarak homojen denklem çözülürse bu durumda denklemler aşağıdaki halini alır.

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ x(0)\cos w_d t + \frac{\dot{x}(0) + \xi\omega_n x(0)}{w_d} \sin w_d t \right] \quad (2.59)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ \dot{x}(0)\cos w_d t - \frac{\xi\dot{x}(0) + \omega_n x(0)}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin w_d t \right] \quad (2.60)$$

Başlangıç koşulları olarak yer değiştirme ve hız 0 olarak kabul edilirse denklemler aşağıdaki gibi sadeleştirilir.

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \frac{\dot{x}(0)}{w_d} \sin w_d t \quad (2.61)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ \dot{x}(0)\cos w_d t - \frac{\xi\dot{x}(0)}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin w_d t \right] \quad (2.62)$$

Yapılarda sönüm başlığında ele alındığı üzere çok küçük sönüm oranları için  $w_d \approx w_n$  ve  $\sqrt{1-\xi^2} \approx 1$  olarak kabul edilebilir. Bu durumda denklemlerin yeni hali aşağıdaki gibi olur.

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \frac{\dot{x}(0)}{w_d} \sin w_n t \quad (2.63)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\xi\omega_n t} [\dot{x}(0)\cos w_n t - \xi\dot{x}(0)\sin w_n t] \quad (2.64)$$

Buraya kadar hareket denkleminin homojen olduğu yani sağ tarafının 0'a eşit olduğu varsayımı ile gelinmiştir. Yapıya etki eden deprem girdisi ivme-zaman grafiği olarak tanımlandığından deprem hareketinin sahip olduğu anlık ivme değeri yapının maruz kalacağı kuvveti belirlemektedir. Deprem girdisi şu şekilde gösterilebilir.

$$F(t) = -m\ddot{x}_g \quad (2.65)$$



Bu durumda deprem girdisine maruz kalan yapının hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (2.66)$$

$t_k$  anında yapının cevabının bilindiği varsayımı ile  $t_{k+1}$  anındaki cevabının bulunması istenilmiş olsun.  $t_{k+1}$  ve  $t_k$  arasındaki zaman aralığı  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  ile ifade edilir.  $\Delta t$  'den daha az bir zaman aralığı için ise tetikleyici kuvvet aşağıdaki gibi olur.

$$F(\tau) = F_k + \left( \frac{F_{k+1} - F_k}{\Delta t} \right) \tau \quad (2.67)$$

Bu denkleme göre  $t_{k+1}$  anındaki cevap aşağıdaki cevapların toplamına eşittir.

- i.  $x(0) = x_k$  ve  $\dot{x}(0) = \dot{x}_k$  başlangıç koşullarına sahip tek serbestlik dereceli bir sistemin sönümlü serbest titreşim cevapları
- ii.  $t_k$  ve  $t_{k+1}$  arasındaki sabit kuvvet  $F_k$  'da kaynaklanan cevaplar
- iii.  $t_k$  ve  $t_{k+1}$  arasında  $F(\tau)$  ile ifade edilen kuvvetin üçgensel değişim kısmından kaynaklanan cevaplar

Buna göre  $t_{k+1}$  anındaki cevaplar  $x_k$ ,  $\dot{x}_k$ ,  $F_k$  ve  $F_{k+1}$  değerlerine bağlıdır.  $t_{k+1}$  anındaki yer değiştirme, hız ve ivme değerleri Duhamel integralinin çözümü yapılarak elde edilen aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$x_{k+1} = C_1 x_k + C_2 \dot{x}_k + C_3 F_k + C_4 F_{k+1} \quad (2.68)$$

$$\dot{x}_{k+1} = D_1 x_k + D_2 \dot{x}_k + D_3 F_k + D_4 F_{k+1} \quad (2.69)$$

$$\ddot{x}_{k+1} = -x_{gk+1} - 2\xi w_n \dot{x}_{k+1} - w_n^2 x_{k+1} \quad (2.70)$$

Denklemlerde yer alan katsayılar şu şekildedir.

$$C_1 = e^{-\xi w_n \Delta t} \left[ \cos \omega_d \Delta t + \left( \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] \quad (2.71)$$

$$C_2 = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{1}{\omega_d} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \quad (2.72)$$

$$C_3 = \frac{1}{k} \left\{ \left( \frac{2\xi}{\omega_n\Delta t} \right) + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ - \left( 1 + \frac{2\xi}{\omega_n\Delta t} \right) \cos\omega_d\Delta t + \left( \frac{1 - 2\xi^2}{\omega_d\Delta t} - \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \right\} \quad (2.73)$$

$$C_4 = \frac{1}{k} \left\{ 1 - \left( \frac{2\xi}{\omega_n\Delta t} \right) + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{2\xi}{\omega_n\Delta t} \right) \cos\omega_d\Delta t + \left( \frac{2\xi^2 - 1}{\omega_d\Delta t} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \right\} \quad (2.74)$$

$$D_1 = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \quad (2.75)$$

$$D_2 = e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \cos\omega_d\Delta t - \left( \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \quad (2.76)$$

$$D_3 = \frac{1}{k} \left\{ - \left( \frac{1}{\Delta t} \right) + e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{1}{\Delta t} \right) \cos\omega_d\Delta t + \left( \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \xi^2}} + \frac{\xi}{\Delta t\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \right\} \quad (2.77)$$

$$D_3 = \frac{1}{k\Delta t} \left\{ 1 - e^{-\xi\omega_n\Delta t} \left[ \cos\omega_d\Delta t + \left( \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \sin\omega_d\Delta t \right] \right\} \quad (2.78)$$

Denklemler yeniden düzenlenerek  $t_{k+1}$  anındaki yer değiştirme, hız ve ivme değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$x_{k+1} = (C_1 + kC_3)x_k + (C_2 + cC_3)\dot{x}_k + mC_3\ddot{x}_k + C_4F_{k+1} \quad (2.79)$$

$$\dot{x}_{k+1} = (D_1 + kD_3)x_k + (D_2 + cD_3)\dot{x}_k + mD_3\ddot{x}_k + D_4F_{k+1} \quad (2.80)$$

$$\ddot{x}_{k+1} = \frac{F_{k+1}}{m} - 2\xi w_n \dot{x}_{k+1} - w_n^2 x_{k+1} \quad (2.81)$$

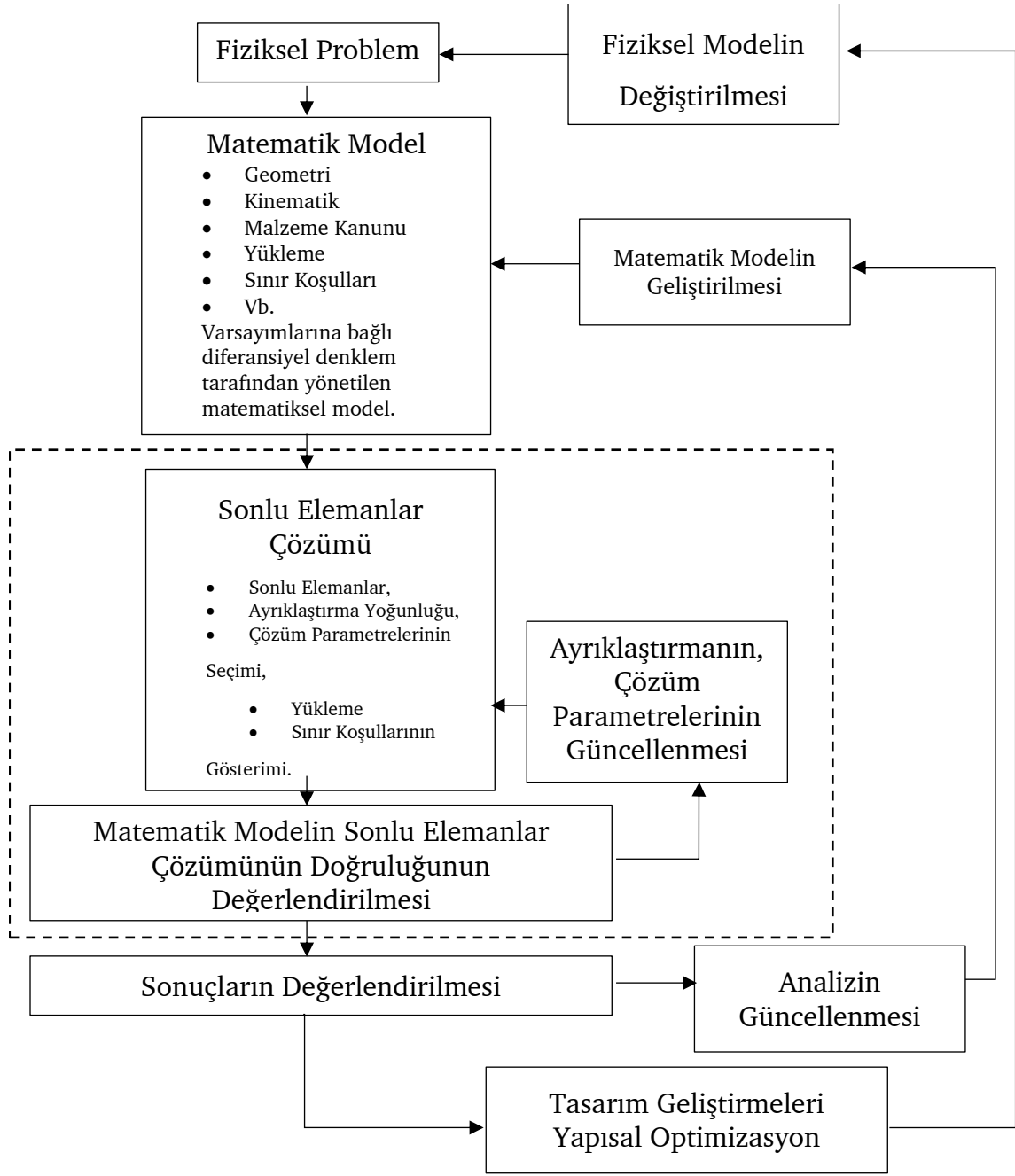
Bu denklemler yardımıyla rijitlik, sönüm, kütle gibi dinamik özellikleri ve başlangıç koşulları bilinen bir yapının zamanla değişen bir etkiye sahip kuvvet karşısında verdiği cevap hesaplanabilmektedir.

## 2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlerin daha basit ve çözüm yöntemi bilinen problemlere dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Ele alınan asıl problem, daha basit bir problem ile ifade edildiğinden elde edilecek sonuç kesin değil yaklaşık olacaktır. Buna rağmen, matematiksel olarak ifade edilemeyen, çözülmesi bir hayli güç olan problemler karşısında sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir[80]. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), çeşitli alanlarda ileri mühendislik sistemlerinin modellenmesinde ve benzetiminde vazgeçilmez yöntem haline gelmiştir. Bu yöntem ilk olarak gerilme analizleri için kullanılmış ve o zamandan beri termal analiz, sıvı akış analizi, piezoelektrik analiz ve diğer birçok probleme uygulanmıştır. SEY, yaklaşık çözümler arayan sayısal bir yöntemdir. İlgili sistemi daha basit yapılar ile temsil eden elemanların kullanılması ve bilinen fiziksel yasaların bu elemanlar aracılığı ile tüm yapıya uygulanması temeline dayanmaktadır[81].

Bir yapının davranışı, geometrisine, malzemenin özelliğine, başlangıç ve yükleme koşullarına bağlıdır. Bir mühendislik sistemi için geometri çok karmaşık yapıda olabilir. Aynı şekilde, sınır ve başlangıç koşulları da karmaşık olabilir. Bu nedenle, yapının davranışını temsil eden denklemlerin analitik yollarla çözülmesi çok zor olduğundan yapının daha basit bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde temel olarak şu adımlar izlenmektedir.

- Geometrinin modellenmesi
- Ayrıklaştırma
- Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması
- Sınır, Başlangıç ve Yükleme Koşullarının Tanımlanması



**Şekil 2.14** Sonlu elemanlar yöntemi çözüm şeması

Yük etkisi altında gerilmeye maruz kalan yapılarda genel olarak gerilmeler yapı üzerinde düzgün dağılım olarak görülemez ve yer değiştirme veya şekil değiştirme olarak gözlemlenebilen gerinimlere sebep olurlar. Yapıda meydana gelen gerinim, yapının maruz kaldığı kuvvet veya moment neticesinde meydana gelen gerilmenin bir ürünüdür ve sınır, başlangıç ve yükleme koşullarıyla ilişkilidir. Bu ilişkilerin mühendisler tarafından matematiksel olarak gerçeğe en yakın bir şekilde ifade edilmesi yapının gerçek sonuçlarının elde edilmesi adına yüksek derecede önem

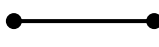

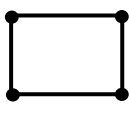
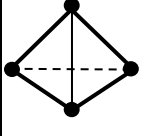
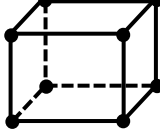
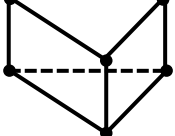
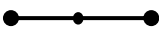
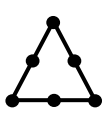
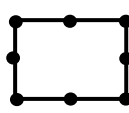
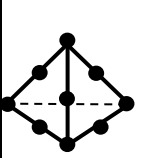
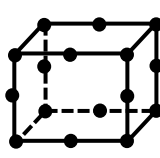
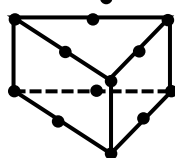
gösterilmesi gereken bir durumdur. Kuvvetler statik ve/veya dinamik olabilir. Statik, zamanla değişmeyen yüklere maruz kalan yapıların mekaniği ile ilgilidir. Dinamik ise zamana bağlı olarak değişen kuvvet veya momentlerin etkisini incelemektedir. Bu durumda, gerilme, gerinim ve yer değiştirme zamana bağlı olacaktır. Malzemenin özelliğine bağlı olarak yapılar elastik olabilir, yani yapıdaki şekil değişimi yapıya etki eden yük kaldırıldığında tamamen kaybolur. Plastik olarak kabul edilen yapılar da vardır, yani yapıdaki şekil değişimi yapıya etki eden yük kalkmasına rağmen tamamen kaybolmaz ve yapı eski haline dönmez. Bu durum bir yapının modellenirken yapılan kabullerde nasıl davranacağını ön görülmesi adına dikkat edilmesi gereken önemli iki özelliktir.

Sonlu elemanlar yönteminde izlenen bu adımların ve yapılan kabullerin amacı tüm yapıyı temsil eden bir hareket denklemi oluşturmaktır. Matematiksel olarak ifade edilemeyen yapıya ait geometri, sonlu elemanlar yönteminde kullanılan eleman tipleri ile tanımlanarak basit ve matematiksel olarak ifade edilebilen hale dönüştürülür. Geometriyi yeniden şekillendirmede kullanılan bu elemanların sayısı sonlu elemanlar yönteminde büyük ölçüde önem arz etmektedir. Eğer, eleman sayısı yeteri kadar olmaz ise ulaşılan sonuç gerçek sonuçtan bir hayli farklı olacaktır. Eleman sayısının az olması sonucun yanlış elde edilmesine sebep olurken çok fazla olması ise sonuca ulaşmada sarf edilen zamanın gereğinden fazla olmasına sebep olabilmektedir. Bundan dolayı ayırıklaştırma işlemi yapılırken bu iki kıstas göz önünde bulundurularak yapılması doğru bir sonlu elemanlar yaklaşımı açısından önemlidir. Yapının hareket denklemleri üzerinde doğrudan etkisi olan malzeme faktörünün de dikkatli bir şekilde modele dâhil edilmesi gerekmektedir. Son olarak yapıya ait sınır şartları da hareket denklemlerinin son halini alması için tanımlanması gereken özelliklerdir.

### **2.6.1 Sonlu Elemanlarda Kullanılan Eleman Tipleri**

Sonlu elemanlar işleminde bir geometriyi ayırıklaştırmada kullanılan birçok eleman tipi mevcuttur. Bu elemanlar ilgili yapının şekil ve boyut özellikleri, yapıya etki eden yükleme tipi veya yapıdan istenen cevap şekline göre 1 boyutlu, 2

boyutlu ve 3 boyutlu olarak seçilebilirler. Aşağıda en çok bilinen eleman tipleri şekiller ile gösterilmiştir.

1 Boyutlu Elemanlar	2 Boyutlu Elemanlar		3 Boyutlu Elemanlar		
Çubuk	Üçgen	Dörtkenar	Dört yüzlü	Altı yüzlü	Beş yüzlü
2 düğümlü 	3 düğümlü 	4 düğümlü 	4 düğümlü 	8 düğümlü 	6 düğümlü 
3 düğümlü 	6 düğümlü 	8 düğümlü 	10 düğümlü 	20 düğümlü 	15 düğümlü 

Şekil 2.15 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan başlıca elemanlar

Her eleman düğüm denilen noktalardan oluşmaktadır. Düğüm noktalarını sayısı ve noktalar arası birleşim şekline göre çeşitli boyutlarda eleman tipleri elde edilmektedir. 1 boyutlu eleman tipleri şu şekildedir.

- **Çubuk Eleman** : Düğüm noktaları sadece yatay ekseninde kuvvet taşır ve toplam serbestlik derecesi 2'dir.
- **Kafes Kiriş Eleman** : Düğüm noktaları sadece yatay ve düşey ekseninde kuvvet taşır ve toplam serbestlik derecesi 4'tür.
- **Kiriş Eleman** : Düğüm noktaları sadece düşey ekseninde kuvvet ve moment taşır ve toplam serbestlik derecesi 4'tür.
- **Çerçeve Eleman** : Uzay çerçeve elemanı da denir. Düğüm noktaları üç ekseninde de kuvvet ve moment taşır. Toplam serbestlik derecesi 12'dir.

Çubuk Eleman	
Kafes Kiriş Eleman	
Kiriş Eleman	
Çerçeve Eleman	

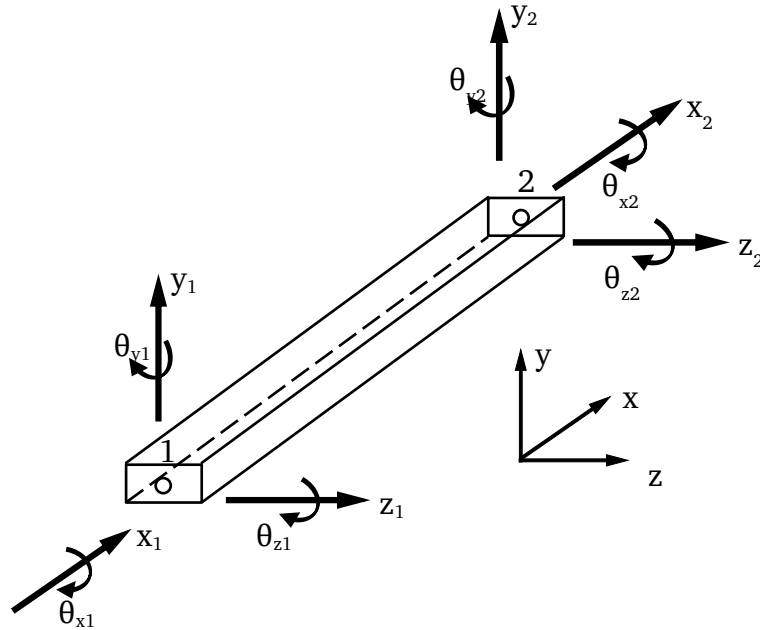
Şekil 2.16 Eleman tipleri

2 düğümden oluşan 1 boyutlu eleman tipleri Şekil 2.16’de görülmektedir. Fiziksel olarak her düğümden 3 eksende öteleme ve dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik vardır. 1, 2 ve 3. numaralar 1. düğüm noktasının sırasıyla çubuk ekseninde, çubuk eksenine dik ekseninde ve bu iki eksenlerden oluşan düzleme dik olan ekseninde öteleme serbestliğini; 4, 5 ve 6 numaralar ise aynı eksenlerdeki dönme serbestliğini temsil etmektedir. Aynı şekilde 7, 8 ve 9. numaralar 2. Düğümden öteleme serbestliğini ve 10, 11 ve 12 numaralar da dönme serbestliğini temsil etmektedir. Modellemede ele alınan serbestlik sayılarına göre 1 boyutlu elemanlar farklı ifadelerle adlandırılmaktadır. Örneğin sadece 1 ve 7 numaralı serbestliklere sahip eleman çubuk eleman olarak adlandırılırken tüm serbestliklere sahip eleman ise çerçeve eleman olarak adlandırılmaktadır.

Teze konu olan kule krenleri oluşturan elemanların çoğu yapısal olarak 1 boyutlu elemanlar ile ifade edilebilmektedir. Özellikle mast kısmı tamamen çubuk elemanlardan meydana gelmektedir. Bu sebeple yapıya ait 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinin elde edilmesi adına üç ekseninde de kuvvet ve moment taşıyan çerçeve eleman tercih edilmiştir.

## 2.6.2 Çerçeve Eleman Sonlu Elemanlar Modeli

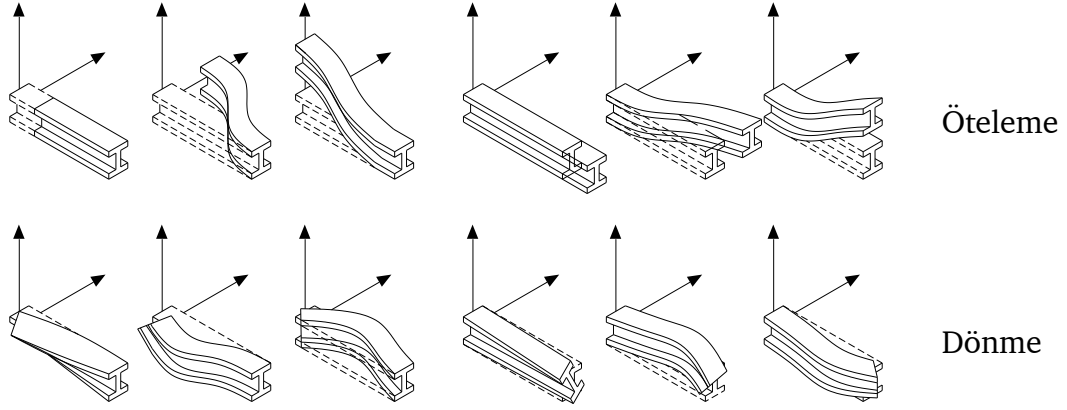
Çerçeve eleman, sadece aksenal doğrultuda değil aynı zamanda eksene dik doğrultularda da yapısal olarak hasara uğrayabilen düz bir çubuk olarak düşünülebilir. Bu çubuk hem aksenal hem yanal kuvvet ve momentleri taşıyabilmektedir. Bu sebeple sadece aksenal yüke maruz kalan çubuk eleman ve sadece yanal yüklere maruz kalan kiriş eleman modellerine göre daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır. Üç boyutlu ortamda, tek boyutlu bir geometriye sahip olması ve aynı zamanda üç yönden gelen kuvvet ve momentleri karşılaması sebebiyle tercih edilmektedir[81]. Aşağıdaki şekilde üç boyutlu çerçeve eleman görülmektedir. İki noktadan ve tek elemandan oluşan çerçeve elemanın toplam serbestlik derecesi 12'dir. Çerçeve elemana ait serbestlik dereceleri Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.17 Çerçeve eleman serbestlik dereceleri

Şekilde görüldüğü üzere çerçeve eleman iki noktadan geçen bir doğru ile oluşturulmaktadır. Elemanın sahip olduğu kesitin de bu noktalar arasında sabit olarak kaldığı kabul edilmektedir. Her iki noktanın da üç ekseninde ötelenme ve dönme serbestliği olduğundan çerçeve elemana ait kütle ve katılık matrisleri 12x12 boyutlarındadır.



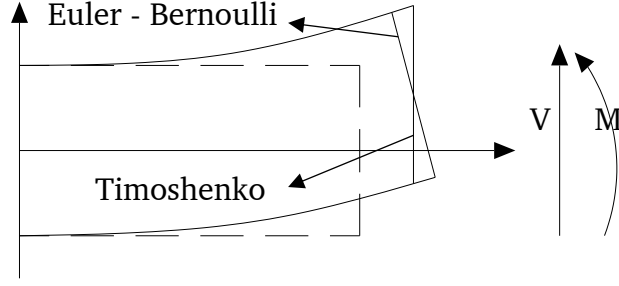


**Şekil 2.18** Çerçeve eleman düğüm noktaları öteleme ve dönme hareketleri

Çerçeve elemana ait kütle ve katılık matrisleri oluşturulurken genelde iki farklı kiriş teorisinden yararlanılmaktadır. Bunlardan ilki klasik kiriş teorisi olarak adlandırılan Euler-Bernoulli kiriş teorisi diğeri ise Timoshenko kiriş teorisidir. Euler-Bernoulli kiriş teorisi aşağıdaki varsayımları içermektedir.

- Kiriş kesiti kendi düzleminde sonsuz rijit kabul edilir, bu düzlemde şekil değişimi meydana gelmez.
- Kirişte meydana gelen şekil değişimi sonrasında kiriş kesiti düzlemsel olarak kalır.
- Şekil değişimi sonrası kesit, kiriş eksenine dik olarak kalır.

Bu varsayımlar her yönde aynı malzeme davranışı gösteren yeterince uzun, narin ve ince bir kiriş için geçerlidir. Kısa ve kalın kirişler için yapılan bu varsayımlar enine kayma gerilmelerinden dolayı meydana gelen etkileri içermediğinden yanlış sonuçlara sebep olabilir. Bu sorun ise Timoshenko kiriş teorisi ile giderilmektedir. Kiriş formülasyonunda enine kayma şekil değişimi de dâhil edildiğinden kiriş kesitinin kiriş eksenine dik olarak kalması haricinde Euler-Bernoulli için yapılan varsayımlar Timoshenko için de geçerlidir[82].



Şekil 2.19 Euler - Bernoulli ve Timoshenko kirişleri farkı

### 2.6.3 Euler-Bernoulli ve Timoshenko Kiriş Teoremi

Burada Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teoremlerine göre hesaplanan katılık ve kütle matrisleri sunulmuştur.

Denklem (2.82)'de Timoshenko kiriş teoremine göre oluşturulan rijitlik matrisi görülmektedir.

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ AE/L & & & & & & & & & & & \\ 0 & a_z & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & a_y & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & GJ/L & & & & sym & & & & \\ 0 & 0 & -c_y & 0 & e_y & & & & & & & \\ 0 & c_z & 0 & 0 & 0 & e_z & & & & & & \\ AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & AE/L & & & & & \\ 0 & -a_z & 0 & 0 & 0 & -c_z & 0 & a_z & & & & \\ 0 & 0 & -a_y & 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & a_y & & & \\ 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & GJ/L & & \\ 0 & 0 & -c_y & 0 & f_y & 0 & 0 & 0 & c_y & 0 & e_y & \\ 0 & c_z & 0 & 0 & 0 & -f_z & 0 & -c_z & 0 & 0 & 0 & e_z \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

Denklem (2.82)'de yer alan matrister A, E, L, G ve J ifadeleri sırasıyla kesit alanını, elastiklik modülünü, eleman uzunluğunu, kayma modülünü ve burulma atalet momentini ifade etmektedir. Kısaltma amacıyla kullanılan a, c, e ve f gibi ifadelerin açılımları ise izleyen denklemlerde gösterilmiştir.  $a_z = (I_z, \phi_y)$ ,  $a_y = (I_y, \phi_z)$  şeklinde olmak üzere ilgili ifadelerin açılımları şu şekildedir.

$$a(I, \phi) = \frac{12EI}{L^3(1 + \phi)} \quad (2.83)$$

$$c(I, \phi) = \frac{6EI}{L^2(1 + \phi)} \quad (2.84)$$

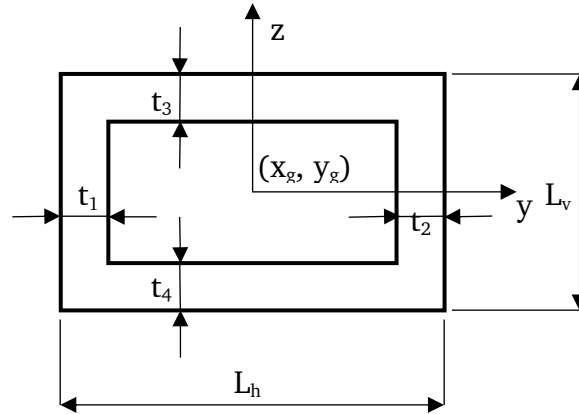
$$e(I, \phi) = \frac{(4 + \phi)EI}{L(1 + \phi)} \quad (2.85)$$

$$f(I, \phi) = \frac{(2 - \phi)EI}{L(1 + \phi)} \quad (2.86)$$

$$\phi_y = \frac{12EI_z}{GA_z^s L^2} \quad (2.87)$$

$$\phi_z = \frac{12EI_y}{GA_y^s L^2} \quad (2.88)$$

Denklemlerde bulunan ifadeler Şekil 2.20’de olduğu gibi düşey eksenini z ve yatay eksenini y olarak adlandırılmış eksen takımına göre verilmiştir. Matris içerisinde yer alan ve kesite bağlı geometrik özellikler bu eksen takımına göre hesaplanmaktadır.



**Şekil 2.20** Kesit eksen takımının gösterilmesi

Denklem (2.87) ve (2.88)’da bulunan  $A_z^s$  ve  $A_y^s$  ifadeleri kesitin z eksenine göre ve y eksenine göre kayma alanı değerlerini tarif etmektedir. Kayma etkisinin de göz önünde bulundurulduğu Timoshenko kiriş teorisi kullanıldığında kesitin ilgili eksenlere göre kayma gerilmesine etkin olarak katkıda bulunan alanın da hesaba

katılması gerekmektedir. Farklı kesit tipleri için kayma düzeltme faktörü adı verilen değer ile etkin kayma alanları hesaplanabilmektedir [83], [84].

Denklem (2.89)'de Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre oluşturulan rijitlik matrisi görülmektedir.

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{-12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 \\ & & & GJ/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 & 0 \\ & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ & & & & & \frac{4EI_z}{L} & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ & & & & & & AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ & & & & & & & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ & & & & & & & & & GJ/L & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ & & & & & & & & & & & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

Denklem (2.89)'da yer alan matrister A, E, L, G, I ve J ifadeleri sırasıyla kesit alanını, elastiklik modülünü, eleman uzunluğunu, kayma modülünü, alt indise göre atalet momentini ve burulma atalet momentini ifade etmektedir.

#### 2.6.4 Sürekli Kütle ve Parçalı Kütle Matrisleri

Kütle matrisi, sürekli ve ayrık olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Sürekli kütle matrisi, katılık matrisinin oluşturulmasında kullanılan yer değiştirme modeli kullanılarak elde edildiğinden bu isimle anılmaktadır. Kütle ilgili elemanın tüm serbestlik dereceleri kullanılarak elde edildiğinden bu serbestlik derecelerine dağıtılmıştır. Fakat birçok dinamik problemde çözümün basitleştirilmesi ve çözüm süresinin azaltılması amacıyla mümkün olduğu kadar basitleştirme yoluna gidilmektedir. Bu amaç doğrultusunda da kütle matrisi sadece yer değiştirme içeren serbestlik derecelerine indirgenmektedir. Elemanın öteleme ve dönme ataletiyle ilgili olan indirgenmiş kütleler, belirli yer değiştirmenin her iki tarafındaki orta kısımdaki malzemenin rijit bir gövde gibi davrandığı ve elemanın geri kalanının harekete katılmadığı varsayılarak hesaplanırlar. Bu sayede, eleman yer değiştirmeleri arasında var olan dinamik bağlantıyı devre dışı bırakılır ve

dolayısıyla elde edilen eleman kütle matrisi tamamen diyagonaldır ve parçalı kütle matrisi olarak adlandırılır[80].

Denklem (2.90)'da sürekli kütle yaklaşımıyla oluşturulan kütle matrisi verilmiştir.

$$M = M \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1/3 & & & & & & & & & & & \\ 0 & A_z & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & A_y & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & J/3A & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -C_y & 0 & E_y & & & sym & & & & \\ 0 & C_z & 0 & 0 & 0 & E_z & & & & & & \\ 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & & & & & \\ 0 & B_z & 0 & 0 & 0 & D_z & 0 & A_z & & & & \\ 0 & 0 & B_y & 0 & -D_y & 0 & 0 & 0 & A & & & \\ 0 & 0 & 0 & J/6A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J/3A & & \\ 0 & 0 & D_y & 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & C_y & 0 & E_y & \\ 0 & -D_z & 0 & 0 & 0 & F_z & 0 & -C_z & 0 & 0 & 0 & E_z \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

Denklem (2.90)'da yer alan matrister M, J ve A ifadeleri sırasıyla elemanın kütlelerini, burulma atalet momentini ve kesit alanını ifade etmektedir. Kısaltma için kullanılan diğer ifadeler ise aşağıdaki denklemler ile açıklanmıştır.  $A_z = A(r_z, \phi_y)$ ,  $A_y = A(r_y, \phi_z)$  şeklinde olmak üzere ilgili ifadelerin açılımları şu şekildedir.

$$A(r, \phi) = \frac{\frac{13}{35} + \frac{17}{10}\phi + \frac{1}{3}\phi^2 + \frac{6}{5}\left(\frac{r}{L}\right)^2}{(1 + \phi)^2} \quad (2.91)$$

$$B(r, \phi) = \frac{\frac{9}{70} + \frac{3}{10}\phi + \frac{1}{6}\phi^2 - \frac{6}{5}\left(\frac{r}{L}\right)^2}{(1 + \phi)^2} \quad (2.92)$$

$$C(r, \phi) = \frac{\left(\frac{11}{210} + \frac{11}{210}\phi + \frac{1}{24}\phi^2 + \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{12}\phi\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L}{(1 + \phi)^2} \quad (2.93)$$

$$C(r, \phi) = \frac{\left(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\phi + \frac{1}{24}\phi^2 + \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{12}\phi\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L}{(1 + \phi)^2} \quad (2.94)$$

$$E(r, \phi) = \frac{\left(\frac{1}{105} + \frac{1}{60}\phi + \frac{1}{120}\phi^2 + \left(\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\phi + \frac{1}{3}\phi^2\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L^2}{(1 + \phi)^2} \quad (2.95)$$

$$E(r, \phi) = \frac{\left(\frac{1}{140} + \frac{1}{60}\phi + \frac{1}{120}\phi^2 + \left(\frac{1}{30} + \frac{1}{6}\phi - \frac{1}{6}\phi^2\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L^2}{(1 + \phi)^2} \quad (2.96)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{yy}}{A}} \quad (2.97)$$

$$r_z = \sqrt{\frac{I_{zz}}{A}} \quad (2.98)$$

Parçalı kütle yaklaşımında ise elemanın toplam kütlesi sadece öteleme hareketi yapan serbestlik derecelerine indirgenmektedir ve denklem (2.99)'da olduğu gibi gösterilmektedir.

$$M = \frac{M}{2} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & \\ 1 & & & & & & & & & & & & 1 \\ 0 & 1 & & & & & & & & & & & 2 \\ 0 & 0 & 1 & & & & & & & & & & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & & & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & & & & & & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & & & & & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & & & & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

### 2.6.5 Dönüşüm Matrisleri

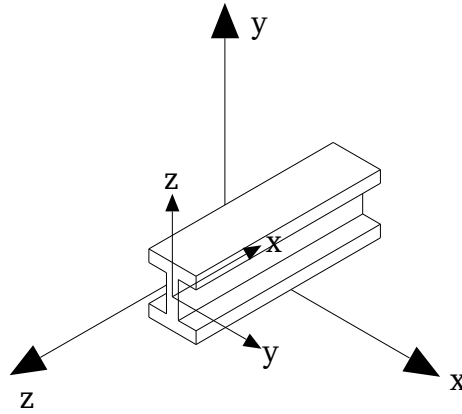
Çerçeve eleman için elde edilen kütle ve katılık matrisleri sadece o elemana ait olan yerel koordinat sistemi için geçerlidir. Birçok çerçevenin bir araya gelerek oluşturdukları sistemlerde, her bir elemanın doğru bir şekilde konumlandırılması için sistemin tümüne ait genel koordinat sisteminde tanımlanmaları gerekmektedir. Bu tanımlama işlemi de dönüşüm matrisleri kullanılarak yapılmaktadır. 3 boyutlu bir çerçeve elemanın başlangıç ve bitiş noktalarının tanımlanmış olması dönüşüm matrisi için tam olarak yeterli değildir. Elemanı

oluşturan kesit şeklinin de 3 boyutlu uzayda tanımlanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan yöntemlerden biri de 3. Nokta yöntemidir.

Yerel koordinat sisteminden genel koordinat sistemine geçilmesi için dönüşüm matrisi ile rijitlik matrisi işleme sokulmalıdır.

$$K_{genel} = T^T K_{yerel} T \quad (2.100)$$

Kütle ve rijitlik matrisleri kullanılırken matris içerisinde tarif edilen eksene bağlı değerler Şekil 2.20’de sunulan eksen takımına göre hesaplanmaktadır. Bu eksenler yerel eksen takımını oluşturmaktadır. Genel eksen takımı ve yerel eksen takımı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 2.21** Genel ve yerel koordinat takımlarının gösterilmesi

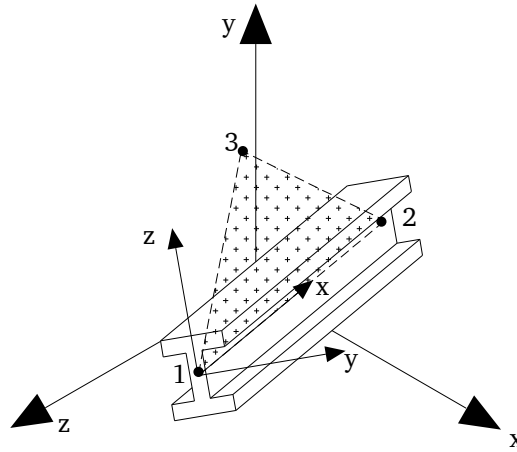
Kütle ve rijitlik matrisi bu şekilde tanımlanan eksenlere göre oluşturulmaktadır. Eleman bazında oluşturulan matrislerin genel koordinatlar çerçevesinde de tanımlanması için dönüşüm matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda yz düzlemi üzerinde tanımlanan kesitin üç boyutlu koordinatlarda hangi doğrultuda konumlandırıldığı da tanımlanmak zorundadır. Örneğin kesite ait z ekseninin genel koordinatlarda hangi doğrultuda olduğu belirtilmelidir. Bu bölümde bu doğrultunun bulunması hakkında bilgi verilecektir.

Çerçeve eleman matrisi 12x12 boyutlarında bir matris olduğu için dönüşüm matrisi de 12x12 boyutlarındadır.

$$T_{12x12} = \begin{bmatrix} R_{3x3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{3x3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{3x3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{3x3} \end{bmatrix} \quad (2.101)$$

$$R_{3x3} = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

R matrisi içerisinde bulunan l, m ve n gibi ifadeler ilgili eksenlere göre yerel vektörleri tanımlamaktadır. Başlangıç ve bitiş noktaları belirli olan bir elemanın yerel x vektörü başlangıçtan noktasında bitiş noktasına doğru olduğundan x vektörü bu noktalar kullanılarak kolayla bulunabilir. Fakat yerel y ve yerel z vektörlerinin tayini için ilave bir bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. x eksenine dik olarak konumlandırılan kesite ait z ekseninin de belirtilmesi gerekmektedir. Bu bilgi ancak bir koordinat bilgisi verilerek sisteme girdi olarak sunulabilir. Buna 3. nokta yöntemi denmesinin sebebi budur. Bu 3. nokta sisteme sayısal olarak girilen koordinatlarla tanımlanabildiği gibi yapıyı oluşturan düğüm noktalarından biri referans olarak belirlenerek de tanımlanabilmektedir. Ticari programlarda bu bilgi genelde referans düğüm noktaları veya vektörler tanımlanarak verilmektedir.



**Şekil 2.22** 3.Noktanın gösterimi

Dönüşüm matrisin kurulması için elemana ait yerel vektörlerin oluşturulması gerekmektedir. 3. nokta yöntemine göre aşağıdaki sıralama ile bu vektörlere ulaşılır.



- 3. nokta kesitin istenildiği konuma göre seçilir. Seçilen noktanın x ekseninde olmamasına dikkat edilir.
- Yerel y vektörü için 1 ve 2 noktalarından oluşan birim vektör (yerel vektör x) ile 1 ve 3 noktalarından oluşan birim vektör vektörel olarak çarpılır.
- Yerel z vektörü için yerel vektör x ile yerel vektör y vektöre olarak çarpılır.

İlgili hesaplar bir sonraki bölümde detaylandırılacaktır.

## 2.7 Matlab İle Sonlu Elemanlar Programının Yazılması

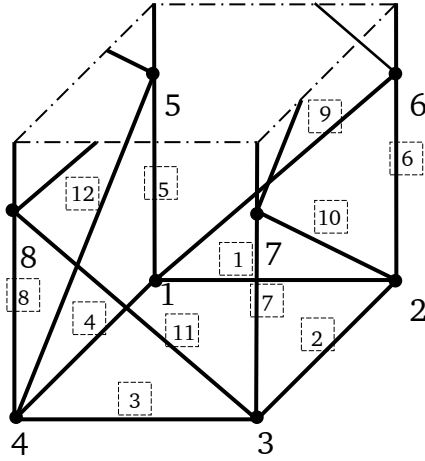
Bu bölümde çerçeve elemanlardan oluşan 3 boyutlu bir yapının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modal ve zaman alanı yöntemine göre geçici durum analizlerinin yapılabilmesi için bir algoritma oluşturulmuş ve MATLAB programı kullanılarak bu algoritma koda dönüştürülmüştür. Program yardımıyla çerçeve elemanların istenilen sayıda daha fazla elemana bölünmeleri de mümkündür.



Şekil 2.23 Sonlu elemanlar programı akış diyagramı

### 2.7.1 Programın Girdileri ve Çıktıları

Programın çalıştırılması için öncelikle kullanıcı tarafından çerçeve yapının geometrik bilgilerini, eleman bağlantı ilişkilerini ve malzeme bilgilerini içeren matrislerin oluşturulması gerekmektedir. Bunun için öncelikle Şekil 2.24'de görüldüğü gibi yapının düğüm noktalarının, eleman numaralarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu numaralar keyfi olarak verilebilir. Daha sonra iki farklı matris şeklinde hazırlanan bilgiler aşağıdaki tablolarda gösterildiği şekilde oluşturulmalıdır.



**Şekil 2.24** Örnek çerçeve yapı ve numaralandırılması

**Tablo 2.2** Eleman koordinat matrisi

DN	X	Y	Z
1	x(1)	y(1)	z(1)
:	:	:	:
n	x(n)	y(n)	z(n)

Tablo 2.2 yapının programa tanıtılması için kullanılan koordinat matrisini göstermektedir. Daha önce yapı üzerinde numaralandırılmış düğüm noktaları temel alınarak bu düğüm noktalarına ait x, y ve z bilgileri [m] biriminden olmak üzere yazılarak matris oluşturulur. Bu matris ile yapının düğüm noktaları noktalar kümesi olarak tanımlanmış olmaktadır.

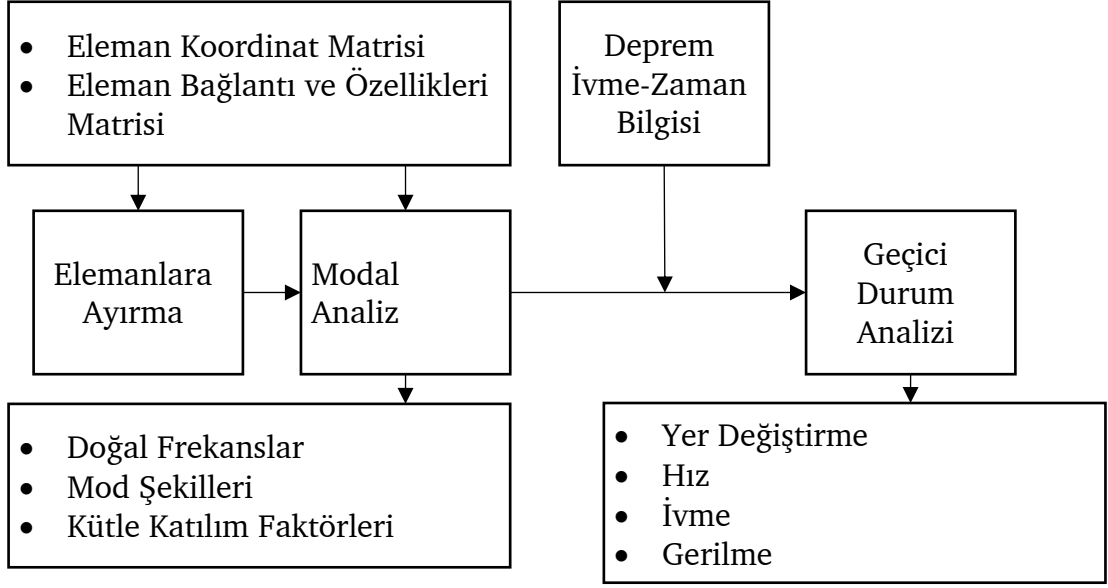
**Tablo 2.3** Eleman bağlantı matrisi ve malzeme bilgileri

EN	DN1	DN2	E	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	J	G	$\rho$	3. N
1	1	2	E(1)	A(1)	I <sub>y</sub> (1)	I <sub>z</sub> (1)	J(1)	G(1)	$\rho$ (1)	5
2	2	3	E(2)	A(2)	I <sub>y</sub> (2)	I <sub>z</sub> (2)	J(2)	G(2)	$\rho$ (2)	6
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
m	NP1(m)	Np2(m)	E(m)	A(m)	I <sub>y</sub> (m)	I <sub>z</sub> (m)	J(m)	G(m)	$\rho$ (m)	:

Tablo 2.3 11 sütundan oluşan bir matristir ve daha önce oluşturulan eleman koordinat matrisindeki düğüm nokta numaralarına bağlı kalarak yapıdaki

elemanların hangi düğüm noktaları arasında olduğunu, elemanları oluşturan kesitlerin z ekseninin hangi doğrultuda olduğunu ve elemanlara ait malzeme bilgilerinin ne olduğunu göstermektedir. 1. sütuna eleman numarası yazılır. Bu elemanın hangi düğüm noktaları arasında meydana geldiğinin tanımlanması için başlangıç noktası 2. sütuna bitiş noktası da 3. sütuna yazılır. Malzeme bilgilerini içeren elastiklik modülü, kayma modülü ve yoğunluk bilgileri sırasıyla 4., 9. ve 10. sütuna yazılır. Elemana ait alan, y ve z eksenine göre atalet momentleri ve burulma sabiti değerleri de sırasıyla 5., 6., 7. ve 8. sütuna yazılır. Kesit bilgilerinin yazılmasında referans olarak alınacak eksen takımı Şekil 2.20'da gösterildiği gibi olmalıdır. Son olarak elemana ait kesitin z ekseninin hangi doğrultuda olacağı bilgisi de yapıyı oluşturan düğüm noktaları kullanılarak 11. sütunda verilerek matris tamamlanır. Bu matris yardımıyla yapıyı oluşturan her elemanın farklı kesitlerle, farklı malzemelerle ve farklı doğrultularda kesit ile tanımlanması mümkün olmaktadır. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de belirtilen bilgilerin hazırlanması ile programın girdi matrisleri tamamlanmış olur. Bu girdiler sadece yapıya ait özellikleri içeren girdilerdir.

Bu girdiler yardımıyla yapının modal analizi yapılarak doğal frekansları, mod şekilleri ve kütle katılım faktörleri hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda istenilen sayıda mod şeklinin çizdirilmesi de mümkündür. Daha sonrasında yapılacak geçici durum analizi için yapıya etki eden depreme ait ivme-zaman bilgisine ihtiyaç vardır. Bu bilgi de programa sütun vektörü olarak tanımlanmaktadır.

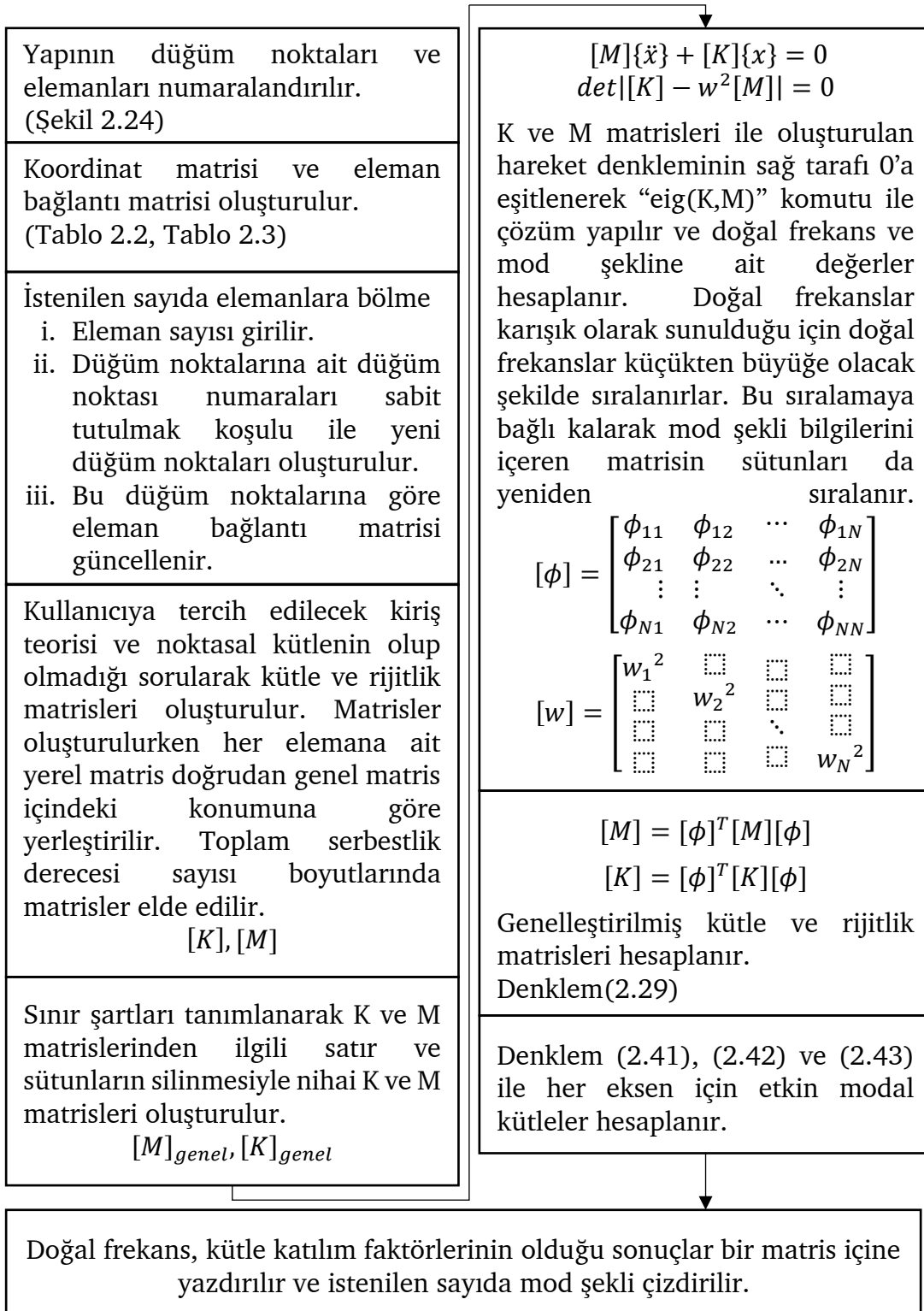


**Şekil 2.25** Analiz adımları ve program girdi-çıktıları

Şekil 2.25’de programın genel olarak adımları gösterilmiştir. Girdi matrisleri kurulan yapı öncelikle modal analize tabi tutularak doğal frekans, mod şekilleri gibi çıktıları hesaplanır. Daha sonra aynı işlem matrislerin eleman ayırma modülü yardımıyla yapının şekli ve özellikleri değişmeyecek şekilde istenilen sayıda daha küçük boyutlu çerçeve elemanlardan oluşturulması sağlanarak tekrarlanır. Bu işlem modal analizi sonucunda elde edilen sonuçlar yakınsayana kadar devam edilir. Daha sonra yapıya etki edecek deprem hareketine ait ivme bilgisi ve depremin doğrultusu hakkındaki bilgi programa girilerek geçici durum analizi yapılır. Bu analiz sonucunda ise istenilen noktadan yer değiştirme, hız veya ivme bilgisi zamana bağlı grafik olarak çizdirilebilir. Bu sayede bir yapının uygulanan deprem hareketi sonucundaki tepkisi şekilsel ve büyüklük olarak hesaplanmış olmaktadır. Programa ait algoritmalar aşağıdaki başlıklarda daha detaylı açıklanacaktır.

### 2.7.2 Modal Analiz Algoritması

Modal analiz için yazılan programın algoritması aşağıdaki şekilde görülebilmektedir. Hesaplamalarla ilgili detaylar için gerekli olan tablo, şekil veya denklemler ilgili yerlerde referans olarak verilmiştir.



Şekil 2.26 Modal analiz işlem adımları

### 2.7.3 Geçici Durum Analiz Algoritması

Modal analizin devamı olarak deprem girdisinin de dâhil olduğu geçici durum analizi için yazılan programın algoritması şekil'deki gibidir.

Tablo 2.7'den ilgili yapı için sönüm oranı seçilir.

(2.4.4) numaralı başlıkta açıklandığı üzere i. ve j. modların seçimi yapılır.

Daha sonra denklem (2.52) ile  $a_0$  ve  $a_1$  Rayleigh sönüm katsayıları hesaplanarak denklem (2.54) ile de yapıya ait sönüm matrisi kurulur.

Çözüm süresinin kısalması adına hareket denkleminde baskın olarak harekete yön veren modlar tespit edilir.

İvme-zaman olarak kullanılan deprem girdisine ait ivme değerleri vektör olarak programa girilir.

Depremi hangi ekseninde etki edeceği seçilir. Yapılan bu seçimdeki eksene göre kütle katılım faktörleri hesaplamaya dâhil edilir.

Denklem (2.79 , (2.80 ve (2.81)'deki denklemlerin çözümü için ilgili denklemlerdeki katsayılar hesaplanarak depremin etki ettiği süre tamamlana kadar Duhamel integrali ile hesaplama yapılır.

İstenilen düğüm noktası için zaman alanında yer değiştirme, ivme, hız ve tüm elemanlar için gerilme grafikleri çizdirilir.

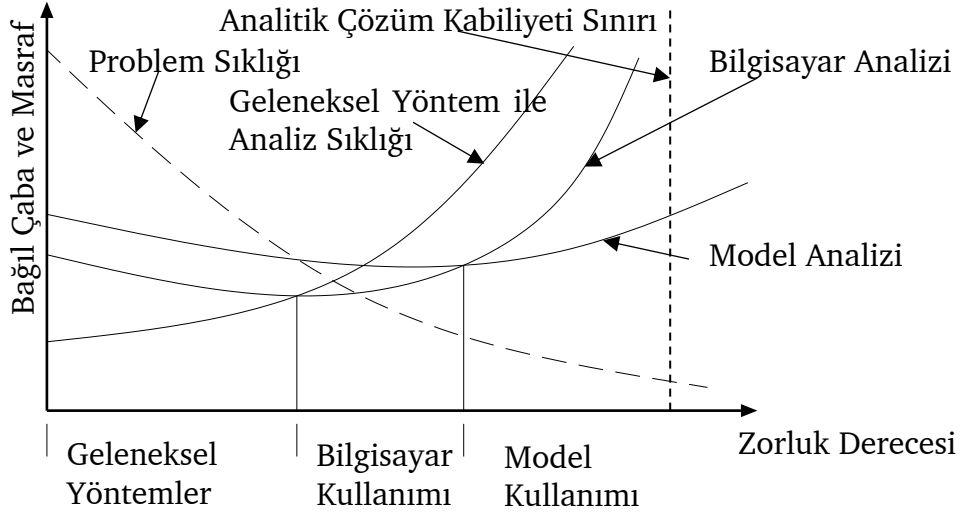
Şekil 2.27 Geçici durum analizi işlem adımları

## 2.8 Benzerlik Teoremi

Mühendislik yapılarının veya sistemlerinin araştırma ve tasarım aşamalarında genellikle ürünün nihai durumunda yani ortam koşulları ve işletme şartları altında nasıl davranacağını bilmesi araştırma ve tasarım sürecine yön veren bir durumdur. Mühendislik ürünlerinin uygun maliyet koşullarını sağlaması ve belirlenen şartlar altında görevini herhangi bir hasara uğramadan yerine getirmesi beklenmektedir. Bu koşulların sağlanabilmesi ise henüz araştırma ve tasarım aşamasında yapılan mühendislik yaklaşımıyla doğrudan ilgilidir. Mühendislik, bir anlamda doğayı hesaplayarak anlama ve günlük yaşantıya uygulama üzerine kurulu bir bilim dalı olduğundan yapılan hesaplamaların, yaklaşımların, kabullerin veya ihmal edilen durumların doğada karşılığını bulması gerekmektedir. Bunun şartı ise ürünü gerçek çalışma koşulları altında test etmek ve test sonuçlarından alınan değerleri kullanarak öngörülen mühendislik yaklaşımlarını güncellemektir. Bu şekilde ürün tasarlanırken yapılan yaklaşımların doğrulanması amaçlanmaktadır.

Deneysel teknikler, ileri mühendislik tasarım evrelerinin çok önemli bir parçası olmaktadır. Teorik bilginin sınırlarına ulaşıldığında, önerilen tasarımın doğruluğunun değerlendirilmesinde alternatif yöntem olarak bir deney tercih edilir. Geliştirilen tasarımların son haline deneysel analizlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla şekil verilir. Günümüzde, matematiksel modeller yapıların çevresel etkilere karşı cevabının hesaplanmasına olanak vermektedir. Fakat zamana ve sıcaklığa bağlı fonksiyonlar genellikle matematiksel yaklaşımı karmaşık bir hale sokmaktadır[50]. Bu karmaşık yapının çözümünde birçok değişken ve parametrenin hesaba katılmasının yanında bunların sisteme nasıl etkide bulunacağını belirlemek adına doğru bir mühendislik yaklaşımına da ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, her ne kadar mühendislik kabulleri yapılsa da tercih edilen yaklaşımların doğruluğu ispatlamadan kurulan modelin doğruluğundan bahsedilemez. Sonuç olarak, yapılan teorik çalışmaların yanında deneysel çalışma tek alternatif haline gelmektedir. Birikimli bir şekilde günümüze kadar gelen mühendislik bilgisi kapsamında hangi durumlarda hangi yönetime başvurulması

gerektiği çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir. Bunlardan biri uygulanabilir analiz teknikleri, bağıl maliyet (tasarım maliyetinin gerçek yapı maliyetine oranı) ve analizi yapılan yapının karmaşıklığı arasındaki bağlantı şeklindeki ifadelerde aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 2.28** Yapısal analizde uygulanabilir yöntemler [85]

Şekilden de görüleceği üzere matematiksel modellemelerin karmaşık sistemlere uygulanması noktasında bir üst sınır bulunmaktadır. Bu sınırın aşılması durumunda model analizinin yapılması bir zorunluluktur. Deneyler çoğu zaman aşağıdaki üç temel amaç doğrultusunda yapılmaktadır[50].

1. Malzemelerin kuvvet-deformasyon karakteristiklerini veren analitik modellerin geliştirilmesi veya doğrulanması
2. Deprem ve rüzgâr gibi karmaşık çevresel etkilerin gerçek yükleme kıstaslarının belirlenmesi
3. Yapısal sistemlerin benzetilen yükleme şartları altındaki davranışlarının araştırılması.

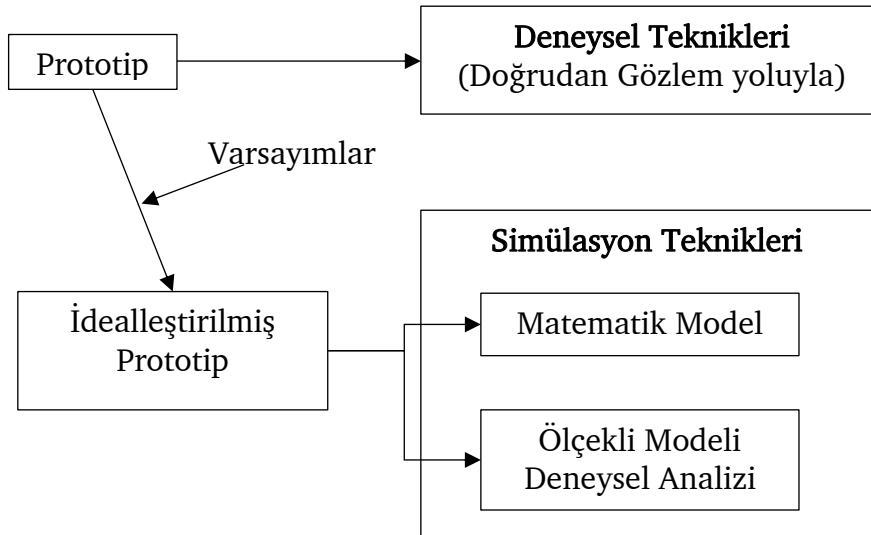
Yapılan deneyler ele alınan sistemin gerçek boyutları kullanılarak yapılabildiği gibi ölçekli modeller kullanılarak da yapılabilmektedir. Bu noktada benzerlik teorisinden yardım alınarak ölçekleme yapılmaktadır.



### 2.8.1 Benzerlik Teoremi Ve Uygulamaları

Yeni bir ürün tasarımı öncesinde teorik analiz ve deneysel doğrulamalar yardımıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Eğer yapılan varsayımlara rağmen davranışı matematiksel olarak ifade edilemeyecek derecede karışık bir sistem varsa, gerekli sürdürülebilirlik ve arzu edilen performans kazanılana kadar geniş kapsamlı bir deneysel değerlendirme sürecine ihtiyaç duyulabilmektedir[86]. Büyük ve ağır sistemlerin prototiplerinin testleri için gerçek çalışma koşullarını sağlamak neredeyse imkânsızdır. Prototip testleri mümkün olsa bile maliyet ve kontrol edilebilirlik açısından tercih edilmemektedir[86], [87]. Bundan dolayı, prototip modelin üzerinde çalışılmasında ziyade basit bir ölçekli modelini kurmak ve bunun üzerinde testler gerçekleştirmek hem ekonomik anlamda hem zaman kazancı anlamında daha mantıklıdır[86]. Şekil 2'deki gösterimde bu konudaki yaklaşım belirtilmiştir[88]. Deneysel çalışmalarda ölçekli model kullanmanın sebepleri şu şekilde özetlenebilir.

- Laboratuvar ortamında test imkânı
- Gerçekçi ortam koşullarının sağlanabilmesi
- Daha az maliyet
- Tekrar Edilebilirlik



Şekil 2.29 Ölçekli model yaklaşımı

Ölçekli modeller çeşitli amaçlarla yıllardır kullanılmaktadır fakat boyut analizine dayanan bilimsel modellerin kullanımı ilk olarak Rayleigh tarafından bir makalede tartışılmıştır. Fakat benzerlik teorisinin yapısal sistemlere uygulanabilirliği de 1944 yılında Goodier ve Thomson tarafından tartışılmıştır. Prototip (ele alınan gerçek ürüne ait numune) ve model (ele alınan gerçek ürünü temsil eden ölçekli model) arasındaki benzerlik durumlarının kurulmasında iki yaklaşım kullanılabilir. Bu modeller küçültülmüş model olabileceği gibi büyütülmüş modeller de olabilirler. Yapısal modeller çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Aşağıdaki sınıflandırmada fonksiyonellik düşünülerek bir sınıflandırma ve tanımlama yapılmıştır[89].

***Elastik Model:*** Bu tip model prototip ile doğrudan geometrik benzerliğe sahiptir, ancak prototip malzemesine benzemek zorunda olmayan homojen, elastik malzemedен yapılmıştır. Elastik model prototipin elastik davranışı ile sınırlıdır ve yükleme durumunda gerçek yapıda meydana gelen elastik olmayan davranışların öngörülmesine imkân vermez.

***Dolaylı Model:*** Aksenal kuvvet, eğilme momenti ve kayma gerilmeleri gibi içyapıdaki gerilmeler ve tepkilerin etkilerini elde etmede kullanılan elastik modelin özel bir formudur. Dolaylı bir model genellikle prototip model ile doğrudan fiziksel benzerliğe sahip değildir.

***Doğrudan Model:*** Doğrudan model tüm açılardan prototip modele geometrik olarak benzerdir. Doğrudan modele uygulanan yükler aynı prototipe yapıldığı gibi uygulanmaktadır. Her yükleme durumu için modeldeki gerinimler, deformasyonlar ve gerilmeler ilgili yükleme koşulu için prototipte benzer miktarları temsil etmektedir.

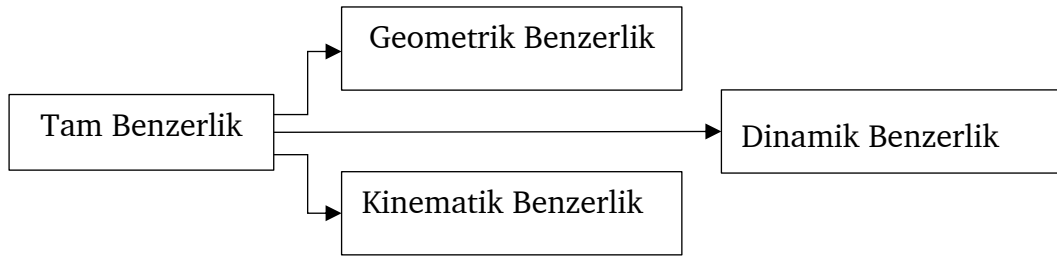
***Kuvvet Modeli:*** Bu model aynı zamanda nihai dayanım, gerçekçi model ya da replika model olarak da adlandırılır ve hasara sebep olan tüm yüklemeler için prototip davranışını öngörmeye imkân veren prototip malzemesi ile aynı malzemedен yapılmış bir doğrudan modeldir.

***Rüzgâr Modeli:*** Rüzgârdan dolayı oluşacak her türlü etkinin gözlemlenmesi ve rüzgâr-yapı etkileşiminin araştırılması amacıyla kullanılabilir.

**Dinamik Modeller:** Bu modeller yapılar üzerinde etkili olan dinamik yüklemeler veya titreşimler üzerine çalışılmak amacıyla kullanılırlar. Deprem yükü etkisinin çalışılması için sarsma masası üzerinde ya da aeroelastik etkileri çalışmak için rüzgâr tüneline test edilebilirler[89].

Benzerlik ya doğrudan sistemi tarif eden denklemler kullanılarak kurulur ya da eğer sistemi tarif eden bir matematiksel model mevcut değilse boyut analizi yapılarak kurulur. Boyut analizinde sistemin davranışını etkileyen tüm değişkenlerin ve parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Boyut analizi ile sistemin karakteristik denkleminin eksik olan kısmı formüle edilebilir ve bu denklem yardımıyla benzerlik durumları kurulabilir[86].

Benzerlik, üzerine odaklanması gereken deneysel test öncesi ciddi bir adımdır. Yapılan yaklaşımlarla kurulan benzerlik, ancak test sonuçlarının gerçek tasarıma uygulanabilir olması sonucunu doğuracak test koşulları oluşturulduğunda başarılı olmaktadır[90]. Temelde tam benzerliği sağlayan üç farklı benzerlik türü vardır; geometrik benzerlik, kinematik benzerlik ve dinamik benzerlik. Bu üç benzerlik aynı anda sağlandığında tam benzerlik sağlanmış olur.



**Şekil 2.30** Tam benzerlik

**Geometrik Benzerlik:** Eğer belirtilen fiziksel nicelikler geometrik boyutlarsa, benzerlik geometrik benzerlik olarak adlandırılır.

**Kinematik Benzerlik:** Eğer nicelikler harekete bağlı ise kinematik benzerlik denir.

**Dinamik Benzerlik:** Eğer nicelikler kuvvete aitse dinamik benzerlik olarak ifade edilir[90].

Yukarıda bahsedilen benzerlik türlerinin uygulanabilmesi için öncelikle boyut analizi aşamasının gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Bilindiği üzere,

prototip ve model arasındaki benzerlik ilişkisi iki yöntemle sağlanabilmektedir. Birincisi, sistemin karakteristik denkleminin analizi; ikincisi ise boyut analizidir.

Boyutsal analiz, karmaşık fiziksel problemleri nicel bir cevap almadan önce en basit (yani en ekonomik) forma indirgemek için bir yöntem sunar. Boyutsal analizin temel kullanımı, herhangi bir fiziksel sistemdeki değişkenlerin boyutlarının incelenmesinden, bu değişkenler arasındaki muhtemel bir ilişki biçimindeki belirli sınırlamaların çıkarılmasıdır. Yöntem, matematiksel basitliğe ve genellemeye sahiptir. Boyutsal analizin merkezinde benzerlik kavramı yer almaktadır. Fiziksel açıdan, benzerlik iki şey veya aslında farklı olan fenomenler arasındaki eşdeğerliği ifade eder. Örneğin, gerçek boyutlu bir hava taşıtına ve bunun ölçekli modeline etki eden kuvvetler arasında bazı özel durumlarda doğrudan bir ilişki vardır. Soru, bu durumların neler olduğu ve kuvvetler arasındaki ilişkinin ne olduğudur. Benzerlik, problemi tanımlayan bağımsız değişkenlerin sayısında azalmaya öncülük eden bir değişkenler dönüşümünü matematiksel olarak sunar. Yine soru, ne tür bir dönüşümün olacağıdır. İşte boyut analizi bu her iki soruyu da ele almaktadır.

Boyutsal analiz, denklemlerin ve sınır koşullarının tamamen ifade edilemediği ve her zaman yardımcı olmadığı problemlerde tek seçenektir, çünkü uygulanması basit ve hızlıdır[91]. Boyutsal analiz yapılırken Buckingham's  $\pi$ -teoremi kullanılmaktadır.

### 2.8.2 Buckingham $\pi$ (Pi) Teoremi

Buckingham  $\pi$  (Pi) teoremi, boyutsal analizde kilit bir teoremdir ve Rayleigh'nin boyutsal analiz yönteminin biçimselleştirilmesidir.

1941'de Buckingham, boyutsal bir analiz yaptıktan sonra kalan  $\pi$  (Pi) miktarlarının, probleme dâhil olan miktarların sayısı ile boyutsal olarak bağımsız olanların maksimum sayısı arasındaki farka eşit olduğunu belirten bir teorem oluşturmuştur.

Buna göre boyutsal olarak bağımsız büyüklüklerin maksimum sayısı her zaman tüm boyutsal denklemleri yazmak için gereken temel boyutların sayısına eşit veya daha az olacaktır.

- 1- Buckingham pi teoremi,  $\pi$  olarak adlandırılan kaç tane boyutsuz sayının belirleneceğine karar vermek için kullanılan bir kuraldır. Teorem, bağımsız boyutsuz grupların sayısının, onları oluşturan değişken sayısı ile ilgili bireysel boyutların sayısı arasındaki farka eşit olduğunu belirtir.
- 2- İlk olarak, probleme hangi değişkenlerin dâhil olacağına karar verilmelidir. Eğer bu değişkenler yanlış seçilirse boyutsuz gruplar da yanlış olarak elde edilmiş olur.
- 3- Bir diğer muhtemel hata da, etkisi zaten bir değişkenle ifade edilen bir değer için ayrı bir değişken olarak probleme dâhil edilmesidir.
- 4- Buckingham pi teoremi, kullanılan gerçek boyut sayısına uygulanırsa, sadece en azından belirli sayıda boyutsuz sayı içermesi gerektiğini söyler.
- 5- Boyutsal analiz yöntemi, herhangi bir sistemle ilgili bir denklemde her bir terimin aynı boyuta sahip olması gerektiği gerçeğine dayanmaktadır[90].

Buckingham pi teoremi aşağıdaki adımlar izlenerek uygulanır.

- 1- Sistemdeki fiziksel değişkenleri tanımlamak için gerekli temel boyutların sayısı K olsun. (Örn. Mekanik için; kütle, uzunluk ve zaman. Bu durumda K=3 olur)
- 2-  $P_1, P_2, \dots, P_N$  Fiziksel bağlamda N adet fiziksel değişkeni temsil etsin.

$$f_1(P_1, P_2, \dots, P_N) = 0 \quad (2.103)$$

- 3- Sonrasında, bu fiziksel ilişki  $\pi$  grubu olarak adlandırılan (N-K) sayıda bir boyutsuz grup bağıntısı ile ifade edilebilir.  $f_1(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N) = 0$   
Burada her bir  $\Pi$  çarpımı, K sayıda bir dizi fiziksel değişken artı bir başka fiziksel değişkenin boyutsuz bir çarpımıdır.
- 4-  $P_1, P_2, \dots, P_k$  seçilen K fiziksel değişkenlerini kümesi olsun. Bu durumda,

$$\Pi_1 = f_3(P_1, P_2, \dots, P_K, P_{K+1}) = 0 \quad (2.104)$$

$$\Pi_2 = f_4(P_1, P_2, \dots, P_K, P_{K+2}) = 0 \quad (2.105)$$

.....

$$\Pi_{N-K} = f_5(P_1, P_2, \dots, P_K, P_N) = 0 \quad (2.106)$$

olur.

- 5- 4. Adımda tekrar eden değişkenlerin  $P_1, P_2, \dots, P_k$  seçimi, problemde kullanılan tüm K boyutlarını içerecek şekilde olmalıdır. Ayrıca, bağımlı değişken sadece bir pi gurubunda gözükmelidir[90].

Aşağıdaki tabloda sıkça karşılaşılan fiziksel değerlerin boyutları görülmektedir.

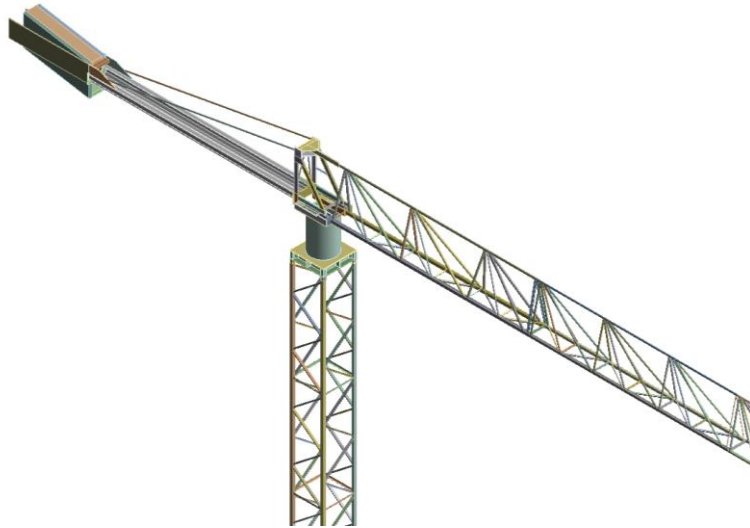
**Tablo 2.4** Sıkça karşılaşılan fiziksel niceliklerin boyutları

Sembol	Fiziksel Nicelik	Birim	Sembol	Fiziksel Nicelik	Birim
[L]	Uzunluk	L	[M]	Kütle	M
[T]	Zaman	T	[v]	Hız	LT <sup>-1</sup>
[a]	İvme	LT <sup>-2</sup>	[F]	Kuvvet	MLT <sup>-2</sup>
[ρ]	Yoğunluk	ML <sup>-3</sup>	[P]	Basınç	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
[α]	Açı	1	[E]	Enerji	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>

Benzerliğin ya doğrudan sistemi tarif eden denklemler kullanılarak ya da eğer sistemi tarif eden bir matematiksel model mevcut değilse boyut analizi yapılarak kurulduğu önceki konularda belirtilmişti. Bu bölümde her iki yaklaşım da uygulanarak bir yapının dinamik davranışının incelenmesi için gerekli olan ölçek değerlerinin elde edilmesinden bahsedilecektir.

Şekil 2.31’de görülen Kule Kren 60 m mast yüksekliğine 55 m jib uzunluğuna 15 m karşı jib uzunluğuna sahiptir ve yaklaşık olarak 51 ton ağırlığındadır. Yapısal olarak elemanlarının büyük bir çoğunluğu kafes yapılıdır. Kule krenlerde mast sabit dururken jib ve karşı jib mast ekseninde dönme hareket yapar ve jib üzerinde

yürüyen araba, jib boyunca çalışarak yükü yatayda hareket ettirir. Gerçek boyutunda modellenen kule krende araba, yük, kabin ve jib üzerinde bulunan halat tamburları ve motorlar basitleştirme mantığıyla modele dâhil edilmemiştir. Bu ölçülerde bir yapının çeşitli koşullar altında gerçek boyutlu testlerinin yapılması mümkün olmadığından ölçekli modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ölçekli modelin ise gerçek boyutlu kren hakkında doğru bilgi verebilmesi adına ölçekli modelin tasarımının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Doğru ve hassas bir şekilde yapılan ölçekli model ile laboratuvar ortamında yapılan testlerle gerçek boyutlu kule kren hakkında gerçekçi yaklaşımlara ve sonuçlara ulaşılması mümkün olacaktır.



**Şekil 2.31** Prototip kule kren modeli

### 2.8.3 Benzerlik Oranlarının Elde Edilmesi

- a. Sistemi Yöneten Matematiksel Denklemler Kullanarak Benzerlik Oranlarının Elde Edilmesi

Ölçekli model üzerinde yapılan yapısal dinamik problemlerinde bazı ölçek faktörlerinin kabulleri yapıldıktan sonra diğer değerler bilinen bu ölçek faktörleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Kullanılacak modelde prototip ile aynı malzeme kullanılacağından  $\lambda_F$  ve  $\lambda_p$  değerleri 1 olarak alınacaktır. Burada  $\lambda$  ile

yapıyı temsil eden bir özelliğin prototipteki değeri ile modeldeki değeri arasındaki oran ifade edilmektedir. Örneğin, uzunluk olarak  $\lambda = 30$  alınırsa bu, prototipe ait bir uzunluğun modele ait uzunluğa oranınının 30 olduğu anlamına gelmektedir.

Kule kreni oluşturan elemanlara bakıldığında büyük bir çoğunluğunun eğilmeye maruz kalan kiriş elemanlar olduğu görülmektedir. Bundan dolayı kiriş teoremi kullanılarak bilinmeyen ölçek değerleri elde edilecektir. Kiriş teorisi olarak ise Euler kiriş teorisi kullanılacaktır. Bu teori yardımıyla zaman, frekans, kütle, yer değiştirme, hız, ivme, gerinim, gerilme ve viskoz sönüme ait ölçek değerleri bulunacaktır. Malzeme özelliği olarak elastiklik modülü ve yoğunluk değişkenleri hesaba katılacaktır. Geometriyi temsilen ise kesit alanı, uzunluk, kesit atalet yarıçapı ve kesit atalet momenti değişkenleri probleme dâhil edilecektir. Aşağıda sırayla bu değerlerin ölçek faktörlerinin elde edilmesinden bahsedilecektir.

### ***Zaman ve Frekans Ölçek Faktörleri***

Euler kiriş teorisine göre atalet kuvvetleri elastik yenileme kuvvetine eşittir.

$$\rho A \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = EI \frac{\delta^4 u}{\delta x^4} \quad (2.107)$$

Bu denklem kullanılarak zaman faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\lambda_\rho \lambda_A \lambda_u \lambda_t^{-2} = \lambda_E \lambda_I \lambda_u \lambda_l^{-4} \quad (2.108)$$

Denkleminde bulunan kesit alanı ve atalet momenti değerleri arasında kesit atalet yarıçapını veren denklem şu şekildedir.

$$r^2 = I/A \quad (2.109)$$

Buradan aşağıdaki eşitlik elde edilir. Bu denklem (2.110) numaralı denklem içine konulursa denklem (2.111) elde edilir.

$$\lambda_l = \lambda_A \lambda_r^2 \quad (2.110)$$



$$\lambda_t = \lambda_\rho^{1/2} \lambda_l^2 \lambda_E^{-1/2} \lambda_r^{-1} \quad (2.111)$$

Frekans ve zaman arasındaki ilişki kullanılarak da aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\lambda_w = \lambda_\rho^{-1/2} \lambda_l^{-2} \lambda_E^{1/2} \lambda_r \quad (2.112)$$

### ***Kütle Ölçek Faktörü***

Kütle, yoğunluk ve hacim ile bulunabildiğinden aşağıdaki denklem doğrudan yazılabilir.

$$\lambda_M = \lambda_\rho \lambda_l \lambda_A \quad (2.113)$$

### ***Yer Değiştirme, Hız ve İvme Ölçek Faktörleri***

Bilindiği üzere hız yer değiştirmenin birinci, ivme ise ikinci türevidir. Bu durumda aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\lambda_v = \frac{\lambda_u}{\lambda_t} = \lambda_\rho^{-1/2} \lambda_l^{-1} \lambda_E^{1/2} \lambda_r \quad (2.114)$$

$$\lambda_a = \frac{\lambda_u^2}{\lambda_t^2} = \lambda_\rho^{-1} \lambda_l^{-3} \lambda_E \lambda_r \quad (2.115)$$

### ***Gerinim ve Gerilme Ölçek Faktörleri***

Malzeme mekaniğinde gerinim değeri şu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{M_e}{EI} y = \frac{MaL}{EI} y \quad (2.116)$$

Burada M kütle, a ivme, L uzunluk, y tarafsız eksene uzaklık, E elastislik modülü ve I atalet momentidir. İlgili denklem için aşağıdaki ifade yazılıp diğer denklemlerden elde edilen eşitlikler ile sadeleştirilirse denklem (2.117) bulunur.

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_M \lambda_a \lambda_l \lambda_y \lambda_l^{-1} \lambda_E^{-1} \quad (2.117)$$

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_l^{-1} \lambda_y \quad (2.118)$$

Hooke kanuna göre de gerilme ve gerinim arasındaki bağlantı aşağıdaki gibidir.

$$\lambda_\sigma = \lambda_E \lambda_\varepsilon \quad (2.119)$$

Gerinime ait denklem yerine yazılırsa,

$$\lambda_\sigma = \lambda_E \lambda_\varepsilon \quad (2.120)$$

olur.

### ***Viskoz Sönüm Ölçek Değeri***

Viskoz sönüm denklem (2.121) ile ifade edilir. Boyut analizine göre ise denklem (2.122) olarak yazılır.

$$d = \eta / (2 \operatorname{acos}(-1) f_w) \quad (2.121)$$

$$\lambda_d = \lambda_\eta / \lambda_{f_w} \quad (2.122)$$

Burada  $\eta$  sönüm katsayısı olduğundan ve model ve prototip ile aynı malzemedenden imal edildiğinde 1 olarak alınabilir.

Bu durumda sönüm için ölçek faktörü aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\lambda_d = 1 / \lambda_{f_w} \quad (2.123)$$

Elde edilen ölçek bağıntıları geometrik ölçek değerine bağlı olarak aşağıdaki Tablo 2.5'de olduğu gibi özetlenebilir.

**Tablo 2.5 Ölçek değerleri**

Değişken	Ölçek Değeri	Değişken	Ölçek Değeri	Değişken	Ölçek Değeri
Geometri ( $\lambda_l$ )	$\lambda_l$	Frekans ( $\lambda_w$ )	$1/\lambda_l$	İvme ( $\lambda_a$ )	$1/\lambda_l$
Yoğunluk ( $\lambda_\rho$ )	1	Viskoz Sönüm ( $\lambda_d$ )	$\lambda_l$	Gerinim ( $\lambda_\varepsilon$ )	1
Elastiklik Modülü ( $\lambda_E$ )	1	Kütle ( $\lambda_M$ )	$\lambda_l^3$	Gerilme ( $\lambda_\sigma$ )	1
Atalet Yarıçapı ( $\lambda_r$ )	$\lambda_l$	Yer Değiştirme ( $\lambda_u$ )	$\lambda_l$		
Zaman ( $\lambda_t$ )	$\lambda_l$	Hız ( $\lambda_v$ )	1		

b. Buckingham Pi Teoremi Kullanılarak Benzerlik Oranlarının Elde Edilmesi

### ***Sisteme etki eden değişkenlerin tespiti***

Yapısal titreşim problemlerinde, şekil değişimi, yer değişimi ve hasarların karakterize edilmesi için yapının elastik-plastik mekanik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Bu kapsamda, elastiklik modülü (E), geometri (L), zaman (t), dinamik gerilme ( $\sigma$ ), yer değiştirme (u), hız (v), ivme (a), yer çekimi (g), doğal frekans (w) ilgili parametreler olarak seçilebilmektedir.

$$f(\sigma, E, l, \rho, t, u, v, a, g, w) = 0 \quad (2.124)$$

### ***Fiziksel değişkenleri temsil eden boyut sayısı***

Değişkenlerin birimleri incelendiğinde M, L ve T olmak üzere 3 boyut ile ifade edilebildikleri görülebilmektedir. Bu durumda  $K = 3$  olur.

- Toplam değişken sayısı 10 olduğundan ve  $K=3$  olarak tespit edildiğinden  $10-3=7$  adet pi grubu oluşturulacaktır.

### ***Tekrarlayan değişkenlerin seçimi***

Tekrarlayan değişkenler olarak yoğunluk ( $\rho$ ), elastiklik modülü (E) ve uzunluk (l) değerleri seçilmiştir.

### *Pi Gruplarının elde edilmesi*

Tüm değişkenlerin listesi hazırlandıktan ve tekrarlayan değişkenler seçildikten sonra pi grupları şu şekilde hesaplanır. Tekrarlayan değişkenlerin dışında kalan bir değişken seçilerek tekrarlayan değişkenler ile çarpım halinde yazılır ve pi grubu oluşturulur. Tekrarlayan değişkenlerin üs değerleri ise boyut analizi yapılarak bulunur ve pi grubuna son hali verilir.

$\sigma$  için,

$$\Pi_1 = \sigma \rho^a E^b l^c$$

Tablo 2.5'den her değişken için birim değerleri yerine yazılarak a,b ve c değerleri bulunur.

$$M^0 L^0 T^0 = (M L^{-1} T^{-2})(M^a L^{-3a})(M^b L^{-b} T^{-2b})(L^c)$$

$$0 = 1 + a + b$$

$$0 = -1 - 3a - b + c$$

$$0 = -2 - 2b$$

Bu denklemlerden a= 0, b=-1 ve c=0 olarak bulunur.

$\Pi_1 = \sigma \rho^0 E^{-1} l^0$  olarak yazılabilir. Bu durumda ilk pi gurubu elde edilmiş olur.

t için,

$$\Pi_2 = t \rho^a E^b l^c$$

$$M^0 L^0 T^0 = (T)(M^a L^{-3a})(M^b L^{-b} T^{-2b})(L^c)$$

$$0 = a + b$$

$0 = -3a - b - c$  Bu denklemlerden a= -0.5, b=0.5 ve c=-1 olarak bulunur.

$$0 = 1 - 2b$$

$$\Pi_2 = t \rho^{-0.5} E^{0.5} l^{-1}$$

a için,

$$\Pi_3 = a \rho^a E^b l^c$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L T^{-2})(M^a L^{-3a})(M^b L^{-b} T^{-2b})(L^c)$$

$$0 = a + b$$

$0 = 1 - 3a - b - c$  Bu denklemlerden  $a= 1$ ,  $b=-1$  ve  $c=-1$  olarak bulunur.

$$0 = -2 - 2b$$

$$\Pi_3 = a\rho^1 E^{-1} l^1$$

Aynı işlem süreçleri kalan diğer değişkenler için de uygulanırsa tüm pi grupları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\Pi_1 = \frac{\sigma}{E} \quad \Pi_2 = \frac{t}{\rho^{0.5} E^{-0.5} l} \quad \Pi_3 = \frac{a}{\rho^{-1} E l^{-1}} \quad \Pi_4 = \frac{g}{\rho^{-1} E l^{-1}} \quad \Pi_5 = \frac{u}{l} \quad \Pi_6 = \frac{v}{\rho^{-0.5} E^{0.5}} \quad \Pi_7 = \frac{w}{\rho^{-0.5} E^{0.5} l^{-1}}$$

Benzerlik teoremi gereğince elde edilen pi gruplarını değerleri hem prototip hem de model için aynı olmak zorundadır. Tam benzerlik ancak tüm pi gruplarının prototip ve model için aynı değerde olması durumunda sağlanmaktadır.

$$\Pi_{1p} = \frac{\sigma_p}{E_p} \text{ ve } \Pi_{1m} = \frac{\sigma_m}{E_m} \text{ olmak üzere } \Pi_{1p} = \Pi_{1m} \text{ olmalıdır.}$$

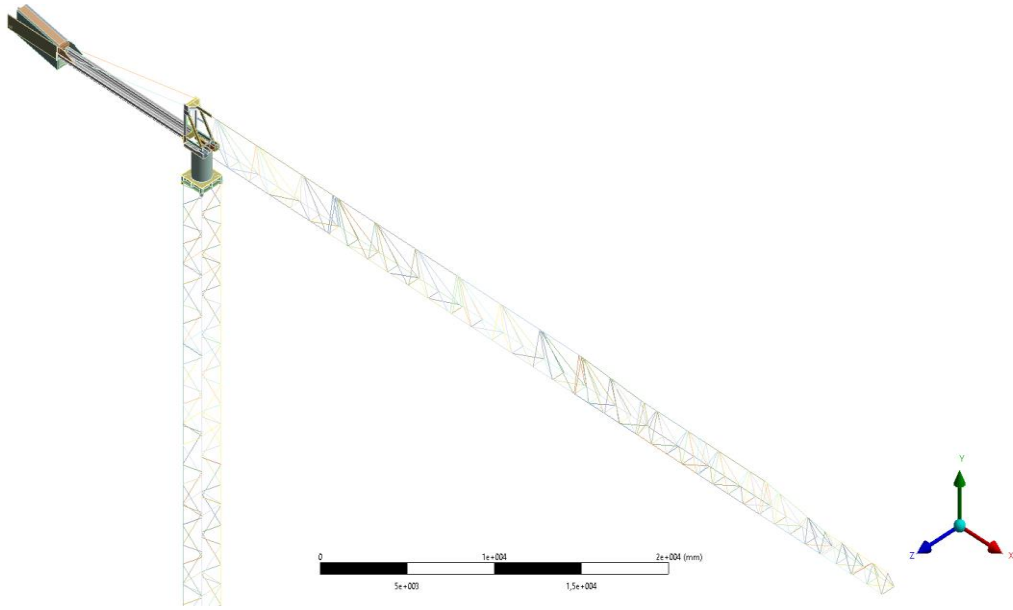
Bu durumda  $\frac{\sigma_p}{E_p} = \frac{\sigma_m}{E_m}$  olur ve  $\frac{\sigma_p}{\sigma_m} (\lambda_\sigma) = \frac{E_p}{E_m} (\lambda_E)$  eşitliği yazılabilir.

Tüm pi grupları için benzer yaklaşımla ve sadeleştirmelerle yine Tablo 2.5 elde edilir. Her iki yaklaşım sonucunda da aynı ölçek değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.

#### 2.8.4 Prototip Kule Krenin Ölçeklenmesinde İzlenen Yol

İlgili kule krenin dinamik davranışının ölçekli model üzerinden izlenmesi amaçlandığından yukarıda elde edilen ölçek faktörlerine riayet ederek yapılan hesaplamalarla gerçek modeli temsil eden bir ölçekli model oluşturulması önem arz etmektedir. Oluşturulacak ölçekli modelin prototipi dinamik anlamda ne derecede temsil ettiği ise modal analiz sonuçlarına bakılarak yapılacaktır. Modal analiz, yapıların veya sistemlerin karakteristik özellikleri olan doğal frekans, mod şekli, sönüm ve kütle katılım faktörlerini veren bir lineer analiz türüdür. Her yapının kendine özgü doğal frekansları ve bu doğal frekanslara bağlı olarak mod şekilleri mevcuttur. Sürekli yapılarda serbestlik derecesi sonsuz kabul edildiğinden yapılan modal analiz sonucunda teorik olarak sonsuz sayıda doğal

frekans ve mod şekli elde edilmektedir. Bununla birlikte, araştırmacılar yapıya ait sonsuz sayıdaki doğal frekans değerlerinden bazılarını hesaplamalara dâhil ederek diğerlerini kullanmazlar. Bu noktada kütle katılım faktörleri dikkate alınmaktadır. Kütle katılım faktörü, ilgili yapının bir doğal frekansa karşılık toplam kütesinin ne kadarının ilgili frekansta görülen mod şeklindeki harekete katıldığını ifade etmektedir. Örneğin, aşağıdaki şekilde prototip kule kren görülmektedir. Yapılan modal analiz sonucu için X doğrultusuna ait değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 2.32 Prototip kule kren sonlu elemanlar modeli

Tablo 2.6 MDT 178 X doğrultusundaki Kütle Katılım Faktörleri

Mod	Frekans	Katılım Faktörü	Etkili Kütle
1	0.136312	0.72643E-03	0.527704E-06
2	0.159456	-6.1276	37.5480
3	0.170388	-0.14935E-02	0.223057E-05
4	0.592814	2.5187	6.34374
5	0.676104	0.29608E-03	0.876639E-07
6	1.08551	-0.66336	0.440050

Tabloya bakıldığında ilk 6 frekanstan 2. ve 4. Frekanslara ait etkili kütle miktarlarının diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. X doğrultusundaki sonuçlara bakarak bu doğrultudaki baskın frekansın 2. Frekans olan 0.159 Hz değeri olduğu etkili kütle katılımı değerinden çıkarılabilir. Bu noktada aynı zamanda şu çıkarımda bulunmak da mümkündür. Ölçekleme işlemi yapılırken 2. ve 4. frekans değerlerinin ve bu frekanslara ait mod şekillerinin prototip ve modelde aynı olması diğer frekans ve ilgili mod şekillerine göre daha önemlidir. Yapının ilgili doğrultuda dinamik davranışında önemli rolü olan bu frekans değerlerinin ve mod şekillerinin sağlanması ölçekleme adımlarında yapılan yaklaşımlarda dikkate alınmalıdır.

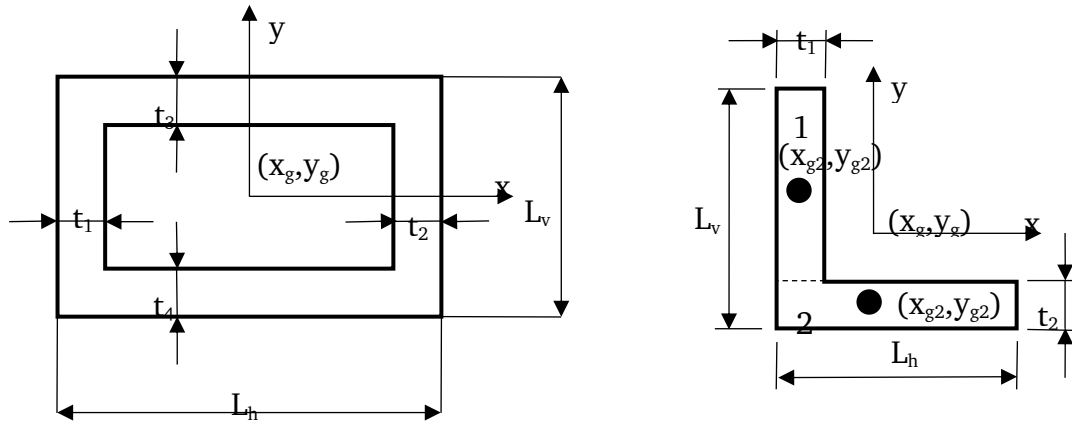
### **2.8.5 Ölçek Değerinin Belirlenmesi**

Model için belirlenen ölçek değeri bazı kısıtlamalar neticesinde belirlenmektedir. İlgili yapının test edileceği laboratuvar, test düzeneği, kullanılacak malzeme, model imalat yöntemi, maliyet, zaman vesaire sebepler ölçek değerini belirleyici sınır şartları olarak düşünülebilir. Örneğin, rüzgâr tüneline test edilecek bir yapının geometrik ölçek değeri rüzgâr tüneli boyutlarına göre, deprem hareketine maruz bırakılacak bir yapının ölçek değeri ise sarsma masasının boyutları ve taşıma kapasitesine göre belirlenmektedir. Desteksiz durumda 60 m uzunluğuna sahip MDT 178 için bahsedilen kısıtlamalar neticesinde 1/30 ve 1/40 ölçek değerlerinin denemesine karar verilmiştir.

### **2.8.6 Ölçekleme Metodu Yaklaşımı**

Kule kreni oluşturan elemanlara bakıldığında yapının büyük çoğunluğunun kiriş elemanlardan oluştuğu görülmektedir. Geri kalan kısım (Mast üstü ve karşı ağırlık bölümü) ise katı elemanlardan oluşmaktadır. Ölçekleme yapılırken model imalat yöntemi de düşünülerek bir yaklaşımda bulunulmuştur. Öncelikle her kiriş elemanın kesit, kesit atalet momenti ve kesit atalet yarıçapı hesaplanarak ölçekleme oranına göre küçültülmüştür. Model imalatında çelik sac parçadan kesim yapılarak kafes yapı oluşturma yöntemi izleneceğinden ölçeklenmiş kesit alanlarının elde edilmesinde kullanılan kesit profil ölçülerinin belirlenmesinde bu kriter göz önünde bulundurulmuştur.

MDT 178 “topless” veya “flat top” denilen bir tipte kule krendir. Bom kısmı doğrudan karşı ağırlık ile dengelenmiş, herhangi bir destek halatı kullanılmamıştır. Bom baştan uca doğru farklı ölçülerde kiriş elemanlara ve farklı ağırlıklara sahip modüllere sahiptir. Mastı oluşturan kiriş elemanlar toplamda 3 farklı kesit alanına sahip olduklarından seçilen imalat yöntemine göre ölçeklenmeleri mümkünken bom kısmı için aynı yaklaşımın sergilenmesi mümkün gözükmemektedir.



Şekil 2.33 Mastı oluşturan kesitlere ait genel ölçüler

Dikdörtgen kesitin ilgili aksellere göre atalet değerleri denklem (2.125) ve (2.126) kullanılarak ve L kesitin atalet değerleri de denklem (2.127) ve (2.128) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$I_x = \frac{L_h L_v^3}{12} - \frac{(L_h - (t_1 + t_2))(L_v - (t_3 + t_4))^3}{12} \quad (2.125)$$

$$I_y = \frac{L_v L_h^3}{12} - \frac{(L_v - (t_3 + t_4))(L_h - (t_1 + t_2))^3}{12} \quad (2.126)$$

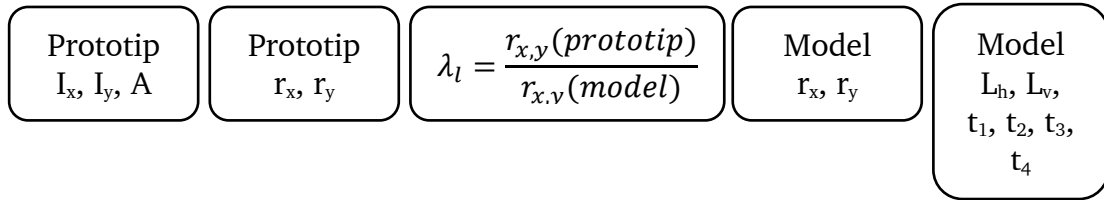
$$I_x = \left( \frac{t_1 (L_v - t_2)^3}{12} + (y_{g1} - y_g)^2 A_1 \right) + \left( \frac{L_h t_2^3}{12} + (y_{g2} - y_g)^2 A_2 \right) \quad (2.127)$$

$$I_y = \left( \frac{(L_v - t_2)(t_1)^3}{12} + (x_{g1} - x_g)^2 A_1 \right) + \left( \frac{t_2 L_h^3}{12} + (x_{g2} - x_g)^2 A_2 \right) \quad (2.128)$$



Yapılan literatür araştırmasında kule krenlerin deprem gibi dinamik bir girdi karşısında hasara uğramaması için alınması gereken önlemlerden birisinin kule kren mastının rijitliğinin değiştirilmesi olduğu ifade edilmiştir[92]. Harekete yön veren kısmın kule kren mastı olduğu düşünüldüğünde sadece bu kısım üzerine yoğunlaşarak bom ve karşı ağırlık kısımlarının ilave kütle olarak düşünülmesi çalışmanın daha pratik bir hâl alması açısından uygun bulunmuştur. Bu kapsamda ölçekleme yapılırken sadece mast kısmına ait elemanlara ait özellikler ölçeklenmiştir.

Teorik olarak kesitlerin aşağıda bahsedilecek yöntemle ölçeklenmesi yapılabilirken elde edilen teorik değerler eş değer bir kesite çevrilerek pratik anlamda imalatı mümkün olan ölçülere getirilmiştir.



**Şekil 2.34** Kesit ölçekleme aşamaları

Öncelikle ölçeklenecek kesitin kesit alanı ve kesit atalet yarıçapı hesaplanmıştır. Kesit atalet yarıçapı kesit atalet momentinin kesit alanına bölünüp karekökünün alınmasıyla hesaplanabilir.

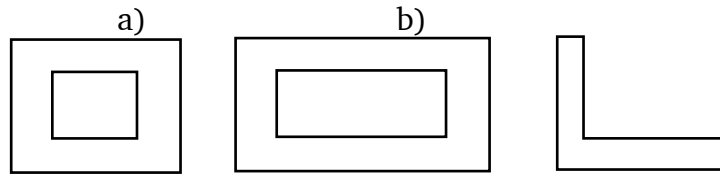
$$r^2 = \frac{I}{A} \quad (2.129)$$

Eğer kesit her iki ekseninde farklı uzunluğa sahipse iki farklı kesit atalet yarıçapına sahip olur. Ölçekleme yapılırken Şekil 2.34'de gözüken adımlar uygulanmıştır.

- 1- Gerçek Kesite Ait Alan ve Atalet Momentleri Hesaplanır.
- 2- Kesit Atalet Yarıçapları Hesaplanır.
- 3- Kesit Atalet Yarıçapı Geometrik Ölçek Değeri Kullanılarak Ölçeklenir.
- 4- Hesaplanan Kesit Atalet Yarıçapına Göre Ölçekli Kesitin Kenar Uzunlukları Belirlenir.

4 numaralı adımda kenar uzunlukları belirlenirken ölçekli kesitin gerçek kesitle aynı şekilde mi yoksa farklı kesitte mi olacağına karar verilmesi daha önce bahsedilen sınır şartlarına göre yapılır. Gerçek kesit ile ölçekli kesit arasında şekilsel fark olması mümkün olabilmesine rağmen kesit atalet yarıçaplarının farklı olması hataya sebep olacağından kenar uzunluklarının gerçek kesitle aynı kesit atalet yarıçapını vermesine özen gösterilir. Aşağıda masta ait kesitlerin bahsedilen yöntemle ölçeklenmesi yapılmıştır. Mastta 3 farklı kesit mevcuttur.

- 1- Kare Profil (a)
- 2- Dikdörtgen Profil (b)
- 3- L Profil (c)



**Şekil 2.35** Masta ait kesit profilleri

Bu kesitlere ait alan, atalet momenti, kesit atalet yarıçapı gibi özellikler Tablo 2.7’de sunulmuştur.

**Tablo 2.7** Prototip kesitlerin özellikleri

Prototip Kesiti [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	r <sub>xp</sub> [mm]	r <sub>yp</sub> [mm]
Boşluklu Kesit 132x132x15	7020	16279380	16279380	48,156	48,156
Boşluklu Kesit 100x50x10	2600	861666	2886666	18,205	33,321
L Kesit 80x7	1071	656716	656716	24,762	24,762

Aşağıdaki tablolarda her üç kesit için öncelikle kesit atalet yarıçapları bulunmuş ve geometrik ölçek değeri kullanılarak ölçekli kesitin sağlaması gereken kesit atalet yarıçapları hesaplanmıştır. Daha sonra bu değerleri en az hata ile verecek şekilde ölçekli kesitin kenar uzunlukları belirlenmiştir. Tabloda fark olarak ifade

edilen değer kenar uzunlukları belirlenen kesite ait atalet yarıçapı ile ölçekli kesitin sağlaması gereken atalet yarıçapı arasındaki yüzdelik farktır.

**Tablo 2.8** 1/40 Ölçek için model kesit değerleri

$\lambda_l = 40$		Model Kesiti [mm]	$r_{xm}$ [mm]	Fark	$r_{ym}$ [mm]	Fark
$\lambda_l/r_{xp}$ [mm]	$\lambda_l/r_{yp}$ [mm]			$\lambda_l/r_{xp}$ - $r_{xm}$ [%]		$\lambda_l/r_{yp}$ - $r_{ym}$ [%]
1,203	1,203	Boşluklu Kesit 3,775x3,775x1	1,204	-0,02	1,204	-0,02
0,455	0,833	Boşluklu Kesit 2,85x1,55x0,7	0,458	-0,80	-0,83	-0,64
0,619	0,619	L Kesit 1,95x0,1	0,613	0,84	0,613	0,84

Elde edilen değerlerin doğruluğunun sorgulanması adına prototip mast ve ölçekli mast ile bir sonlu elemanlar programı olan ANSYS yardımı ile modal analiz yapılmış ve çıkan sonuçlar ölçekleme açısından karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki tabloda 2. Sütunda gerçek boyutlu masta ait doğal frekans sonuçları görülmektedir. 3. Sütunda ise daha önce belirlenen ölçek oranında modelden beklenen ( $f_m = f_p * \lambda_l$ ) doğal frekans değerleri görülmektedir. 4.sütunda ölçekli model ile yapılan modal analiz sonuçları mevcuttur. Son sütunda ise model sonuçları ile olması beklenen değerler arasındaki fark yüzde olarak verilmiştir.

Tablodan da görüleceği üzere gerçek model ile ölçekleme kuralları neticesinde elde edilen teorik ölçülere göre tasarlanan yeni yapının doğal frekansları arasındaki fark çok az olmakla beraber sadece bazı modlarda yüzde 6'ya varan farklar mevcuttur. Bu açıdan bu değerler kabul edilebilir makul bir seviyedir. Fakat ölçekli kesitin değerlerine bakıldığında imalata uygun olmayan değerlerin kullanıldığı görülmektedir.

**Tablo 2.9** Prototip mast ve teorik ölçekli mast doğal frekansları (1/40)

Mod	Prototip [Hz]	Olmadı Beklenen [Hz]	Model [Hz]	Fark [%]
1	0,473	18,92	18,971	-0,269556025
2	0,473	18,92	18,971	-0,269556025
3	2,8548	114,192	114,99	-0,698823035
4	2,8548	114,192	114,99	-0,698823035
5	4,3248	172,992	184,1	-6,421106178
6	7,5543	302,172	306,12	-1,306540646
7	7,5544	302,176	306,12	-1,305199619
8	12,91	516,4	550,39	-6,582106894
9	13,719	548,76	560,21	-2,086522341
10	13,719	548,76	560,21	-2,086522341
11	16,486	659,44	663,43	-0,605058838
12	19,488	779,52	756,19	2,992867406
13	20,058	802,32	767,56	4,332435936
14	20,718	828,72	801,3	3,308717058
15	20,72	828,8	853,39	-2,966940154
16	20,789	831,56	853,39	-2,625186397
17	21,294	851,76	895,5	-5,135249366
18	22,917	916,68	910,69	0,653445041
19	26,735	1069,4	1063,7	0,533009164
20	27,91	1116,4	1159,9	-3,896452884

Bu değerlerin düzeltilerek imal edilebilir hale getirilmesi mecburidir. Bu kapsamda referans kesit olarak alınan 132x132x15 mm lik kare profil için 3,775 mm değeri yerine 4 mm kenar uzunluğuna sahip dolu kare profil tercih edilmiştir. Yani kutu profilden dolu profile geçiş yapılmıştır. Mast imal edilirken çelik sac parçadan kesim yapılacağı için masta ait diğer kesitlerin de bu sac parçanın ölçülerine göre yeniden uyarlanması gerekmektedir. Güncellenen değere göre seçilen 4 mm sac kalınlığı için dikdörtgen ve L kesitlerinin de bir kenarı 4 mm olan dolu profil kesite çevrilmesi gerekmektedir. Bunun için daha önce Şekil 2.34’de gösterilen ölçekleme adımları ölçek değeri 1 alınarak tekrar uygulanmıştır. Son durumda ölçekli kesit değerleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

**Tablo 2.10** 1/40 ölçek için güncellenmiş kesit değerleri

Model Kesiti	Teorik Ölçüler [mm]	Model Kesiti	Pratik Ölçüler [mm]
Boşluklu Kesi	3,775x3,775x1	Dolu Kesit	4x4
Boşluklu Kesi	2,85x1,55x0,7	Dolu Kesit	4x1,6
L Kesit	1,95x0,1	Dolu Kesit	4x2,1

Pratik ölçülere dönüştürülen değerler neticesinde tekrar modal analiz yapılmıca aşağıdaki tablo elde edilir. Bu durumda ölçekli model sonuçları ile gerçek model arasında en az yüzde 0,6 en fazla yüzde 26 fark mevcuttur.

**Tablo 2.11** Prototip mast ve pratik ölçekli mast doğal frekansları (1/40)

Mod	Prototip [Hz]	Olmadı Beklenen [Hz]	Model [Hz]	Fark [%]
1	0,473	18,92	18,092	4,376321
2	0,473	18,92	18,092	4,376321
3	2,8548	114,192	109,77	3,872425
4	2,8548	114,192	109,78	3,863668
5	4,3248	172,992	182,41	-5,44418
6	7,5543	302,172	292,76	3,114782
7	7,5544	302,176	292,83	3,0929
8	12,91	516,4	537,21	-4,02982
9	13,719	548,76	537,44	2,062833
10	13,719	548,76	545,45	0,603178
11	16,486	659,44	630,74	4,352178
12	19,488	779,52	821,21	-5,34816
13	20,058	802,32	821,7	-2,4155
14	20,718	828,72	902,99	-8,96201
15	20,72	828,8	1026,2	-23,8176
16	20,789	831,56	1121,3	-34,8429
17	21,294	851,76	1122,2	-31,7507
18	22,917	916,68	1155,4	-26,0418
19	26,735	1069,4	1173	-9,68768
20	27,91	1116,4	1230,3	-10,2024

Aynı kesit değerleri bir de 1/30 ölçek değeri kullanılarak ölçeklenmiştir ve benzer işlemler için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. 1/30 ölçek değeri için bulunan teorik değerler referans alınarak pratik ölçekli modele ait kesit değerleri belirlenmiştir. Tablodan da görüleceği üzere 1/30 ölçek değerli mast için 6 mm çelik sac kullanılması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Masta ait 3 farklı kesit de bu 6 mm çelik sac düşünülerek yeniden ölçülendirilmiştir. Prototip ile pratik ölçekli model karşılaştırılmasına bakıldığında yaklaşık olarak yüzde 2'lik bir fark mevcuttur. 12. Moddan sonra bu değer artmaktadır. Fakat daha önce de açıklandığı üzere bir yapının modal analizi sonucunda frekanslarına, mod şekillerine bakıldığı gibi kütle katılımlarına da bakılması gerekmektedir. Kütle katılımı da düşünüldüğünde ki ilk modlarda kütle katılımı diğer modlara göre çok fazladır, yüzde 2'lik hata payı kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca doğrudan kütle katılımının en yüksek olduğu modlara bakarak bu modlar için bir düzeltme katsayısının uygulanmasıyla belirlenmiş olan 1/30 luk ölçek oranı tam olarak sağlanmış olur.

Tablo 2.14 ve Tablo 2.15'de 1/30 ölçek değeri için prototip ile teorik ve pratik ölçekli mast modeli için doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 2.12** 1/30 Ölçek için model kesit değerleri

$\lambda_l = 30$		Model Kesiti [mm]	$r_{xm}$ [mm]	Fark	$r_{ym}$ [mm]	Fark
$\lambda_l/r_{xp}$ [mm]	$\lambda_l/r_{yp}$ [mm]			$\lambda_l/r_{xp}$ - $r_{xm}$ [%]		$\lambda_l/r_{yp}$ - $r_{ym}$ [%]
1,61	1,61	Boşluklu Kesit 4,8x4,8x1	1,604	0,06	1,604	0,06
0,61	1,11	Boşluklu Kesit 3,8x2,09x1	0,609	-0,45	1,10	0,44
0,8254	0,8254	L Kesit 2,605x0,7	0,8250	0,04	0,8250	0,04

**Tablo 2.13** 1/30 ölçek için güncellenmiş kesit değerleri

Model Kesiti	Teorik Ölçüler [mm]	Model Kesiti	Pratik Ölçüler [mm]
Boşluklu Kesit	4,8x4,8x1	Dolu Kesit	6x6
Boşluklu Kesit	3,8x2,09x1	Dolu Kesit	6x2,1
L Kesit	2,605x0,7	Dolu Kesit	6x3

Prototip ile pratik ölçekli model karşılaştırılmasına bakıldığında yaklaşık olarak yüzde 2'lik bir fark mevcuttur. 12. Moddan sonra bu değer artmaktadır. Fakat daha önce de açıklandığı üzere bir yapının modal analizi sonucunda frekanslarına, mod şekillerine bakıldığı gibi kütle katılımlarına da bakılması gerekmektedir. Kütle katılımı da düşünüldüğünde ki ilk modlarda kütle katılımı diğer modlara göre çok fazladır, yüzde 2'lik hata payı kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca doğrudan kütle katılımının en yüksek olduğu modlara bakarak bu modlar için bir düzeltme katsayısının uygulanmasıyla belirlenmiş olan 1/30 luk ölçek oranı tam olarak sağlanmış olur.

**Tablo 2.14** Prototip mast ve teorik ölçekli mast doğal frekansları (1/30)

Mod	Prototip [Hz]	Olmayı Beklenen [Hz]	Model [Hz]	Fark [%]
1	0,473	14,19	13,394	5,609584214
2	0,473	14,19	13,394	5,609584214
3	2,8548	85,644	81,814	4,472000374
4	2,8548	85,644	81,814	4,472000374
5	4,3248	129,744	150,41	-15,92828955
6	7,5543	226,629	220,08	2,889744913
7	7,5544	226,632	220,08	2,891030393
8	12,91	387,3	407,6	-5,241414924
9	13,719	411,57	407,6	0,964598975
10	13,719	411,57	449,2	-9,143037636
11	16,486	494,58	467,83	5,408629544
12	19,488	584,64	594,29	-1,650588396
13	20,058	601,74	603,29	-0,257586333
14	20,718	621,54	626,06	-0,727225923
15	20,72	621,6	627,81	-0,999034749
16	20,789	623,67	627,81	-0,663812593
17	21,294	638,82	691,54	-8,252715945
18	22,917	687,51	742,16	-7,948975288
19	26,735	802,05	812,35	-1,284209214
20	27,91	837,3	860,39	-2,757673474

**Tablo 2.15** Prototip mast ve pratik ölçekli mast doğal frekansları (1/30)

Mod	Prototip [Hz]	Olmadı Beklenen [Hz]	Model [Hz]	Fark [%]
1	0,473	14,19	13,908	1,987315011
2	0,473	14,19	13,908	1,987315011
3	2,8548	85,644	84,062	1,847181355
4	2,8548	85,644	84,062	1,847181355
5	4,3248	129,744	131,85	-1,623196448
6	7,5543	226,629	223,11	1,552758032
7	7,5544	226,632	223,11	1,554061209
8	12,91	387,3	394,59	-1,882261813
9	13,719	411,57	407,4	1,013193381
10	13,719	411,57	407,4	1,013193381
11	16,486	494,58	485,08	1,920821707
12	19,488	584,64	620,61	-6,152504105
13	20,058	601,74	620,61	-3,135905873
14	20,718	621,54	654,39	-5,285259195
15	20,72	621,6	846,95	-36,2532175
16	20,789	623,67	846,95	-35,8009845
17	21,294	638,82	886,04	-38,69947716
18	22,917	687,51	908,68	-32,1697139
19	26,735	802,05	1070,3	-33,44554579
20	27,91	837,3	1070,3	-27,82754091

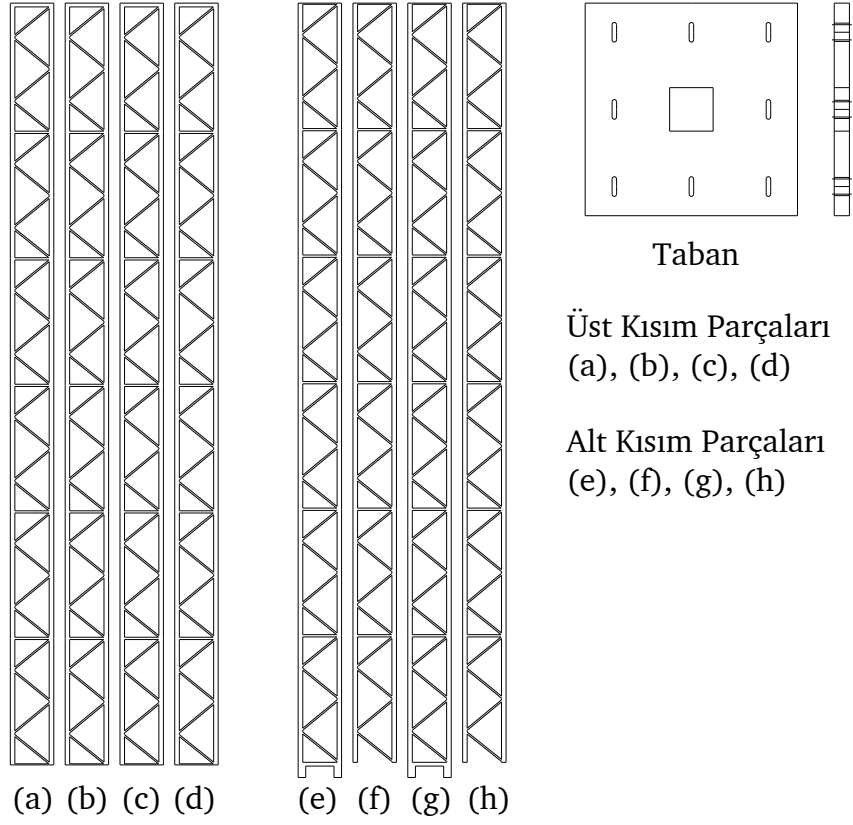


Bu bölümde öncelikle ölçeklendirme sonrası belirlenmiş olan kesit ölçülerine ve yapı boyutlarına göre fiziksel model tasarımı ve imalatından bahsedilmiştir. Daha sonra deneysel modal analiz hakkında bilgi verilerek fiziksel model üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları ile teorik çalışmalar kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar programı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modelinin yapıyı ne derecede temsil ettiğinden bahsedilmiştir.

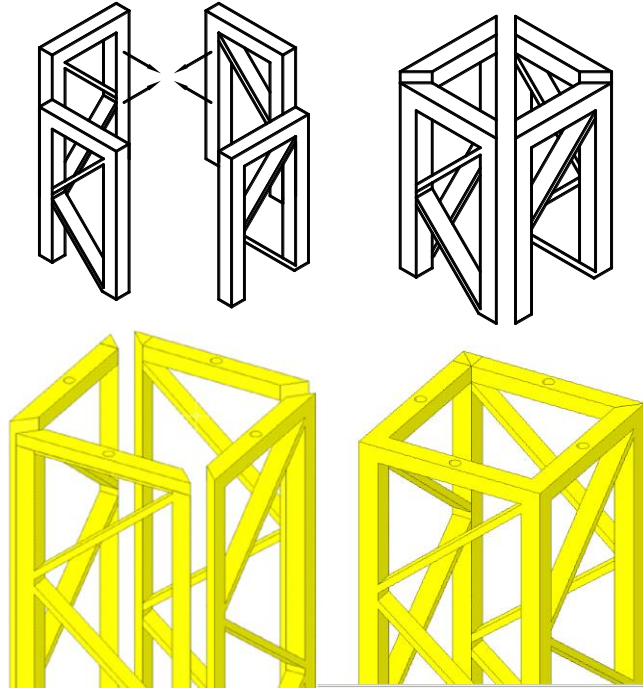
### 3.1 Model Tasarımı ve İmalatı

Deneysel modal analiz kapsamında kullanılacak olan fiziksel model 2.8.6 Ölçekleme Metodu Yaklaşımı başlığında belirtildiği üzere 1/30 ölçekli model bilgileri kullanılarak imal edilmiştir. Yapılan teorik çalışmalarda en az hata ile kule mastını temsil eden 1/30 ölçekli modelin imal edilmesinde referans olarak alınan kesit bilgileri Tablo 2.13'de görülmektedir. Kuleyi oluşturan üç farklı kesit dolu kesit olarak tanımlanmış ve imalat yöntemi de düşünülerek pratik ölçüler olarak adlandırılan son ölçüler belirlenmiştir. Kule mastı 6 mm sabit kalınlığa sahip çelik bir plakanın lazer ile kesilip kaynak ile birleştirilmesi ile imal edilmiştir. 2 metre uzunluğuna sahip kule mastı toplam 8 ayrı parça olarak planlanmıştır.

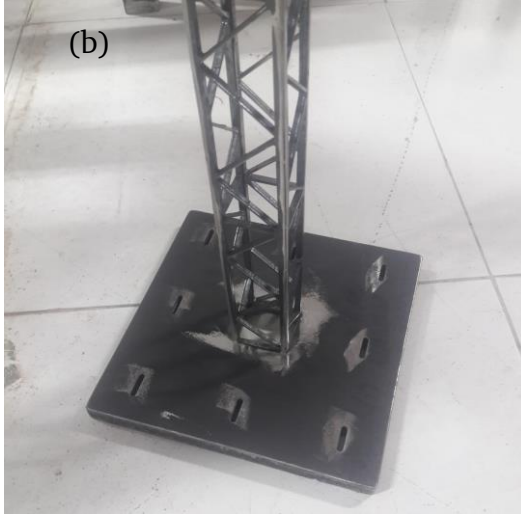
Plakadan kesilen bu parçaların ilgili kenarlarına 45 derecelik pah kırılarak (a) ile (e), (b) ile (f), (c) ile (g) ve (d) ile (h) birleştirilmiş ve ek 4 parça haline getirilmiştir. Bu 4 parça da Şekil 3.2'de gösterildiği üzere hizalanarak kaynak yapılmış ve birleştirilmiştir. Şekilde mastın sadece üst kısmı gösterilmektedir. Kaynak ile birleştirilen mast zemini temsil eden ve fiziksel modelin zemine sabitlenmesinde kullanılan 20x20x2 cm ölçülerinde bir plakaya (Taban) kaynaklanarak son haline getirilmiştir. 1/30 ölçekli fiziksel model Şekil 3.3'de görülebilmektedir.



Şekil 3.1 Ölçekli kule mastı kısımları



Şekil 3.2 Kule mast parçalarının birleştirilmesi



Şekil 3.3 1/30 Ölçekli fiziksel model(a)Genel görünüş (b)Alt (c)Üst

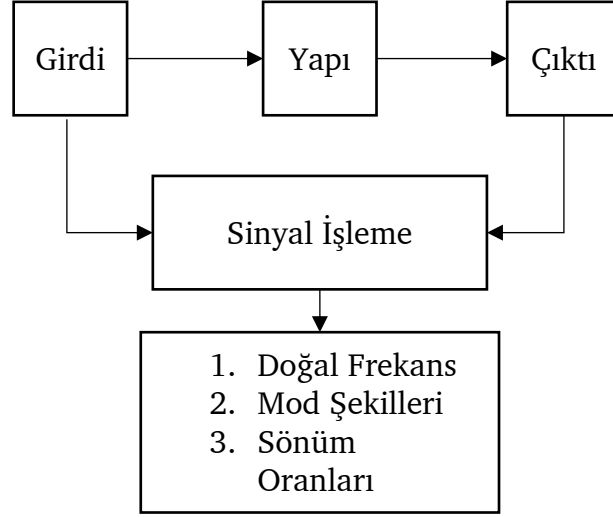
### 3.2 Deneysel Modal Analiz Çalışmaları

Modal analizin tanımı ve kapsamı konusundaki teorik bilgi Bölüm 2.1’de verilmişti. Bu bölümde ise deneysel yöntemlerle bir yapının doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranlarının nasıl elde edileceği hakkında kısaca bilgi verilecektir.

Yapısal dinamik analiz, bir yapının etki eden yüklemelere karşılık nasıl tepki vereceğinin incelenmesini konu almaktadır. Bu yükler, yapının dinamik

karakteristiğine göre farklı frekans değerlerinde tepkiye sebep olabilirler. Yapıya ait modların her biri sistemin toplam cevabına farklı seviyelerde katkıda bulunabilmektedir. Bu farklı seviyedeki katkıların sistemin toplam cevabına nasıl etki edeceğinin cevabı modal analiz ile bulunabilmektedir[68]. Modal analiz teorik veya deneysel olarak yapılabilmektedir. Teorik analiz, fiziksel bir yapı veya donanım gerektirmemesi açısından avantajlı gözükse de analizin sonucu, modelleme esnasında yapılan kabullerin gerçeğe ne kadar yakın olmasına bağlıdır. Mühendislik, bir anlamda doğayı anlamaya ve onu günlük yaşama uyarlamaya dayanan bir bilim dalıdır. Bu nedenle hesaplamalar, yaklaşımlar, kabul veya ihmal edilen durumlar doğadaki karşılığını bulmalıdır[93]. Bu sebeple modelleme aşamasındaki yaklaşım ve kabullerde yapılabilecek hatalar gerçek olmayan sonuçların elde edilmesine sebep olabilir. Aynı zamanda fiziksel yapıların sahip oldukları geometriler nedeniyle teorik modellerinin gerçeğe en yakın şekilde kurulması da mümkün olmayabilmektedir. Örneğin, gerçek modelin imalatına ait teknik detaylar teorik modellerde çeşitli kabuller ve basitleştirmeler yapılarak oluşturulmaktadır veya fiziksel modelin sahip olduğu sınır şartları da yine çeşitli varsayımlar ile teorik modele tanımlanmaktadır. Bu gibi çeşitli hata kaynakları, teorik olarak modal analizi yapılan modelin ayrıca deneysel olarak da modal analizinin yapılmasını gerektirmektedir. Aynı zamanda gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda kullanılacak bu teorik modelin doğru kurulup kurulmadığının sorgulanması adına da deneysel modal analiz ile model doğrulamanın yapılması önem arz etmektedir. Diğer bir yandan teorik olarak modellenmesinin mümkün olmadığı yapı veya sistemler için deneysel olarak modal analizin yapılması daha uygun olmaktadır.

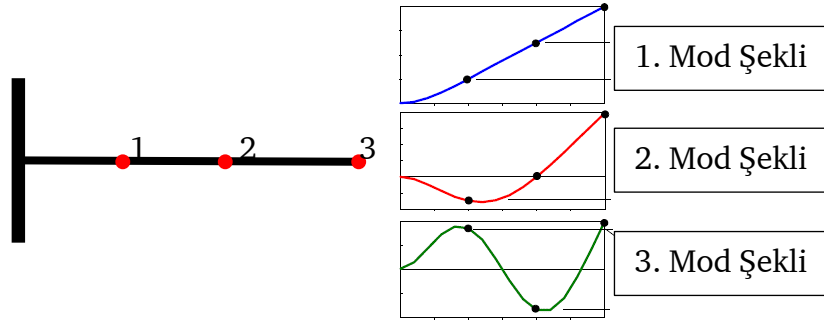
Deneysel modal analiz, bir yapıyı dışarıdan değeri ölçülebilen bir kuvvet ile tetiklenerek yapı üzerindeki belirli noktalardan alınan cevapların değerlendirilmesi temeline dayanmaktadır. Yapıya etki eden kuvvet girdisi, yapıdan alınan yer değiştirme ve ivme gibi çıktılar ve bu girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi anlamlandırarak sunan sinyal işleyiciler yardımıyla deneysel modal analiz çalışmaları yapılmaktadır.



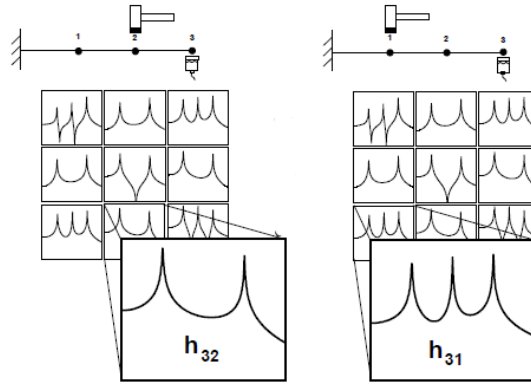
**Şekil 3.4** Deneysel modal analiz

İlgilenilen yapıyı tetikleyip yapıda titreşim meydana getirmek için darbe çekiçleri kullanılmaktadır. Bu noktada yapıya uygun bir darbe çekicinin seçilmesi önemlidir. Bu seçimin yapılmasında ilgili yapıyı tetikleyemeyecek kadar düşük bir kuvvet sağlayan veya yapının yapısal olarak bozulmasına sebep olacak kadar büyük bir kuvvet sağlayan çekiçlerden kaçınılarak yapının herhangi bir yapısal bozulmaya maruz kalmadan tümüyle titreşmesine neden olabilecek bir çekiç seçilmelidir. Yine yapının boyutları ve özelliklerine göre tetikleme sonrası yapıdan yer değiştirme veya ivme gibi çıktıları sinyal işlemeye gönderecek konum ölçer ve ivmeölçer gibi ölçüm aletlerinin de yapının cevabını algılayabilecek seviyelerde olacak şekilde seçilmesi hatasız veya kayıpsız bir sinyal alınarak en doğru bir şekilde bu sinyallerin işlenmesi adına önemlidir. Aynı şekilde girdi ve çıktı sinyallerinin işlenmesinde kullanılan sinyal işleme birimi ve bu birimle beraber çalışan ve işlenen sinyalleri anlamlı grafikler yardımıyla sunan programların ayarlarının yapılması, kullanılması da yapı hakkında doğru bilgilerin alınması konusunda dikkat edilmesi gereken noktalardan birisidir. Sinyal işleme birimi ile zaman alanındaki girdi ve çıktı sinyalleri Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform) ile frekans alanında tanımlanır ve frekans cevap fonksiyonları ile yapının doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi özellikleri hakkında bilgi verecek anlamlı grafikler elde edilmektedir. Zaman alanından frekans alanına dönüşüm ile elde edilen fonksiyon gerçek ve sanal kısımlar ile ifade edilen

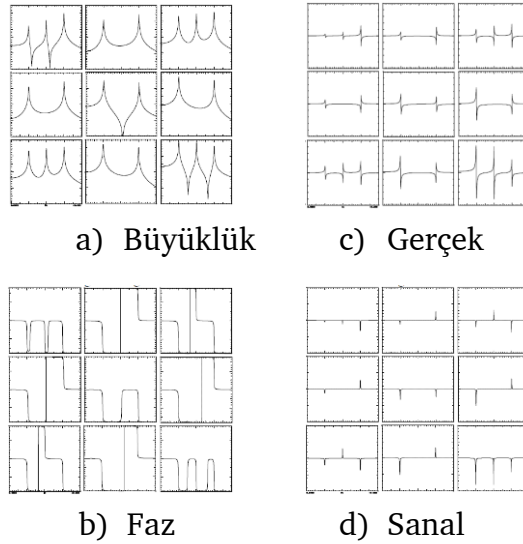
karmaşık sayılardan oluşmaktadır. Sayının gerçek kısmı fonksiyonun büyüklüğünü, sanal kısmı ise faz bileşenini oluşturmaktadır. Şekilde ankastre bir çubuk ve bu çubuğun ilk 3 moduna ait mod şekilleri görülmektedir. Numaralandırılmış noktalardan uygulanan darbe ve yine aynı noktalardan alınacak cevaplar ile frekans cevap fonksiyonları elde edilebilmektedir. Tek bir darbe çekici ve tek bir ivmeölçer ile yapılacak deneysel modal analizde iki farklı yaklaşım ile grafikler elde edilebilir. Yapının durumuna, kullanılan ölçüm aletlerinin yapı üzerinde belirlenen noktalara erişimi, sabitlenmesi veya yapıdan alınacak cevaba etki derecelerinin durumuna göre ya ivmeölçer sabit bir noktada tutulur ve farklı noktalardan çekiç ile darbe uygulanır ya da hep aynı noktadan darbe uygulanarak farklı noktalardan ivmeölçer ile cevaplar alınmaktadır. Yöntem farklı olsa da elde edilen cevaplar aynı olacağından yapı ve ölçüm aletlerinin durumuna göre iki yöntemden birisi seçilebilir. Frekans cevap fonksiyonları girdi ve çıktı noktaları gözetilerek tanımlanmaktadır. Örneğin 3 noktaya bağlanan ivmeölçer ve 1 noktasından uygulanan darbe çekici ile elde edilen frekans cevap fonksiyonu  $h_{3,1}$  ( $h_{\text{satır, sütun}}$ ) ile ifade edilmektedir. 3 farklı nokta kullanılarak ve farklı yöntemlerle yapılacak analizle toplamda 9 adet frekans cevabı elde edilmektedir. Bu 9 adet frekans cevap fonksiyonlarından oluşan 3 satır 3 sütunluk matris simetrik olduğundan tüm girdi/çıkı kombinasyonlarını kullanarak ölçüm yapmaya gerek duyulmamaktadır.



Şekil 3.5 a) Ankastre kiriş ve ölçüm noktaları b) Mod şekilleri [68]

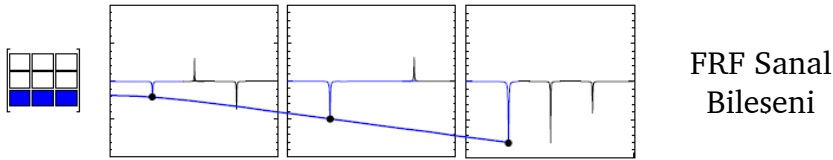


Şekil 3.6 Ankastre kiriş frekans cevap fonksiyonları [68]

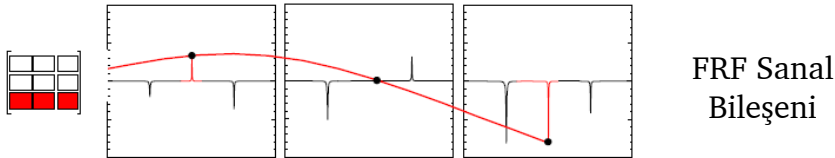


Şekil 3.7 Frekans cevap fonksiyonları [68]

Frekans cevap fonksiyonlarına bakarak mod şekilleri elde edilebilmektedir. Ankastre kirişe ait frekans cevap fonksiyonunun sanal kısmına bakılırsa her mod için mod şekilleri görülebilmektedir. Şekil 3.7'de sanal kısmı oluşturan matris formundaki grafiklerden 3. satırdakilere bakılırsa Şekil 3.5'deki 1. Moda ait mod şekli kabaca çizilebilir. Aynı şekilde 1. ve 2. satırdaki grafikler ile de aynı mod şeklinin çizdirilebildiği görülmektedir. Aynı yaklaşımla 2. Moda ait mod şekli için 3. Satırdaki grafiklere bakılırsa yine Şekil 3.5'deki 2. Moda ait mod şekli görülebilir. Fakat burada dikkat edilirse eğer  $h_{2,2}$  yani 2. Noktadan darbe çekici ile vurulup yine aynı noktadaki ivmeölçerden alınan veriler ile elde edilen frekans cevap fonksiyonunda 2. mod için bir büyüklüğün olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi kiriş üzerindeki 2 numaralı noktanın 2. Mod şeklinin oluşmasında tam olarak büküm noktasına denk gelmesidir. Buna mod noktası denir ve bir yapının mod şeklinin elde edilmesinde olumsuz bir durum oluşturmaması için bu mod noktalarına ölçüm aletlerinin bağlanmaması gerekmektedir. Bu noktaların belirlenmesi karmaşık bir yapı için pek mümkün olmadığından buna önlem olarak ölçüm noktalarının artırılması önerilmektedir. Ölçüm nokta sayısı artırılarak bir anlamda veri çözünürlüğü artırılmış ve sonuçların daha hassas olarak alınması sağlanmaktadır.



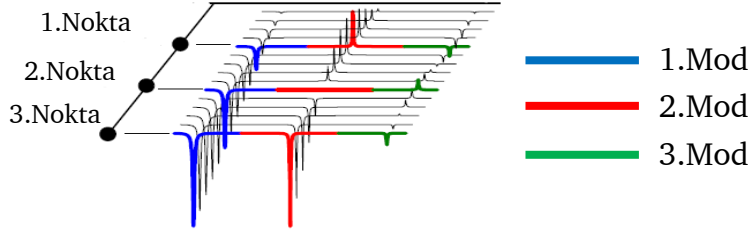
Şekil 3.8 Frekans cevap fonksiyonu ile 1.modun çizdirilmesi[68]



Şekil 3.9 Frekans cevap fonksiyonu ile 2.modun çizdirilmesi[68]

Şekil 3.10'de ölçüm yapılan nokta sayısının artırılması ile daha fazla sayıdaki frekans cevap fonksiyonlarının kullanılması ile mod şekillerinin elde edilmesi görülebilmektedir.

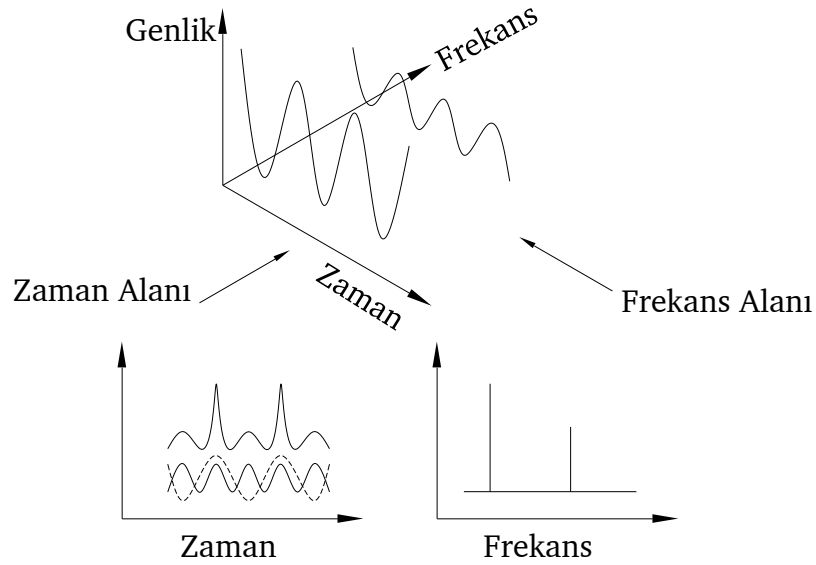




**Şekil 3.10** Nokta sayısının artırılması ile mod şekillerin çizdirilmesi

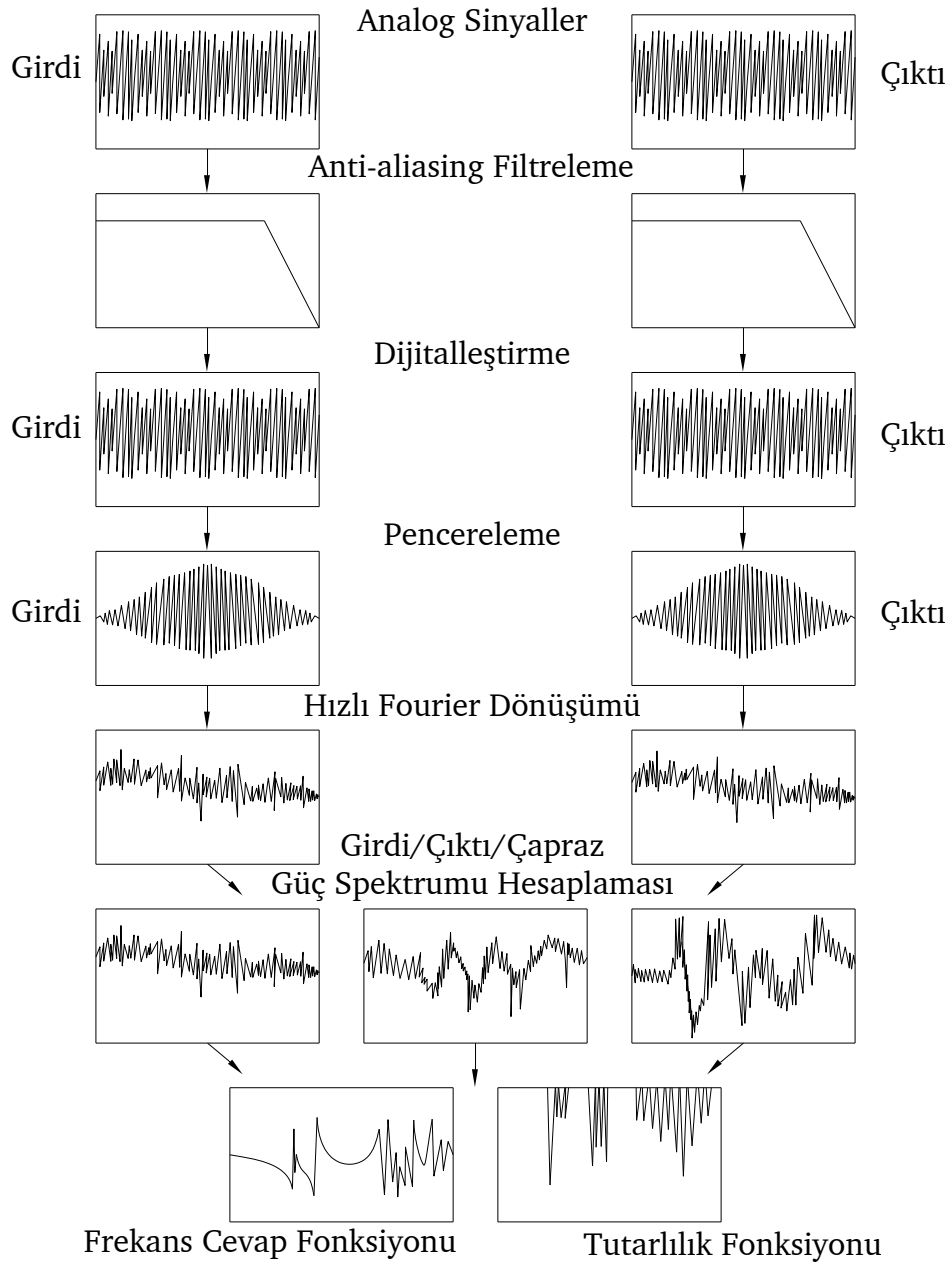
Deneysel moda analizinin yapılmasında giriş ve çıkış sinyallerinin arasındaki oran olarak nitelendirilen frekans cevap fonksiyonunun elde edilmesi en önemli etmendir. Girdi ve çıktı sinyallerinin alınması, işlenmesi ve anlamlı grafikler halinde sunulması ile ilgili şematik gösterimde sunulmuştur(Tablo 3.1).

Yapılara uygulanan girdi ve yapılardan alınan çıktılar yer değiştirme, hız veya ivme olarak zaman alanında veya frekans alanında tanımlanabilmektedir. Zaman alanı zamanla değişen genliklerden oluşurken frekans alanı ise frekansla değişen ve büyüklük, faz bileşenlerine sahip sinüs ve cosinüs dalgalarından oluşmaktadır.



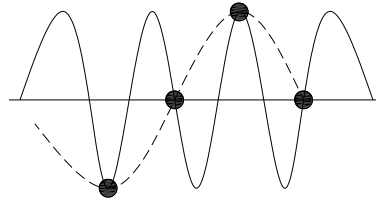
**Şekil 3.11** Hızlı fourier dönüşümü [94]

**Tablo 3.1** Girdi/Çıktı sinyal dönüşümleri [68]

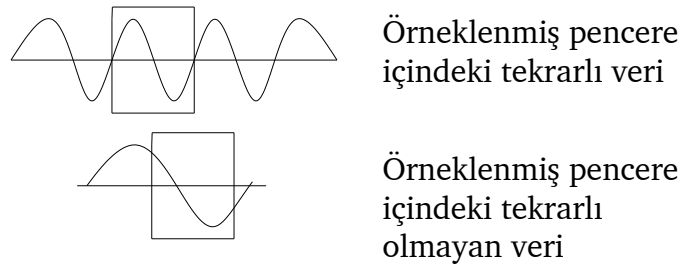


Yapılan ölçümler her zaman analog olarak (zaman alanında) yapılmaktadır ve frekans alanına dönüştürülmek zorundadırlar. Bu sebeple hızlı fourier dönüşümüne gerek duyulmaktadır. Hızlı fourier dönüşümü örneklenmiş bir sinyale uygulanan dönüşüm işlemidir. Bu noktada analog sinyallerin örneklenme hızları önem kazanmaktadır. Örneklemenin amacı analog sinyal olarak elde edilen bir dalgaının genliğini kaybetmeden belirli anlarda kayıt alınması ve bu kayıtlar ile

gerçek sinyalin hatasız bir şekilde dijital olarak temsil edilebilmesidir. Bu sebeple örnekleme hızının gerçek sinyali hatasız temsil edecek şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu gereklilik Nyquist örnekleme teoremiyle, örneklenmiş bir sinyalde herhangi bir bilgi kaybedilmemesi için ilgilenilen frekansın en az iki katı bir frekans oranında örnekleme yapılmalıdır şeklinde ifade edilmektedir. Yeterli örnekleme hızı sağlanamaz ise Şekil'deki gibi gerçek sinyali hatalı bir şekilde tanımlayan bir sinyal dalgası elde edilir. Bu duruma “aliasing” denir ve bu durumun önüne geçilmesi için sinyal işleme birimlerinde düşük frekansların geçmesine yüksek frekansların ise tutulmasına yarayan ve “anti-aliasing” denen elektronik filtreleme işlemi uygulanmaktadır[94]. Filtreleme sonrası ise analog sinyaller Analog-dijital dönüştürücüler ile dijital sinyale dönüştürülerek hızlı fourier dönüşümü için kullanılacak hale getirilmektedir.



**Şekil 3.12** Yetersiz örnekleme hızı örneği

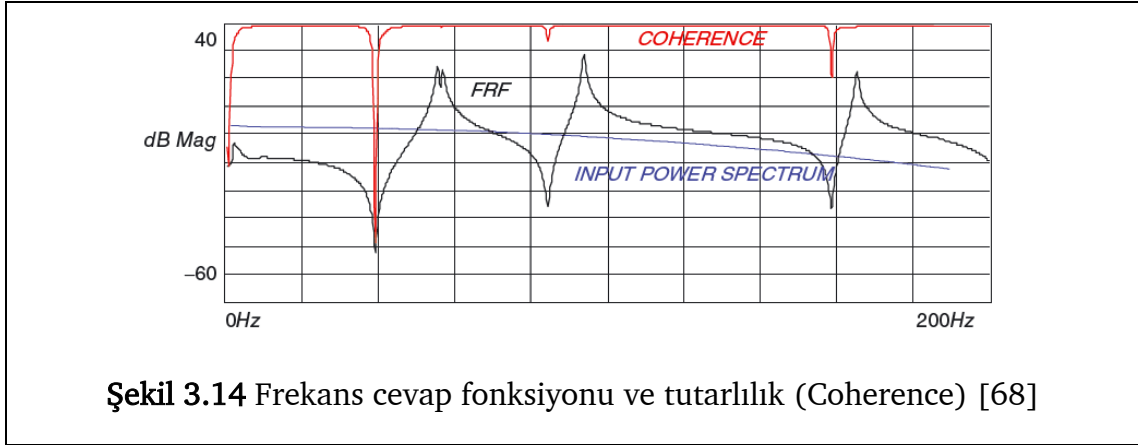


**Şekil 3.13** Pencereleme

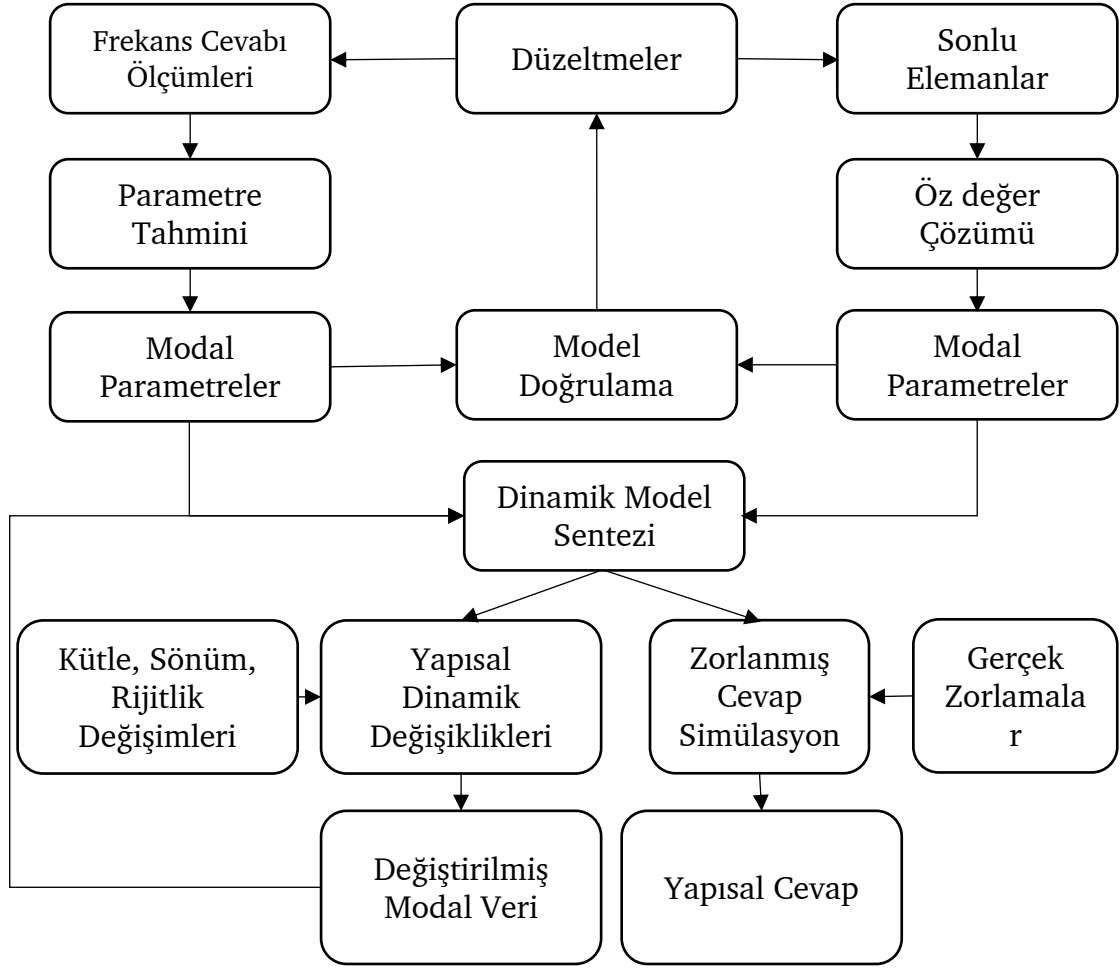
Hızlı fourier dönüşümünün temelinde verilerin periyodik olarak tekrarlanması şartı mevcuttur. Böyle bir tekrar söz konusu olmadığı durumda ki çoğunlukla olmamaktadır, dönüşüm yapılırken sızıntı adı verilen hata meydana gelmektedir. Bu hatayı en aza indirmek için ise ağırlıklandırma da denilen pencereleme işlemi yapılarak dönüşüme girecek sinyallerin yapay olarak periyodik tekrarlı hale

getirilmesi sağlanmaktadır. Bu amaçla kullanılan çeşitli pencereleme yöntemleri (Rectangular, Flat Top, Hanning, Hamming, Kaiser Bessel, Blackman, Barlett) sinyal işleme birimleri tarafından kullanılmaktadır.

Bu aşamadan sonra hızlı fourier dönüşümü girdi ve çıktı sinyallerine uygulanarak giriş, çıkış ve çapraz spektrum fonksiyonlarını ifade eden grafikler elde edilmektedir. Bu fonksiyonlar yardımıyla da frekans cevap fonksiyonu ve giriş ile çıkış sinyalleri arasındaki ilişkiyi sunan, ölçülen verilerin ne kadar kaliteli olduğuyla ilgili bilgi veren, tutarlılık olarak adlandırılan fonksiyon elde edilmiş olur. Sonuçta, frekans cevap fonksiyonu ve bileşenleri ile yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları hesaplanırken ve bu değerlerin hesaplanmasında kullanılan fonksiyonların güvenilirliği sunulmaktadır.



Yapılan deneysel modal analiz çalışmaları ile yapıya ait karakteristik özellikler belirlenerek teorik olarak kurulan modelin doğrulanması, güncellenmesi yapılabilmektedir. Bu sayede tekrar eden deneysel çalışmalara gerek duymaksızın doğrulanmış bir teorik model ile daha kısa sürede, daha az maliyet ile istenilen koşullarda bir çok senaryo kurgusuyla ilgili yapıların test edilmesi mümkün olabilmektedir. Genel olarak dinamik modelleme sürecini özetleyen aşamalar Şekil 3.15'de görülebilmektedir.



Şekil 3.15 Genel olarak dinamik modelleme süreci

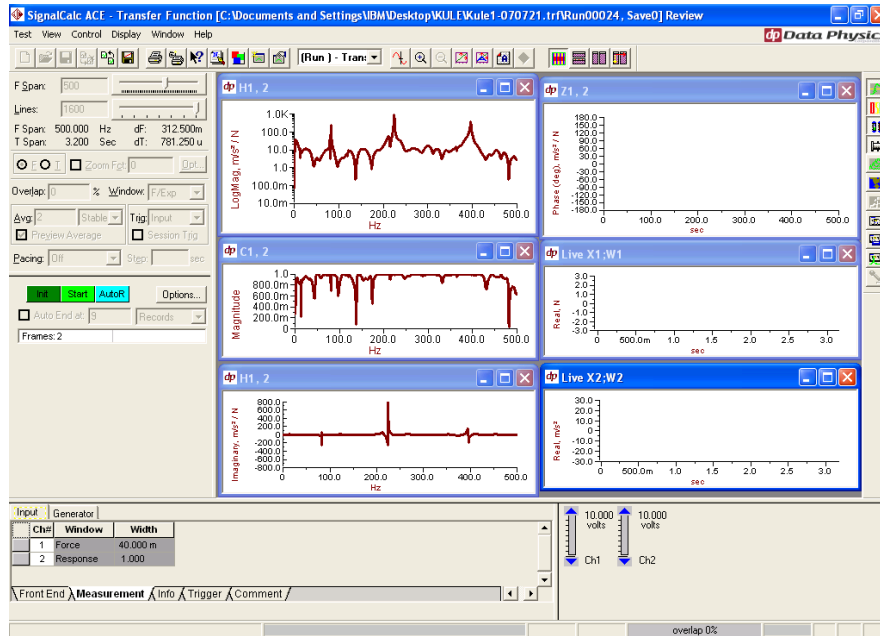
### 3.3 Deneysel Çalışmalardan Çıkarılan Sonuçlar

Deneysel çalışma kapsamında K tipi mast yapısına sahip 1/30 ölçekli fiziksel model kullanılarak deneysel modal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada Brüel&Kjær marka Type 4507 tek eksenli bir ivmeölçer, Brüel&Kjær marka 8210 kodlu darbe çekici, Data Physic firmasına ait veri toplayıcı ile aynı firmaya ait SignalCalc ACE isimli yazılım kullanılmıştır.



Şekil 3.16 Darbe çekici ve tek eksenli ivmeölçer

Yapılacak testler öncesinde ivmeölçerin ve darbe çekicinin teknik bilgileri programa girilerek hangi aralıkta ölçüm yaptıkları tanıtılmıştır. Daha sonra ilgilenilen frekans aralığı ve bu aralıktaki frekans çözünürlüğü tanımlanmıştır. Her bir ölçüm için 2 farklı deneme yapılarak ortalamaları alınmıştır. Sağlıklı ölçüm almak adına hem darbe girişi fonksiyonuna hem de çıkış fonksiyonuna ayrı ayrı pencereleme uygulanmıştır. Program ara yüzü ve yapılan ayarlamalar Şekil 3.17’de görülebilmektedir.



Şekil 3.17 Program ara yüzü

Modal analiz testleri öncesinde yapı üzerinden ölçüm alınacak noktalar işaretlenmiştir. İşaretlenen noktalara ait numaralandırmalar Şekil 3.18’de görülmektedir.



Şekil 3.18 Fiziksel model ve deney kurulumu

Daha önce ifade edildiği üzere iki farklı yaklaşım ile modal analiz yapılabilmektedir.

- (i) İvmeölçerin sabit tutularak çekiç ile farklı noktalardan darbe uygulanması.
- (ii) Çekiç ile tek bir noktadan darbe uygulayarak ivmeölçerin farklı noktalara bağlanması.

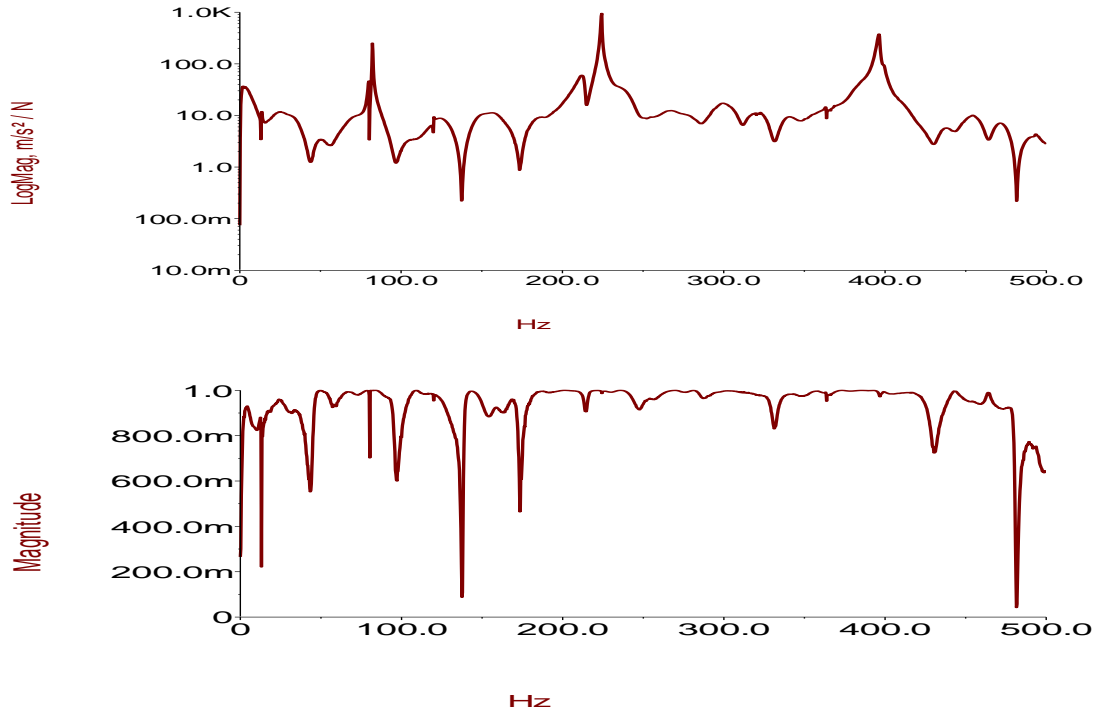
Deneyisel çalışmada her iki yöntem de uygulanmış ve bu iki yönteme ait 6x6 boyutlarındaki transfer fonksiyonu grafikleri elde edilmiştir. Yapı her iki ekseninde de simetrik olduğundan sadece tek bir ekseninde, Şekil 3.18’de görülebilen y ekseninde ölçümler yapılmıştır. Fakat burada tüm sonuçlara yer verilmeyecektir. Bunun yerine ivmeölçerin bir noktada sabit tutularak diğer noktalardan darbe çekici ile vurulması sonucu elde edilen transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu cevaplarına yer verilecektir. Bu sonuçlar ilgili yapının doğal frekanslarının tespiti için yeterlidir.

**Tablo 3.2** Deneysel ölçüm tablosu

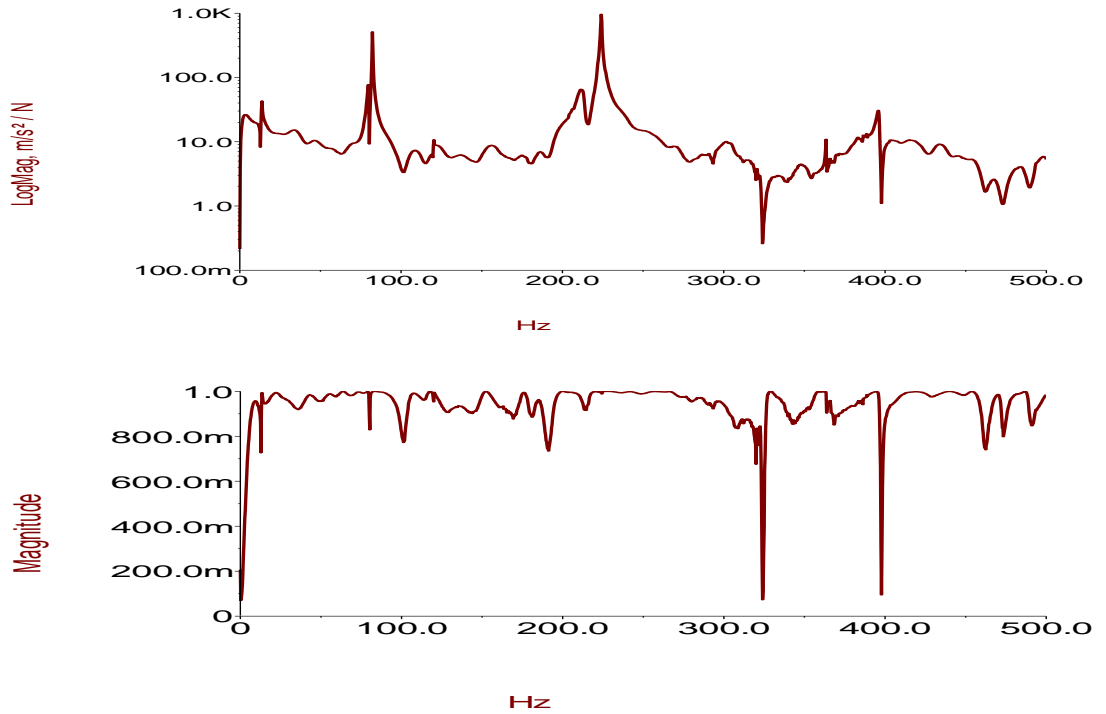
İvmeölçer/Çekiç	1	2	3	4	5	6
1	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...
4	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	6.Ölçüm
5	...	...	...	...	...	...
6	...	...	...	...	...	...

İvmeölçerin 4 numarada sabit tutularak farklı noktalardan çekiç ile vurulması sonucu elde edilen grafikler şu şekildedir.

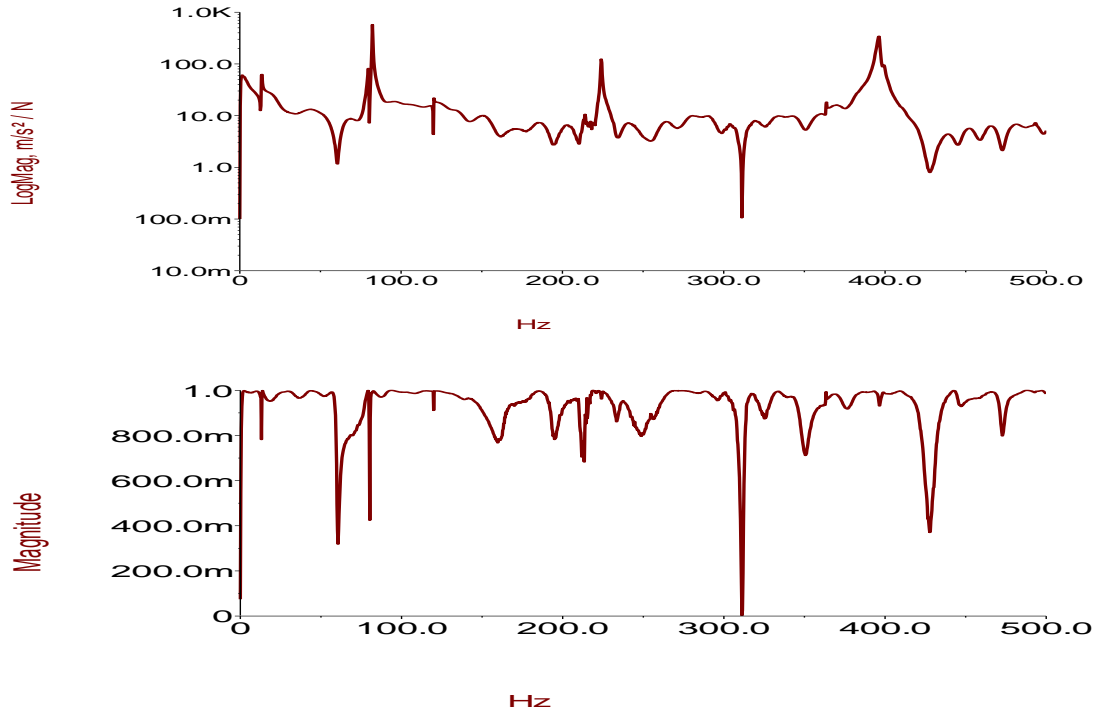




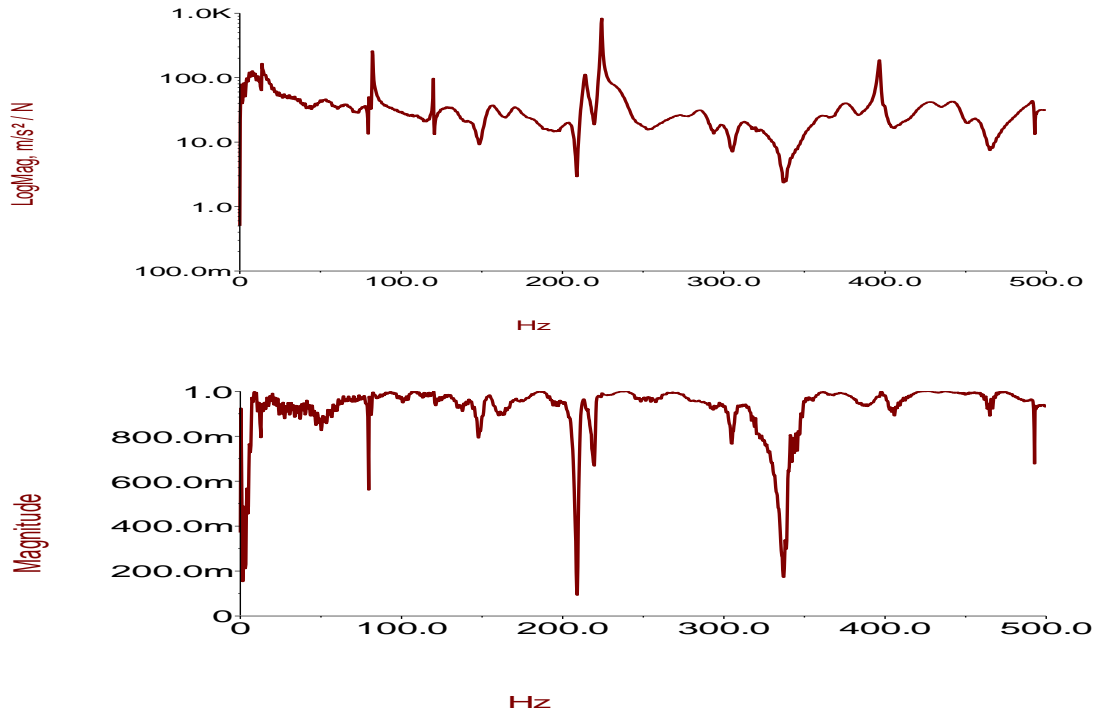
Şekil 3.19 Ölçüm 1'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu



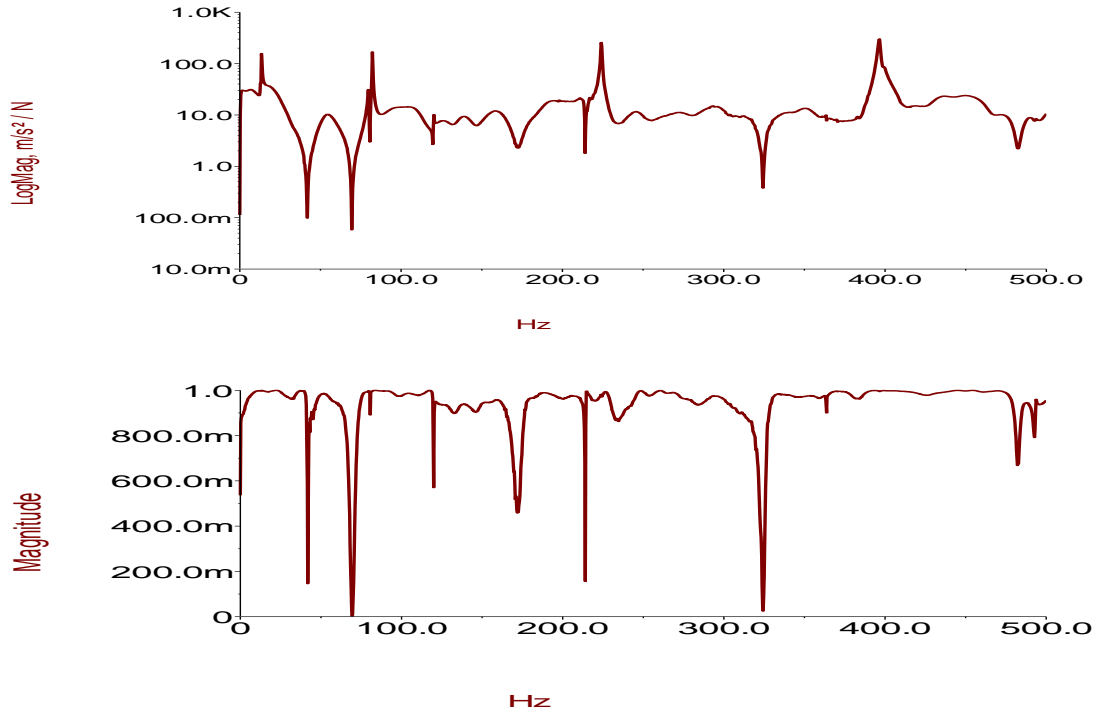
Şekil 3.20 Ölçüm 2'ye ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu



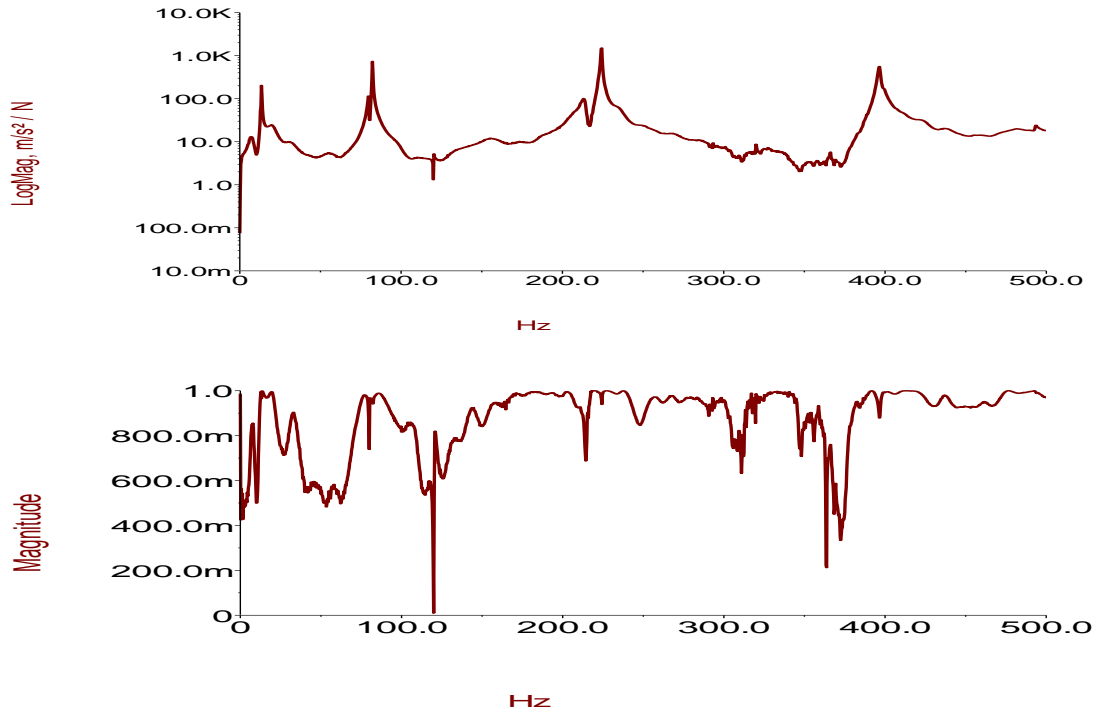
Şekil 3.21 Ölçüm 3'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu



Şekil 3.22 Ölçüm 4'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu



Şekil 3.23 Ölçüm 5'e ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu



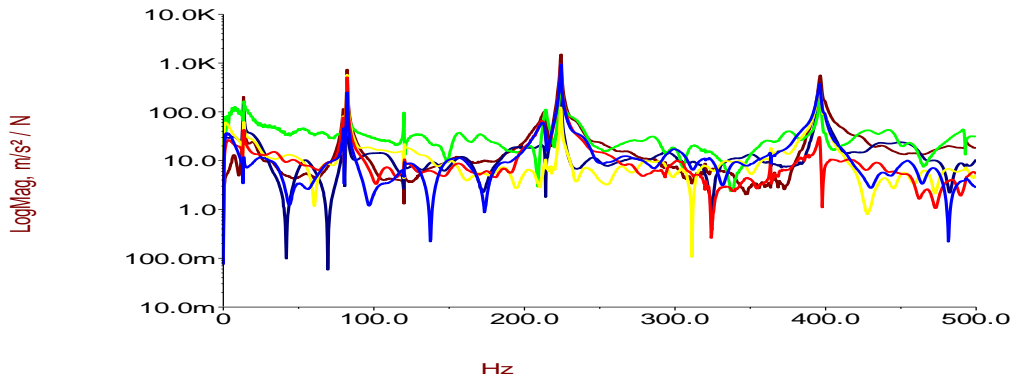
Şekil 3.24 Ölçüm 6'ya ait transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu

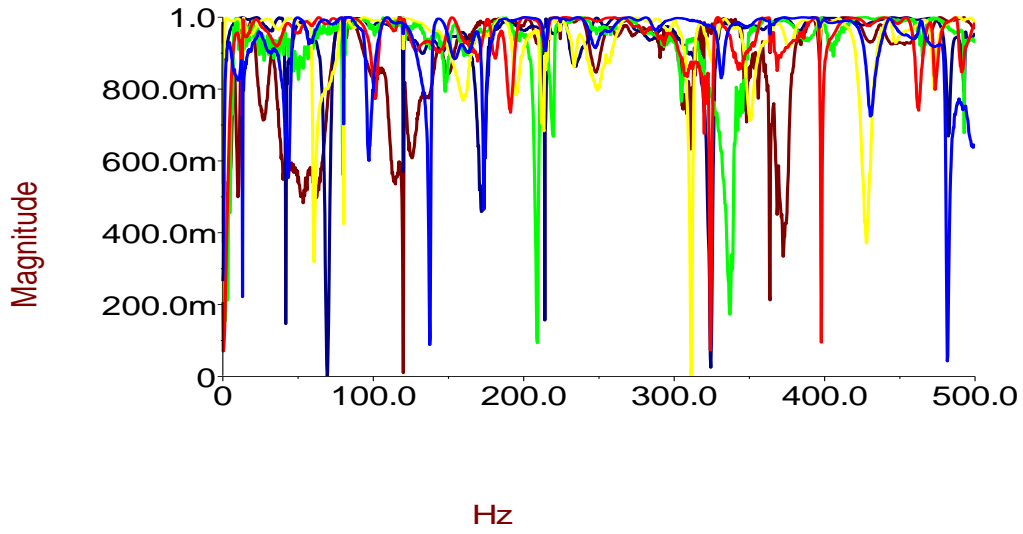
Bu grafikler beraber değerlendirildiklerinde elde edilen doğal frekanslar ise aşağıdaki tabloda listelenmiştir. Doğal frekanslar tespit edilirken transfer fonksiyonundaki tepe noktalar ve bu tepe noktaları arasında meydana gelen çukurlara karşılık gelen tutarlılık fonksiyonundaki değişimler temel alınmıştır. Tablo 3.3'deki değerler ölçekli fiziksel modelin tek bir doğrultudaki doğal frekanslarını göstermektedir. Yapı her iki ekseninde de simetrik olduğundan tek bir ekseninde ölçümlerin yapılması yeterli görülmüştür.

**Tablo 3.3** Deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar

Mod No	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 2	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
	[Hz]					
1	13,438	13,750	13,438	13,750	13,438	13,438
2	82,188	82,188	82,188	82,188	82,188	82,188
3	120,313	120,313	120,313	120,000	120,313	120,313
4	224,375	224,063	224,063	224,375	224,375	224,063
5	396,250	395,938	395,938	396,563	396,563	396,563

Ölçümlere ait tüm grafikler bir arada olacak şekilde 'de görülebilmektedir. Bir arada ele alınan frekans cevap fonksiyonlarına bakıldığında ilgili frekans aralığı için beş adet tepe noktasının oluştuğu net bir şekilde görülmektedir.



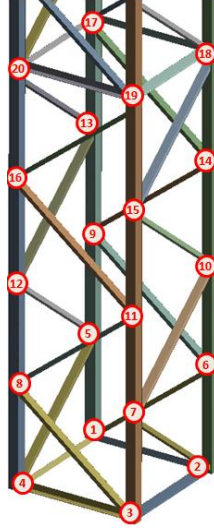


Şekil 3.25 6 Ölçüme ait (a) transfer fonksiyonu ve (b) tutarlılık fonksiyonu

### 3.4 MATLAB İle Sonlu Elemanlar Programının Çalıştırılması ve Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması

Bu bölümde, Bölüm 2’de oluşturulan sonlu elemanlar programın doğrulanması için deneysel çalışmalardan alınan sonuçlar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel modal analiz çalışmalarında yalnızca doğal frekanslar belirlenebildiği için mod şekilleri yalnızca teorik çalışmalardan elde edilip sunulmuştur.

Öncelikle benzerlik teoremi ile ölçeklenerek imal edilen kule kren mastının programa tanıtılması için eleman düğüm noktaları ile eleman kesit ve malzeme özelliklerini içeren girdi matrisleri hazırlanmıştır. Masta ait numaralandırma örneği Şekil 3.26’da görülmektedir. Sadece alt tarafa ait sunulan numaralandırma sonucunda toplam 196 adet düğüm noktası elde edilmiştir. Bu düğüm noktalarıyla oluşturulan yapıda ise toplamda 436 adet eleman vardır. Buradaki numaralandırma ve bu numaralarla oluşturulan elemanlara göre koordinat matrisi ve eleman bağlantı matrisleri oluşturulmuştur. Koordinat matrisi 196x3 ve eleman bağlantı matrisi 436x13 boyutlarındadır. Malzeme olarak St37 malzeme kullanıldığından elastiklik modülü  $200 \times 10^9$  Pa ve kayma modülü  $77 \times 10^9$  Pa olarak alınmıştır.



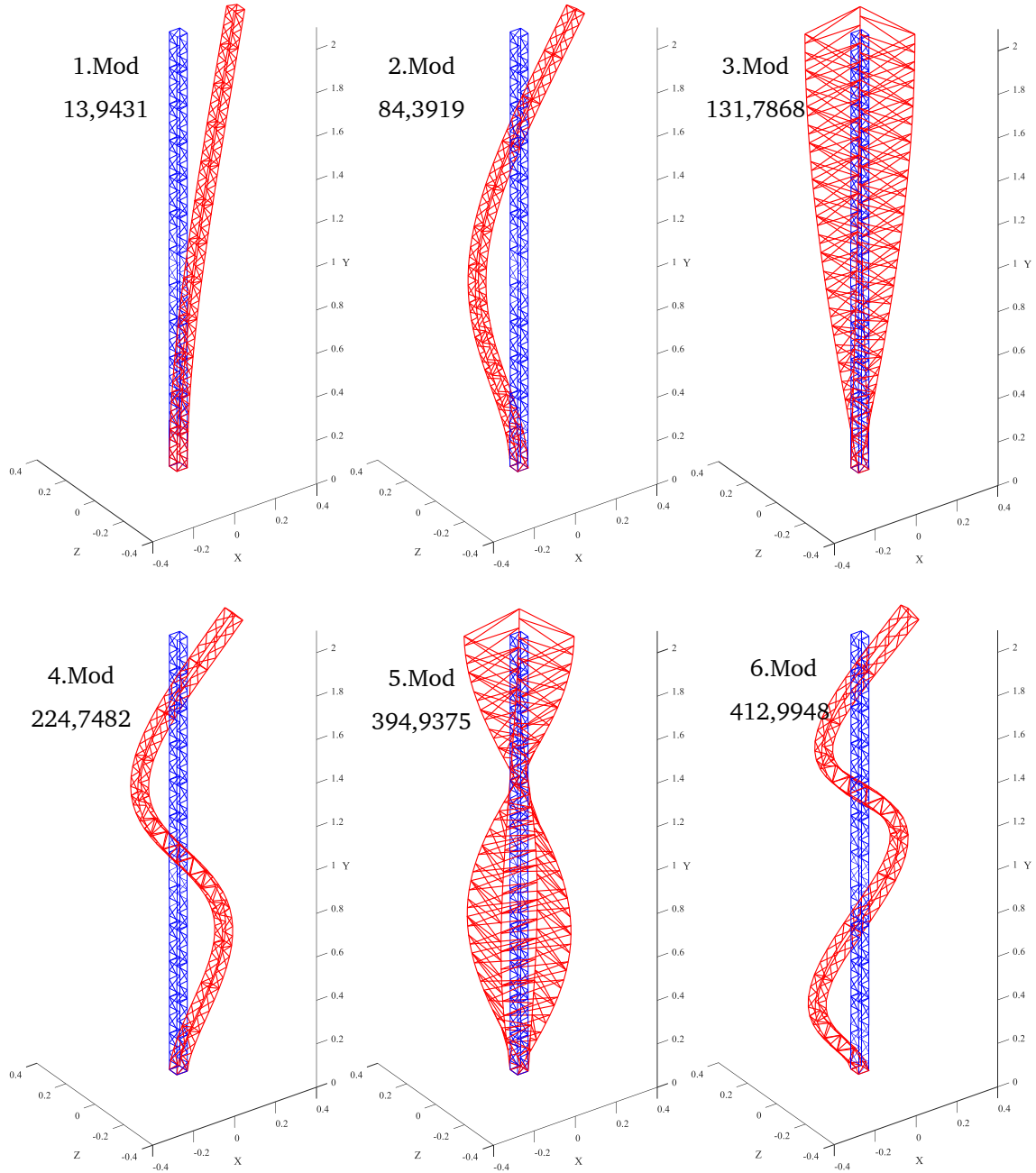
**Şekil 3.26** Masta ait elemanların numaralandırılması

1, 2, 3 ve 4 numaralı düğüm noktalarının sabitlenerek modal analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Tablo 3.4’de yapıya ait ilk 10 doğal frekans ve bu modların eksenlere bağlı olarak kütle katılım faktörleri görülmektedir.

**Tablo 3.4** 1/30 ölçekli model modal analiz sonuçları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>1</b>	13,9431	0,072	1,53	1,2E-13	0,148728	2,36	1,50E-26	0,02212
<b>2</b>	13,9431	0,072	-0,16	-3E-13	1,535267	0,02	1,50E-25	2,357044
<b>3</b>	84,3919	0,012	-0,86	1E-13	-0,06604	0,74	1,01E-26	0,004361
<b>4</b>	84,3919	0,012	0,31	-1,7E-15	-0,80505	0,09	3,05E-30	0,648112
<b>5</b>	131,7868	0,008	9E-12	-0,00377	9,56E-12	9E-23	1,42E-05	9,13E-23
<b>6</b>	224,7482	0,004	0,11	-3,35E-13	-0,49771	0,01	1,12E-25	0,247715
<b>7</b>	224,7482	0,004	0,51	5,85E-13	0,024016	0,26	3,42E-25	0,000577
<b>8</b>	394,9375	0,003	-1E-10	-0,01212	-2,8E-12	1E-20	0,000147	7,77E-24
<b>9</b>	412,9948	0,002	-0,36	-2E-12	-0,04178	0,13	3,93E-24	0,001746
<b>10</b>	412,9948	0,002	0,02	-1,2E-12	-0,36594	0,00	1,55E-24	0,13391

Tablodan da görüleceği üzere aynı frekans değerine sahip modlar mevcuttur. Bu durum yapının simetrik olmasından kaynaklanmaktadır. Simetrik modlarda mod şekilleri de aynıdır fakat yalnızca mod şeklinin meydana geldiği hareketin doğrultusu farklıdır. Bu sebeple farklı 6 moda ait mod şekilleri sunulmuştur.



**Şekil 3.27** 1/30 ölçekli model mod şekilleri

1.mod şeklinde yapı baskın olarak XY düzleminde bir miktar da Z doğrultusunda hareket ederek salınım yapmaktadır. 2.modda yapı tek noktadan kırılmak suretiyle baskın olarak XY düzleminde ve bir miktarda Z doğrultusunda salınım yapmaktadır. 3.mod ve 5. mod şekilleri yapının simetri ekseninde dönme hareketi yapmasıyla gerçekleşen burulma modunu göstermektedir. 4. ve 6. mod şekilleri de 2. modda olduğu gibi eğilme modlarıdır ve yapı 2. Mod ile benzer salınımı sırasıyla 2 ve 3 noktadan kırılma yaşayarak yapmaktadır.

**Tablo 3.5** Teorik ve deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Mod No	Teorik Değerler [Hz]	Deneysel Değerler [Hz]	Fark [%]
1	13,9431	13,5420	2,88
2	84,3919	82,1880	2,61
3	131,7868	120,2608	8,75
4	224,7482	224,2190	0,24
5	394,9375	396,3025	-0,35

Tablo 3.5'den de görüleceği üzere teorik modelden alınan değerler ile 6 farklı ölçümden alınan değerlerin ortalaması alınarak yapılan karşılaştırmada ilgili doğrultudaki ilk 5 doğal frekanslar arasında 3 numaralı mod karşılaştırma dışı tutulursa en az %0,24 en fazla %2.88 fark mevcuttur. Bu karşılaştırmada 3 numaralı modun değerlendirilmemesinin sebebi bu modun yapının burulma modu olması ve diğer modlar göz önünde alındığında kütle katılım faktörünün bu modu önemsiz kılacak miktarda düşük olmasıdır. Bu sonuçlara bakıldığında teorik modelin fiziksel modeli %0,35-2,88 farkla temsil ettiği söylenebilmektedir.

Bu farkın oluşmasındaki sebepler ise şu şekilde sıralanabilir.

- Teorik model kurulurken yapılan varsayımlar,
- Teorik modelde kullanılan kiriş elemanın eğilme, burulma gibi davranışlarının tam olarak modellenememesi,
- İmalat aşamasındaki süreçlerden dolayı fiziksel modelin teorik modele uygun olarak imal edilememesi,
- Teorik modelde kabul edilen malzeme ile fiziksel modelin imalatında kullanılan malzeme özelliklerinin farklılıklar içermesi vesaire.



## 4 KAFES SİSTEMLERİ

---

Bu bölümde farklı tipteki kafes tipleri ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmiş ve teorik çalışmalar kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle MATLAB aracılığı ile oluşturulan ve deneylerle doğrulanmış programın farklı kafes tipleri ve farklı deprem girdileri gibi senaryolarla çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Kule krenler, daha az ağırlık ile işlevini yerine getirme, rüzgâr etkisinden en az derecede etkilenme gibi sebeplerden dolayı yapısal olarak kafes yapılı olarak tasarlanmaktadır. Bu bölümde kule kısmını oluşturan kafes yapının farklı örgü tipleriyle oluşturulmasının sismik performansına etkileri incelenecektir.

Daha önceki bölümlerde tek serbestlik dereceli bir yapının sismik cevabının nasıl hesaplanacağından bahsedilmişti (Denklemler(2.79),(2.80),(2.81)).

Bu denklemlerde bulunan cevap fonksiyonlarındaki değişkenlere bakarak yapının sismik cevabının değiştirilerek sismik performansın artırılmasında alınacak önlemler belirlenebilmektedir. Bu kapsamda yapıların deprem etkisinden en az etkilenmesi adına alınması önerilen bazı önlemler aşağıda sıralanmıştır.

- Deprem hareketinden yapıya aktarılan enerji geçişini engelleyen yalıtma sistemi kullanmak,
- Kütle sönümleyicileri gibi aygıtlar aracılığıyla ekstra bir sönümleme mekanizması işlevi görmek üzere bir denetim kuvveti uygulayan denetim aygıtları veya sistemleri kullanmak,
- Malzemelerin enerji soğurma kabiliyetini kullanan kontrol cihazları veya sistemleri.
- Yapının doğal periyodunu, deprem yer hareketlerinin baskın frekansından uzaklaştıran kontrol cihazları veya sistemleri kullanmak[95].

Son maddede belirtilen öneri yapının doğal frekansının tetikleyici frekanstan uzaklaştırılması önerisi yapının rijitliğinin değiştirilmesi olarak düşünülebilir.

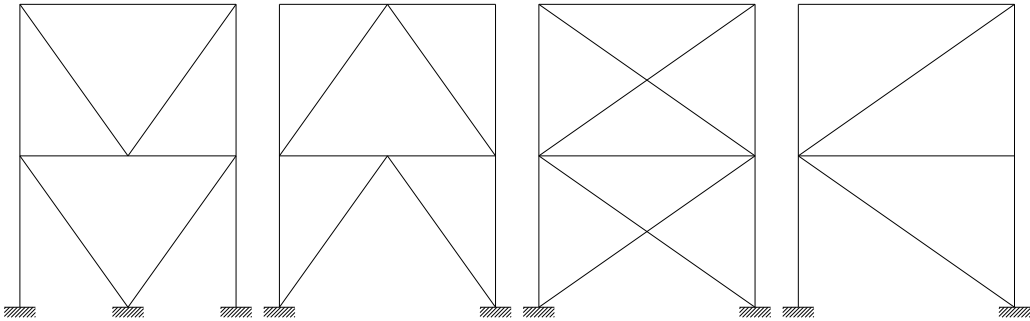
Ushio vd. de [92] yapmış oldukları çalışmada benzer bir öneride bulunulmuştur. Bu çalışmada da herhangi bir ilave sistem kullanmaksızın sadece yapının farklı örgü tipleri ile oluşturulmasıyla yani rijitliğinin değiştirilmesi ile sismik performansının nasıl etkileneceği araştırılmaktadır.

Çelik yapıli sistemlerin sismik performanslarının yapıyı oluşturan çelik elemanların malzeme ve geometrik özelliklerinin yanı sıra farklı elemanları birleşim tiplerine de bağılı olduğu belirtilmektedir. Çelikler sünek malzeme olmalarına rağmen çelik elemanlardan oluşan bütün sistemin de sünek olması, sünekliğin yalnızca malzemeye değil aynı zamanda sistem geometrisine de bağılı olduğundan her zaman beklenmemektedir [96]. Bu sebeple kullanılacak malzemenin özelliklerinin yanında kafes sistemin oluşturulmasında tercih edilen birleştirme yöntemlerinin de sismik performansa etki etmesi beklenmektedir.

Yanal kuvvetlere karşı yüksek dayanım ve rijitlik sağlamasından dolayı çapraz elemanlı çelik çerçeveler çeşitli binalarda veya endüstriyel yapılarda tercih edilmektedirler. Özellikle 1960'lı yıllardan sonra sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgelerde daha az malzeme ile gelen yükleri karşılama kabiliyetleri açısında çapraz destekli çerçevelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Deniz aşırı petrol arama platformlarında yapılmaya başlanan sismik analizlerle beraber zamanla bu konularda birçok çalışma yapılmış ve sismik etkilere karşı tercih edilecek çelik çerçeveli yapıların tasarımlarıyla alakalı öneriler, sınırlamalar gibi bilgiler geliştirilmeye başlanmıştır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalarla geliştirilen yönergelerden bazıları şunlardır. SEAOC (Structural Engineering Association of California) 1978 ve 1996, ICBO (Uniform Building Code) 1994, BSSC 1995 ve ANSI standartları AISC 342[97].

Kafes sistemde çapraz olarak konumlandırılan elemanlar yer çekimi kuvveti hariç yapıya etki eden rüzgâr ve deprem gibi yanal yükleri zemine aktarmak suretiyle yapıyı sabit tutarak yapının sallanmasını engellemede görev alırlar. Bu elemanlar yapının yanal doğrultuda sallanmaya veya kaymaya karşı direncini artıran elemanlardır. Yapı düşey ekseninde ne kadar yüksekse, sallanma eğilimi daha yüksek olduğu için rüzgâr yükü, deprem yükü gibi yanal yüklere karşı

hassasiyetleri de yüksek olur[96]. Deprem esnasında çapraz destekli çerçevelerin çapraz elemanlarındaki histerik davranış ile sünmesi ve enerjiyi harcaması beklenmektedir. Bu gereksinim ise bu elemanların basma durumunda burkulması ve çekme durumunda ise esnemesi ile sağlanmaktadır[97]. Çapraz olarak konumlandırılan destek elemanları zayıfsa, gelen yanal yükler neticesinde burkulma meydana gelerek yapının hasara uğramasına yol açabilmektedir. Bu sebeple deprem esnasında yapıların sağlam kalması için çapraz elemanların dayanımdan ve rijitlikten kaybı olmaksızın lineer olmayan yer değiştirmelere izin vermeleri gerekmektedir. Tasarımdaki genel yaklaşım plastik şekil değişiminin sadece çapraz destek elemanlarda meydana gelmesinin sağlanarak kolon veya kirişlerde herhangi bir hasar oluşumunu engellemektir. Destek elemanlarının yanal bu tarz yüklerle karşı rijit olması, direnç göstermesi için farklı tiplerde elemanların kullanıldığı görülmektedir[26], [97] [29], [30]. Literatürde kullanılan en temel kafes yapıları Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu yapılar eş merkezli çapraz destekli çerçeve sistemler olarak adlandırılmaktadır. Farklı çerçeve sistemlerinin bir arada kullanılmasıyla farklı tipler elde edilebilmektedir.



**Şekil 4.1** Farklı tiplerdeki destek elemanları

Bu yapıların genellikle çelik konstrüksiyon olarak tasarlanan binalarda kullanımı görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da genellikle bina modelleri kullanılmıştır. Bu çalışmada ise binalara kıyasla en/boy oranı çok farklı olan kule krenlerin kule kısmını oluşturan çelik yapıya literatürde bulunan çerçeve sistemlerinin uygulanması ve örnek depremler karşısında zaman alanındaki performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kule krenler incelendiğinde çok az tipte kafes yapılu kule konstrüksiyonu olması ve bu konuyla ilgili nerdeyse hiç çalışmaya olmaması konuya odaklanılmasının ayrı bir sebebidir.

Ay vd. [93], çaprazlı çelik çerçevelerin deprem etkisi altında sergiledikleri davranışlar üzerine yapılan çalışmalarda karşılaşılan sorunlar üzerine bir değerlendirmede bulunmuşlardır. Bu kapsamda merkezi çaprazlı ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveleri ele alarak yapılarda kullanımları ve deprem esnasında yapıların ihtiyaç duydukları sünekliği sağlamaları konusunda henüz tasarım aşamasında yapılan hesaplama yöntemlerinden bahsetmişlerdir.

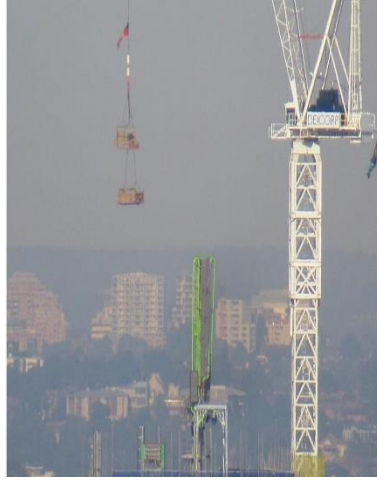
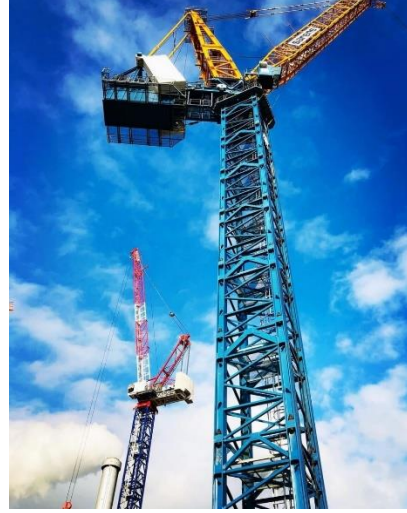
Silva vd. [97], Eurocode 8'e göre farklı sismik bölgelere göre farklı tiplerde kullanılan eş eksenli çapraz çeliklerin ana çerçevelere bağlantı tipleri üzerine yoğunlaşarak farklı bağlantı tipli tasarımları üzerinden sismik performans analizlerini teorik olarak gerçekleştirmişlerdir.

Bassetti vd. [98], çelik yapılarda deprem gibi dinamik yükler altında yapının dinamik kararsızlığını incelemek için çapraz destekli çok katlı bir bina ve endüstriyel bir yapı üzerinde zaman alanı analizlerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir.

Momenzadeh ve Shen [100], zaman alanında deprem girdileri ile analizler yaparak X ve ters V şeklindeki eş merkezli çapraz çelik uygulamalarına sahip bir çelik konstrüksiyon bina modelinin sismik cevaplarını elde etmişlerdir. Bu sonuçlarla yapıya ait ana kolların sismik davranışlarını inceleyerek deprem sonrası hasara uğrayıp uğramadıklarını araştırmışlardır.

Rahimi ve Maheri [101], bir binanın güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan X çaprazlı çelik elemanlı betonarme kolonların yan etkilerini incelerken, Faytarouni vd. doğrusal olmayan zaman alanı analizi ile X-tipi özel eş merkezli çaprazlı çerçevelerin sismik performans analizleri üzerine detaylı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Keivan ve Zhang [102], doğrusal olmayan zaman alanındaki analizler ile 3 ve 4 katlı binaların K-tipi ve D-tipi eş merkezli olmayan çaprazlı çerçevelerinin sismik performansı üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Martin ve Deierlein [103], bir yapının artan yüksekliği ile birlikte farklı çerçeve türleriyle oluşturulması temeline dayanan yapısal topoloji optimizasyonu ile yüksek binaların sismik performansları üzerine çalışmışlardır.



Şekil 4.2 Farklı kafes tiplerine sahip mast örnekleri

Kumar vd. [104], eş merkezli çelik çaprazlı çerçevelerden oluşan bir yapının sünekliği ve sismik performansını, tüm elemanların kapasite oranlarına göre ve değişik yanal yük yüzdeleri temelinde araştırmışlardır.

Türker ve Bayraktar [105], hem teorik hem de deneysel bir çalışma yaparak, 3 katlı çelik bir binada oluşturulan çeşitli destek konfigürasyonlarını dinamik özellik açısından karşılaştırmışlardır.

Goel ve Tang [106], tasarım kuvvetleri ile çerçeve sünekliği arasındaki ilişkiyi sorgulamak için ters V çaprazlı çerçevelere sahip bir binanın sismik davranışını incelemiştir.

Mashhadiali ve Kheyroddin [107], sismik performansın iyileştirilmesi için yeni bir çaprazlı çerçeve tipi geliştirilmesi üzerine bina modelleri kullanarak detaylı bir teorik çalışmada bulunmuşlardır.

Nayak vd. [108], 3 katlı bina için X tipi çaprazlı çerçevelerin ve elmas tipli çaprazlı çerçevelerin sismik performansını statik itme analizi yaparak araştırmışlardır.

Burada sunulan literatürden de görüldüğü üzere farklı tipteki çaprazlı çelik çerçeveler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu bina modellerine uygulamıştır. Bu çalışma ise binalara kıyasla en-boy-genişlik oranları çok farklı olan kule kren mastının farklı tip örgüler ile tasarlanmasını ve bu tasarımların sismik performanslarının araştırılmasını içermektedir.

#### **4.1 Farklı Kafes Tiplerinin Uygulanması**

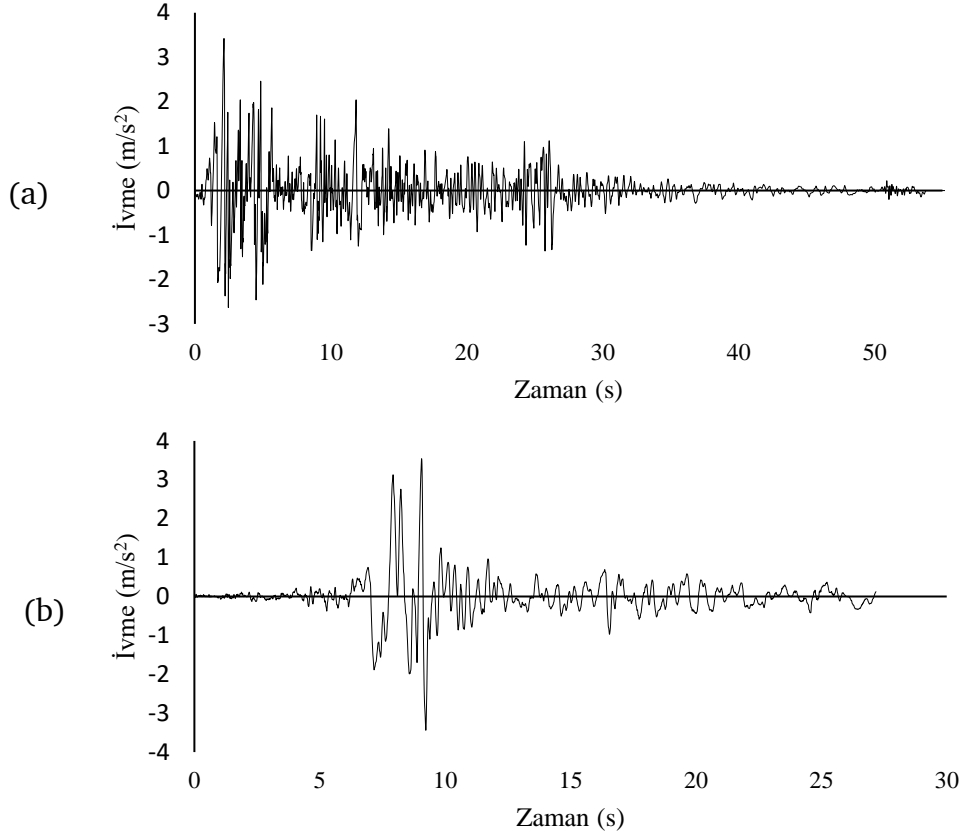
Farklı kafes yapılarının kule kren mastına uygulanması ve deprem cevaplarının incelenmesi adına aşağıdaki adımlar izlenmiştir. Örnek olarak kullanılan kule krene ait elemanların kesit bilgileri kullanılarak farklı yaklaşımlarla farklı tipteki çerçeveler oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak üzere her mast tipine ait katılık ve kütle matrisleri oluşturulmuştur. Daha sonra seçilen 2 farklı depreme (El Centro ve Kocaeli) ait ivme-zaman grafikleri kullanılarak zaman alanında doğrusal analizler yapılmış ve yer değiştirme, hız ve ivme cevapları elde edilmiştir.

## 4.2 Geçici Durum Analizlerinin Yapılması

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen kule kren mastının farklı örgü tipleri ve senaryolar kullanılarak geçici durum analizleri yapılmıştır.

### 4.2.1 Analizlerde Kullanılan Deprem Verileri

Analizlerde kullanılan deprem hareketi, farklı sismik analiz türlerinin yapılması gerekliliğinden dolayı farklı durumlarda olabilir [3]. Daha önce meydana gelmiş ve kaydedilmiş deprem hareketinin kullanılmasının yanı sıra ilgili sismik bölgenin özelliklerine göre yapay bir deprem hareketi de oluşturulabilir. Geçmişte sensörler yardımıyla elde edilen deprem verileri daha sonra depreme dayanıklı binaların tasarım aşamalarında kullanılmıştır. Fakat 1995 yılında Kobe depreminde meydana gelen depremin tasarım aşamasında kullanılan depremden daha büyük olduğu ve ilgili bölgede büyük hasara neden olduğu görüldüğünden farklı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuş ve sentezlenmiş deprem hareketleri yapılmaya başlanmıştır [109]. Yapısal analiz için sismik girdiler, zaman alanında veya frekans alanında tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada, çalışmanın amacı ve çalışmada tercih edilen analiz türü nedeniyle deprem hareketlerinin zaman alanı girdileri kullanılmıştır. Kule vinç mastı üzerindeki farklı tipte çaprazlı çelik çerçevelerin sismik performansını değerlendirmek için yapıya geçmişte meydana gelen iki farklı deprem hareketi verisi uygulanmıştır. İlki, 1940 yılında meydana gelen ve maksimum ivmesi  $3 \text{ m/s}^2$ 'den fazla El Centro deprem hareketidir (Kuzey-Güney bileşeni). Literatürde birçok kez temsili deprem hareketi olarak kullanılmıştır. Bu hareketin ivme-zaman grafiği Şekil 4.3'de görülebilir. İkincisi, 1999 yılında Kocaeli'nde meydana gelen Kocaeli depremi hareketidir (Kuzey-Güney bileşeni). Bu yer hareketleri için temel bilgiler aşağıdaki Tablo 4.1'de görülebilmektedir.



Şekil 4.3 Deprem girdileri (a)El Centro-1940 (NS) (b)Kocaeli-1999 (NS)

**Tablo 4.1** Deprem hareketleri temel bilgileri

Deprem Hareketi	Süre[s]	Pik Yer İvmesi [m/s <sup>2</sup> ]
El Centro-USA	53,76	3,417 (2.14 s'de)
Kocaeli-TURKEY	27,17	3,543 (9,06 s'de)

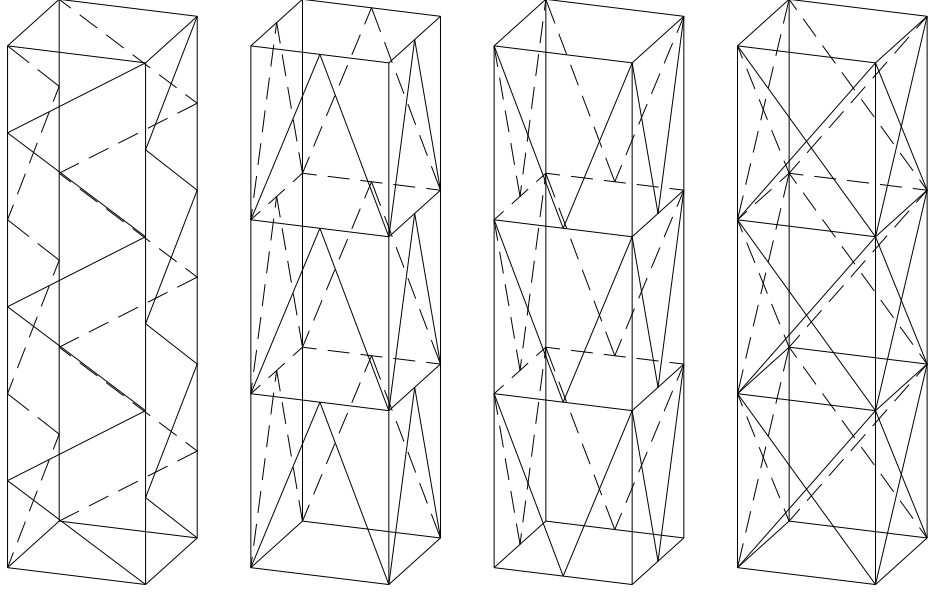
#### 4.2.2 Senaryolar ve Analiz Sonuçları

Farklı çerçeve sistemlerinin kule kren mastına uygulanmasında kullanılan senaryolar ve çerçeve tipleri aşağıdaki tablolarda özetlenmiştir. Analiz için senaryolar kurulurken öncelikle temel kafes tiplerine odaklanılarak referans olarak alınan kule kren mastıyla aynı ağırlık değerini verecek kafes tiplerinin ve referans kule kren mastını oluşturan elemanların doğrudan yeni kafes yapısında



kullanılması ile oluşturulan kafes tiplerinin elde edilmesine dikkat edilmiştir. Sonrasında ise referans mast tipinin sabit kalması koşulu ile çapraz elemanların örgü sıklığının değiştirilmesi, başlangıç modüllerinin konik yapıda olması gibi yapısal değişiklikler yapılarak senaryolar kurulmuştur. Tüm senaryolara ait şekiller ve açıklamalar Tablo 4.2, Tablo 4.4 ve Tablo 4.3’de belirtilmiştir.

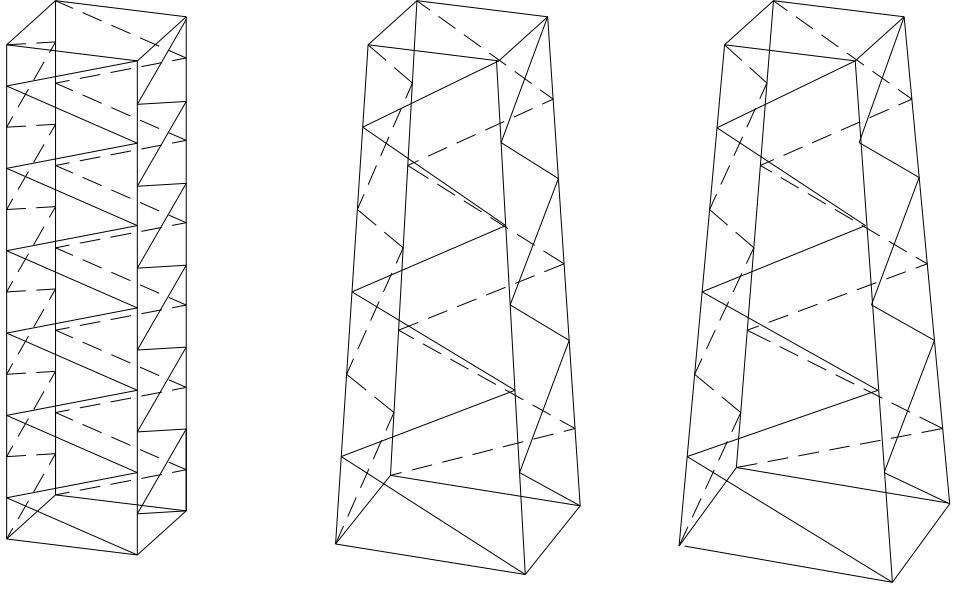
**Tablo 4.2** Farklı çerçeve tipleri

	
	a)                      b)                      c)                      d)
1	K Tipi Çerçeve (a)
2	Ters V Çerçeve (b), Çapraz elemanlar K Tipi ile farklı kesite sahip
3	Ters V Çerçeve (b), Çapraz elemanlar K Tipi ile aynı kesite sahip
4	V Çerçeve (c), Çapraz elemanlar K Tipi ile farklı kesite sahip
5	V Çerçeve (c), Çapraz elemanlar K Tipi ile aynı kesite sahip
6	X Çerçeve (d), Çapraz elemanlar K Tipi ile farklı kesite sahip
7	X Çerçeve (d), Çapraz elemanlar K Tipi ile aynı kesite sahip

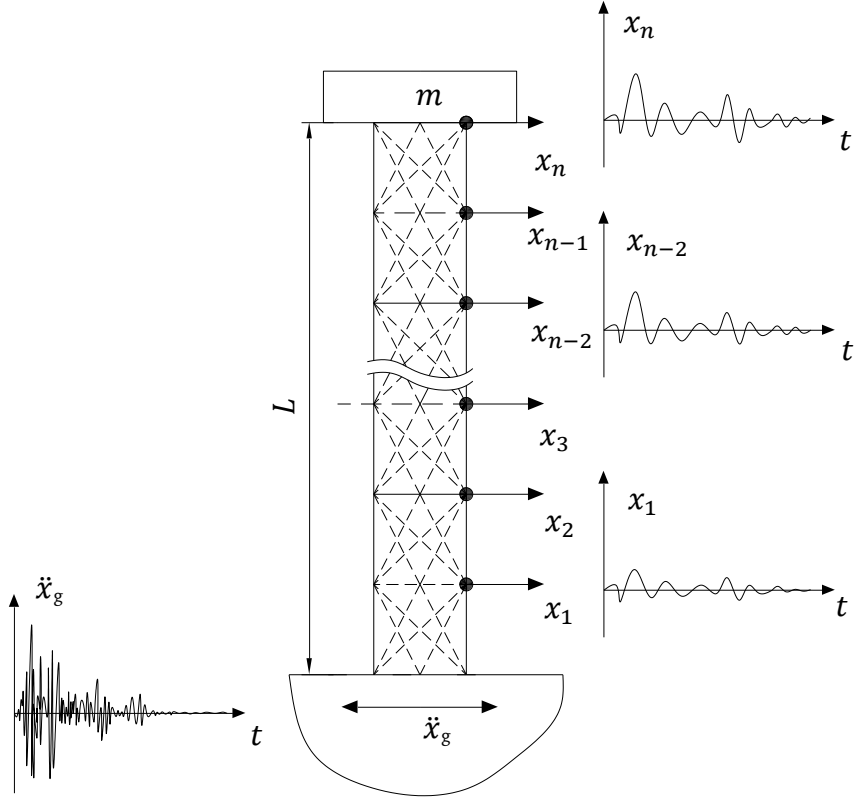
**Tablo 4.3** Analizlerde kullanılan senaryo bilgileri

Mast Numarası	Deprem	El Centro	Kocaeli
	Ağırlık		
1...10	Yok	1	2
	Var	3	4

**Tablo 4.4** Farklı K tipli tasarımlar

				
	e)	f)	g)	h)
8	K_2 2 Tipi Çerçeve (e), Çapraz Eleman Sıklığı Artırılmış			
9	K Konik 5 Derece (f), 1. Modül 5 Derece Konik Tasarlanmış			
10	K Konik 10 Derece (f), 1. Modül 10 Derece Konik Tasarlanmış			

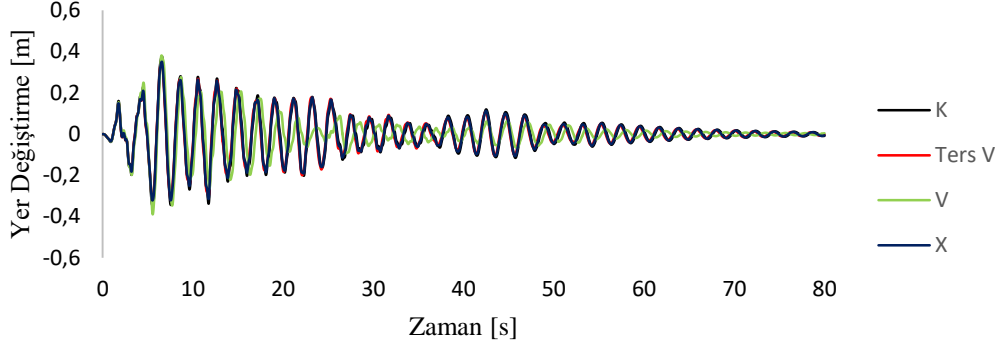
Aşağıdaki senaryolarda farklı çerçeve tipleri ile oluşturulan desteksiz ve 60 metre yüksekliğe sahip kule kren mastları için önce düğüm noktası ve numaralandırma yapılmış ve daha sonra bu numaralandırmaya göre koordinat matrisi oluşturulmuştur. Yapıyı oluşturan her elemana ait malzeme ve geometrik bilgileri de tanımlanarak eleman bağlantı bilgilerinin ve diğer özelliklerin sunulduğu matris oluşturulmuştur. Ekte modal analiz sonucu elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ile buna bağlı olarak hesaplanan Rayleigh sönüm katsayıları ve deprem girdileri kullanılarak yapılan geçici durum analizi ile mastın üst noktası ve orta noktası için çizdirilen yer değiştirme ve ivme verileri görülebilmektedir. Senaryolar Tablo 4.2, Tablo 4.4 ve Tablo 4.3’da sunulan bilgilere göre kurulmuştur. Örneğin, Senaryo 3.3 ile 3 numaralı çerçeve tipiyle oluşturulan kule kren mastının yük altında iken El Centro depremi girdisi ile analiz edildiği anlaşılmaktadır.



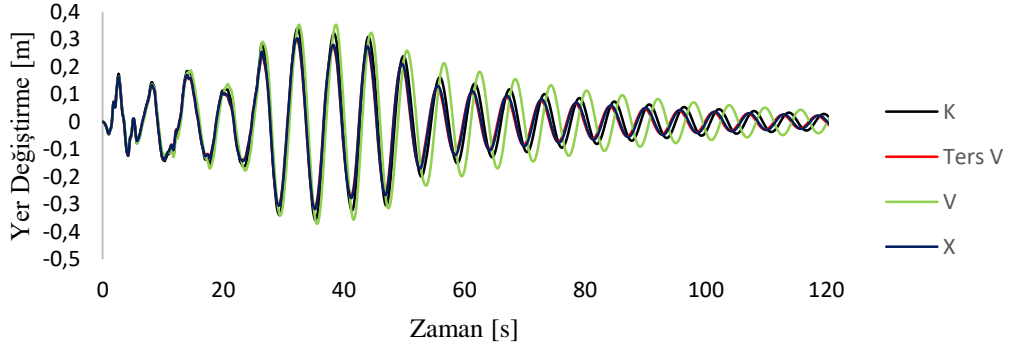
**Şekil 4.4** Geçici durum analizi

Yukarıda belirtilen senaryo bilgilerine göre toplam 10 farklı mast tipi için iki farklı deprem ve ilave ağırlık olup olmaması durumuna göre toplamda 40 adet analiz yapılmıştır. Bu sebeple analizlere ait sonuçlar ekte açık halde verilmiş, bu kısımda karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur. Karşılaştırma, senaryolar gruplara ayrılarak yapılmıştır. Çok sayıda grafik olduğundan karşılaştırmalar sadece yer değiştirme, ivme ve maksimum normal gerilme grafikleri kullanılarak yapılmıştır.

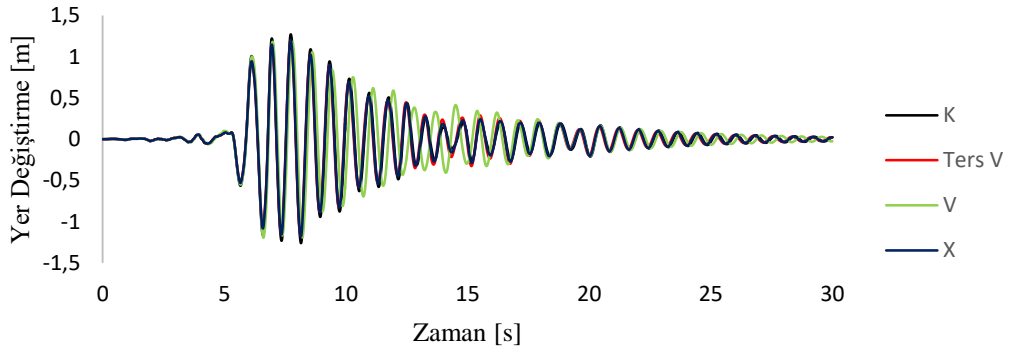
1. Grup : Mast Tipi 1-2-4-6 ( Farklı Mast, Aynı Ağırlık Kategorisi)
2. Grup : Mast Tipi 1-3-5-7 (Farklı Mast, Aynı Elemanlar Kategorisi)
3. Grup : Mast Tipi 1-8-9-10 (Aynı Mast Tipi Kategorisi)



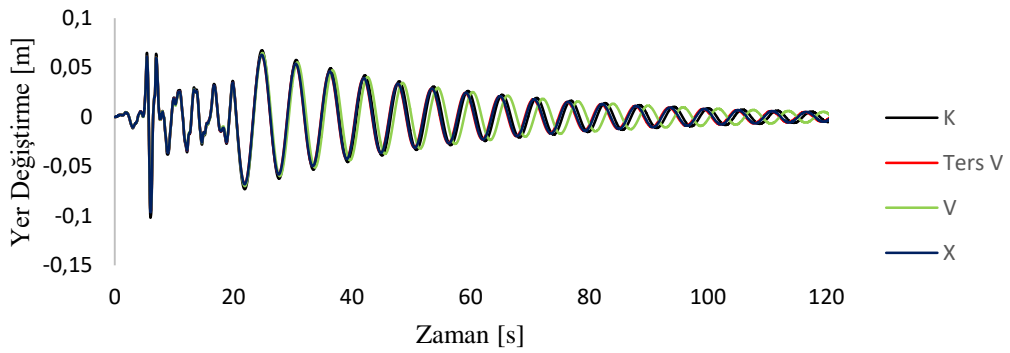
Şekil 4.5 Senaryo (Grup 1).1 yer değiştirme-zaman grafiği



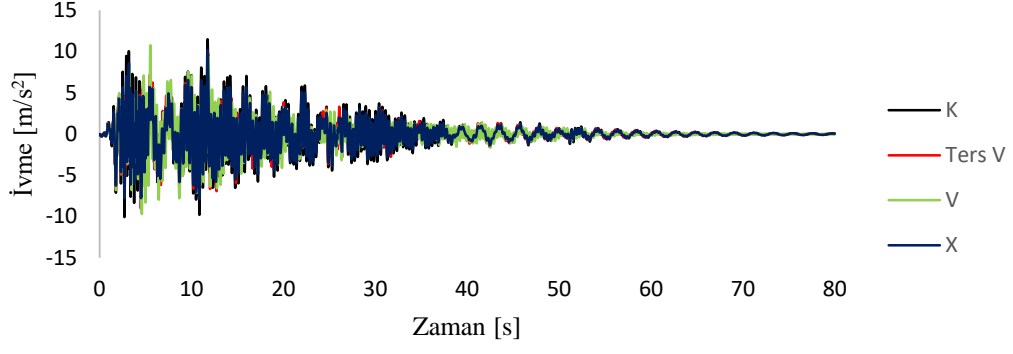
Şekil 4.6 Senaryo (Grup 1).3 yer değiştirme-zaman grafiği



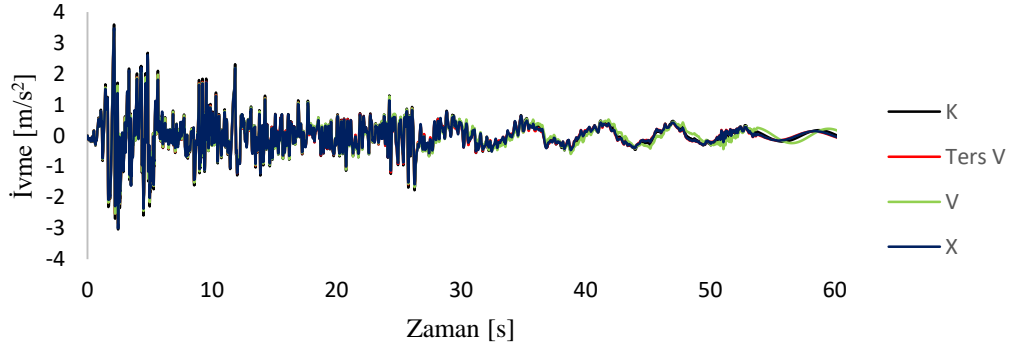
Şekil 4.7 Senaryo (Grup 1).2 yer değiştirme-zaman grafiği



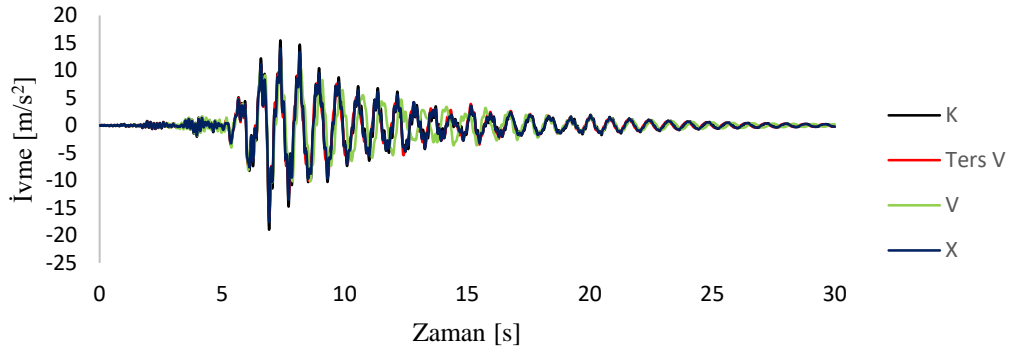
Şekil 4.8 Senaryo (Grup 1).4 yer değiştirme-zaman grafiği



Şekil 4.9 Senaryo (Grup 1).1 ivme-zaman grafiği



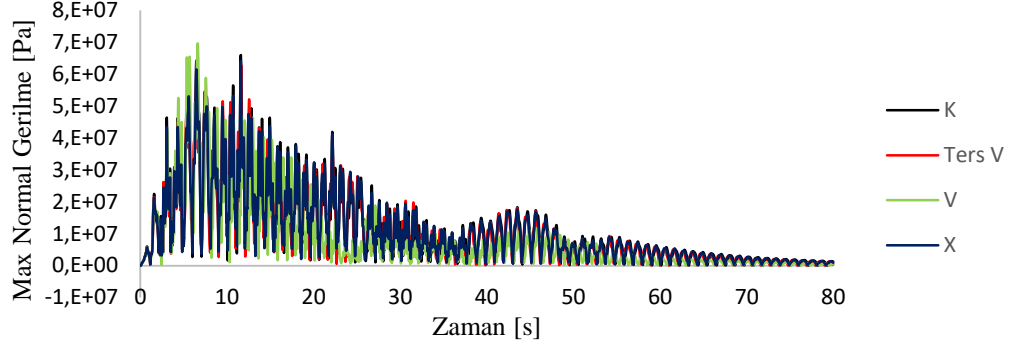
Şekil 4.10 Senaryo (Grup 1).3 ivme-zaman grafiği



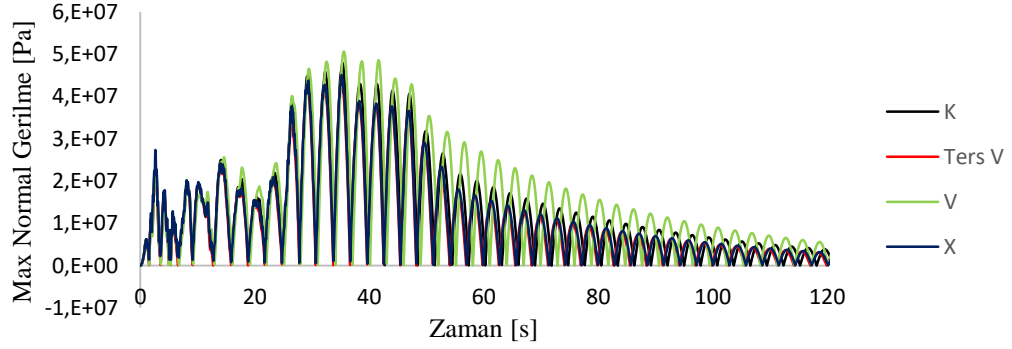
Şekil 4.11 Senaryo (Grup 1).2 ivme-zaman grafiği



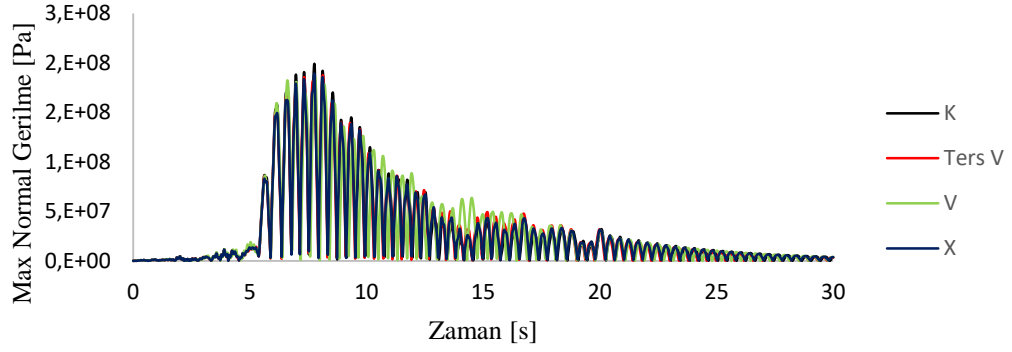
Şekil 4.12 Senaryo (Grup 1).4 ivme-zaman grafiği



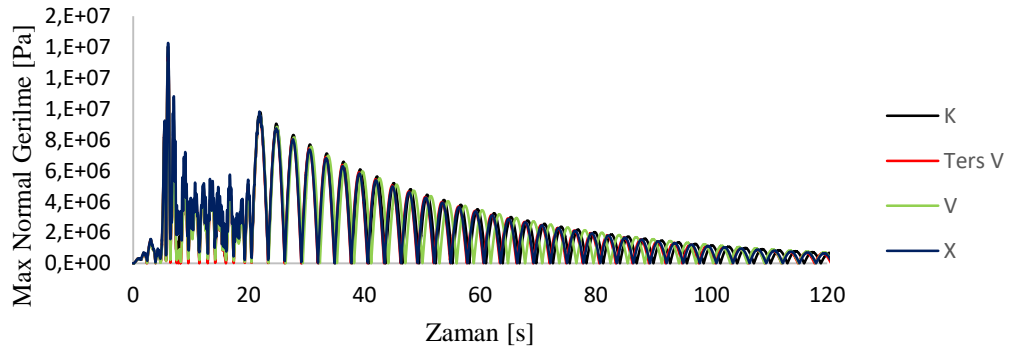
Şekil 4.13 Senaryo (Grup 1).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



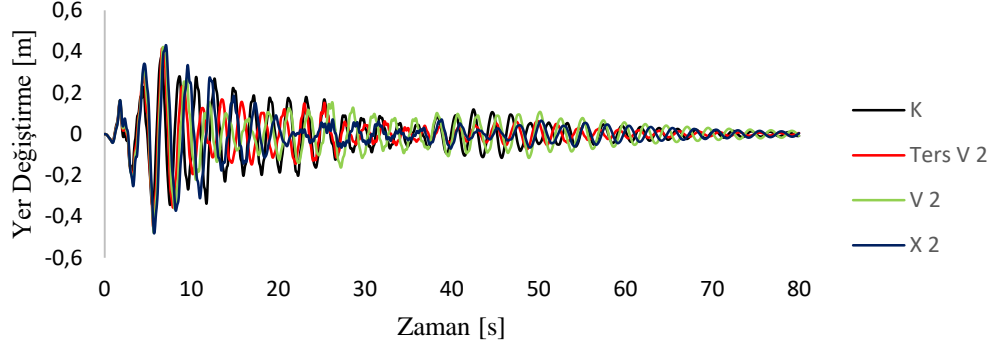
Şekil 4.14 Senaryo (Grup 1).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



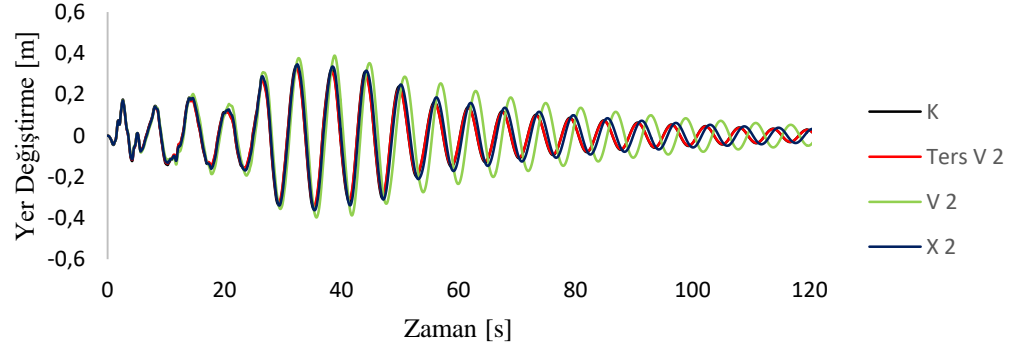
Şekil 4.15 Senaryo (Grup 1).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



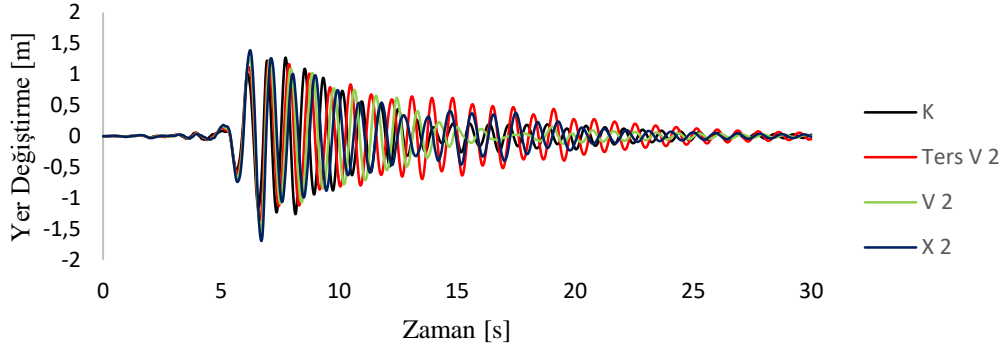
Şekil 4.16 Senaryo (Grup 1).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



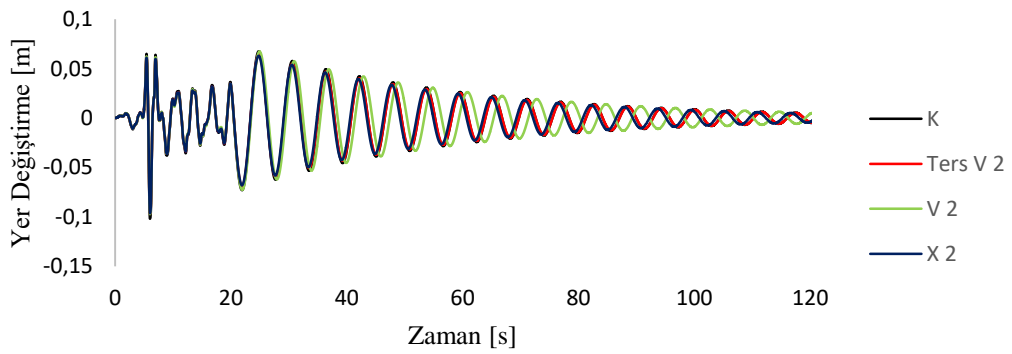
Şekil 4.17 Senaryo (Grup 2).1 yer değiştirme-zaman grafiği



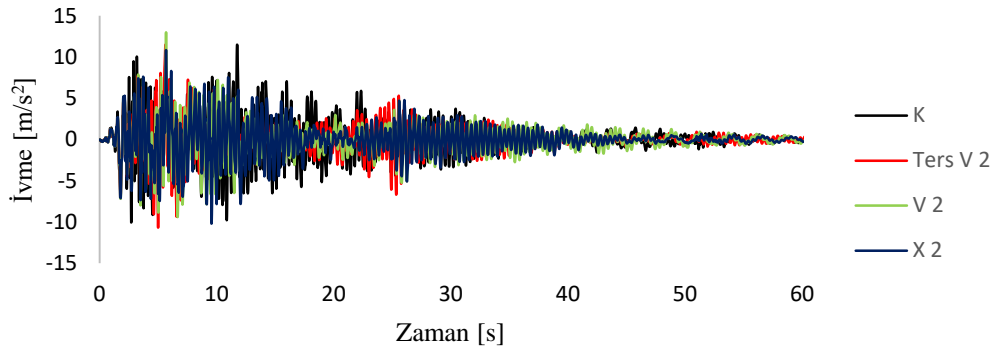
Şekil 4.18 Senaryo (Grup 2).3 yer değiştirme -zaman grafiği



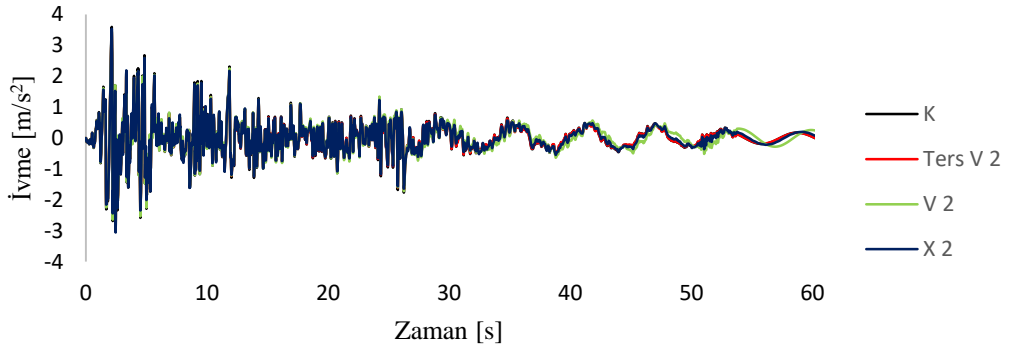
Şekil 4.19 Senaryo (Grup 2).2 yer değiştirme -zaman grafiği



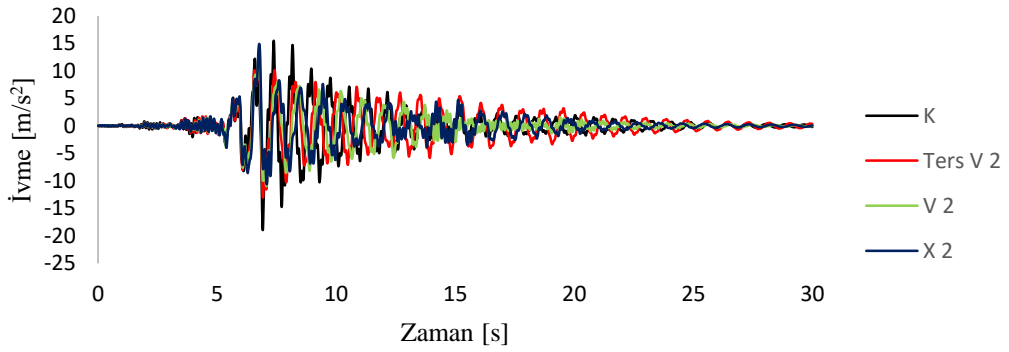
Şekil 4.20 Senaryo (Grup 2).4 yer değiştirme -zaman grafiği



Şekil 4.21 Senaryo (Grup 2).1 ivme-zaman grafiği



Şekil 4.22 Senaryo (Grup 1).3 ivme-zaman grafiği

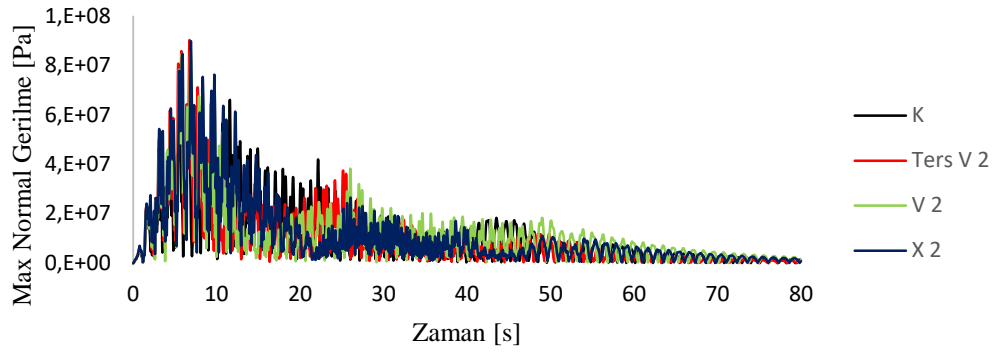


Şekil 4.23 Senaryo (Grup 2).2 ivme-zaman grafiği

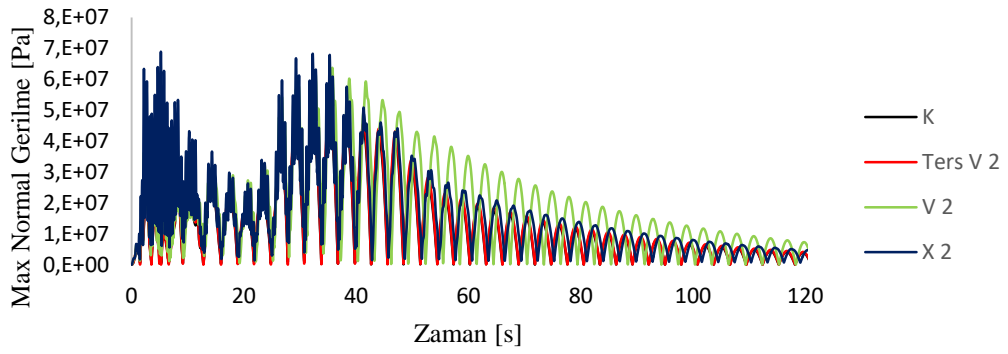


Şekil 4.24 Senaryo (Grup 2).4 ivme-zaman grafiği

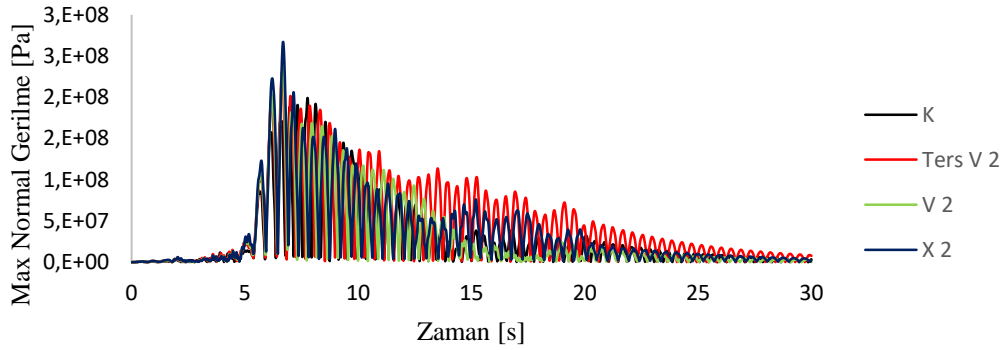




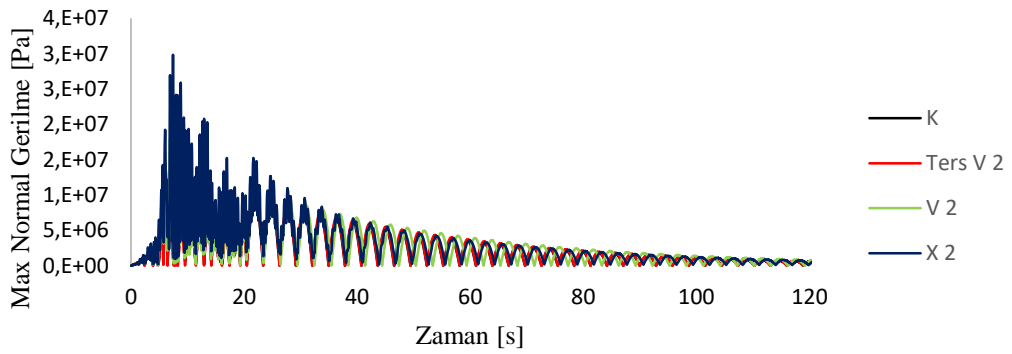
Şekil 4.25 Senaryo (Grup 2).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



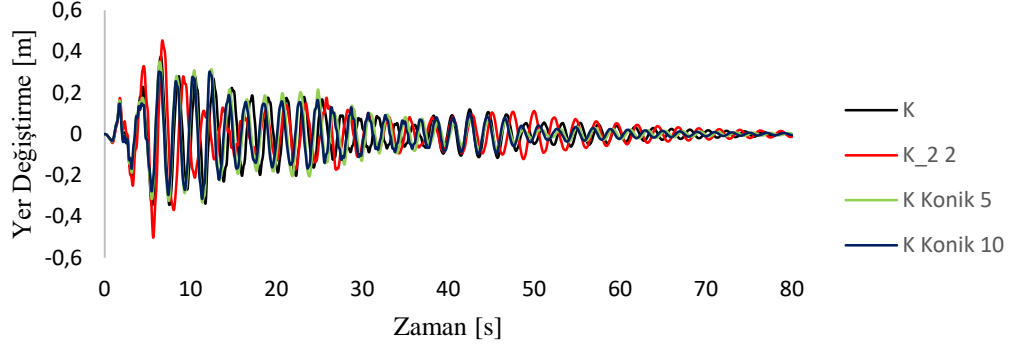
Şekil 4.26 Senaryo (Grup 2).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



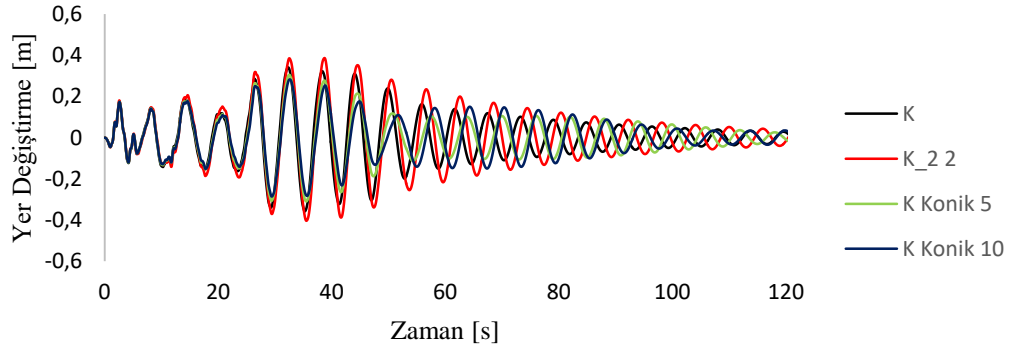
Şekil 4.27 Senaryo (Grup 2).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



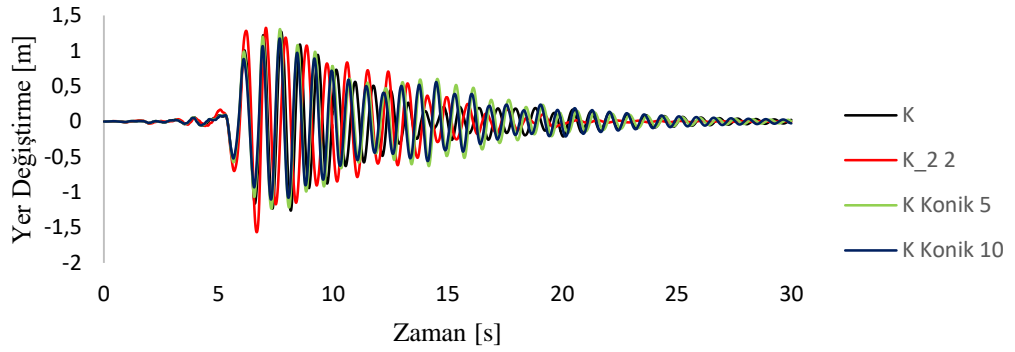
Şekil 4.28 Senaryo (Grup 2).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



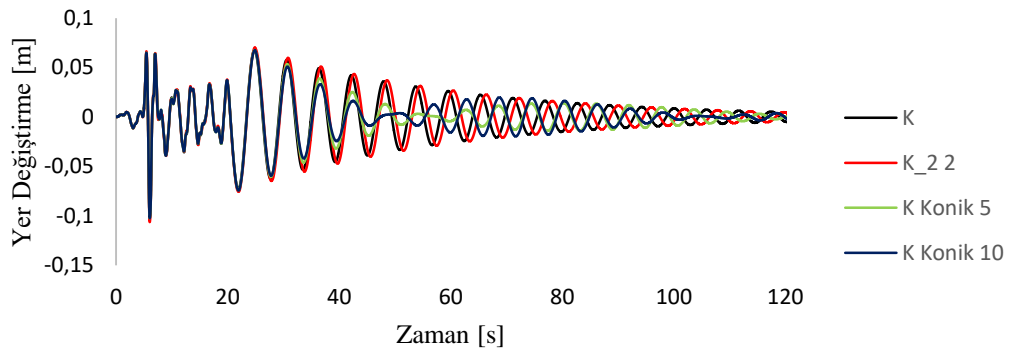
Şekil 4.29 Senaryo (Grup 3).1 yer değiştirme-zaman grafiği



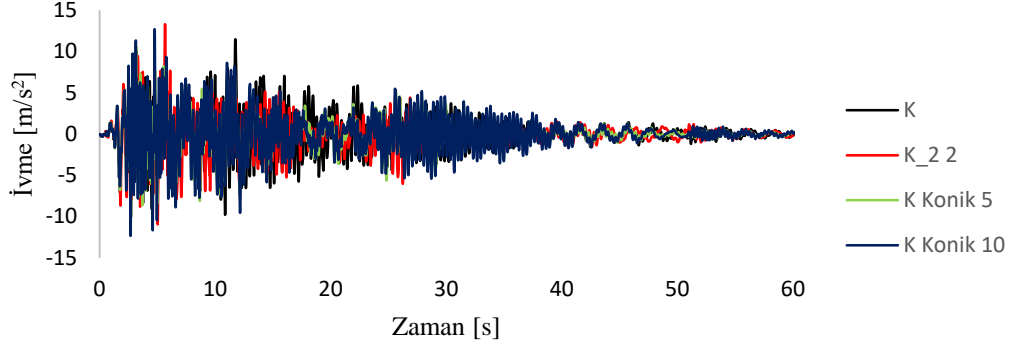
Şekil 4.30 Senaryo (Grup 3).3 yer değiştirme-zaman grafiği



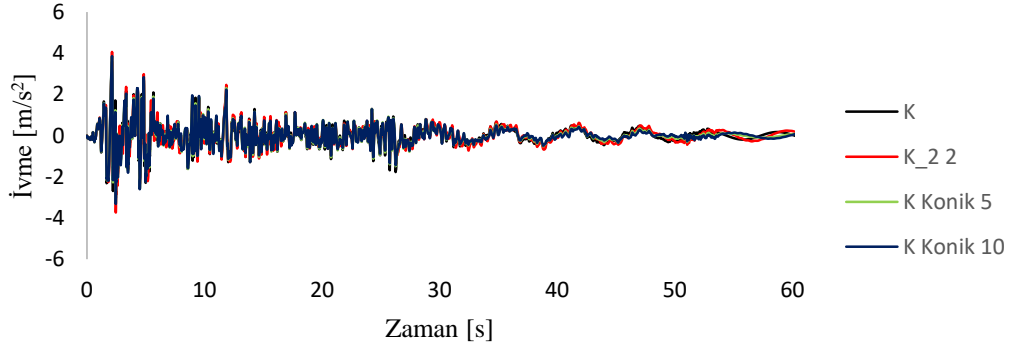
Şekil 4.31 Senaryo (Grup 3).2 yer değiştirme-zaman grafiği



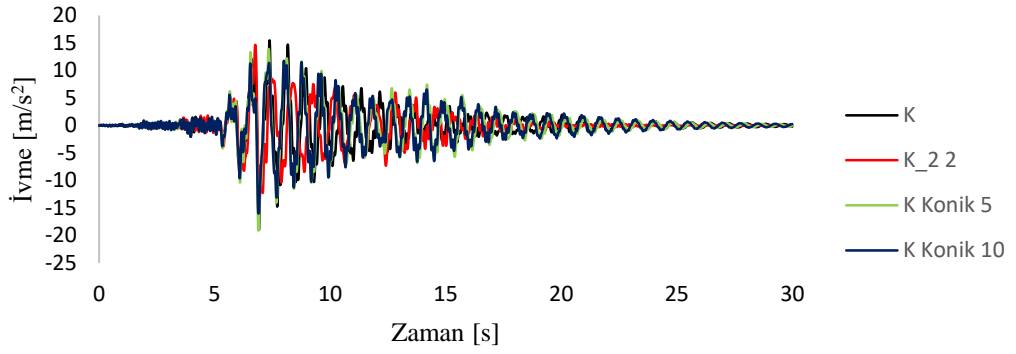
Şekil 4.32 Senaryo (Grup 3).4 yer değiştirme-zaman grafiği



Şekil 4.33 Senaryo (Grup 3).1 ivme-zaman grafiği



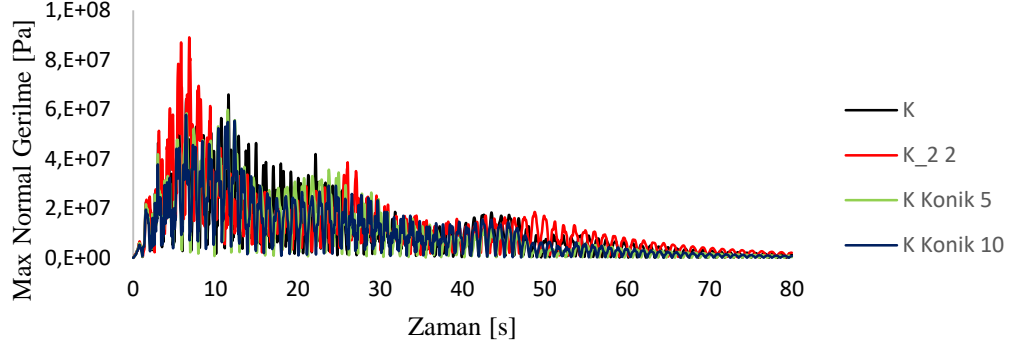
Şekil 4.34 Senaryo (Grup 3).3 ivme-zaman grafiği



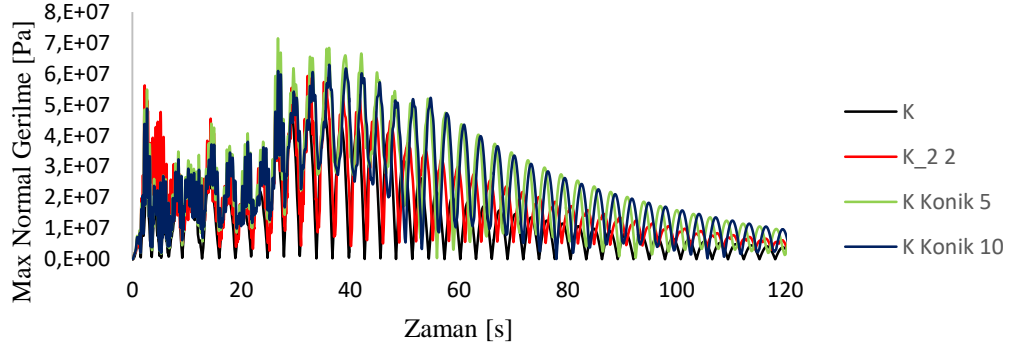
Şekil 4.35 Senaryo (Grup 3).2 ivme-zaman grafiği



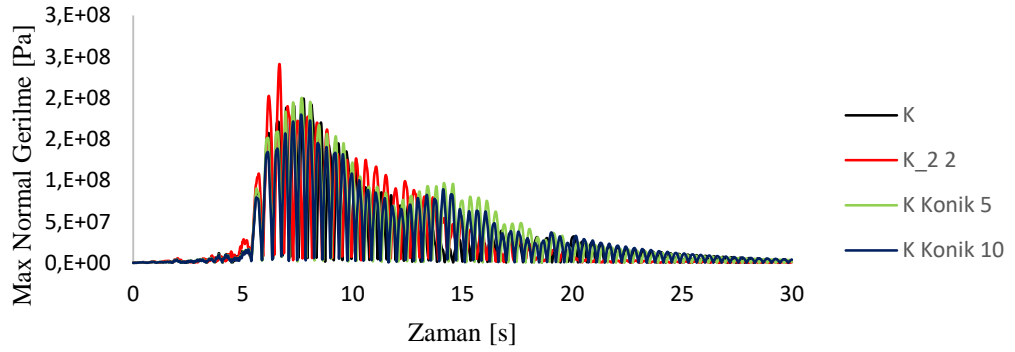
Şekil 4.36 Senaryo (Grup 3).4 ivme-zaman grafiği



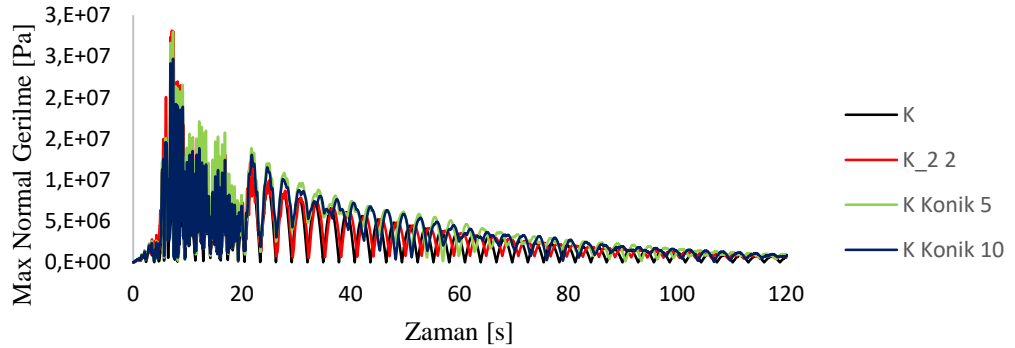
Şekil 4.37 Senaryo (Grup 3).1 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.38 Senaryo (Grup 3).3 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.39 Senaryo (Grup 3).2 maksimum normal gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.40 Senaryo (Grup 3).4 maksimum normal gerilme-zaman grafiği

10 farklı mast tipi için çeşitli senaryolara göre gerçekleştirilen zaman alanı analizlerinin sonuçları grafik olarak yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. Aynı zamanda bu grafiklere ait özet bilgiler de yine tablolar halinde sunulmuştur. Senaryolara ait grafikler karşılaştırma yapılabilmesi adına yaygın kullanıma sahip olan K tipi mast temel alınarak sunulmuştur.

K, Ters V, V ve X tipi mastların aynı ağırlık değerine sahip olacak şekilde tasarlanmasıyla oluşturulan 1. Gruba ait analiz sonuçları Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Tabloda her grafiğin sahip olduğu maksimum değerler sayısal olarak sunulmuştur. Buna göre El Centro deprem girdisini uygulandığı ve ilave yükün olmadığı analizlerde en az yer değiştirme ve ivme değerini Ters V tipi, en az gerilme değerini ise X tipi mast sağlarken ilave yükün olduğu analizlerde en az yer değiştirme, ivme ve gerilme değerlerini Ters V tipi mast sağlamaktadır. Kocaeli deprem girdisini uygulandığı ve ilave yükün olmadığı analizlerde en az yer değiştirme, ivme ve gerilme değerlerini V tipi mast sağlarken ilave yükün olduğu durumda en az yer değiştirmeyi ve ivmeyi X tipi mast ve en az gerilmeyi ise V tipi mast sağlamaktadır.

Hareketin sönümlenme süresi ise deprem süresi ve ilave yük olup olmasına göre değişmekle birlikte sönümlenme karakteristiği V tipi mast hariç diğer mast tiplerinde benzerlik sergilemektedir. Tüm senaryolarda yapıyı oluşturan elemanlar üzerine gelen maksimum gerilme değeri yapıya ait malzemenin akma gerilmesi değerinden düşüktür. Yalnızca ilave yükün olduğu ve El Centro depremi için yapılan analizde diğer senaryolara göre akma gerilmesine daha fazla yaklaşmaktadır.

K, Ters V 2, V 2 ve X 2 tipi mastların aynı kesite sahip çapraz elemanlara sahip olacak şekilde tasarlanmasıyla oluşturulan 2. Gruba ait analiz sonuçları Tablo 4.6'de gösterilmiştir. Buna göre El Centro deprem girdisinin uygulandığı ve ilave yükün olmadığı analizlerde en az yer değiştirme değerini K tipi mast, ivme değerini X 2 tipi mast, en az gerilme değerini ise K tipi mast sağlarken ilave yükün olduğu analizlerde en az yer değiştirme ve ivme değerini Ters V 2 tipi mast, gerilme değerini ise K tipi mast sağlamaktadır. Kocaeli deprem girdisini

uygulandığı ve ilave yükün olduğu ve olmadığı durumdaki analizlerde en az yer değiştirme, ivme değerlerini Ters V 2 tipi mast ve gerilme değerini K tipi mast sağlamaktadır.

**Tablo 4.5** Grup 1'e ait senaryoların maksimum değerleri

Grup1.	Max Yer Değiştirme [m]				Max İvme [ $m/s^2$ ]				Max Gerilme [Pa]			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>K</b>	0,377	1,27	0,341	0,067	11,49	15,5	3,6	3,77	66	199	47,9	14
<b>Ters V</b>	0,340	1,2	0,29	0,062	9,71	12,7	3,36	3,53	64,5	188	43,4	13,3
<b>V</b>	0,38	1,18	0,354	0,064	10,8	12	3,38	3,54	69,7	185	50,6	13,1
<b>X</b>	0,35	1,2	0,304	0,062	10,2	14	3,47	3,51	64,1	189	45,1	14,3

Hareketin sönümlenme süresi ise deprem süresi ve yük olup olmamasına göre değişmekle birlikte sönümlenme karakteristiği 1. senaryoda X 2 tipi mast ve 3. senaryoda V 2 tipi mast hariç diğer mast tiplerinde benzerlik sergilemektedir. Yapıyı oluşturan elemanlar üzerine gelen maksimum gerilme değerleri 1. 3. ve 4. senaryolar için yapıda kullanılan ilgili malzemenin akma gerilmesi değerinden düşüktür. 2. Senaryoda ise X 2 tipi mastta akma gerilmesi değeri sınırlarına yaklaşıldığı görülmektedir.

**Tablo 4.6** Grup 2'ye ait senaryoların maksimum değerleri

Grup 2.	Max Yer Değiştirme [m]				Max İvme [ $m/s^2$ ]				Max Gerilme [Pa]			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>K</b>	0,377	1,27	0,341	0,067	11,49	15,5	3,6	3,77	66	199	47,9	14
<b>Ters V 2</b>	0,415	1,22	0,325	0,064	11,50	11,2	3,42	3,59	90,2	231	50,8	14,4
<b>V 2</b>	0,423	1,25	0,389	0,067	13	13,7	3,45	3,64	85,9	241	63,7	18
<b>X 2</b>	0,432	1,39	0,346	0,065	10,9	14,9	3,53	3,61	89,8	267	68,9	29,9

K, K\_2 2, K Konik 5 ve K Konik 10 tipi mastların aynı kesite sahip çapraz elemanlara sahip olacak şekilde fakat farklı örgü sıklığı ve 1. Mast için farklı koniklikte tasarlanmasıyla oluşturulan 3. Gruba ait analiz sonuçları Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Buna göre El Centro deprem girdisinin uygulandığı ve ilave yükün olmadığı analizlerde en az yer değiştirme ve gerilme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme değerini ise K Konik 5 tipi mast sağlarken ilave yükün olduğu analizlerde en az yer değiştirme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme ve gerilme değerlerini ise K tipi mast sağlamaktadır. Kocaeli deprem girdisini uygulandığı ve ilave yükün olmadığı durumdaki analizlerde en az yer değiştirme, ivme ve gerilme değerlerini K Konik 10 tipi mast sağlarken ilave yükün olduğu durumda en az yer değiştirme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme değerini K\_2 2 tipi mast ve gerilme değerini K tipi mast sağlamaktadır.

**Tablo 4.7** Grup 3'e ait senaryoların maksimum değerleri

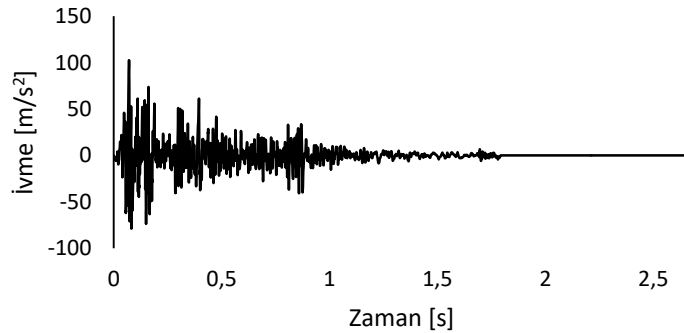
Grup 3.	Max Yer Değiştirme [m]				Max İvme [ $m/s^2$ ]				Max Gerilme [Pa]			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>K</b>	0,377	1,27	0,341	0,067	11,49	15,5	3,6	3,77	66	199	47,9	14
<b>K_2 2</b>	0,455	1,33	0,386	0,07	13,3	14,7	4,06	3,67	89,1	241	59,3	28,1
<b>K Konik 5</b>	0,351	1,31	0,305	0,067	10,6	13,9	3,82	3,76	59,8	200	71,5	28
<b>K Konik 10</b>	0,303	1,17	0,283	0,067	12,7	11,8	3,86	3,75	57,8	180	62,9	24,7

Hareketin sönümlenme süresi ise deprem süresi ve yük olup olmamasına göre değişmekle birlikte sönümlenme karakteristiği 1. senaryoda K\_2 2 tipi mastta farklılık göstermektedir. Maksimum genlikten sonra K\_2 2 tipinde yer değiştirme genlikleri daha kısa sürede azalmaktadır. Bununla birlikte 2., 3. ve 4. senaryolar için ise K konik 5 ve K Konik 10 tipi diğer tiplere göre daha kısa sürede sönüm etkisi göstermektedir. Yapıyı oluşturan elemanlar üzerine gelen maksimum gerilme değerleri 1. 3. ve 4. senaryolar için yapıda kullanılan ilgili malzemenin

akma gerilmesi değerinden dūřüktür. 2. Senaryoda ise yalnızca K\_2 2 tipi mast için akma gerilmesi değeri sınırlarına yaklaşıldığı görölmektedir.

### 4.3 Ölçekli Modelin Geçici Durum Analizi ve Gerçek Model İle Karşılaştırılması

Bölüm 2.8.6 'da ölçekleme metodu yaklaşımı ile farklı ölçek değerleri belirlenmiş ve bu ölçek değerlerine göre modele ait ölçüler Tablo 2.5'e göre belirlenmiştir. Elde edilen teorik ölçülere göre imalatın gerçekleştirilmesi mümkün olmadığından aynı ölçek değerinde olmak üzere ölçüler imalata uygun olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir(Tablo 2.13). İmalata uygun bu ölçüler temel alınarak yapılan teorik çalışmalar kapsamında K tipi mastın üzerinde ilave yük olmadığı kabul edilmiş ve deprem girdisi olarak El Centro yer hareketi kullanılmıştır. 1/30 ölçekli model ile öncelikle modal analiz yapılmış daha sonra ölçeklendirilmiş yer hareketi uygulanarak zaman alanı analizi yapılmıştır. El Centro deprem girdisi için ölçek değerleri tablosuna göre zaman eksenini 30'a bölünmüş ve ivme eksenini ise 30 ile çarpılarak ölçekli model uygun bir girdi elde edilmiştir. Bu girdi sahip olduğu değerler temelinde sadece teorik çalışmalarda kullanılacak ölçekli modeller için uygundur.



Şekil 4.41 Ölçekli deprem girdisi

Aşağıdaki tablo ve şekiller gerçeğe boyutlu K tipi mast ve 1/30 ölçeklendirilmiş ve imalata uygun ölçülere sahip K tipi mast için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 4.8'den göröldüğü üzere ilk 14 doğal frekans değerleri kabul edilen ölçek değerine kabul edilebilir bir seviyede yakın çıkmaktadır. Devam eden doğal

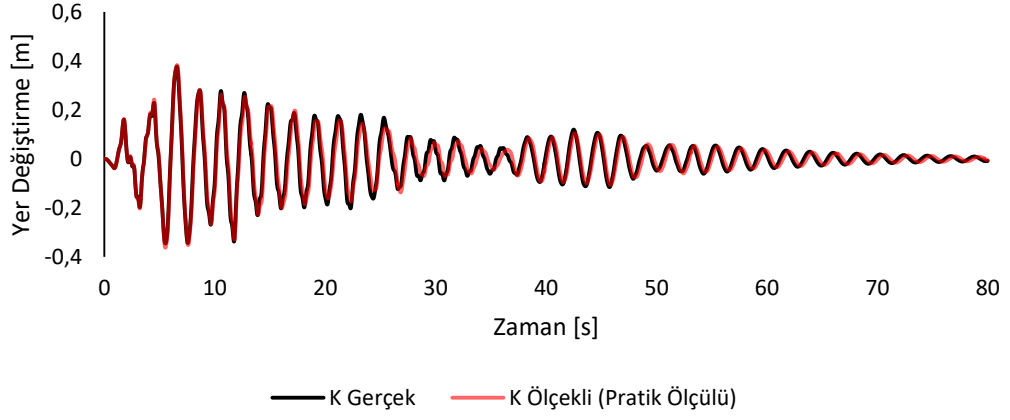


frekanslar arasında ise ölçek değerinden uzaklaştığı görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere kütle katılım faktörlerine bakıldığında ilerleyen frekansların yapının dinamik davranışına etkisi ihmal edilebilir seviyede olduğundan ilerleyen frekanslarda meydana gelen ölçek değerinden uzaklaşma durumu da bu örnek için ihmal edilebilmektedir.

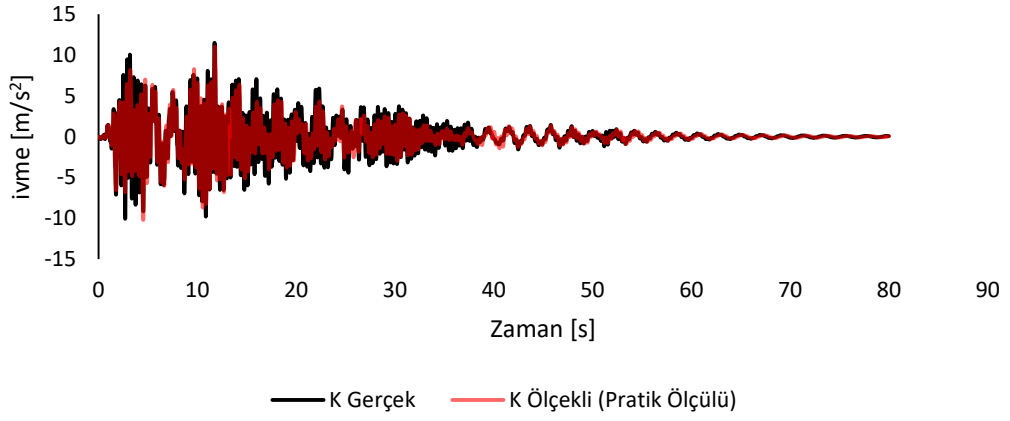
**Tablo 4.8** Doğal frekansların karşılaştırılması

1/30 Ölçekli Model				Ölçek Oranı	Gerçek Model (prototip)			
Frekans [Hz]	Kütle Katılım Faktörleri				Frekans [Hz]	Kütle Katılım Faktörleri		
	X	Y	Z			X	Y	Z
13,32	-1,03727	-2E-14	0,003925	29,7	0,469307	3,58388	7E-09	-115,288
13,32	0,096818	-8E-14	1,032752	29,7	0,469307	-115,344	5E-09	-0,3914
81,35	0,041185	-2E-13	0,578292	29,7	2,841016	-4,46256	-9E-08	-64,492
81,35	0,579752	6E-14	-0,00236	29,7	2,841016	-64,3422	-6E-08	6,261833
138,29	3,04E-12	0,002	-2,37E-13	31,1	4,230207	3,81E-07	0,20	1,83E-07
218,80	0,050167	4E-13	0,339247	29,7	7,557253	-1,82409	9E-08	-38,2629
218,80	0,342928	-1E-13	-0,00249	29,7	7,557253	-38,2627	9E-08	1,829176
405,75	-0,01905	8E-13	0,246843	31,2	12,64555	-2,5E-06	1,22	1,42E-08
405,75	-0,24755	-7E-13	0,003812	29,8	13,83665	7,0755	-5E-07	26,71816
412,84	-1,2E-10	-0,02	-8,9E-13	29,8	13,83665	-26,7182	1E-06	7,075377
466,24	4,13E-13	1,19	-1,1E-12	29,4	16,45219	-4,1E-07	-132	4,04E-08
565,82	1,13E-12	6E-13	3,29E-13	34,0	18,67292	-4E-06	-2E-07	-1,3E-05
569,16	8,05E-13	4E-13	3,57E-14	33,5	18,91462	2,34E-06	-1E-07	5,9E-06
589,97	3,07E-12	5E-13	2,23E-13	33,4	19,6534	1,99E-06	-1E-06	1,09E-05
627,33	-0,19309	2E-13	0,004937	42,0	20,92301	1,97E-05	1,33	2,08E-06
627,33	-0,05556	-5E-14	-0,18499	41,6	21,1372	-3,2845	-6E-08	-21,2041
648,18	1,95E-12	2E-13	3,31E-13	43,3	21,1372	21,20408	-2E-06	-3,28458
681,16	1,28E-11	-0,00	1,54E-14	52,5	21,67812	-9E-06	1E-05	-2,7E-05
756,33	-1,5E-13	2E-13	2,57E-13	44,9	25,37208	1,37E-06	4E-06	-2,9E-06
867,30	0,156256	1E-14	0,014606	39,8	28,93454	-1,51786	-1E-06	-17,2259

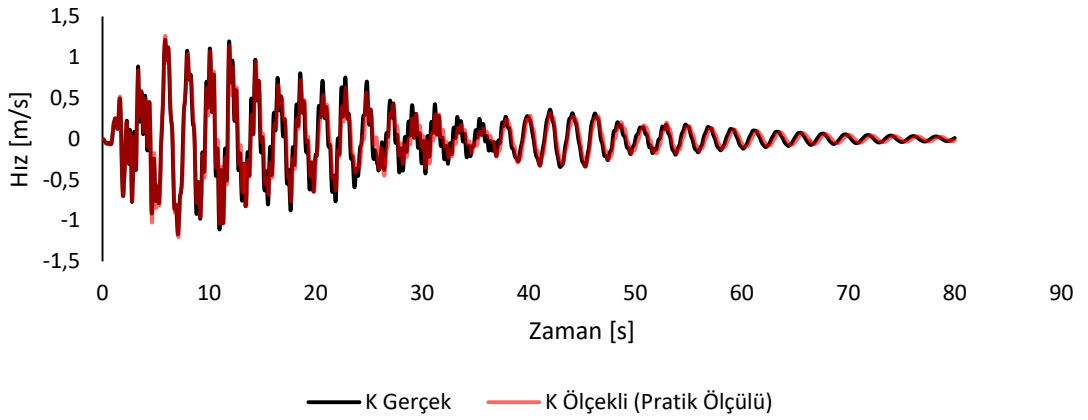
Zaman alanında yapılan analizlere ait sonuçlar da aşağıdaki şekillerde grafikler halinde gösterilmiştir. Her iki modele ait yer değiştirme-zaman, ivme-zaman, hız-zaman, maksimum normal gerilme-zaman ve son olarak maksimum birleşik gerilme-zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.



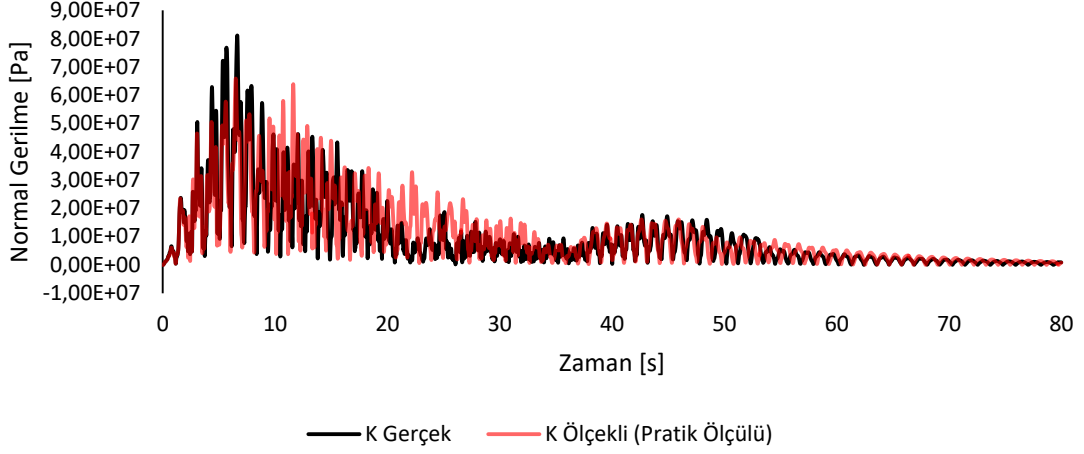
Şekil 4.42 Yer değiştirme-zaman grafikleri



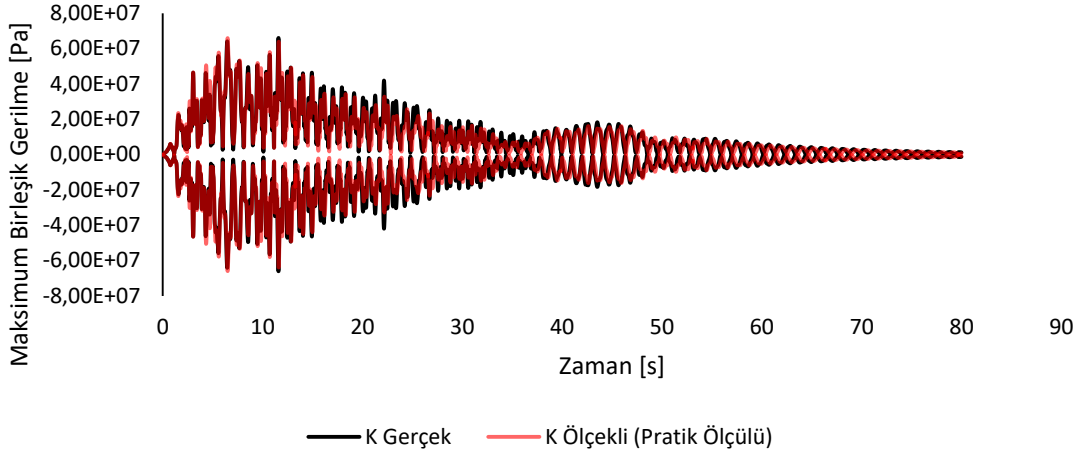
Şekil 4.43 İvme-zaman grafikleri



Şekil 4.44 Hız-zaman grafikleri



**Şekil 4.45** Normal gerilme-zaman grafikleri



**Şekil 4.46** Maksimum birleşik gerilme-zaman grafikleri

Ölçekli model ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak Tablo 2.5'de belirtilen ölçek değerleri ile gerçek modele ait olması gereken değerler hesaplanmış ve gerçek model ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla grafiksel olarak karşılaştırılarak şekillerle sunulmuştur. Özellikle Şekil 4.42'ye bakıldığında yer değiştirme-zaman grafiklerinin uyum içerisinde olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Aynı şekilde hız, ivme ve gerilme grafikleri de ölçekli modelin gerçek modeli temsil etmesi konusundaki yetkinliğini göstermesi açısından yer değiştirme-zaman grafiğini desteklemektedir. Karşılaştırmalı grafiklerden de görüleceği üzere izlenen ölçekleme yöntemi ile

gerçek boyutu ile deneysel çalışmaların yapılamadığı benzer yapıların ölçeklenerek üzerinde deney yapılabilir duruma getirilebilmesi mümkün olacaktır.

#### **4.4 Teorik Çalışmalardan Çıkarılan Sonuçlar**

Teorik çalışmalar kapsamında öncelikle yapının dinamik analizleri için temel bir adım olan modal analiz konusuna değinilmiş ve konu hakkında detaylı bilgi sunularak modal analizlerin temelini oluşturan matematiksel denklemlere yer verilmiştir. Daha sonra dinamik sistemlerin çözümünde önemli bir değişken olan yapıya ait sönüm değerinin nasıl hesaplanacağı ve teorik olarak hangi kabuller ile belirlenebileceği üzerine bilgiler verilerek çalışmaya konu ola yapı için sönüm değerinin belirlenmesinde kullanılacak yöntemlerden bahsedilmiştir. Yapının hareket denkleminin kurulmasında sonlu elemanlar yöntemi tercih edildiğinden bu yönteme ait teorik alt yapı sunulmuştur. Kiriş elemanlardan oluşan yapının modellenmesinde izlenen adımlar açıklanarak tüm yapıyı temsil eden hareket denkleminin nasıl elde edileceği gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde izlenen adımlar ise MATLAB programında koda dönüştürülerek çalışmaya konu olan yapı ve benzer yapılar için bir program geliştirilmiştir. Bu programda kafes yapıyı oluşturan elemanların 3 boyutlu uzayda koordinat noktalarını içeren bilgileri ve elemanlara ait malzeme, kesit, kesitin 3 boyutlu uzaydaki konumunu gösterir bilgileri matris şeklinde iki ayrı matris şeklinde tanımlanmaktadır. Yazılan program ile yapının daha fazla sayıda elemanlara ayrılması, statik analizlerinin yapılması, modal analizlerinin yapılarak doğal frekans ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve son olarak zaman alanında tanımlanan deprem girdisi karşısında sergileyeceği yer değiştirme, ivme, hız ve gerilme gibi davranışlara ait çıktılarının hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu sayede kafes yapıli sistemlerin ticari bir programa ihtiyaç duyulmaksızın zaman alanında cevaplarının alınabileceği bir program oluşturulmuştur. Çalışmanın bir diğer odak noktası ise benzerlik teoreminin dinamik sistemlere uygulanması üzerinedir. Bu kapsamda benzerlik teoreminin öneminden, amacından ve literatürdeki kullanım alanlarından bahsedilerek çalışmaya konu olan yapı için uygulanmasına yönelik adımlar ifade edilmiştir. Bu adımlar uygulanarak yapıyı

oluşturan elemanların ve temel boyutların ölçeklenmesi sağlanmıştır. Uygulanan ölçekleme yöntemi neticesinde farklı oranlarda ölçekleme işlemi yapılarak daha önce oluşturulan sonlu elemanlar programı yardımıyla modal analizler yapılmış ve bu analizlerin sonuçlarına göre en uygun ölçek değeri belirlenmiştir. Sonrasında kafes yapılar hakkında genel bir literatür bilgisi sunulmuş ve farklı kafes yapıları için kule kren mastının yeniden tasarlanarak belirtilen senaryolara göre zaman alanındaki geçici durum analizleri yapılmış ve çıkan sonuçlar belli gruplar halinde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara ait detaylar Senaryolar ve Analiz Sonuçları başlığında sunulmuştur.

Bu çalışmada kule krenlerin deprem etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla teorik ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan literatür araştırması ve ilk çalışmalar neticesinde deprem etkisi karşısında etkin olarak rol alan kısmın kule krenin temel kısımlarından olan mast olduğu sonucuna varıldığından bom ve karşı ağırlık kısımları yalnızca ilave kütle olarak kabul edilerek çalışmalar yapılmıştır. Deprem etkisi altındaki davranışın temeline inerek konuyu daha iyi özümsemek, harekete yön veren değişkenleri tam olarak tespit etmek adına herhangi bir ticari program kullanmaksızın yapı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu kapsamda yalnızca çalışmaya konu olan kule krenler değil ayrıca kafes yapıdan oluşan benzer yapılar da düşünülerek bir sonlu elemanlar programı MATLAB programında oluşturulmuştur. Bu programın oluşturulmasında temel alınan tüm teorik altyapı detayları ile birlikte sunularak konuya dair tüm aşamalar paylaşılmıştır. Bu sayede farklı amaçlar doğrultusunda temel oluşturabilecek bu çalışmanın başka araştırmacılar tarafından da kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan program ile kafes yapı bir sistemin statik analizi yapılarak yapıya etki eden kuvvetler karşısında yapıda meydana gelen yer değiştirme değerlerini hesaplamak, modal analizi yapılarak yapıya ait doğal frekans değerlerini elde etmek ve mod şekillerini çizdirmek, geçici durum analizleri yapılarak zaman alanında tanımlanan girdi karşısında yapının göstereceği yer değiştirme, ivme, hız ve gerilme gibi cevapları elde etmek mümkün olmaktadır.

Kule krenler boyut itibarıyla deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde zaman, maliyet ve deneysel donanım açısından dezavantajlı durumda olan yapılardır. Bu sebeple bu çalışmada aynı zamanda laboratuvar ortamında kullanılacak ölçekli bir kule kren modeli tasarımı üzerine de odaklanılmıştır. Bu kapsamda benzerlik teoremi hakkında literatür bilgisi sunularak teoremin kullanım amacından bahsedilmiş ve literatürdeki örnekler sunularak çalışmaya konu olan kule krene

uygulanabilirliği üzerine tartışılmıştır. Benzerlik teoreminin çalışmadaki probleme uygulanması için izlenen adımlar detaylı bir şekilde sunularak farklı ölçek değerleri için ölçekli kule kren mastı modeline ait boyutlar hesaplanmış ve en uygun ölçek değer belirlenmiştir.

Oluşturulan sonlu elemanlar programında izlenen adımların, varsayımlarının ve kabullerinin gerçek örnek üzerinde karşılıklarının olup olmadığının sorgulanması adına deneysel modal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ölçeklenmiş kule kren mastına ait ölçülere bağlı kalarak ölçekli fiziksel model tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu model üzerinde bir ivme ölçer, bir darbe çekici ve veri toplama nitesi ile deneysel modal analiz çalışmaları yürütülmüştür.

Oluşturulan sonlu elemanlar programı ile gerçek model ve ölçekli model kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonrasında sonuçlar karşılaştırılmış ve ölçekli modelin gerçek modeli ne derece temsil ettiği grafikler ve tablolar yardımıyla sunulmuştur.

Deprem hareketi karşısında etkin olarak rol oynayan mast için literatürdeki çalışmalar ışığında farklı kafes tipleri tasarlanmış ve iki farklı deprem girdisi kullanılarak farklı senaryolar ile 10 farklı mast için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolara ait yer değiştirme, ivme, gerilme değerleri gibi çıktılar grafikler ve tablolar ile sunularak açıklanmıştır.

Yapılan bu çalışmalar kapsamında varılan sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

Sonlu elemanlar modelinin kurulması ve MATLAB ile programın oluşturulması;

- Sonlu elemanlar yöntemi, bir yapının bilinen ve matematiksel olarak ifade edilebilen daha küçük parçalara ayrılarak her bir parçaya ait rijitlik ve kütle matrislerinin tüm yapıyı temsil etmek üzere bir araya getirilmesi üzerine kurulmuş bir yöntemdir. Bu noktada, yapının doğru elemanlar ile temsil edilebilmesi ve yeterli sayıda elemana ayrılması önem arz etmektedir. Bu çalışmada kafes yapılı sistem ele alındığından tek boyutlu kiriş elemanlardan oluşan bir sonlu elemanlar programı oluşturulmuştur.

Program kullanıcı tercihine göre hem Euler-Bernoulli hem Timoshenko kiriş teoremine göre çalıştırılabilmektedir. Bu çalışmada, Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre analizler yapılmıştır. Timoshenko kiriş teoreminde eğilen kirişte kayma gerilmelerinin de etkisi dikkate alındığından kirişe ait kesitin eksenlere göre kayma alanlarının da ayrıca tanımlanması gerekmektedir. Oluşturulan programda bu seçenek aktif olmadığından yalnızca Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre sonuçlar alınmıştır. Programda kesit bilgileri girilirken eksenlere göre kayma alanları da hesaplatılarak Timoshenko kiriş teoremine göre yapılacak analizlerle Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre yapılacak analiz sonuçları karşılaştırılarak kayma gerilmelerinin hesaba katılmasının sonuçlara etki derecesi araştırılabilir.

- Programda kütle ve rijitlik matrisleri hesaplandıktan ve sınır şartları tanımlandıktan sonra yapılan modal analiz sonuçlarına göre Rayleigh sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplama kütle katılım faktörünün literatürde de belirtildiği gibi %90 olduğu durum referans olarak alınmış ve bu değer yeterli olduğu görülmüştür. Kütle katılım faktörünün farklı yüzdelerde olduğu durumlar ele alınarak benzer yapılar için uygun yüzde değeri tespit edilebilir.
- Zaman alanında yapılan geçici durum analizlerinde lineer sistemler için deprem mühendisliğinde kullanımı yaygın olan Duhamel integrasyonu yöntemi tercih edilmiştir. Lineer olmayan sistem kurgusunda bu çözüm yöntemi yerine diğer sayısal çözüm yöntemleri tercih edilmelidir.
- Oluşturulan program yardımıyla kafes yapılı sistemlerin çalışmaya konu olan dinamik analizleri için bir ticari programa olan bağımlılık kalmamıştır.

Benzerlik Teoremi ile ölçekli modelin tasarımı;

- Benzerlik teoremi, ilgili problemin amacına yönelik çözüm gerektiren ve çözüm aşamasında yapılan kabullerin önemli ve sonucu etkileyerek değiştirebildiği bir teoremdir. Bu çalışmada yer çekimi etkisi, P-delta etkisi, malzeme etkisi gibi durumlar ele alınmamıştır. Bu kapsamda, sisteme etki



eden değişkenlerin elastiklik modülü, geometri, zaman, gerilme, yer değiştirme, hız, ivme, doğal frekans gibi faktörler olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul ile 7 adet pi grubu oluşturulmuştur.

- Bu pi gruplarına göre ölçeklendirme uygulaması yapılmıştır. Ölçek değerleri seçilirken laboratuvar ve imalat imkânları düşünülerek 1/30 ve 1/40 değerleri seçilmiştir. Her iki ölçek değerine göre tasarlanan ve pratik ölçülere uyarlanan ölçekli modeller ve gerçek ölçülere ait model ile yapılan modal analiz sonuçlarına göre en iyi sonucun 1/30 ölçekli model ile elde edildiği ve bu modelin %2'lik fark ile gerçek modeli temsil ettiği belirlenmiştir. Çalışmada ölçekli model aynı zamanda imal edileceğinden imalata uygunluk açısından 1/30 ölçekli modele ait değerler yeni bir benzerlik çalışması ile pratik(imalata uygun) ölçülere dönüştürülmüştür. Daha farklı ölçek değerleri kullanılarak gerçek modelin daha az hata yüzdesi ile temsil edilmesi sağlanabilir.
- Boyutları sebebiyle deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği veya gerçekleştirilmesinin zaman ve maliyet açısından dezavantajlı olduğu yapı veya sistemlere benzerlik teoreminin uygulanması ile laboratuvar ortamında kullanılabilir hale getirilebilmesi çalışmaya konu olan kule kren mastı üzerinden gösterilmiştir.

Deneysel modal analiz ile sonlu elemanlar modelinin doğrulanması;

- Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin fiziksel modeli ne derece temsil ettiğinin sorgulanması için fiziksel model üzerinde deneysel modal analiz yapılmıştır. Tablo 3.5'den de görüleceği üzere teorik modelden alınan değerler ile 6 farklı ölçümden alınan değerlerin ortalaması alınarak yapılan karşılaştırmada ilgili doğrultudaki ilk 5 doğal frekanslar arasında 3 numaralı mod karşılaştırma dışı tutulursa en az %0,24 en fazla %2.88 fark mevcuttur. Bu karşılaştırmada 3 numaralı modun değerlendirilmemesinin sebebi bu modun yapının burulma modu olması ve diğer modlar göz önünde alındığında kütle katılım faktörünün bu modu önemsiz kılacak

miktarda düşük olmasıdır. Bu sonuçlara bakıldığında teorik modelin fiziksel modeli %0,24-2,88 farkla temsil ettiği söylenebilmektedir.

Ölçekli model ile gerçek modelin karşılaştırılması;

- Ölçekli modelden elde edilen modal analiz sonuçları ölçek değeri kullanılarak gerçek modelin sahip olması gereken değerler hesaplanmış ve bu değerler gerçek model ile yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre; ilk 14 doğal frekans değerleri kabul edilebilir bir seviyede yakın çıkmaktadır. Devam eden doğal frekanslar arasındaki oranın ise ölçek değerinden uzaklaştığı görülmektedir. Kütle katılım faktörlerine bakıldığında ilerleyen frekansların yapının dinamik davranışına etkisi ihmal edilebilir seviyede olduğundan bu frekanslarda meydana gelen ölçek değerinden uzaklaşma durumu da bu örnek için ihmal edilebilmektedir. Zaman alanında yapılan analizlere ait sonuçlar da grafikler halinde gösterilmiştir(Şekil 4.42 - Şekil 4.45). Karşılaştırmalı grafiklerden de görüleceği üzere grafikler kabul edilebilir seviyede uyum içerisindedir. Bu sayede izlenen ölçekleme yöntemi ile gerçek boyutu ile deneysel çalışmaların yapılamadığı benzer yapıların ölçeklenerek üzerinde deney yapılabilir duruma getirilebilmesinin mümkün olacağı gösterilmiştir.

Farklı kafes yapıları ile geçici durum analizlerinin yapılması;

- Depremde karşısındaki tepki hareketinde etkin olarak rol oynayan kule kren mastı kafes yapıdadır. Bu sebeple literatürde temel kafes tipleri olarak tanımlanan K, Ters V, V ve X tipleri için kule kren mastı yeniden tasarlanmıştır. Mastların iki farklı deprem girdisi karşısında ilave yük(bom ve karşı ağırlık) olup olmaması durumlarına göre çeşitli senaryolar ile geçici durum analizleri yapılmıştır.
- Aynı ağırlık değerine sahip olacak şekilde kurgulanan 1. Grup mast tiplerinin sonuçlarına göre; (Grup1).1 için en az yer değiştirme ve ivme değerini Ters V tipi, en az gerilme değerini ise X tipi mast sağlarken (Grup1).3 için en az yer değiştirme, ivme ve gerilme değerlerini Ters V tipi mast sağlamaktadır. (Grup1).2 için en az yer değiştirme, ivme ve gerilme

değerlerini V tipi mast sağlarken (Grup1).4 için en az yer değiştirmeyi ve ivmeyi X tipi mast ve en az gerilmeyi ise V tipi mast sağlamaktadır.

- Aynı kesite sahip çapraz elemanlara sahip olacak şekilde tasarlanmasıyla oluşturulan 2. Grup mast tiplerinin sonuçlarına göre; (Grup2).1 için en az yer değiştirme değerini K tipi mast, ivme değerini X 2 tipi mast, en az gerilme değerini ise K tipi mast sağlarken (Grup2).3 için en az yer değiştirme ve ivme değerini Ters V 2 tipi mast, gerilme değerini ise K tipi mast sağlamaktadır. (Grup2).2 ve (Grup2).4 için en az yer değiştirme, ivme değerlerini Ters V 2 tipi mast ve gerilme değerini K tipi mast sağlamaktadır.
- K, K<sub>2</sub> 2, K Konik 5 ve K Konik 10 tipi mastların aynı kesite sahip çapraz elemanlara sahip olacak şekilde fakat farklı örgü sıklığı ve 1. Mast için farklı koniklikte tasarlanmasıyla oluşturulan 3. Grup mast tiplerinin sonuçlarına göre; (Grup3).1 için en az yer değiştirme ve gerilme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme değerini ise K Konik 5 tipi mast sağlarken (Grup3).3 için en az yer değiştirme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme ve gerilme değerlerini ise K tipi mast sağlamaktadır. (Grup3).2 için en az yer değiştirme, ivme ve gerilme değerlerini K Konik 10 tipi mast sağlarken (Grup3).4 için en az yer değiştirme değerini K Konik 10 tipi mast, ivme değerini K<sub>2</sub> 2 tipi mast ve gerilme değerini K tipi mast sağlamaktadır.
- Bu sonuçlara göre belirli bir mast tipin diğerlerine göre her durumda üstün olduğunu söylemek mümkün değildir. Sonuçlardan da görülmektedir ki, ilave yükün olup olmaması durumuna göre ve farklı karakteristikteki deprem girdilerine göre farklı çıktılar elde edilmektedir. Bu sebeple tasarlanacak kafes tipinin yapının kullanılacağı deprem bölgesi ve taşıyacağı yük de düşünülerek planlanması gerekmektedir.

- [1] J. S. Hwang, K. S. Lee, M. W. Hur, and S. H. Lee, "Mechanical Hysteresis Model of a Metal-Wire Kagome Truss for Seismic Strengthening for Building Systems," *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 115–123, 2019, doi: 10.1080/13467581.2019.1599898.
- [2] S. Rajasekaran, *Structural Dynamics of Earthquake Engineering*. 2009.
- [3] T. K. Datta, *Seismic Analysis of Structures*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010.
- [4] T. Kanayama and A. Kashiwazaki, "A Study on The Dynamic Behavior Of Container Cranes under Strong Earthquakes," *Seism. Eng.*, vol. 364, pp. 276–284, 1998.
- [5] T. Kanayama, A. Kashiwazaki, N. Shimizu, I. Nakamura, and N. Kobayashi, "Large Shaking Table Test of a Container Crane by Strong Ground Excitation," *Seism. Eng.*, vol. 364, pp. 243–248, 1998.
- [6] N. Kobayashi, H. Kuribara, T. Honda, and M. Watanabe, "Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem between Wheels and Rails," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 126, no. 1, pp. 59–65, 2004, doi: 10.1115/1.1636786.
- [7] E. Soderberg and M. Jordan, "Seismic Response of Jumbo Container Cranes and Design Recommendations to Limit Damage and Prevent Collapse," in *ASCE Ports 2007 Conference*, 2007, vol. 238, pp. 1–10, doi: 10.1061/40834(238)105.
- [8] B. Koshab and L. Jacobs, "Seismic Performance of Container Cranes, Seismic Risk Management for Port Systems," 2008.
- [9] L. Jacobs, R. DesRoches, and R. Leon, "Shake Table Testing of Container Cranes," in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, p. 2008.
- [10] T. Sugano, M. Takenobu, T. Suzuki, and Y. Shiozaki, "Design Procedures of Seismic-Isolated Container Crane at Port," *14th World Conf. Earthq. Eng.*, 2008.
- [11] S. Ahmet, A. C. Oktay, and E. Ayşe, "Increasing of Seismic Performance of Cranes Using Soil Improvement Method," İstanbul, 2011.
- [12] A. Sagirli and C. O. Azeloglu, "Investigation of the Dynamic Behaviors of Cranes under Seismic Effects with Theoretical and Experimental Study," *Adv. Mater. Res.*, vol. 445, no. March, pp. 1082–1087, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.445.1082.
- [13] A. C. Oktay, "Modeling of the Behaviors of Cranes under Seismic Effect and Vibrations Active Control," Yıldız Technical university, 2012.
- [14] C. O. Azeloğlu, "Krenlerin Sismik Etki Altındaki Davranışlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin Aktif Kontrolü," Yıldız Teknik Üniversitesi,

2012.

- [15] A. Sağirli, C. O. Azeloğlu, R. Guclu, and H. Yazici, “Self-Tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures against Earthquake Induced Vibration,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 64, no. 4, pp. 375–384, 2011, doi: 10.1007/s11071-010-9868-2.
- [16] C. O. Azeloğlu and A. Sağırli, “Active Vibration Control of Container Cranes Against Earthquake Induced Vibration C.,” *J. Eng. Nat. Sci. Sigma Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, no. 212, pp. 383–394, 2011.
- [17] C. O. Azeloğlu, A. Sağırli, H. Yazici, and R. Güçlü, “Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Bulanık PID Kontrolör ile Aktif Kontrolü,” *Fırat Üniv. Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 24, no. 2, pp. 149–155, 2012.
- [18] C. O. Azeloğlu and A. Sağırli, “Lmi Based Mixed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> State-Feedback Control of Crane Structures Against Earthquake Induced Vibration,” *J. Eng. Nat. Sci. Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, no. 212, pp. 281–291, 2012.
- [19] L. Solazzi, “Ship to Shore Crane Subjected to Earthquake,” *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2690–2695, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.448.
- [20] H. Li-Jeng and S. Hong-Jie, “Seismic Response Analysis of Tower Crane using SAP2000,” *Procedia Eng.*, vol. 79, no. 1st ICM, pp. 513–522, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.374.
- [21] F. Ju and Y. S. Choo, “Dynamic Analysis of Tower Cranes,” *J. Eng. Mech.*, vol. 131, no. 1, pp. 88–96, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:1(88).
- [22] B. Ai, J. L. Yang, and Z. Z. Pei, “Seismic Response Analysis of Tower Crane in Consideration of the Building-Crane Interaction,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 353–354, pp. 1981–1985, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.1981.
- [23] F. An, C.-F. Wang, S.-C. Yuan, D.-H. Wang, and J.-S. Liu, “Earthquake Spectrum Analysis of Unconventional Dedicate Tower Crane,” in *2014 International Conference on Mechanical Science and Control Engineering*, 2014, pp. 74–78.
- [24] A. Pristyák, “Analysis of Dynamicloads of the Lattice Type Mast Structure of a Tower Crane using Simulation Method,” *Period. Polytech. Transp. Eng.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 103–113, 1997.
- [25] M. Jovanović, G. Radoičić, V. Tomić, and D. Marković, “Experience with Extreme Impacts Load Excitation,” in *Proceedings of the XXI International Conference MHCL’15*, 2015, no. December.
- [26] F. Ju, Y. S. Choo, and F. S. Cui, “Dynamic Response of Tower Crane Induced by The Pendulum Motion of the Payload,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, pp. 376–389, 2006, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.078.
- [27] M. Alămoreanu and A. Vasilescu, “Behavior of Tower Cranes under Seismic

- Actions,” *UPB Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.*, vol. 72, no. 2, pp. 55–64, 2010.
- [28] M. Alămoreanu and A. Vasilescu, “Dynamic Response of Anchored Tower Cranes under Sinusoidal Damped Seismic Action. Case Study,” *Rom. J. Acoust. Vib.*, vol. 11, no. 1, pp. 3–10, 2014.
- [29] M. Alămoreanu and A. Vasilescu, “Dynamic Response of Tower Cranes under Seismic Actions. Case Study,” *Rom. J. Acoust. Vib.*, vol. 8, no. 2, pp. 85–90, 2011.
- [30] J. J. Rubio-Ávila, R. Alcántara-Ramírez, J. Jaimes-Ponce, and I. I. Siller-Alcalá, “Design, Construction and Control of a Novel Tower Crane,” *Int. J. Math. Comput. Simul.*, vol. 1, no. 2, pp. 119–126, 2007.
- [31] A. Karpe, S. Karpe, and A. Chawrai, “Validation of Use Of FEM (ANSY) for Structural Analysis of Tower Crane Jib and Static And Dynamic Analysis of Tower,” *Int. J. Innov. Res. Adv. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 69–75, 2014, [Online]. Available: <http://ijrae.com/images/downloads/vol1issue4/MYME10087-13.pdf>.
- [32] B. Jerman, P. Podržaj, and J. Kramar, “An Investigation of Slewing-Crane Dynamics during Slewing Motion - Development and Verification of a Mathematical Model,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 46, no. 5, pp. 729–750, 2004, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2004.05.006.
- [33] X. Y. Lu, “The Fatigue Behavior Study of Intelligent Tower Crane by Finite Element Theory,” *Int. J. Control Autom.*, vol. 8, no. 10, pp. 125–134, 2015, doi: 10.14257/ijca.2015.8.10.12.
- [34] N. Sun, Y. Fang, H. Chen, B. Lu, and Y. Fu, “Slew/Translation Positioning and Swing Suppression for 4-DOF Tower Cranes with Parametric Uncertainties: Design and Hardware Experimentation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 10, pp. 6407–6418, 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2587249.
- [35] C. Chen, T. Lu, H. Y. Chen, and L. C. Tian, “The Finite Element Analysis of Tower Crane Safety Performance,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 405–408, pp. 1135–1138, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.1135.
- [36] Y. Q. Gu and C. F. Mao, “The Preliminary Analysis on Tower Crane by Earthquake Effect,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 353–354, pp. 1892–1895, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.1892.
- [37] J. F. Lei, X. H. Chen, L. Huang, S. Lei, C. S. Chen, and L. Shen, “Modeling and Modal Analysis of the Whole Structure of PT7032 Tower Crane Based on Finite Element Method,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 706–708, pp. 1433–1436, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.706-708.1433.
- [38] E. S. Kim and S. K. Choi, “Failure Analysis of Connecting Bolts in Collapsed Tower Crane,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 36, no. 3, pp. 228–241, 2013, doi: 10.1111/j.1460-2695.2012.01716.x.
- [39] G. XU, W. LIU, and Y. TAO, “Optimization Design of Arm Frame of Folding

- Arm Type Tower Crane Based on ANSYS,” *DEStech Trans. Mater. Sci. Eng.*, no. ammme, pp. 1–6, 2017, doi: 10.12783/dtmse/ammme2016/6882.
- [40] J. Jie Jia and Y. Yipin Wan, “Light-weight Design of Tower Crane Boom Structure Based on Multi-objective Optimization,” in *International Conference on Mechanical Science and Engineering (ICMSE2015)*, 2016, pp. 255–260, doi: 10.2991/mse-15.2016.44.
- [41] L. Qing and Z. Yihui, “Finite Element Analysis on Tower Crane Based on ANSYS,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 190–191, pp. 373–380, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.190-191.373.
- [42] S. C. Kang and E. Miranda, “Numerical Methods to Simulate and Visualize Detailed Crane Activities,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 169–185, 2009, doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00579.x.
- [43] F. Rauscher and O. Sawodny, “An Elastic Jib Model for the Slewing Control of Tower Cranes,” in *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 9796–9801, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.886.
- [44] G. Huang, C. He, and X. Wang, “A Modal Analysis of Giant Shipbuilding Tower Crane,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 239–240, pp. 473–477, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.239-240.473.
- [45] B. Li, H. Zhang, S. Xu, J. Zhang, and X. Zhao, “Parametric Modeling of Whole Tower Crane Based on ANSYS,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 215–216, pp. 1140–1145, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.215-216.1140.
- [46] K. Itoh, N. Suemasa, S. Tamate, and Y. Toyosawa, “Dynamic Loading Test for Pile Supported Tower Crane in Soft Clay,” 2004.
- [47] D. Voisin, G. Grillaud, C. Sollic, A. Beley-Sayettat, J. L. Berlaud, and A. Miton, “Wind Tunnel Test Method to Study out-of-Service Tower Crane Behaviour in Storm Winds,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 92, no. 7–8, pp. 687–697, 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.03.005.
- [48] Y. Ushio, M. Okano, and Y. Nagano, “The Earthquake Responses of Climbing-Type Tower Cranes Installed in High-Rise Buildings in Consideration of Various Situations Under Construction,” *16th World Conf. Earthquake, 16WCEE 2017*, pp. 2–12, 2017.
- [49] G. Yao, H. Li, Y. Yang, and W. Pu, “Seismic Responses and Dynamic Characteristics of Boom Tower Crane Basing on Measured Strong Earthquake Excitation,” *J. Vibroengineering*, vol. 21, no. 1, pp. 154–169, 2019, doi: 10.21595/jve.2018.19626.
- [50] P. D. Moncarz and H. Krawinkler, “Theory and Application of Experimental Model Analysis in Earthquake Engineering,” 1981.
- [51] A. Jha, R. Sedaghati, and R. Bhat, “Dynamic Testing of Structures Using Scale Models,” 2005.
- [52] C. José and P. Coutinho, “Structural Reduced Scale Models Based on

Similitude Theory,” University of Porto, 2017.

- [53] V. Prabhu Raja, M. Ramu, and P. R. Thyla, “Analytical and Numerical Validation of the Developed Structural Similitude for Elastic Models,” *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 6, pp. 492–496, 2013.
- [54] M. Shehadeh, Y. Shennawy, and H. El-Gamal, “Similitude and Scaling of Large Structural Elements: Case Study,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 54, no. 2, pp. 147–154, 2015, doi: 10.1016/j.aej.2015.01.005.
- [55] S. Balawi, O. Shahid, and M. Al Mulla, “Similitude and Scaling Laws - Static and Dynamic Behaviour Beams and Plates,” *Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 330–337, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.076.
- [56] R. E. Oshiro and M. Alves, “Scaling of Structures Subject to Impact Loads When Using a Power Law Constitutive Equation,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 46, no. 18–19, pp. 3412–3421, 2009, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.05.014.
- [57] X. Li, “A Scaling Approach for High-Frequency Vibration Analysis of Line-Coupled Plates,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011*, 2011, pp. 3193–3197, doi: 10.1016/j.jsv.2013.03.037.
- [58] S. Torkamani, A. A. Jafari, and H. M. Navazi, “Scaled Down Models for Free Vibration Analysis of Orthogonally Stiffened Cylindrical Shells Using Similitude Theory,” 2008.
- [59] Z. Zhang, Y. Wang, and Z. Fan, “Similarity Analysis between Scale Model and Prototype of Large Vibrating Screen,” *Shock Vib.*, vol. 2015, no. 1, 2015, doi: 10.1155/2015/247193.
- [60] J. Rezaeepazhand, G. J. Simites, J. Rezaeepazhand, and G. J. Simites, “Use of Scaled-Down Models for Predicting Vibration Response of Laminated Plates,” *Compos. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 419–426, 1995, doi: 10.1016/0263-8223(94)00064-6.
- [61] S. S. Wang, Z. H. Zhao, M. S. Cao, X. M. Li, and Y. R. Zhang, “Scale Effects on Structural Dynamic Properties and Responses: Illustrated on Arch Dams,” *J. Vibroengineering*, vol. 16, no. 8, pp. 4026–4038, 2014.
- [62] Y. L. Jin and Z. G. Li, “Theoretical Design and Experimental Verification of a 1/50 Scale Model of a Quayside Container Crane,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 226, no. 6, pp. 1644–1662, 2012, doi: 10.1177/0954406211423603.
- [63] X. Lu, Y. Chen, B. Chen, and P. Li, “Shaking Table Model Test on the Dynamic Soil-Structure Interaction System,” *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 55–64, 2002, doi: 10.3130/jaabe.1.55.
- [64] X. Lu, G. Fu, W. Shi, and W. Lu, “Shake Table Model Testing and Its Application,” *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 17, no. 1, pp. 181–201, 2008, doi: 10.1002/tal.338.
- [65] T. Baran, “Yapıların Dinamik Davranışının Deneysel ve Teorik Olarak



- İncelenmesi,” 2008.
- [66] S. Bucas, “Reliability Assessment of Tower Crane Structural Members to Cite This Version : Thèse Évaluation de la Fiabilité des Éléments de Charpente De Grues À Tour,” 2015.
- [67] “Manitowoc Tower Cranes.” <https://www.manitowoc.com/potain>.
- [68] P. Avitabile, “Introduction to Experimental Modal Analysis: A Simple Non-mathematical Presentation,” *Modal Test. A Pract. Guid.*, pp. 1–35, 2017, doi: 10.1002/9781119222989.ch1.
- [69] C. W. De Silva, “Modal Analysis,” in *Vibratoin and Shock Handbook*, 2005.
- [70] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering Anil K. Chopra University*. 1995.
- [71] S. G. Kelly, *Mechanical Vibrations Theory and Applications*. Global Engineering, 2012.
- [72] M. R. Hatch, *Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS*. Chapman & Hall / CRC, 2001.
- [73] A. Taushanov, “Definition of the Influence Vector in Earthquake Analysis,” in *International Jubilee Conference UACEG*, 2012, no. November.
- [74] S. Karabay, *Mekanik Titreşimler Cilt-1 Birsen Yayınevi Doç. Dr. Seda t KARABAY İstanbul 2011*. İsanbul: Birsen Yayınevi, 2011.
- [75] P. Chopra, “Effective Mechanical Properties of Lattice Materials,” no. November, p. 93, 2011.
- [76] Z. Song and C. Su, “Computation of Rayleigh Damping Coefficients for the Seismic Analysis of a Hydro-Powerhouse,” *Shock Vibrat.*, vol. 2017, no. 2, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2017/2046345>.
- [77] I. Chowdhury and S. P. Dasgupta, “Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems,” *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 8 C, 2003.
- [78] A. Burgess, “Transient Response of Mechanical Structures Using Modal Analysis,” no. January, pp. 1–301, 1988, [Online]. Available: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/40377709.PDF>.
- [79] C. Analysis, *Standard Methods for*, vol. i. 2003.
- [80] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, Fourth Edi. Elsevier Inc., 2005.
- [81] G. R. Liu and S. S. Quek, *The Finite Element Method A Pactical Course*. 2003.
- [82] H. Karadeniz, *Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures*. Springer, 2013.
- [83] J. Freund and A. Karakoç, “Shear and Torsion Correction Factors of Timoshenko Beam Model for Generic Cross Sections,” *Res. Eng. Struct. Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 19–27, 2016.

- [84] F. Gruttmann, "Shear Correction Factors in Timoshenko ' S Beam Theory for Arbitrary Shaped Cross – Sections," pp. 1–20, 2001.
- [85] H. Hosdorf, *Model Analysis of Structures*. Van Nostrand Reinhold Co. New York, 1971.
- [86] G. J. R. J. Simites, "Structural Similitude and Scaling Laws For Laminated Beam-Plates," 1992.
- [87] A. Jha, R. Sedaghati, and R. Bhat, "Dynamic Testing of Structures Using Scale Models," in *46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, 2005, vol. 9, no. April, pp. 5731–5744.
- [88] A. Stavridis, B. Shing, and J. Conte, "Design, Scaling, Similitude, and Modeling of Shake-Table Test Structures," *PPT Present.*, 2010.
- [89] H. G. Harris and G. M. Sabnis, *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Second Edi. CRC Press, 1999.
- [90] B. Zohuri, *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers And Scientists*. 2015.
- [91] A. A. Sonin, *The Physical Basis of Dimensional Analysis*, vol. Second Edi. 2001.
- [92] Y. Ushio, M. Okano, and Y. Nagano, "The Earthquake Responses of Climbing-Type Tower Cranes Installed in High-Rise Buildings in Consideration of Various Situations Under Construction," 2017.
- [93] H. Kenan and O. Azeloğlu, "Design of Scaled Down Model of a Tower Crane Mast by Using Similitude Theory," *Eng. Struct.*, vol. 220, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110985.
- [94] P. Girdhar and C. Scheffer, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [95] F. Cheng, H. Jiang, and H. Lou, "Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control." p. 672, 2008, doi: 10.1201/9781420008173.
- [96] Z. Ay, İ. D. Çelik, and N. A. Kimilli, "Some Assessments on Seismic Performance of Braced Steel Frames," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 26, no. 1, pp. 7–17, 2010.
- [97] M. Bruneau, C.-M. Uang, and R. Sabelli, *Ductile Design of Steel Structures*, Second Edi. McGraw Hill, 2011.
- [98] A. Jesumi and M.G. Rajendran, "Optimal Bracing System for Steel Towers," vol. 3, no. 2, pp. 729–732, 2013.
- [99] M. Chouhan and S. Maru, "Pushover Analysis of Steel Frame Structures with Different Types of Bracing System," *Int. J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 37–44, 2017.
- [100] S. Momenzadeh and J. Shen, "Seismic Demand on Columns in Special Concentrically Braced Frames," *Eng. Struct.*, vol. 168, no. April, pp. 93–107, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.04.060.

- [101] A. Rahimi and M. R. Maheri, “The Effects of Retrofitting RC Frames By X-Bracing on The Seismic Performance of Columns,” *Eng. Struct.*, vol. 173, no. March, pp. 813–830, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.003.
- [102] A. Keivan and Y. Zhang, “Seismic Performance Evaluation of Self-Centering K-Type and D-Type Eccentrically Braced Frame Systems,” *Eng. Struct.*, vol. 184, no. October 2017, pp. 301–317, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.087.
- [103] A. Martin and G. G. Deierlein, “Structural Topology Optimization of Tall Buildings for Dynamic Seismic Excitation Using Modal Decomposition,” *Eng. Struct.*, vol. 216, no. April, p. 110717, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110717.
- [104] M. S. Kumar, R. Senthilkumar, and L. Sourabha, “Seismic Performance of Special Concentric Steel Braced Frames,” *Structures*, vol. 20, no. April, pp. 166–175, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.03.012.
- [105] T. Türker and A. Bayraktar, “Experimental and Numerical Investigation of Brace Configuration Effects on Steel Structures,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 5, pp. 854–865, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.12.008.
- [106] S. C. Goel and X. Tang, “Earthquake Resistant Design of Ductile Braced Structures,” in *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering Tokyo-Kyoto, JAPAN*, 1988, vol. V, pp. 1143–1148.
- [107] N. Mashhadiali and A. Kheyroddin, “Seismic Performance of Concentrically Braced Frame with Hexagonal Pattern of Braces to Mitigate Soft Story Behavior,” *Eng. Struct.*, vol. 175, no. March, pp. 27–40, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.036.
- [108] B. Jayaram Nayak, K. Kamath, and A. R. Avinash, “Pushover Analysis of Three Dimensional Steel Braced Structure with Varying Bracing Heights,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 265–274, 2018.
- [109] N. Yoshida, *Seismic Ground Response Analysis*. Springer, 2015.

**Senaryo 1.1:**

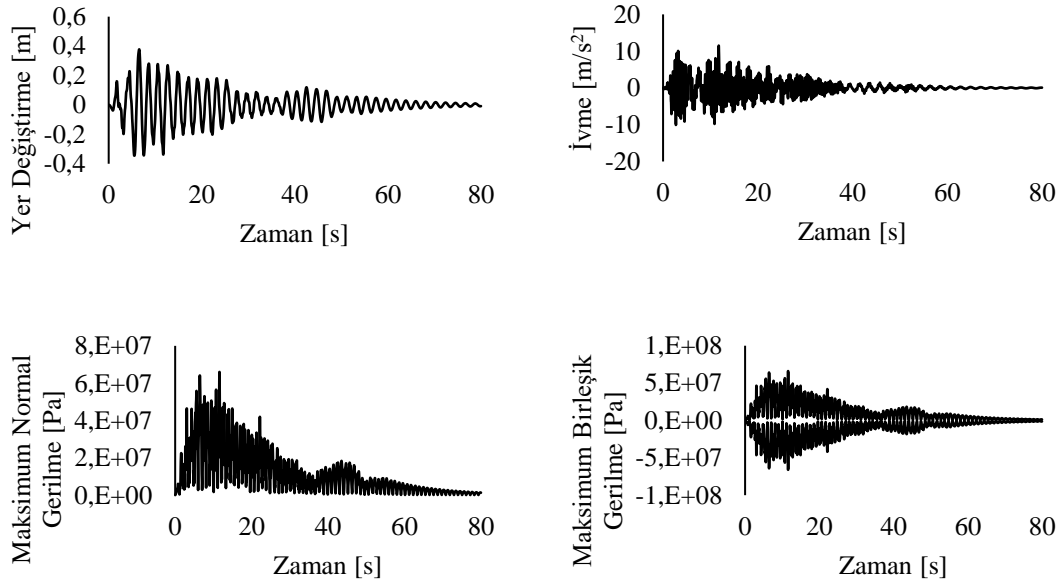
Senaryo 1.1 çalışmada referans olarak kullanılan K tipi masta ait olup ilave ağırlık olmadığı durumda El Centro deprem girdisi ile yapılan analizleri içermektedir. Tablo 0.1’de mast tipi, bu mastın tepe ve orta noktasına ait düğüm numarası, mastın toplam kütlesi, kabul edilen sönüm oranı ve sönüm matrisinin oluşturulmasında kullanılan rayleigh sönüm katsayıları gösterilmektedir. Tablo 0.2’de ise sadece ilk 6 moda ait doğal frekanslar, periyotlar ve üç eksendeki kütle katılım faktörleri ile etkin kütle miktarları sunulmaktadır. Şekil 0.2’de da modal analiz sonuçlarına göre çizdirilen ve ilk 6 moda ait mod şekilleri görülmektedir. Diğer tüm tiplerde de benzer mod şekilleri olduğundan burada sadece K tipine ait mod şekilleri gösterilecektir.

Tablo 0.1 Senaryo 1.1 genel bilgiler

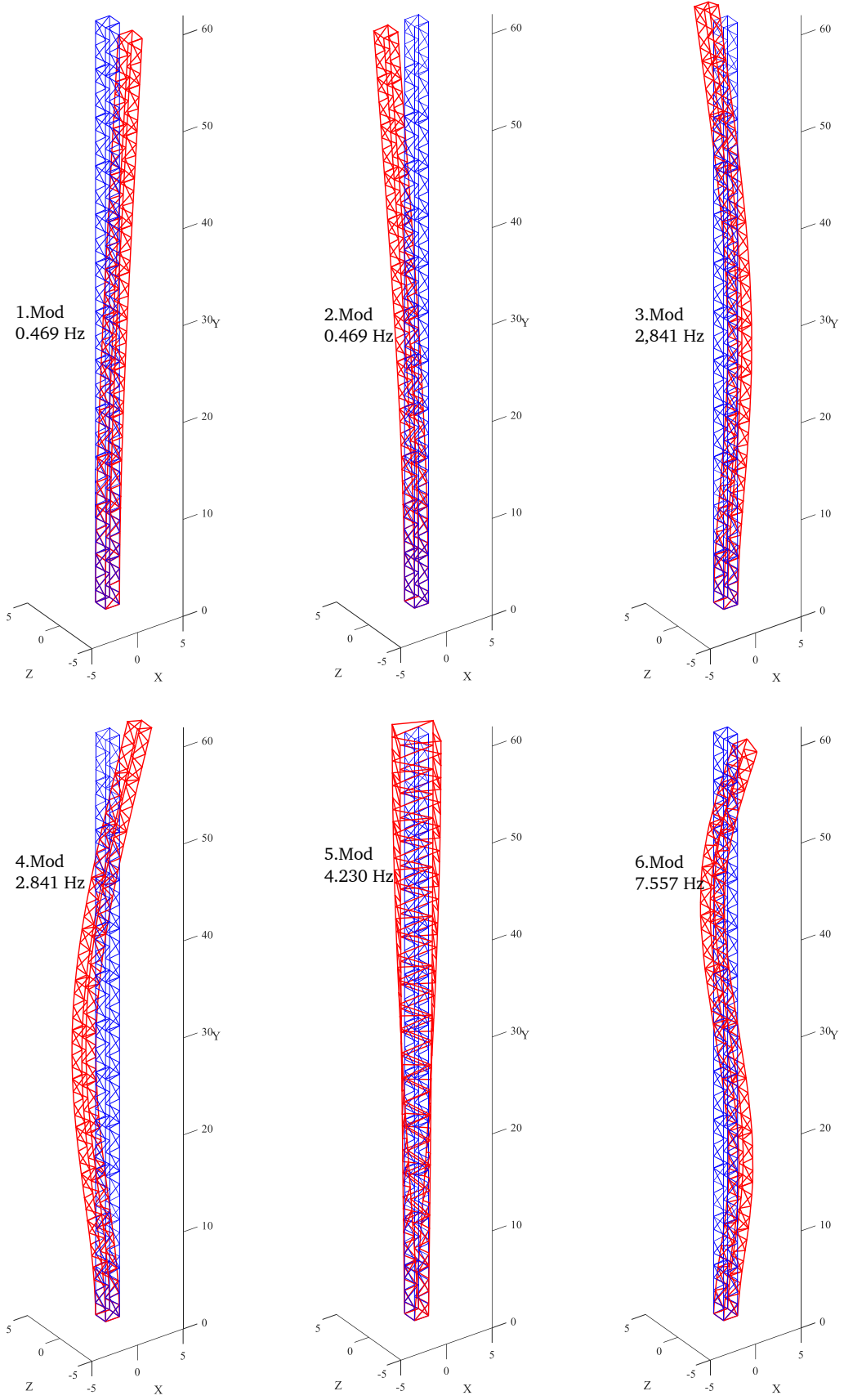
Mast Tipi			
K_El Centro_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		613	
Mast Kütle [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21665,58869			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,142601	5,56E-04

Tablo 0.2 Senaryo 1.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,469	2,13	3,58388	7,12E-09	-115,288	12,8442	5,07E-17	13291,43
2	0,469	2,13	-115,344	5,12E-09	-0,3914	13304,12	2,62E-17	0,153191
3	2,841	0,35	-4,46256	-9,61E-08	-64,492	19,91447	9,24E-15	4159,22
4	2,841	0,35	-64,3422	-6,86E-08	6,261833	4139,924	4,71E-15	39,21055
5	4,230	0,23	3,81E-07	0,204396	1,83E-07	1,45E-13	0,041778	3,34E-14
6	7,557	0,13	-1,82409	9,26E-08	-38,2629	3,32729	8,57E-15	1464,051



Şekil 0.1 Senaryo 1.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



**Şekil 0.2** K tipi mast için ilk 6 frekansa ait mod şekilleri

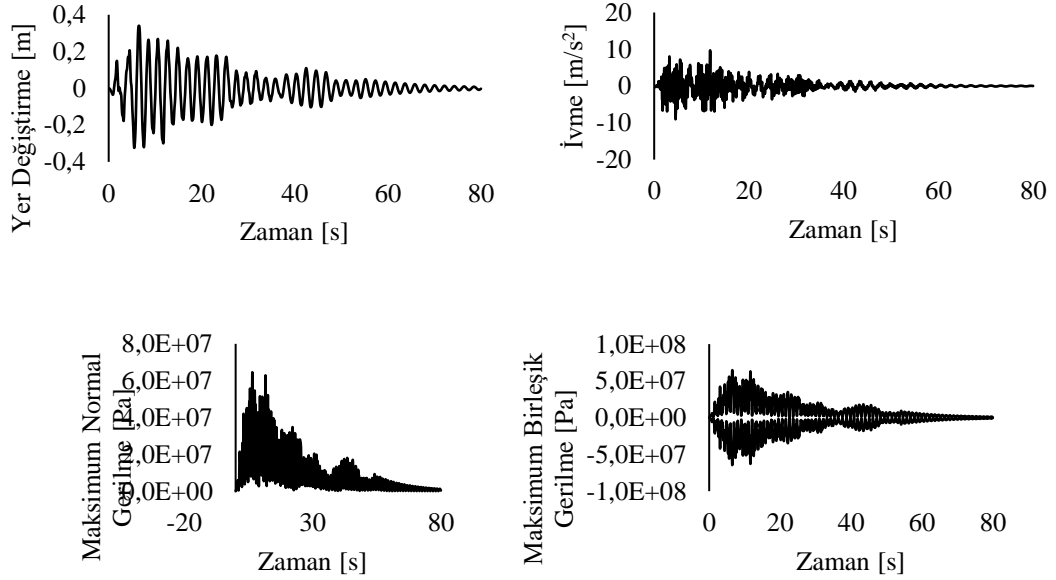
## Senaryo 2.1

Tablo 0.3 Senaryo 2.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
22092,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,142931	6,22E-04

Tablo 0.4 Senaryo 2.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,472	2,11	116,0627	1,85E-10	0,173361	13470,55	3,43E-20	0,030054
2	0,472	2,11	0,173176	2,77E-05	-116,044	0,02999	7,68E-10	13466,31
3	2,795	0,35	-65,6427	1,44E-09	-0,03146	4308,959	2,08E-18	0,00099
4	2,799	0,35	0,031177	4,59E-04	-65,5058	0,000972	2,11E-07	4291,005
5	3,547	0,28	2,21E-04	0,000918	-2,14E-01	4,88E-08	8,43E-07	4,58E-02
6	7,217	0,13	-39,2588	-9,21E-10	-0,01059	1541,253	8,48E-19	0,000112



Şekil 0.3 Senaryo 2.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

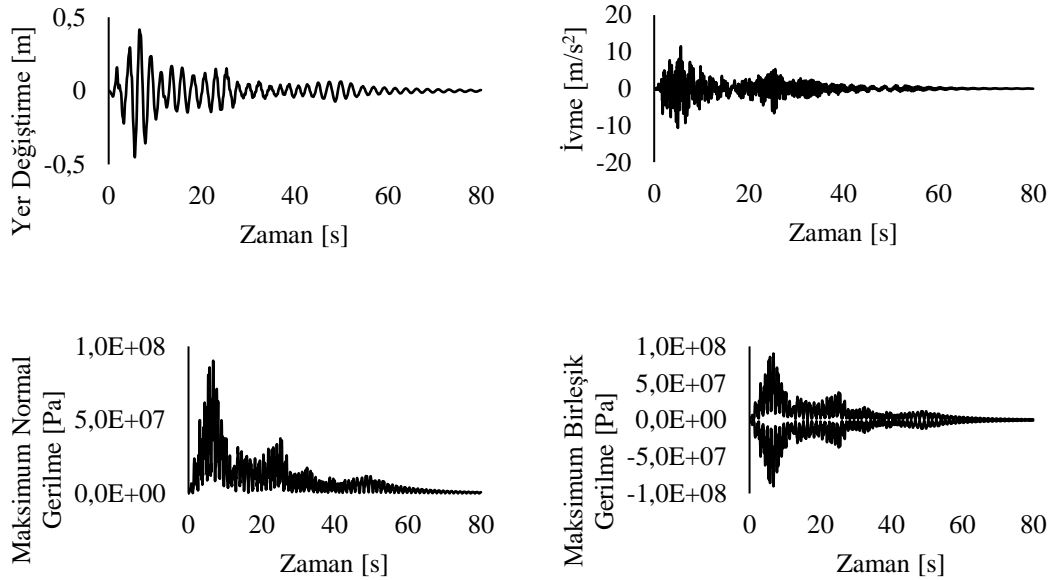
### Senaryo 3.1

Tablo 0.5 Senaryo 3.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26628,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,131025	6,24E-04

Tablo 0.6 Senaryo 3.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,431	2,31	-4,36545	-3,29E-11	127,2177	19,05718	1,08E-21	16184,35
2	0,431	2,31	127,2925	-3,28E-12	0,150544	16203,39	1,08E-23	0,022663
3	2,595	0,38	-0,90757	-2,47E-11	-71,5922	0,82368	6,08E-22	5125,437
4	2,595	0,38	71,5979	-1,27E-11	0,020252	5126,26	1,61E-22	0,00041
5	3,912	0,25	5,33E-10	-3,8E-11	5,81E-10	2,84E-19	1,48E-21	3,38E-19
6	6,828	0,14	1,579358	-1,27E-11	-42,6913	2,494371	1,62E-22	1822,548



Şekil 0.4 Senaryo 3.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



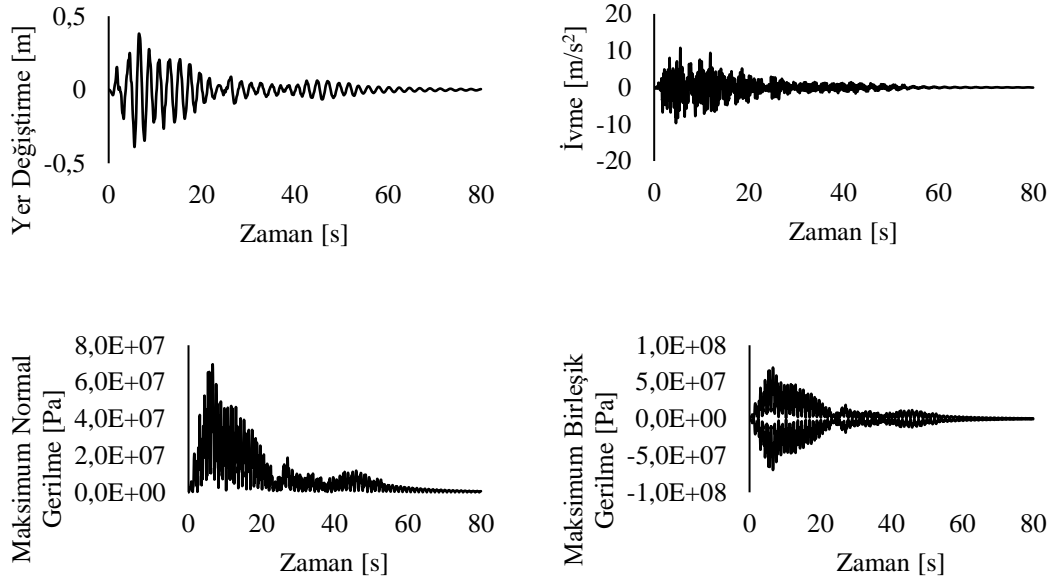
## Senaryo 4.1

Tablo 0.7 Senaryo 4.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
22092,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,137552	6,12E-04

Tablo 0.8 Senaryo 4.1 Modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,453	2,20	0,293867	2,21E-11	117,1912	0,086358	4,90E-22	13733,78
2	0,453	2,20	-117,192	4,81E-12	0,014638	13733,87	2,31E-23	0,000214
3	2,700	0,37	-65,8236	-5,25E-12	-0,11437	4332,743	2,75E-23	0,013079
4	2,700	0,37	-0,44285	-1,73E-11	65,82218	0,196116	3,00E-22	4332,56
5	3,525	0,28	1,72E-09	-3,6E-11	-2,47E-10	2,94E-18	1,28E-21	6,08E-20
6	7,025	0,14	0,010615	-6,10E-12	38,69703	0,000113	3,72E-23	1497,46



Şekil 0.5 Senaryo 4.1 a) Yer değıştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiğı

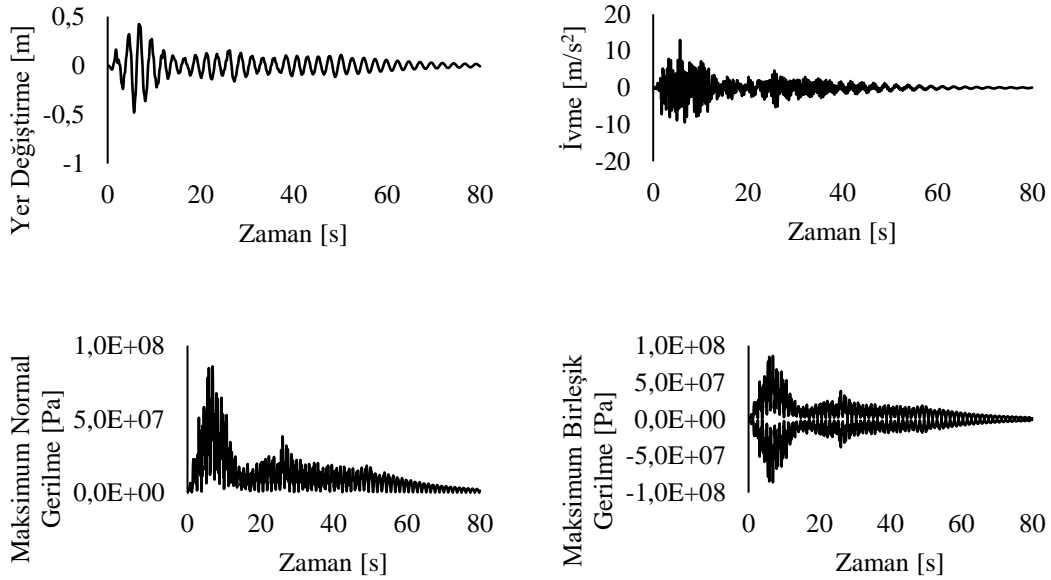
## Senaryo 5.1

Tablo 0.9 Senaryo 5.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26628,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,12587	6,39E-04

Tablo 0.10 Senaryo 5.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,414	2,41	-128,557	9,80E-12	-4E-09	16526,79	9,60E-23	1,62E-17
2	0,414	2,41	-1,52925	-1,68E-11	-128,547	2,338612	2,81E-22	16524,45
3	2,502	0,39	-71,9476	4,42E-12	-5,1E-10	5176,456	1,95E-23	2,6E-19
4	2,502	0,39	-3,10582	-3,12E-11	71,88052	9,646142	9,75E-22	5166,809
5	3,893	0,25	7,27E-11	1,57E-12	2,80E-10	5,28E-21	2,46E-24	7,82E-20
6	6,623	0,15	-42,3502	-1,91E-11	-0,06139	1793,54	3,63E-22	0,003768



Şekil 0.6 Senaryo 5.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

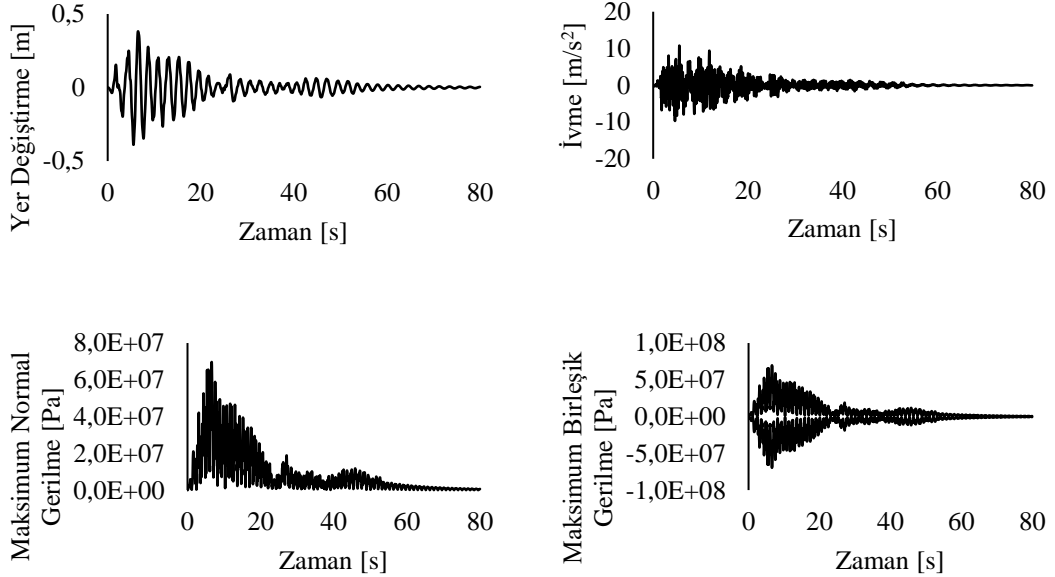
## Senaryo 6.1

Tablo 0.11 Senaryo 6.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
X_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21896,85965			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,14252	5,65E-04

Tablo 0.12 Senaryo 6.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,469	2,13	-18,032	-2,88E-02	-114,713	325,1545	8,31E-04	13159,12
2	0,470	2,12	-114,687	-1,97E-02	17,9606	13153,05	3,89E-04	322,583
3	2,829	0,35	-15,9839	1,47E-01	63,12538	255,4856	2,17E-02	3984,814
4	2,839	0,35	63,12706	3,05E-02	15,89101	3985,026	9,30E-04	252,524
5	4,166	0,24	-8,42E-01	-0,86153	5,36E-02	7,08E-01	0,74224	2,87E-03
6	7,481	0,13	12,66867	-7,44E-02	-36,4028	160,4952	5,53E-03	1325,162



Şekil 0.7 Senaryo 6.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

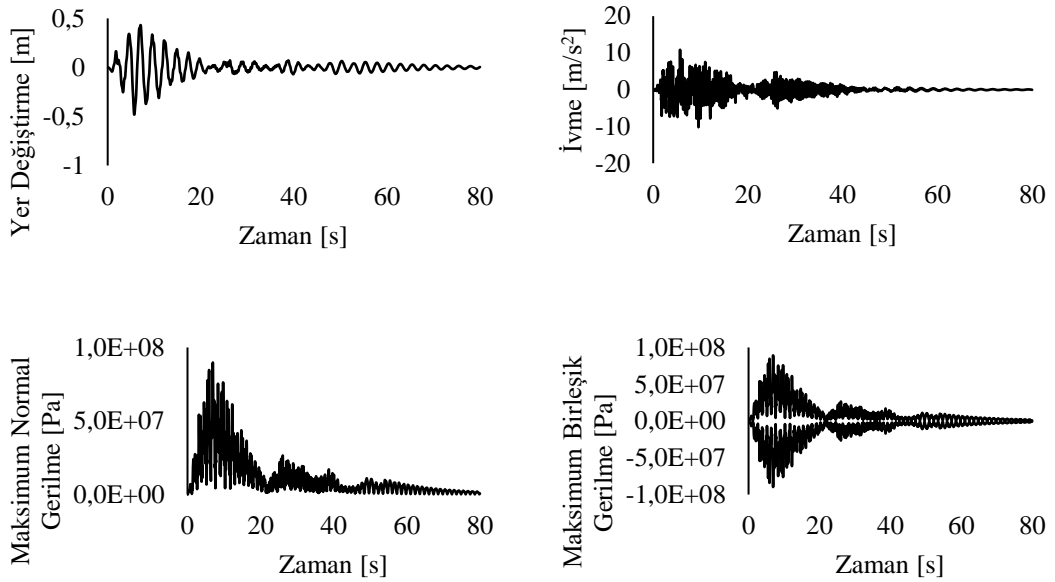
## Senaryo 7.1

Tablo 0.13 Senaryo 7.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
X 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
31134,59455			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,120816	6,15E-04

Tablo 0.14 Senaryo 7.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,396	2,52	19,8817	-2,90E-02	-136,882	395,2821	8,41E-04	18736,64
2	0,398	2,50	-136,909	-4,16E-02	-20,0045	18744,13	1,73E-03	400,1807
3	2,441	0,40	29,00185	-1,78E-01	-71,3838	841,1072	3,19E-02	5095,648
4	2,458	0,40	-71,3647	-1,19E-01	-28,8835	5092,926	1,41E-02	834,2544
5	5,475	0,18	1,73E-01	-2,6675	-9,52E-02	2,99E-02	7,115535	9,07E-03
6	6,647	0,15	-20,0682	8,30E-02	40,72497	402,732	6,88E-03	1658,523



Şekil 0.8 Senaryo 7.1 a) Yer Değişirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

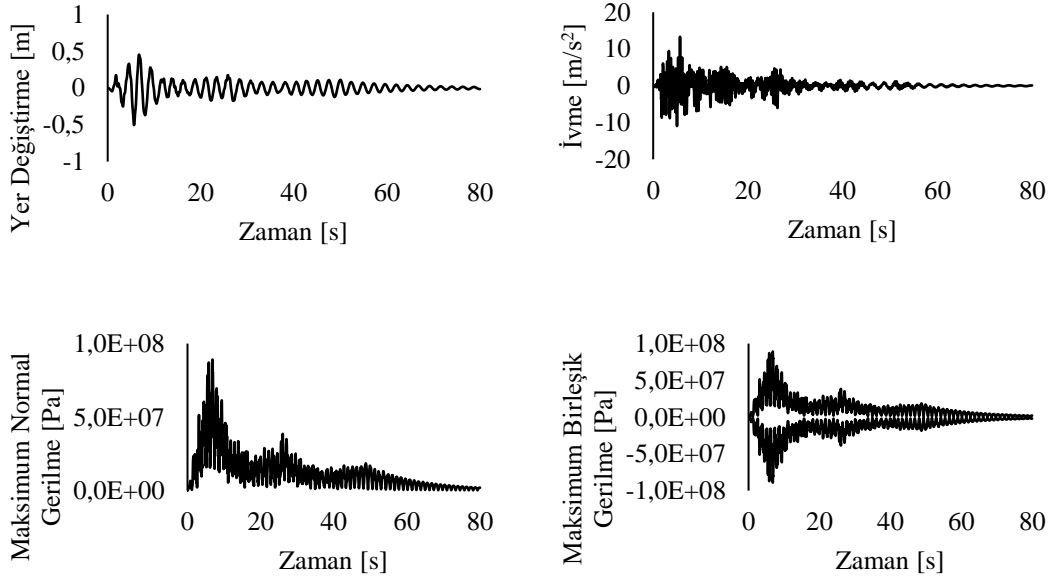
## Senaryo 8.1

Tablo 0.15 Senaryo 8.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_2_2_El Centro_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2299		1147	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26986,61004			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,126192	7,60E-04

Tablo 0.16 Senaryo 8.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,418	2,390	67,18103	8,13E-02	-109,854	4513,291	6,61E-03	12067,95
2	0,419	2,385	-109,887	9,28E-03	-67,2816	12075,14	8,61E-05	4526,817
3	2,447	0,408	-47,8705	1,02E+00	51,98904	2291,588	1,05E+00	2702,861
4	2,530	0,395	52,8035	-1,37E-02	49,31984	2788,209	1,88E-04	2432,447
5	3,420	0,292	-9,35E-01	-0,03642	-2,60E+00	8,74E-01	0,001327	6,76E+00
6	5,704	0,175	27,98276	4,68E+00	-28,41	783,0348	2,19E+01	807,1282



Şekil 0.9 Senaryo 8.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

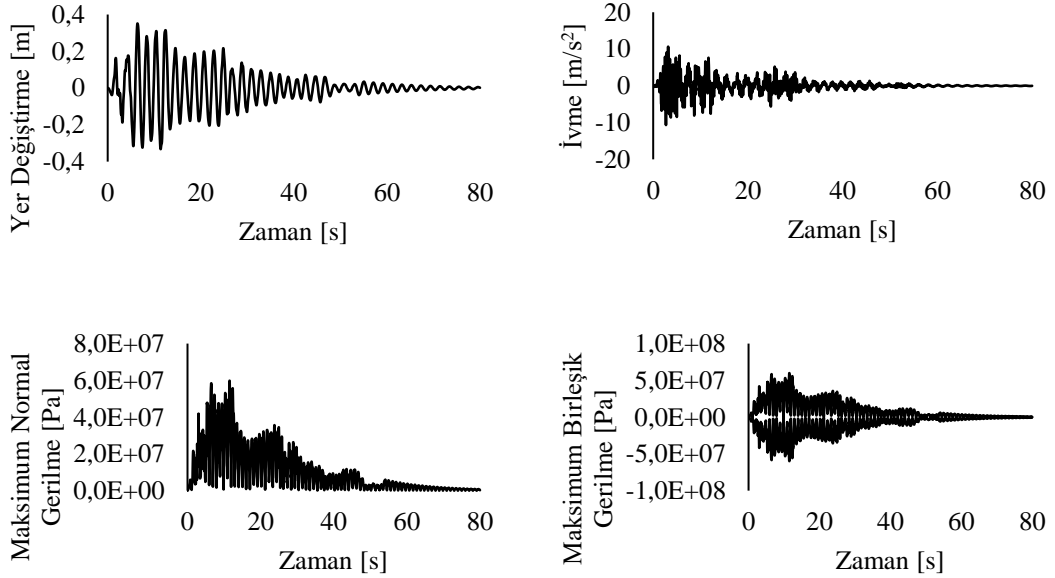
## Senaryo 9.1

Tablo 0.17 Senaryo 9.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 5_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21774,40454			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,148629	5,38E-04

Tablo 0.18 Senaryo 9.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,489	2,04	34,87716	4,71E-12	-108,576	1216,416	2,22E-23	11788,66
2	0,489	2,04	112,2476	3,80E-11	20,13862	12599,51	1,44E-21	405,5642
3	2,966	0,33	11,14131	2,81E-11	-63,0081	124,1287	7,92E-22	3970,024
4	2,966	0,33	63,87727	3,77E-11	3,721161	4080,305	1,42E-21	13,84704
5	4,335	0,23	1,57E-12	-0,31935	-1,02E-10	2,48E-24	0,101985	1,03E-20
6	7,866	0,12	4,898109	1,53E-11	38,23497	23,99147	2,35E-22	1461,913



Şekil 0.10 Senaryo 9.1 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

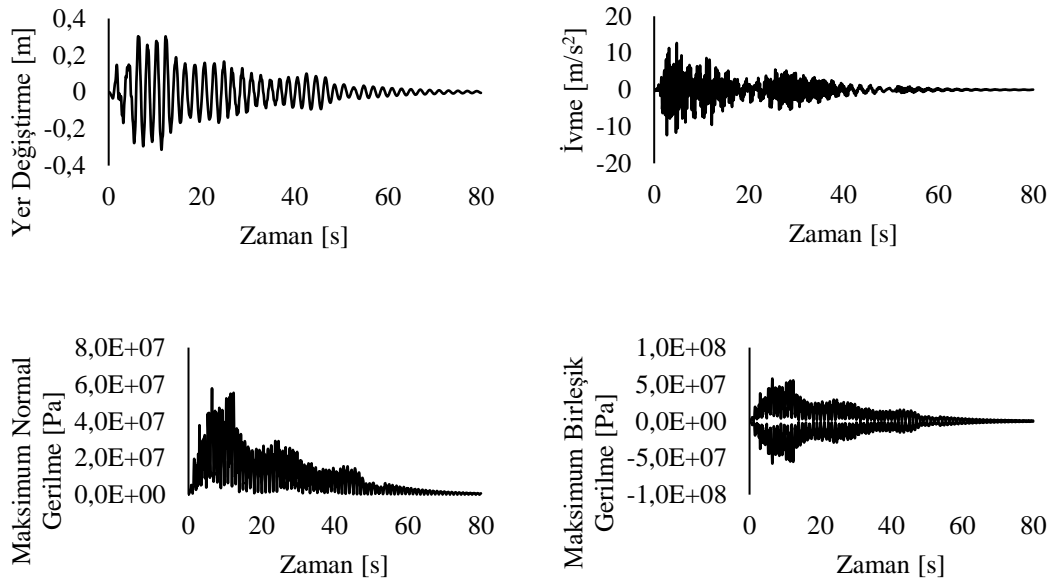
## Senaryo 10.1

Tablo 0.19 Senaryo 10.1 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 10_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütle [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21897,48614			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,152875	2,63E-04

Tablo 0.20 Senaryo 10.1 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,494	2,02	14,18443	2,65E-12	112,5969	201,1981	7,03E-24	12678,07
2	0,494	2,02	-111,159	2,12E-11	22,86967	12356,24	4,49E-22	523,0217
3	3,025	0,33	-11,8449	2,33E-11	62,02646	140,3027	5,43E-22	3847,281
4	3,025	0,33	61,84853	2,13E-11	12,74139	3825,241	4,54E-22	162,343
5	4,390	0,22	1,38E-10	-0,35848	-1,71E-10	1,92E-20	0,128504	2,92E-20
6	8,055	0,12	3,425298	-1,06E-11	-37,7126	11,73266	1,12E-22	1422,24



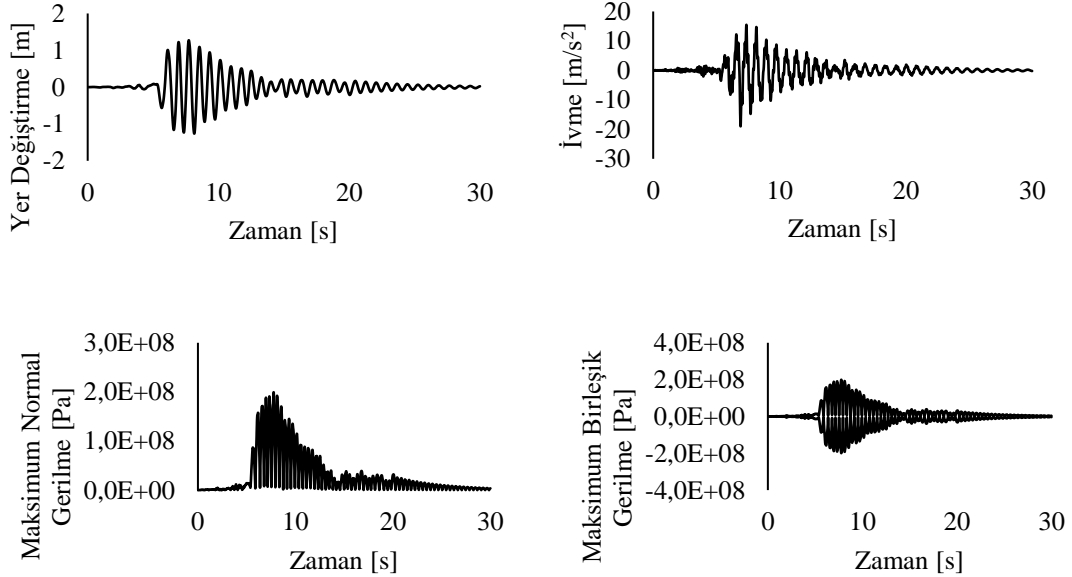
## Senaryo 1.2

Tablo 0.21 Senaryo 1.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		613	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21665,58869			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,142601	5,56E-04

Tablo 0.22 Senaryo 1.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,469	2,13	3,58388	7,12E-09	-115,288	12,8442	5,07E-17	13291,43
2	0,469	2,13	-115,344	5,12E-09	-0,3914	13304,12	2,62E-17	0,153191
3	2,841	0,35	-4,46256	-9,61E-08	-64,492	19,91447	9,24E-15	4159,22
4	2,841	0,35	-64,3422	-6,86E-08	6,261833	4139,924	4,71E-15	39,21055
5	4,230	0,23	3,81E-07	0,204396	1,83E-07	1,45E-13	0,041778	3,34E-14
6	7,557	0,13	-1,82409	9,26E-08	-38,2629	3,32729	8,57E-15	1464,051



Şekil 0.12 Senaryo 1.2 a) Yerdeğiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



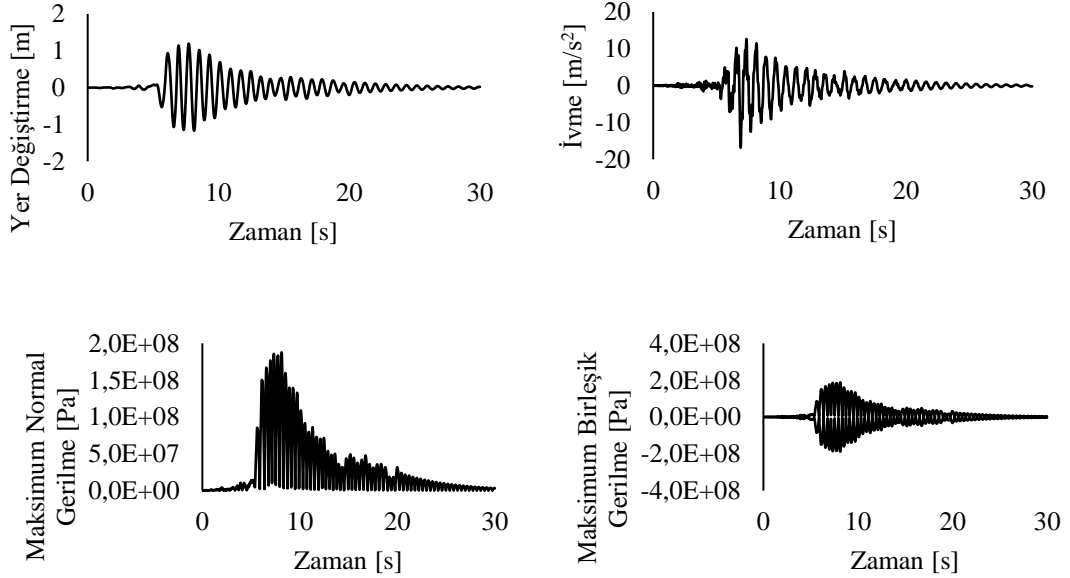
## Senaryo 2.2

Tablo 0.23 Senaryo 2.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
22092,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,142931	6,22E-04

Tablo 0.24 Senaryo 2.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,472	2,11	116,0627	1,85E-10	0,173361	13470,55	3,43E-20	0,030054
2	0,472	2,11	0,173176	2,77E-05	-116,044	0,02999	7,68E-10	13466,31
3	2,795	0,35	-65,6427	1,44E-09	-0,03146	4308,959	2,08E-18	0,00099
4	2,799	0,35	0,031177	4,59E-04	-65,5058	0,000972	2,11E-07	4291,005
5	3,547	0,28	2,21E-04	0,000918	-2,14E-01	4,88E-08	8,43E-07	4,58E-02
6	7,217	0,13	-39,2588	-9,21E-10	-0,01059	1541,253	8,48E-19	0,000112



Şekil 0.13 Senaryo 2.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

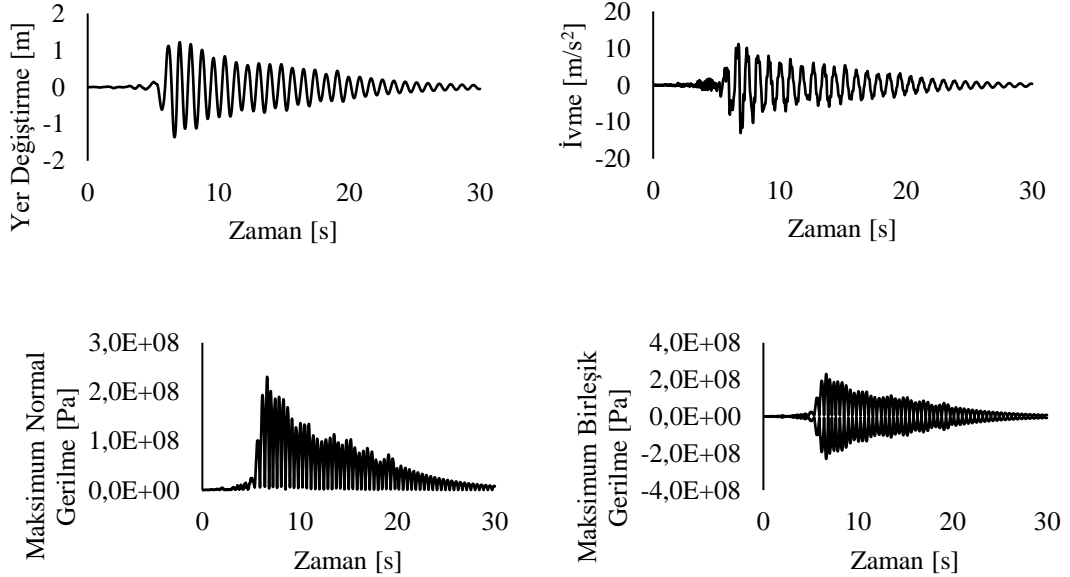
### Senaryo 3.2

Tablo 0.25 Senaryo 3.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26628,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,131025	6,24E-04

Tablo 0.26 Senaryo 3.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,431	2,31	-4,36545	-3,29E-11	127,2177	19,05718	1,08E-21	16184,35
2	0,431	2,31	127,2925	-3,28E-12	0,150544	16203,39	1,08E-23	0,022663
3	2,595	0,38	-0,90757	-2,47E-11	-71,5922	0,82368	6,08E-22	5125,437
4	2,595	0,38	71,5979	-1,27E-11	0,020252	5126,26	1,61E-22	0,00041
5	3,912	0,25	5,33E-10	-3,8E-11	5,81E-10	2,84E-19	1,48E-21	3,38E-19
6	6,828	0,14	1,579358	-1,27E-11	-42,6913	2,494371	1,62E-22	1822,548



Şekil 0.14 Senaryo 3.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

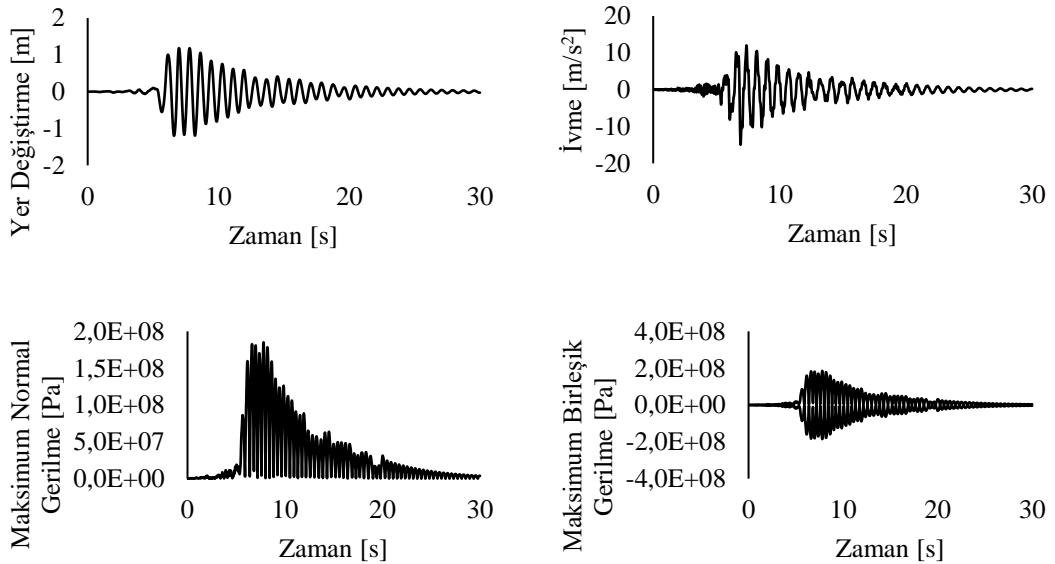
## Senaryo 4.2

Tablo 0.27 Senaryo 4.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
22092,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,137552	6,12E-04

Tablo 0.28 Senaryo 4.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,453	2,20	0,293867	2,21E-11	117,1912	0,086358	4,90E-22	13733,78
2	0,453	2,20	-117,192	4,81E-12	0,014638	13733,87	2,31E-23	0,000214
3	2,700	0,37	-65,8236	-5,25E-12	-0,11437	4332,743	2,75E-23	0,013079
4	2,700	0,37	-0,44285	-1,73E-11	65,82218	0,196116	3,00E-22	4332,56
5	3,525	0,28	1,72E-09	-3,6E-11	-2,47E-10	2,94E-18	1,28E-21	6,08E-20
6	7,025	0,14	0,010615	-6,10E-12	38,69703	0,000113	3,72E-23	1497,46



Şekil 0.15 Senaryo 4.2 a) Yer değişikliği b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

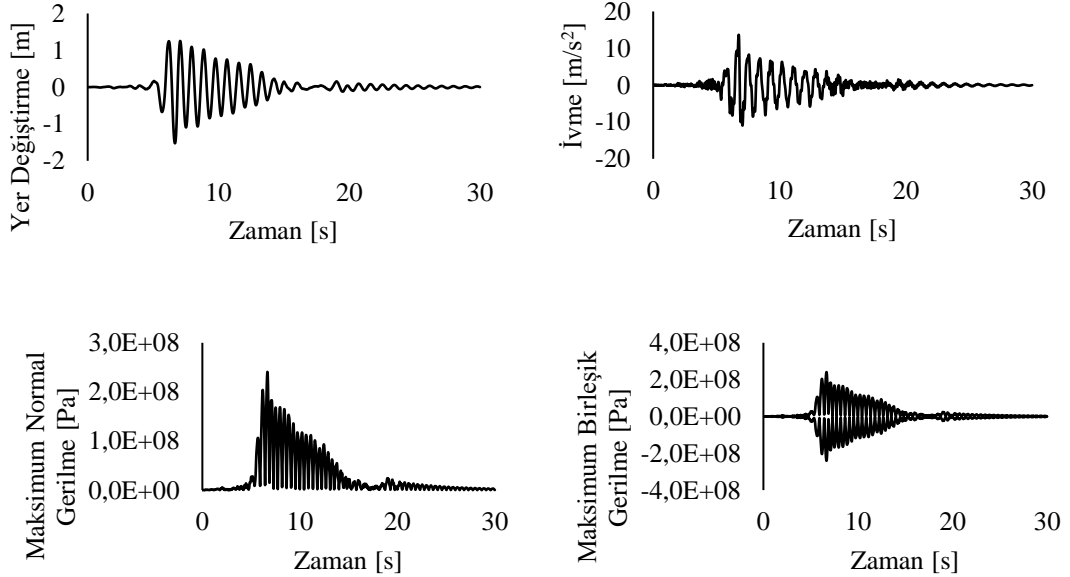
## Senaryo 5.2

Tablo 0.29 Senaryo 5.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26628,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,12587	6,39E-04

Tablo 0.30 Senaryo 5.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,414	2,41	-128,557	9,80E-12	-4E-09	16526,79	9,60E-23	1,62E-17
2	0,414	2,41	-1,52925	-1,68E-11	-128,547	2,338612	2,81E-22	16524,45
3	2,502	0,39	-71,9476	4,42E-12	-5,1E-10	5176,456	1,95E-23	2,6E-19
4	2,502	0,39	-3,10582	-3,12E-11	71,88052	9,646142	9,75E-22	5166,809
5	3,893	0,25	7,27E-11	1,57E-12	2,80E-10	5,28E-21	2,46E-24	7,82E-20
6	6,623	0,15	-42,3502	-1,91E-11	-0,06139	1793,54	3,63E-22	0,003768



Şekil 0.16 Senaryo 5.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

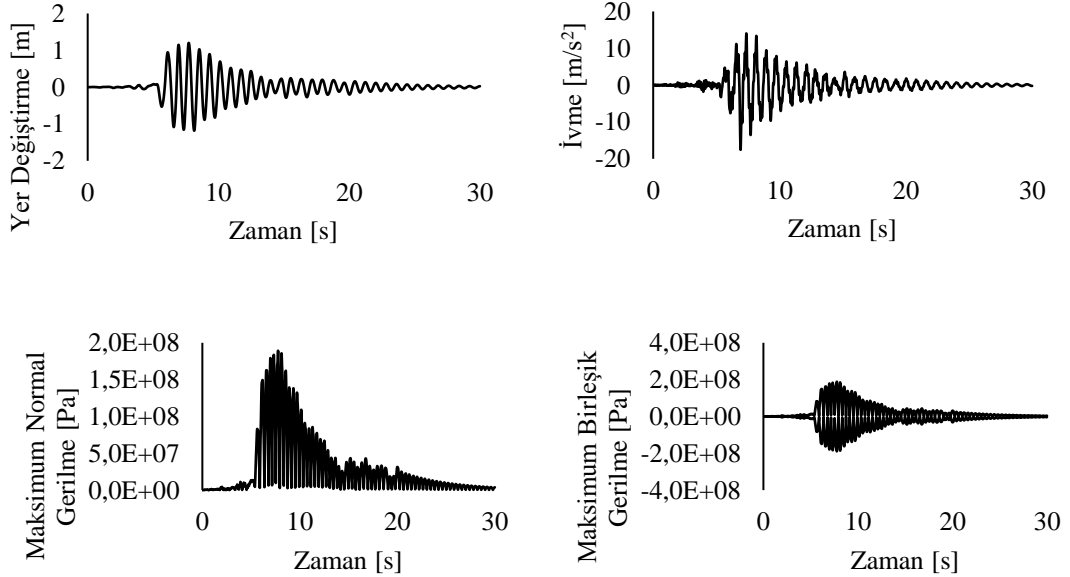
## Senaryo 6.2

Tablo 0.31 Senaryo 6.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
X_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21896,85965			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,14252	5,65E-04

Tablo 0.32 Senaryo 6.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,469	2,13	-18,032	-2,88E-02	-114,713	325,1545	8,31E-04	13159,12
2	0,470	2,12	-114,687	-1,97E-02	17,9606	13153,05	3,89E-04	322,583
3	2,829	0,35	-15,9839	1,47E-01	63,12538	255,4856	2,17E-02	3984,814
4	2,839	0,35	63,12706	3,05E-02	15,89101	3985,026	9,30E-04	252,524
5	4,166	0,24	-8,42E-01	-0,86153	5,36E-02	7,08E-01	0,74224	2,87E-03
6	7,481	0,13	12,66867	-7,44E-02	-36,4028	160,4952	5,53E-03	1325,162



Şekil 0.17 Senaryo 6.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

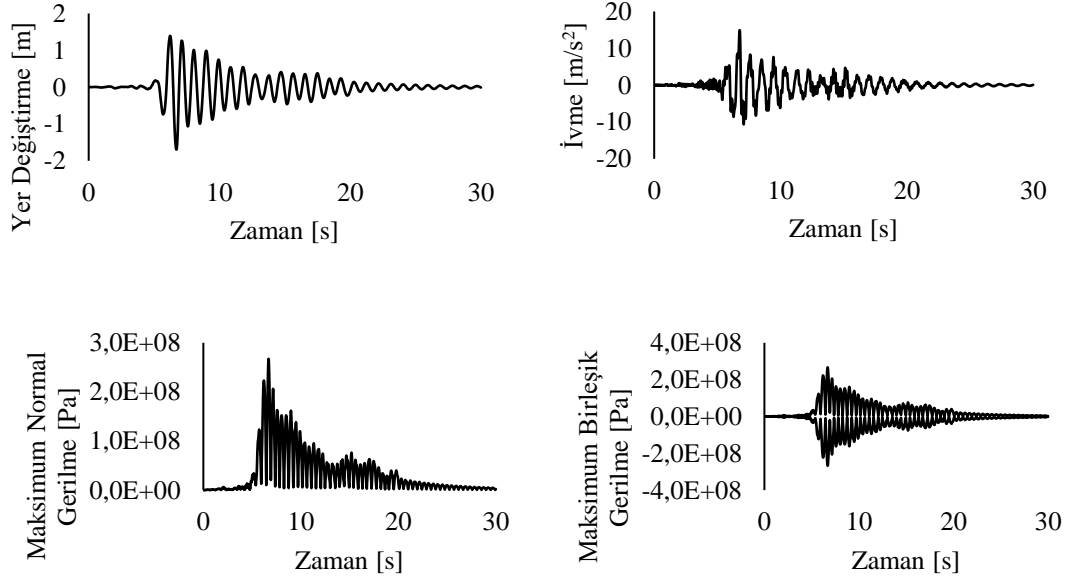
## Senaryo 7.2

Tablo 0.33 Senaryo 7.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
X 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
31134,59455			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,120816	6,15E-04

Tablo 0.34 Senaryo 7.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,396	2,52	19,8817	-2,90E-02	-136,882	395,2821	8,41E-04	18736,64
2	0,398	2,50	-136,909	-4,16E-02	-20,0045	18744,13	1,73E-03	400,1807
3	2,441	0,40	29,00185	-1,78E-01	-71,3838	841,1072	3,19E-02	5095,648
4	2,458	0,40	-71,3647	-1,19E-01	-28,8835	5092,926	1,41E-02	834,2544
5	5,475	0,18	1,73E-01	-2,6675	-9,52E-02	2,99E-02	7,115535	9,07E-03
6	6,647	0,15	-20,0682	8,30E-02	40,72497	402,732	6,88E-03	1658,523



Şekil 0.18 Senaryo 7.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

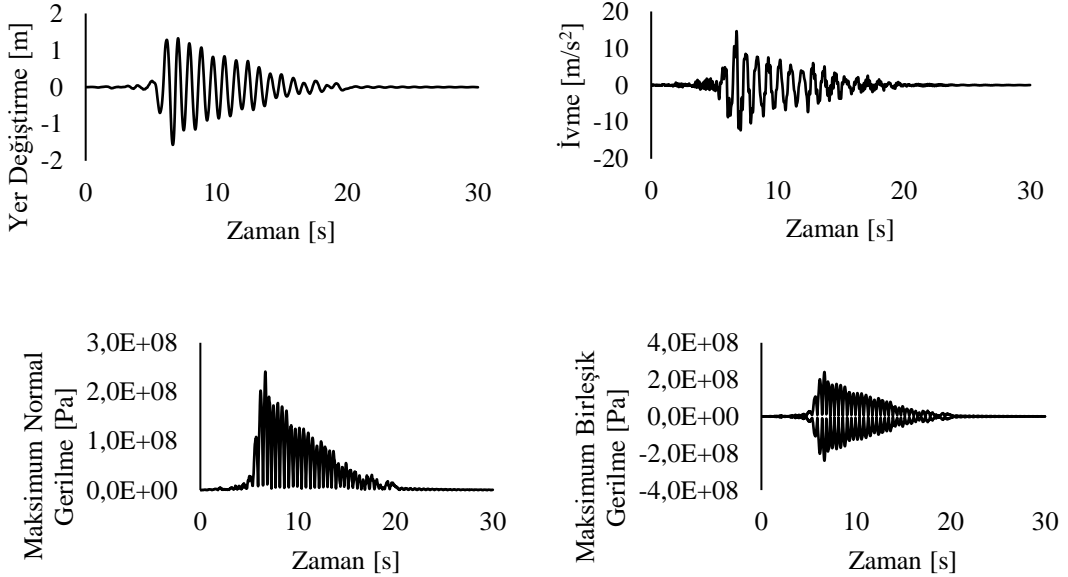
## Senaryo 8.2

Tablo 0.35 Senaryo 8.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_2 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2299		1147	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
26986,61004			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,126192	7,60E-04

Tablo 0.36 Senaryo 8.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,418	2,39	67,18103	8,13E-02	-109,854	4513,291	6,61E-03	12067,95
2	0,419	2,38	-109,887	9,28E-03	-67,2816	12075,14	8,61E-05	4526,817
3	2,447	0,40	-47,8705	1,02E+00	51,98904	2291,588	1,05E+00	2702,861
4	2,530	0,39	52,8035	-1,37E-02	49,31984	2788,209	1,88E-04	2432,447
5	3,420	0,29	-9,35E-01	-0,03642	-2,60E	8,74E-01	0,001327	6,76E+00
6	5,704	0,17	27,98276	4,68E+00	-28,41	783,0348	2,19E+01	807,1282



Şekil 0.19 Senaryo 8.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

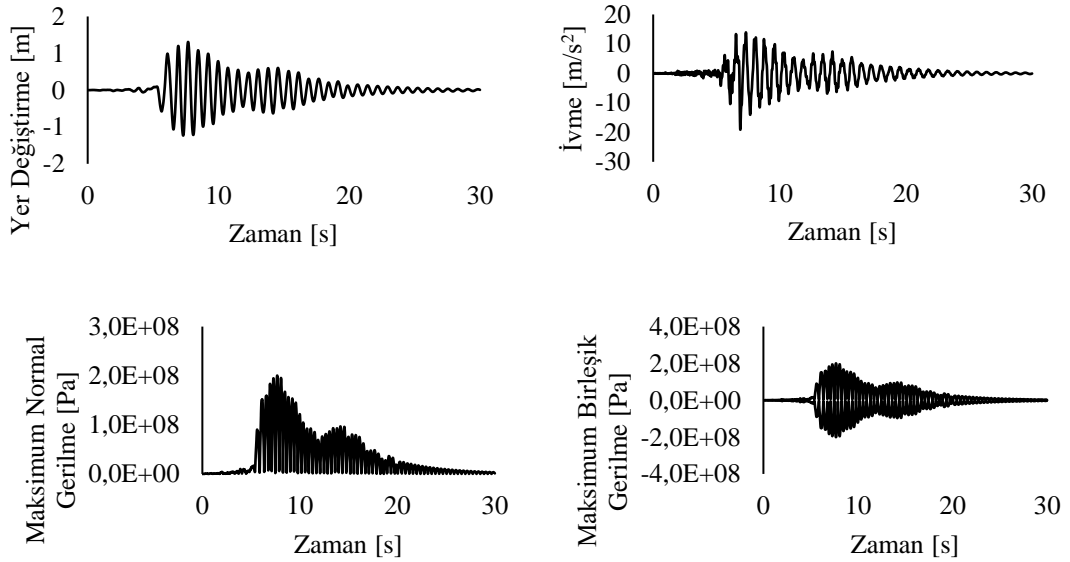
## Senaryo 9.2

Tablo 0.37 Senaryo 9.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 5_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21774,40454			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,148629	5,38E-04

Tablo 0.38 Senaryo 9.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,489	2,04	34,87716	4,71E-12	-108,576	1216,416	2,22E-23	11788,66
2	0,489	2,04	112,2476	3,80E-11	20,13862	12599,51	1,44E-21	405,5642
3	2,966	0,33	11,14131	2,81E-11	-63,0081	124,1287	7,92E-22	3970,024
4	2,966	0,33	63,87727	3,77E-11	3,721161	4080,305	1,42E-21	13,84704
5	4,335	0,23	1,57E-12	-0,31935	-1,02E-10	2,48E-24	0,101985	1,03E-20
6	7,866	0,12	4,898109	1,53E-11	38,23497	23,99147	2,35E-22	1461,913



Şekil 0.20 Senaryo 9.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



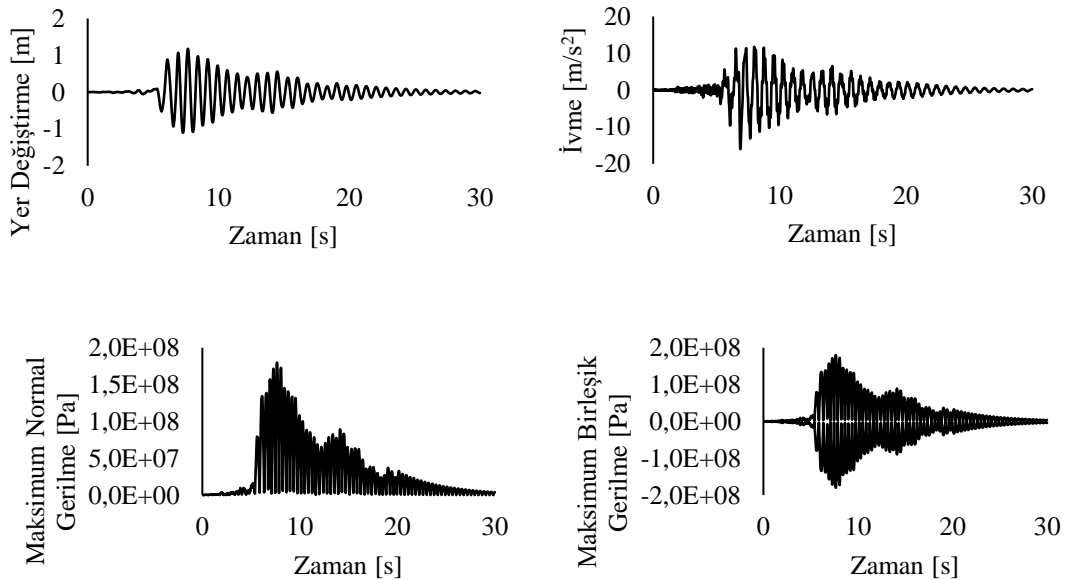
## Senaryo 10.2

Tablo 0.39 Senaryo 10.2 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 10_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
21897,48614			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,152875	2,63E-04

Tablo 0.40 Senaryo 10.2 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,494	2,02	14,18443	2,65E-12	112,5969	201,1981	7,03E-24	12678,07
2	0,494	2,02	-111,159	2,12E-11	22,86967	12356,24	4,49E-22	523,0217
3	3,025	0,33	-11,8449	2,33E-11	62,02646	140,3027	5,43E-22	3847,281
4	3,025	0,33	61,84853	2,13E-11	12,74139	3825,241	4,54E-22	162,343
5	4,390	0,22	1,38E-10	-0,35848	-1,71E-10	1,92E-20	0,128504	2,92E-20
6	8,055	0,12	3,425298	-1,06E-11	-37,7126	11,73266	1,12E-22	1422,24



Şekil 0.21 Senaryo 10.2 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

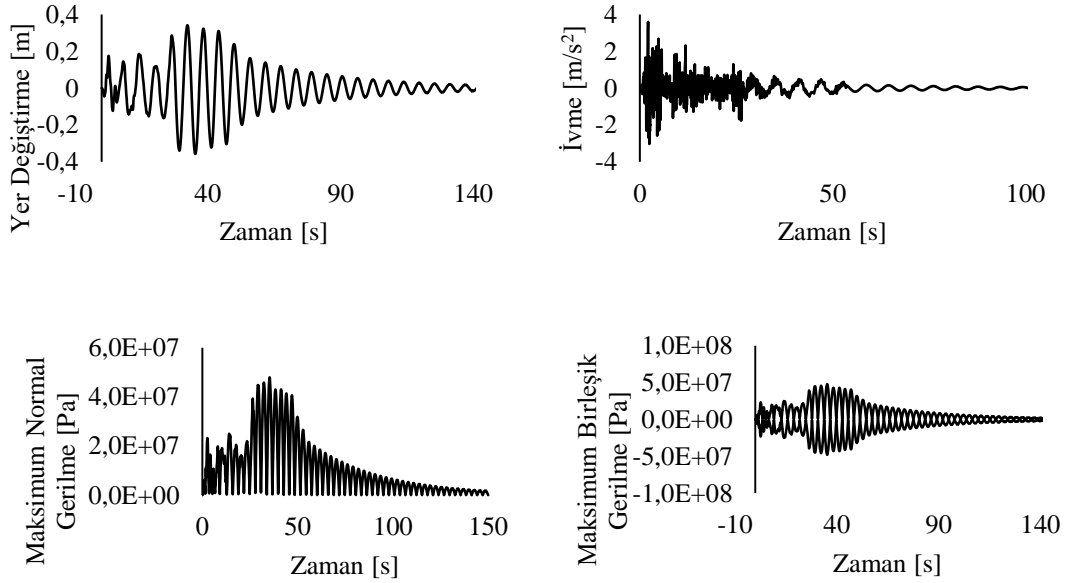
### Senaryo 1.3

Tablo 0.41 Senaryo 1.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55580,58869			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,050092	3,55E-03

Tablo 0.42 Senaryo 1.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,172	5,78	-6,82248	-1,47E-08	212,8491	46,5462	2,17E-16	45304,74
2	0,172	5,78	-212,957	1,09E-08	-0,80534	45350,64	1,19E-16	0,648576
3	1,943	0,51	1,19E-06	-6,35E-01	1,08E-06	1,42E-12	4,03E-01	1,17E-12
4	2,070	0,48	4,525859	3,05E-07	73,73885	20,4834	9,33E-14	5437,417
5	2,070	0,48	-7,37E+01	-2,3E-07	4,69E+00	5,44E+03	5,19E-14	2,20E+01
6	3,356	0,29	-2,1E-08	6,04E-09	-2,8E-08	4,21E-16	3,65E-17	7,86E-16



Şekil 0.22 Senaryo 1.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

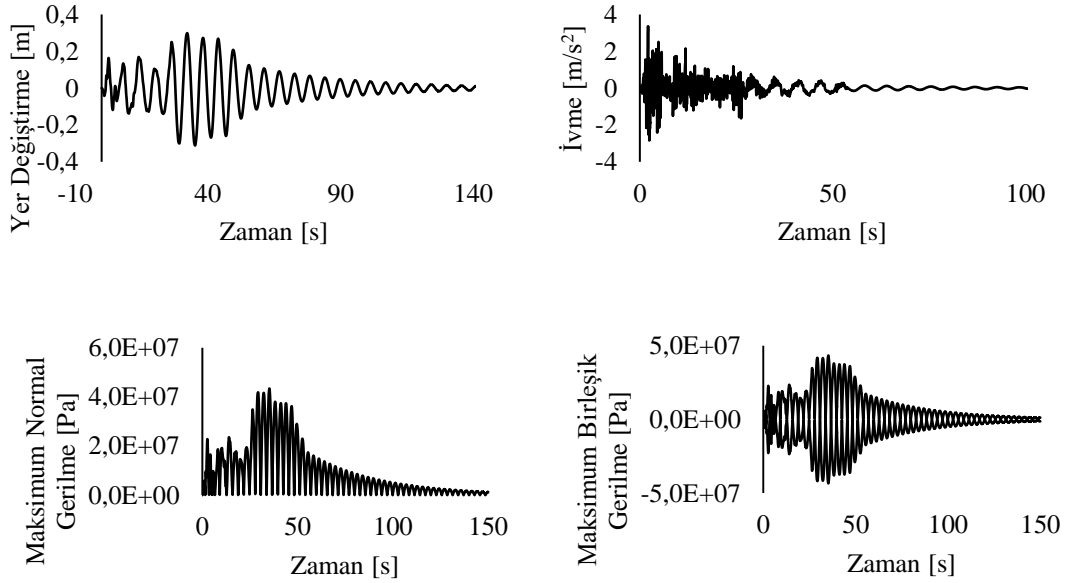
## Senaryo 2.3

Tablo 0.43 Senaryo 2.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
56007,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,049932	4,10E-03

Tablo 0.44 Senaryo 2.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,174	5,72	213,2579	-1,53E-10	0,39694	45478,93	2,35E-20	0,157562
2	0,174	5,72	0,391169	8,06E-06	-213,252	0,153013	6,50E-11	45476,37
3	1,764	0,56	0,000362	-3,86E-04	-0,75405	1,31E-07	1,49E-07	0,568588
4	2,033	0,49	-74,2246	-1,33E-09	-0,04247	5509,29	1,77E-18	0,001803
5	2,035	0,49	4,26E-02	0,000313	-7,41E+01	1,82E-03	9,8E-08	5,49E+03
6	2,453	0,40	-5,5E-11	-1,67E-12	2,19E-11	3E-21	2,78E-24	4,79E-22



Şekil 0.23 Senaryo 2.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

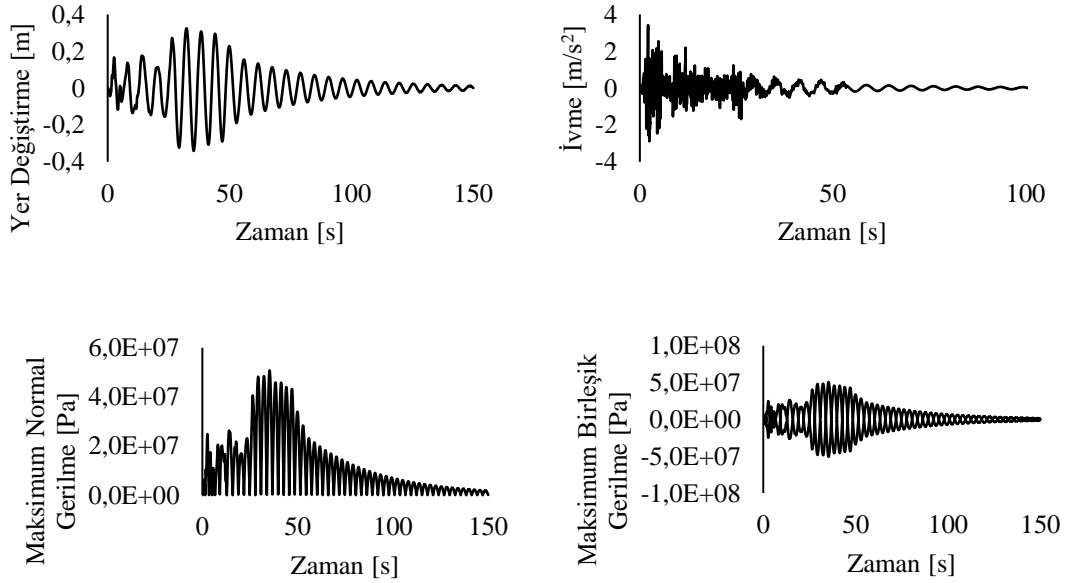
### Senaryo 3.3

Tablo 0.45 Senaryo 3.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60543,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,027129	2,30E-02

Tablo 0.46 Senaryo 3.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,172	5,79	-218,857	-8,65E-11	-0,32977	47898,31	7,48E-21	0,108749
2	0,172	5,79	13,92655	7,28E-11	-218,414	193,9488	5,30E-21	47704,47
3	1,899	0,52	81,16248	4,92E-10	0,028807	6587,347	2,42E-19	0,00083
4	1,899	0,52	7,662935	-1,16E-10	80,79992	58,72058	1,35E-20	6528,628
5	2,070	0,48	7,44E-10	-1,2E-11	3,69E-09	5,53E-19	1,55E-22	1,36E-17
6	2,820	0,35	8,1E-12	1,11E-11	1,31E-10	6,56E-23	1,22E-22	1,72E-20



Şekil 0.24 Senaryo 3.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

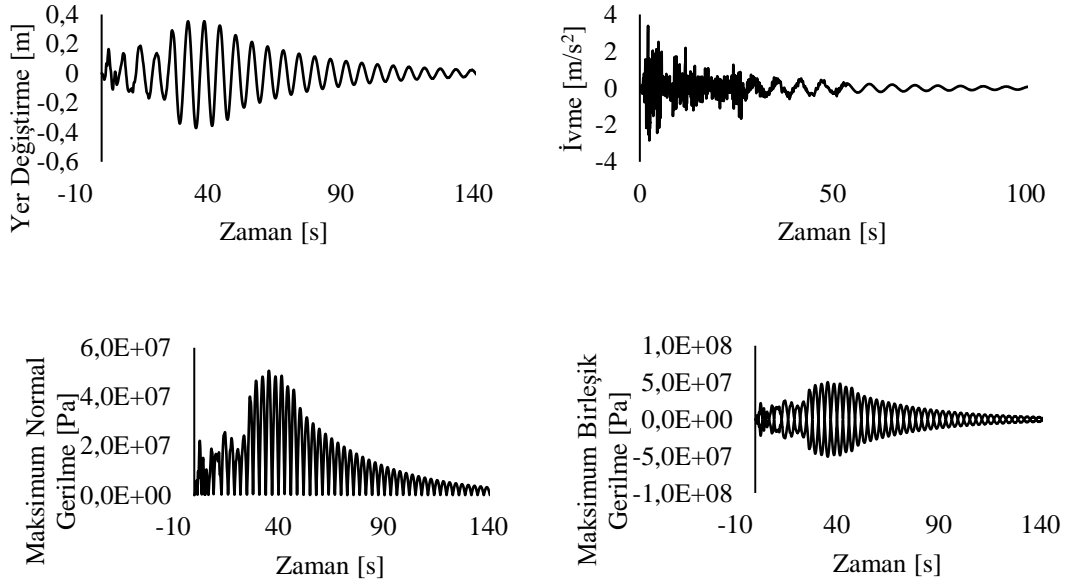
### Senaryo 4.3

Tablo 0.47 Senaryo 4.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
56007,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,048925	3,74E-03

Tablo 0.48 Senaryo 4.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,169	5,91	6,680867	-8,80E-11	213,7045	44,63398	7,75E-21	45669,61
2	0,169	5,91	-213,808	2,73E-11	0,520341	45713,97	7,48E-22	0,270755
3	1,287	0,77	3,27E-10	-1,33E+02	1,27E-08	1,07E-19	1,77E+04	1,61E-16
4	1,293	0,77	0,085945	9,99E-10	4,295851	0,007386	9,98E-19	18,45433
5	1,293	0,77	-4,30E+00	-3,3E-09	-8,28E-05	1,85E+01	1,06E-17	6,86E-09
6	1,295	0,77	-3,8E-10	3,99E-10	-3,1E-10	1,43E-19	1,59E-19	9,41E-20



Şekil 0.25 Senaryo 4.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

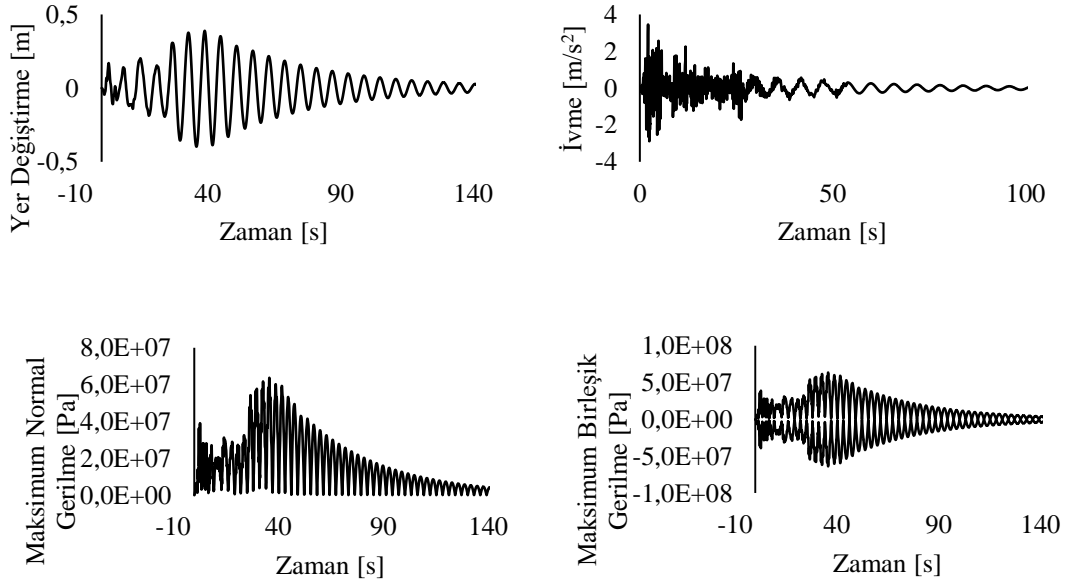
### Senaryo 5.3

Tablo 0.49 Senaryo 5.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60543,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,04812	3,99E-03

Tablo 0.50 Senaryo 5.3 modal analiz çıktıları

	Frekans [Hz]	Periyot [s]	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
			X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,167	5,98	-26,8083	-1,04E-10	217,8701	718,6872	1,09E-20	47467,36
2	0,167	5,98	219,5132	-1,26E-11	-1,6E-05	48186,05	1,59E-22	2,61E-10
3	1,287	0,77	-2,2E-10	1,33E+02	7,51E-11	4,96E-20	1,77E+04	5,64E-21
4	1,293	0,77	-0,06549	-3,33E-09	-5,18146	0,004289	1,11E-17	26,84751
5	1,293	0,77	5,18E+00	3,54E-09	2,76E-06	2,69E+01	1,25E-17	7,59E-12
6	1,295	0,77	-6,4E-10	2,10E-09	-9,8E-10	4,03E-19	4,43E-18	9,64E-19



Şekil 0.26 Senaryo 5.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

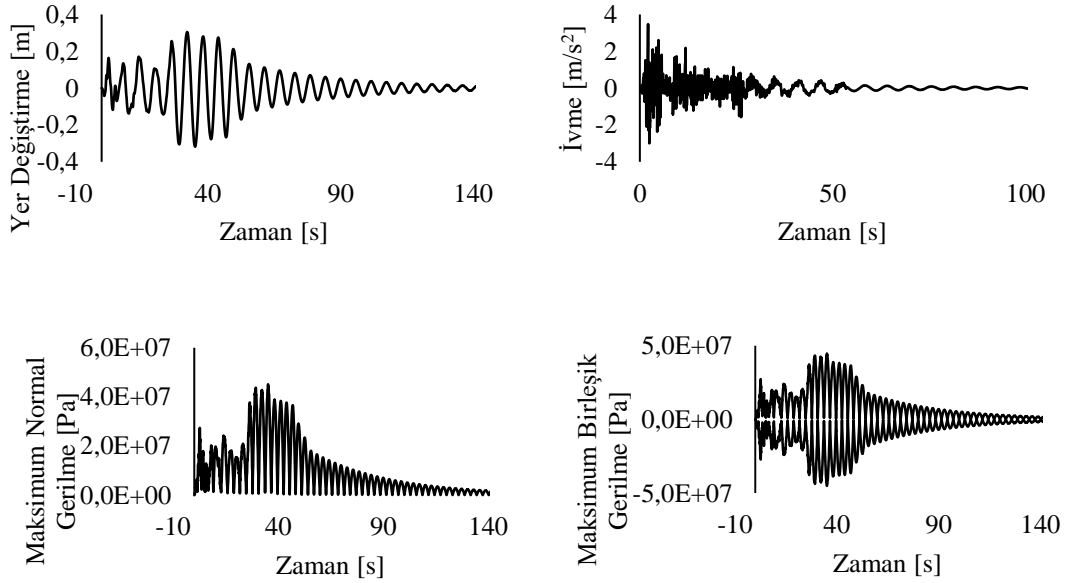
### Senaryo 6.3

Tablo 0.51 Senaryo 6.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
X_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55811,85965			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,050337	3,56E-03

Tablo 0.52 Senaryo 6.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,173	5,75	7,75383	1,23E-02	213,1773	60,12187	1,50E-04	45444,55
2	0,174	5,73	-213,166	6,73E-03	7,710408	45439,94	4,53E-05	59,4504
3	1,861	0,53	6,393757	-1,53E+00	0,858311	40,88013	2,35E+00	0,736698
4	2,063	0,48	12,95928	-3,15E-01	-73,2421	167,943	9,92E-02	5364,407
5	2,072	0,48	7,30E+01	0,378005	1,29E+01	5,33E+03	0,142888	1,65E+02
6	3,010	0,33	-0,19847	-7,26E-02	0,013243	0,039388	5,27E-03	0,000175



Şekil 0.27 Senaryo 6.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

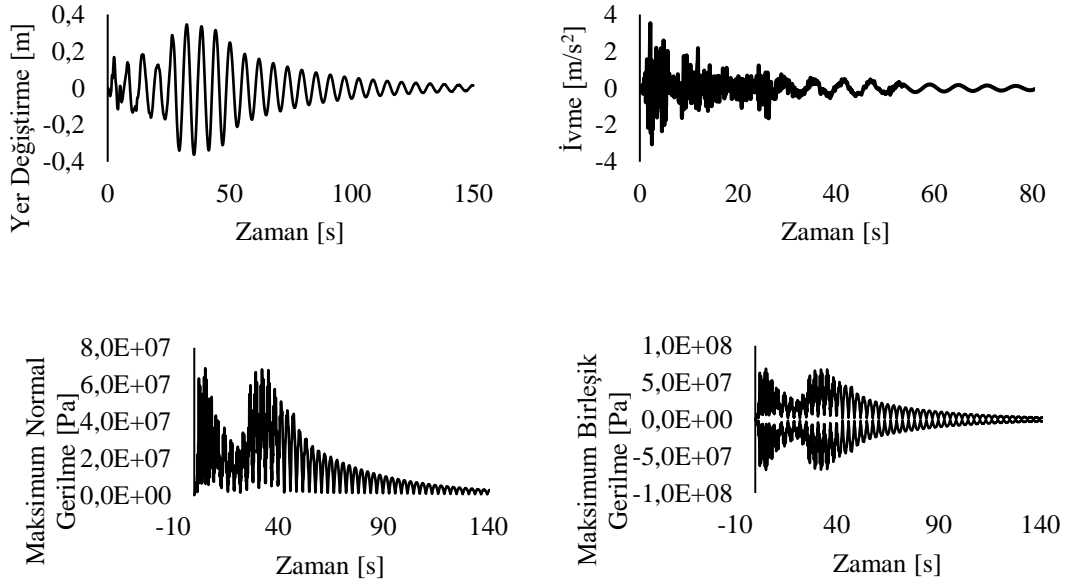
### Senaryo 7.3

Tablo 0.53 Senaryo 7.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
X 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
65049,59455			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,051543	1,68E-03

Tablo 0.54 Senaryo 7.3 Modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,170	5,87	51,90764	-1,16E-02	-218,69	2694,403	1,34E-04	47825,35
2	0,171	5,84	218,7117	-1,55E-02	51,98585	47834,8	2,40E-04	2702,528
3	1,799	0,55	31,30581	-3,18E-01	-81,7773	980,0539	1,01E-01	6687,519
4	1,810	0,55	81,74691	4,42E-01	31,21603	6682,557	1,96E-01	974,4404
5	2,756	0,36	-2,09E+00	-4,12137	-3,23E-01	4,36E+00	16,98567	1,05E-01
6	4,578	0,21	0,387233	3,24E-01	-0,00756	0,14995	1,05E-01	5,71E-05



Şekil 0.28 Senaryo 7.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



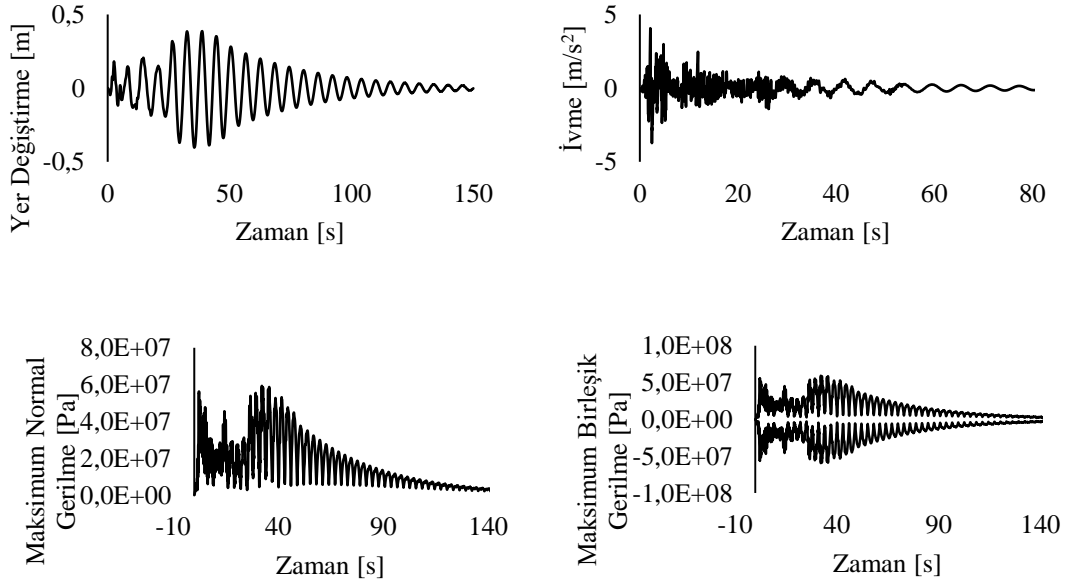
### Senaryo 8.3

Tablo 0.55 Senaryo 8.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_2 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2299		1147	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60901,61004			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,048376	3,92E-03

Tablo 0.56 Senaryo 8.3 Modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,167	5,95	-153,388	-2,67E-01	156,7645	23527,77	7,13E-02	24575,09
2	0,169	5,89	-157,014	1,52E-03	-153,673	24653,26	2,32E-06	23615,54
3	1,634	0,61	-16,8734	3,47E+00	28,84078	284,7119	1,21E+01	831,7909
4	1,696	0,58	-54,8446	6,79E+00	47,40216	3007,929	4,62E+01	2246,965
5	1,861	0,53	5,65E+01	-0,12152	5,87E+01	3,20E+03	0,014767	3,44E+03
6	4,458	0,22	-32,6114	-3,46E+01	34,79596	1063,503	1,20E+03	1210,759



Şekil 0.29 Senaryo 8.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

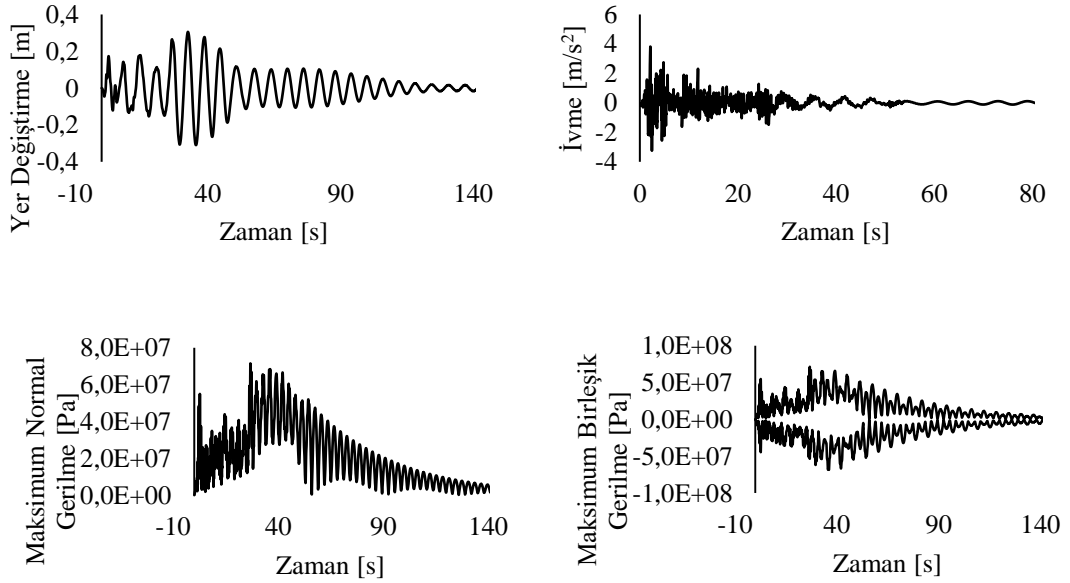
### Senaryo 9.3

Tablo 0.57 Senaryo 9.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 5_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55689,40454			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,047663	3,72E-03

Tablo 0.58 Senaryo 9.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,164	6,08	-151,582	9,28E-01	-150,712	22977,24	8,61E-01	22714,03
2	0,178	5,60	-149,677	-7,50E-03	150,6023	22403,25	5,63E-05	22681,04
3	1,962	0,50	51,13976	-1,15E+01	52,69384	2615,275	1,32E+02	2776,641
4	1,977	0,50	5,490233	-7,72E-01	9,327469	30,14266	5,95E-01	87,00168
5	2,164	0,46	-5,24E+01	-0,02409	5,06E+01	2,74E+03	0,00058	2,57E+03
6	3,355	0,29	-0,00057	-1,25E-03	-0,00062	3,23E-07	1,57E-06	3,88E-07



Şekil 0.30 Senaryo 9.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

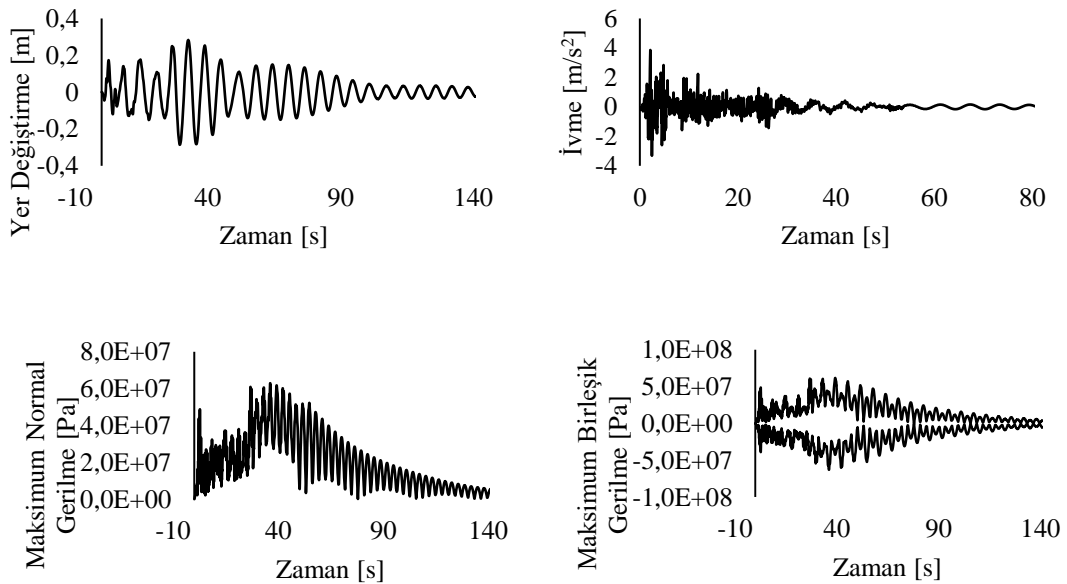
### Senaryo 10.3

Tablo 0.59 Senaryo 10.3 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 10_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55812,48614			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,047101	3,70E-03

Tablo 0.60 Senaryo 10.3 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,162	6,16	-153,291	1,18E+00	-149,17	23498,2	1,40E+00	22251,63
2	0,179	5,56	-147,91	-7,67E-03	152,0441	21877,46	5,88E-05	23117,4
3	1,945	0,51	52,25379	-1,46E+01	52,33818	2730,459	2,13E+02	2739,285
4	1,989	0,50	1,170114	-1,16E+00	0,618938	1,369166	1,34E+00	0,383084
5	2,198	0,45	-5,10E+01	-0,07443	5,12E+01	2,60E+03	0,005539	2,62E+03
6	3,355	0,29	0,000827	2,43E-03	0,000956	6,84E-07	5,89E-06	9,13E-07



Şekil 0.31 Senaryo 10.3 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

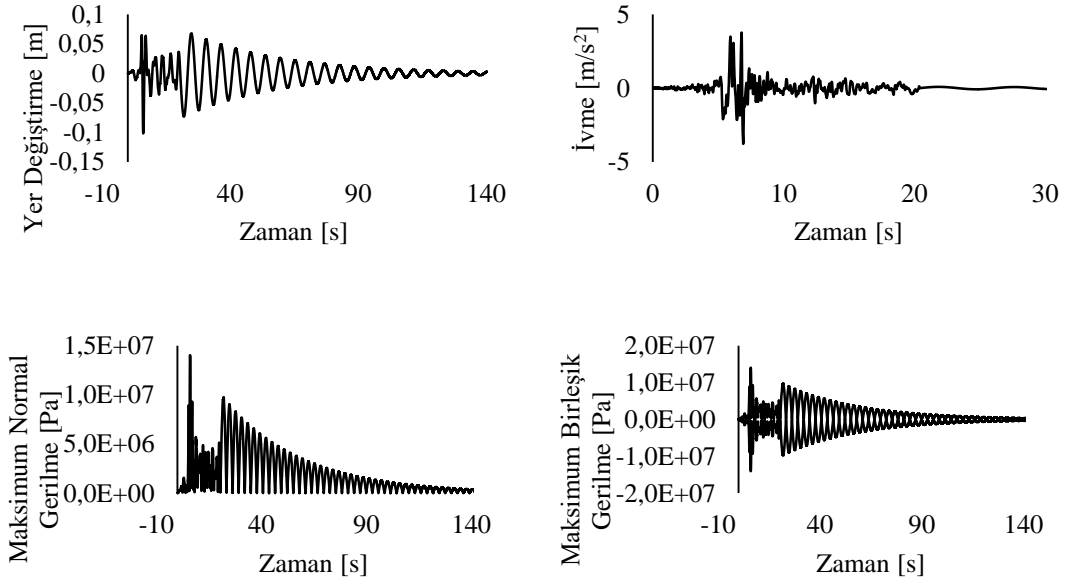
## Senaryo 1.4

Tablo 0.61 Senaryo 1.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		613	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55580,58869			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,050092	3,55E-03

Tablo 0.62 Senaryo 1.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,172	5,78	-6,82248	-1,47E-08	212,8491	46,5462	2,17E-16	45304,74
2	0,172	5,78	-212,957	1,09E-08	-0,80534	45350,64	1,19E-16	0,648576
3	1,943	0,51	1,19E-06	-6,35E-01	1,08E-06	1,42E-12	4,03E-01	1,17E-12
4	2,070	0,48	4,525859	3,05E-07	73,73885	20,4834	9,33E-14	5437,417
5	2,070	0,48	-7,37E+01	-2,3E-07	4,69E+00	5,44E+03	5,19E-14	2,20E+01
6	3,356	0,29	-2,1E-08	6,04E-09	-2,8E-08	4,21E-16	3,65E-17	7,86E-16



Şekil 0.32 Senaryo 1.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

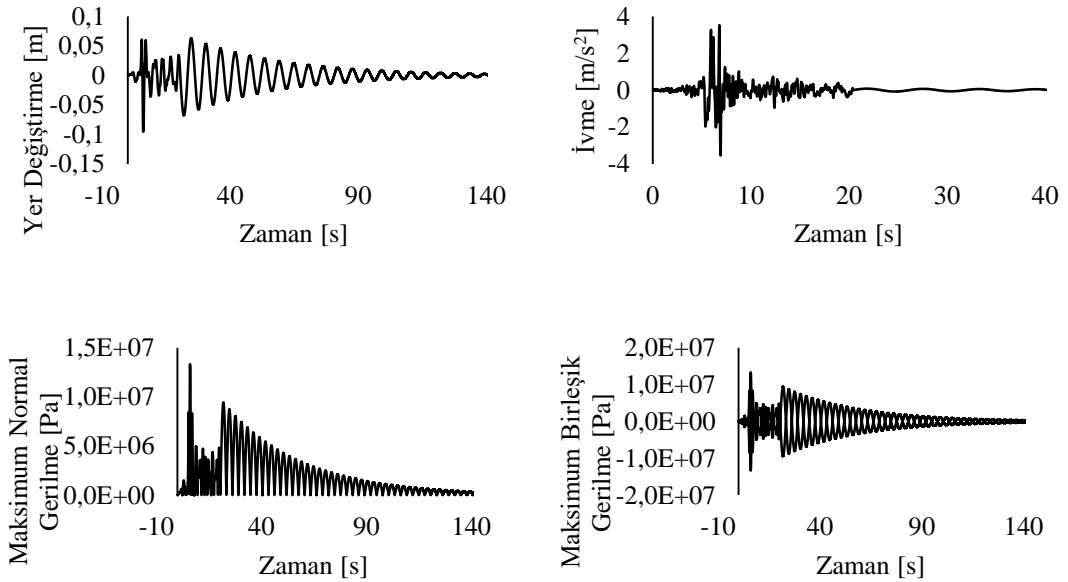
## Senaryo 2.4

Tablo 0.63 Senaryo 2.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
56007,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,049932	4,10E-03

Tablo 0.64 Senaryo 2.4 Modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,174	5,72	213,2579	-1,53E-10	0,39694	45478,93	2,35E-20	0,157562
2	0,174	5,72	0,391169	8,06E-06	-213,252	0,153013	6,50E-11	45476,37
3	1,764	0,56	0,000362	-3,86E-04	-0,75405	1,31E-07	1,49E-07	0,568588
4	2,033	0,49	-74,2246	-1,33E-09	-0,04247	5509,29	1,77E-18	0,001803
5	2,035	0,49	4,26E-02	0,000313	-7,41E+01	1,82E-03	9,8E-08	5,49E+03
6	2,453	0,40	-5,5E-11	-1,67E-12	2,19E-11	3E-21	2,78E-24	4,79E-22



Şekil 0.33 Senaryo 2.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

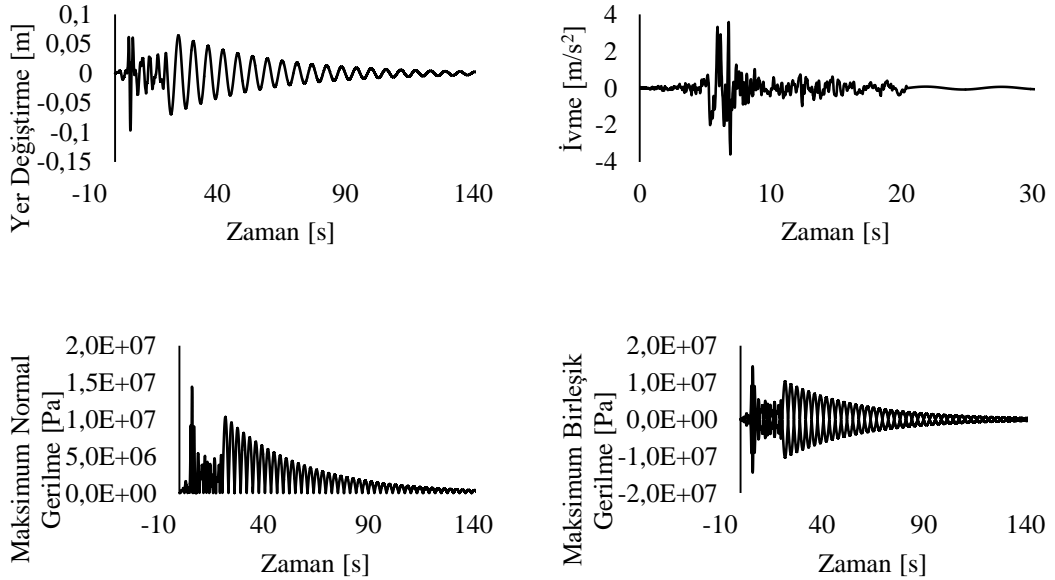
### Senaryo 3.4

Tablo 0.65 Senaryo 3.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
Ters V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60543,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,027129	2,30E-02

Tablo 0.66 Senaryo 3.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,172	5,79	-218,857	-8,65E-11	-0,32977	47898,31	7,48E-21	0,108749
2	0,172	5,79	13,92655	7,28E-11	-218,414	193,9488	5,30E-21	47704,47
3	1,899	0,52	81,16248	4,92E-10	0,028807	6587,347	2,42E-19	0,00083
4	1,899	0,52	7,662935	-1,16E-10	80,79992	58,72058	1,35E-20	6528,628
5	2,070	0,48	7,44E-10	-1,2E-11	3,69E-09	5,53E-19	1,55E-22	1,36E-17
6	2,820	0,35	8,1E-12	1,11E-11	1,31E-10	6,56E-23	1,22E-22	1,72E-20



Şekil 0.34 Senaryo 3.4 a) Yer değişirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

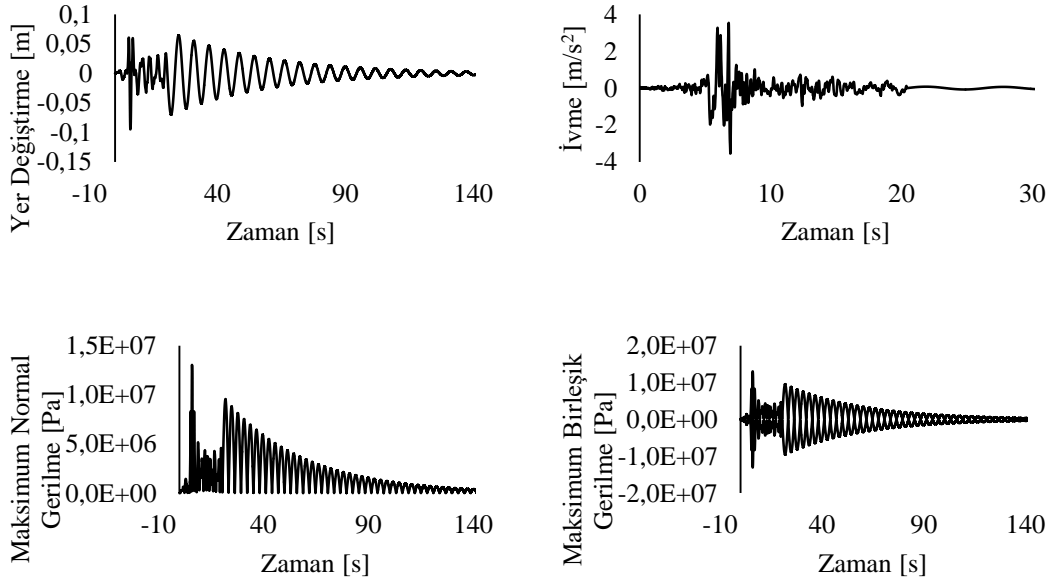
## Senaryo 4.4

Tablo 0.67 Senaryo 4.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
V_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
56007,47252			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,048925	3,74E-03

Tablo 0.68 Senaryo 4.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,169	5,91	6,680867	-8,80E-11	213,7045	44,63398	7,75E-21	45669,61
2	0,169	5,91	-213,808	2,73E-11	0,520341	45713,97	7,48E-22	0,270755
3	1,287	0,77	3,27E-10	-1,33E+02	1,27E-08	1,07E-19	1,77E+04	1,61E-16
4	1,293	0,77	0,085945	9,99E-10	4,295851	0,007386	9,98E-19	18,45433
5	1,293	0,77	-4,30E+00	-3,3E-09	-8,28E-05	1,85E+01	1,06E-17	6,86E-09
6	1,295	0,77	-3,8E-10	3,99E-10	-3,1E-10	1,43E-19	1,59E-19	9,41E-20



Şekil 0.35 Senaryo 4.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

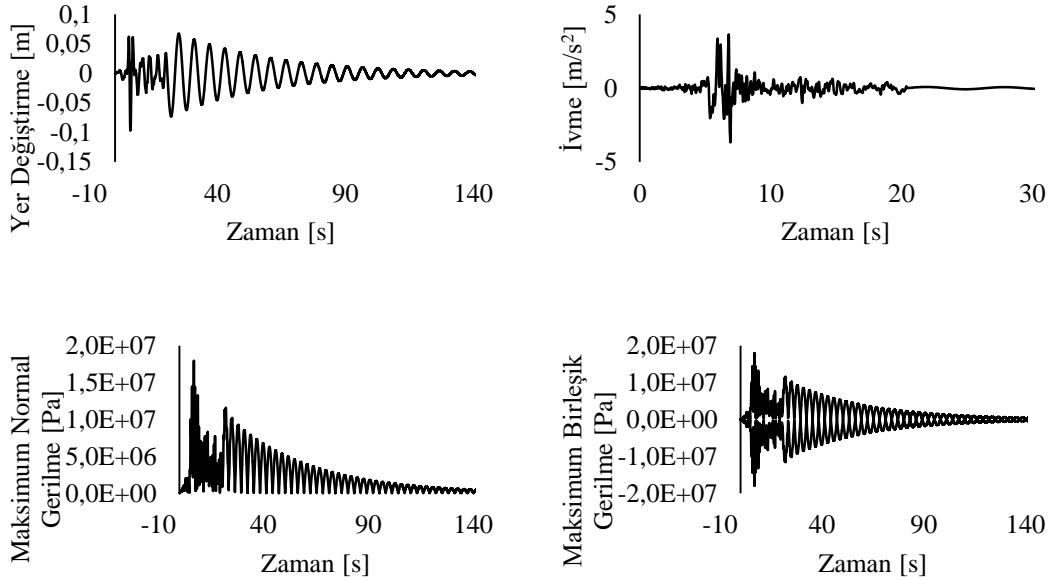
## Senaryo 5.4

Tablo 0.69 Senaryo 5.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
V 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2227		1219	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60543,4729			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,04812	3,99E-03

Tablo 0.70 Senaryo 5.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,167	5,98	-26,8083	-1,04E-10	217,8701	718,6872	1,09E-20	47467,36
2	0,167	5,98	219,5132	-1,26E-11	-1,6E-05	48186,05	1,59E-22	2,61E-10
3	1,287	0,77	-2,2E-10	1,33E+02	7,51E-11	4,96E-20	1,77E+04	5,64E-21
4	1,293	0,77	-0,06549	-3,33E-09	-5,18146	0,004289	1,11E-17	26,84751
5	1,293	0,77	5,18E+00	3,54E-09	2,76E-06	2,69E+01	1,25E-17	7,59E-12
6	1,295	0,77	-6,4E-10	2,10E-09	-9,8E-10	4,03E-19	4,43E-18	9,64E-19



Şekil 0.36 Senaryo 5.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği



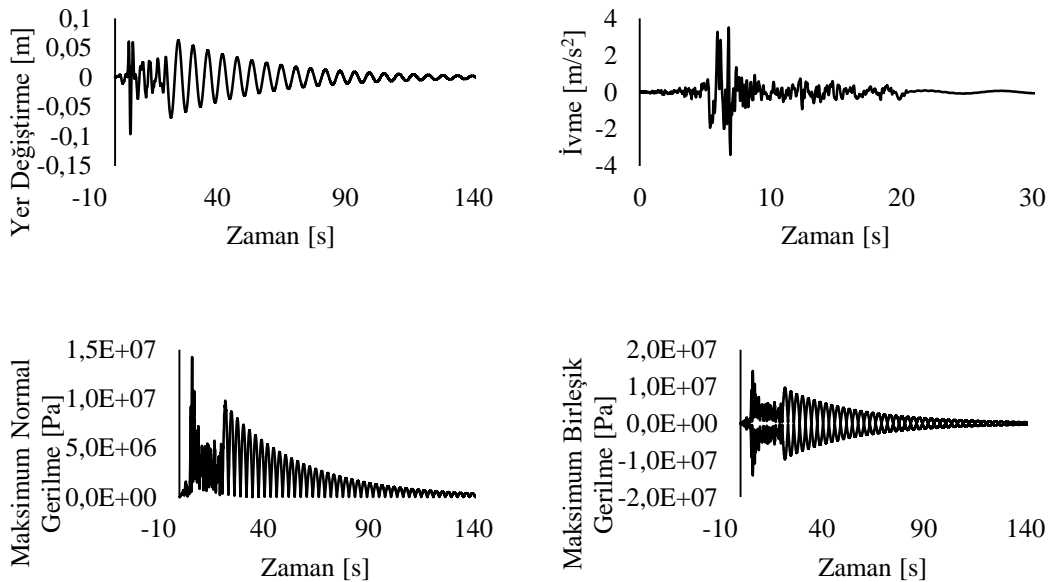
## Senaryo 6.4

Tablo 0.71 Senaryo 6.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
X_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55811,85965			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,050337	3,56E-03

Tablo 0.72 Senaryo 6.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,173	5,75	7,75383	1,23E-02	213,1773	60,12187	1,50E-04	45444,55
2	0,174	5,73	-213,166	6,73E-03	7,710408	45439,94	4,53E-05	59,4504
3	1,861	0,53	6,393757	-1,53E+00	0,858311	40,88013	2,35E+00	0,736698
4	2,063	0,48	12,95928	-3,15E-01	-73,2421	167,943	9,92E-02	5364,407
5	2,072	0,48	7,30E+01	0,378005	1,29E+01	5,33E+03	0,142888	1,65E+02
6	3,010	0,33	-0,19847	-7,26E-02	0,013243	0,039388	5,27E-03	0,000175



Şekil 0.37 Senaryo 6.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

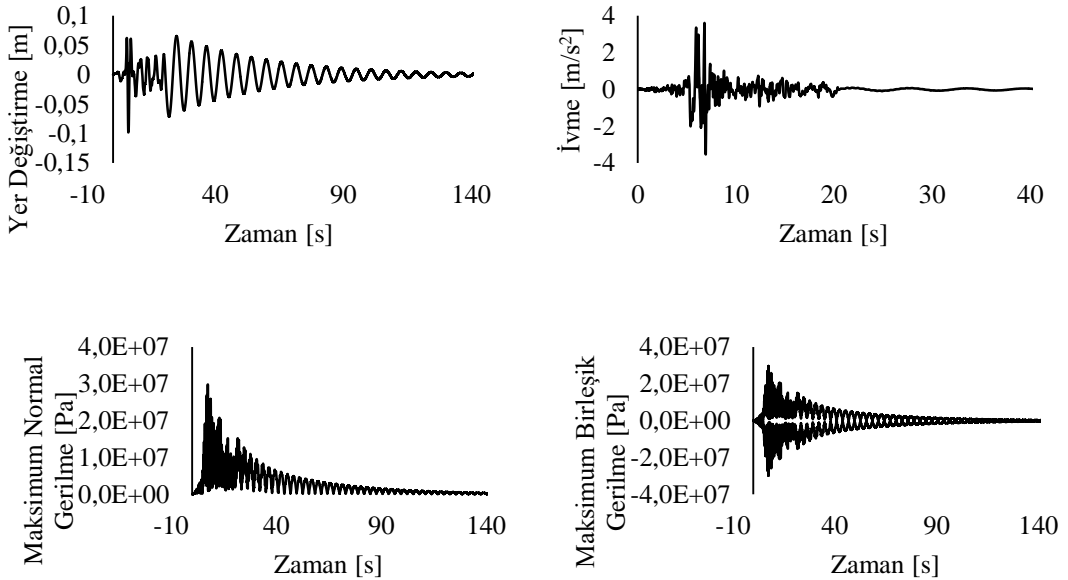
## Senaryo 7.4

Tablo 0.73 Senaryo 7.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
X 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2203		1195	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
65049,59455			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,051543	1,68E-03

Tablo 0.74 Senaryo 7.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,170	5,87	51,90764	-1,16E-02	-218,69	2694,403	1,34E-04	47825,35
2	0,171	5,84	218,7117	-1,55E-02	51,98585	47834,8	2,40E-04	2702,528
3	1,799	0,55	31,30581	-3,18E-01	-81,7773	980,0539	1,01E-01	6687,519
4	1,810	0,55	81,74691	4,42E-01	31,21603	6682,557	1,96E-01	974,4404
5	2,756	0,36	-2,09E+00	-4,12137	-3,23E-01	4,36E+00	16,98567	1,05E-01
6	4,578	0,21	0,387233	3,24E-01	-0,00756	0,14995	1,05E-01	5,71E-05



Şekil 0.38 Senaryo 7.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

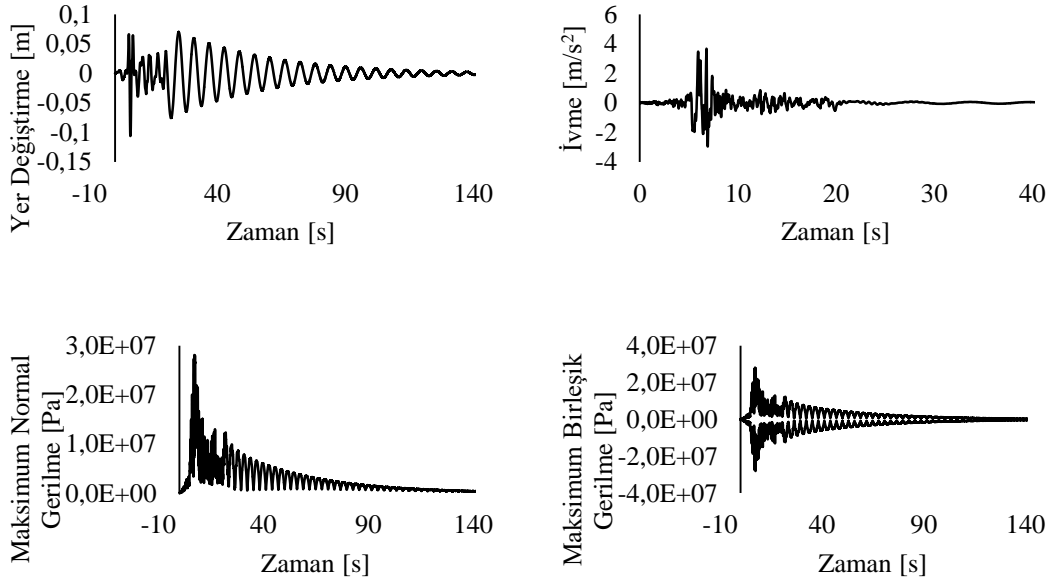
## Senaryo 8.4

Tablo 0.75 Senaryo 8.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
K_2 2_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
2299		1147	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
60901,61004			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,048376	3,92E-03

Tablo 0.76 Senaryo 8.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,167	5,95	-153,388	-2,67E-01	156,7645	23527,77	7,13E-02	24575,09
2	0,169	5,89	-157,014	1,52E-03	-153,673	24653,26	2,32E-06	23615,54
3	1,634	0,61	-16,8734	3,47E+00	28,84078	284,7119	1,21E+01	831,7909
4	1,696	0,58	-54,8446	6,79E+00	47,40216	3007,929	4,62E+01	2246,965
5	1,861	0,53	5,65E+01	-0,12152	5,87E+01	3,20E+03	0,014767	3,44E+03
6	4,458	0,22	-32,6114	-3,46E+01	34,79596	1063,503	1,20E+03	1210,759



Şekil 0.39 Senaryo 8.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

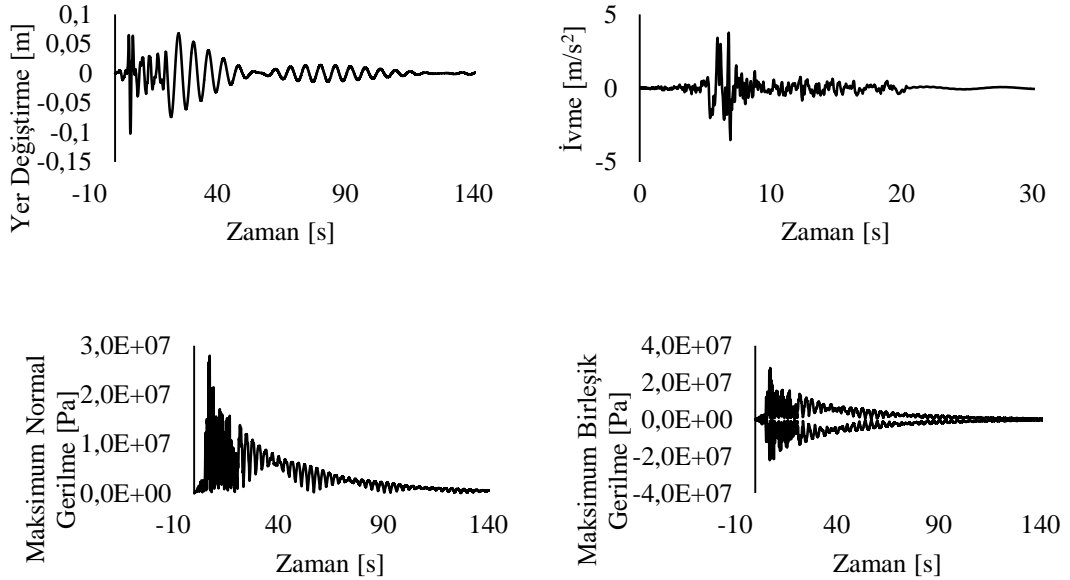
## Senaryo 9.4

Tablo 0.77 Senaryo 9.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 5_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55689,40454			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,047663	3,72E-03

Tablo 0.78 Senaryo 9.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,164	6,08	-151,582	9,28E-01	-150,712	22977,24	8,61E-01	22714,03
2	0,178	5,60	-149,677	-7,50E-03	150,6023	22403,25	5,63E-05	22681,04
3	1,962	0,50	51,13976	-1,15E+01	52,69384	2615,275	1,32E+02	2776,641
4	1,977	0,50	5,490233	-7,72E-01	9,327469	30,14266	5,95E-01	87,00168
5	2,164	0,46	-5,24E+01	-0,02409	5,06E+01	2,74E+03	0,00058	2,57E+03
6	3,355	0,29	-0,00057	-1,25E-03	-0,00062	3,23E-07	1,57E-06	3,88E-07



Şekil 0.40 Senaryo 9.4 a) Yer değiştirme b) İvme c) Maksimum normal gerilme d) Maksimum birleşik gerilme grafiği

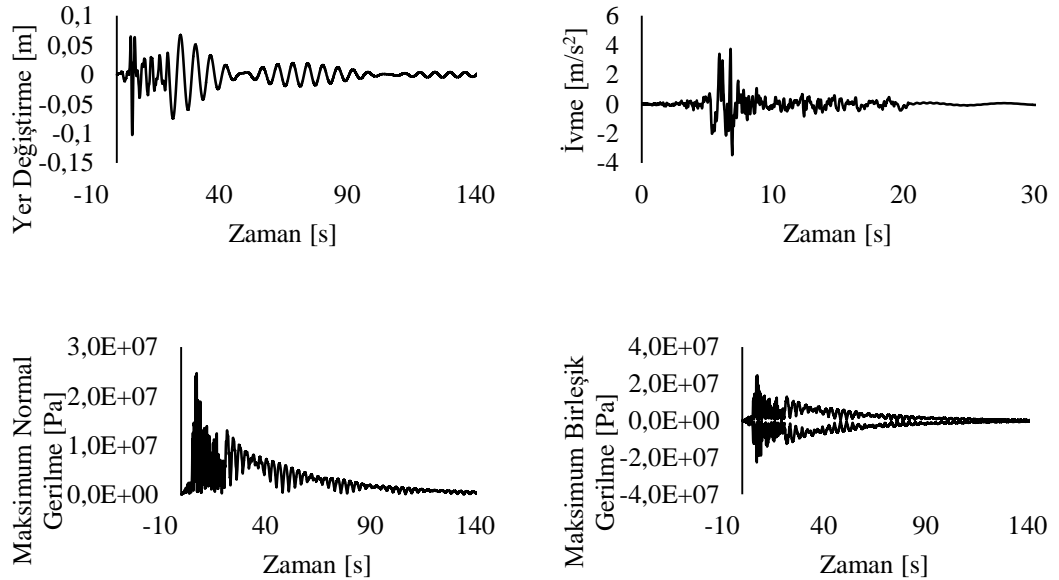
## Senaryo 10.4

Tablo 0.79 Senaryo 10.4 genel bilgiler

Mast Tipi			
K Konik 10_0.025			
Tepe Noktası		Orta Noktası	
1147		571	
Mast Kütlesi [kg]		Rayleigh Sönüm Katsayıları	
55812,48614			
Sönüm Oranı [%]		Kütle	Rijitlik
ksi1	ksi2	a0	a1
0,025	0,025	0,047101	3,70E-03

Tablo 0.80 Senaryo 10.4 modal analiz çıktıları

	Frekans	Periyot	Kütle Katılım Faktörleri			Etkin Kütle Miktarı [kg]		
	[Hz]	[s]	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,162	6,167	-153,291	1,1E+0	-149,17	23498,2	1,40E+00	22251,63
2	0,179	5,563	-147,91	-7,6E-3	152,0441	21877,46	5,88E-05	23117,4
3	1,945	0,514	52,25379	-1,4E+1	52,33818	2730,459	2,13E+02	2739,285
4	1,989	0,502	1,170114	-1,1E+0	0,618938	1,369166	1,34E+00	0,383084
5	2,198	0,454	-5,10E+01	-0,0744	5,12E+01	2,60E+03	0,005539	2,62E+03
6	3,355	0,297	0,000827	2,4E-03	0,000956	6,84E-07	5,89E-06	9,13E-07



## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Makaleler

1. Hamit KENAN, C. Oktay AZELOĞLU, "Design of scaled down model of a tower crane mast by using similitude theory", Engineering Structures, Vol: 220, Page: 110985, 2020
2. Hamit KENAN, C. Oktay AZELOĞLU, "Seismic Performance Analysis of Tower Crane Mast Types with Different Bracing Configurations," STRUCTURES, cilt.2021, sa.34, ss.286-302, 2021

### Projeler

1. Kule Krenlerin Deprem Etkisi Altındaki Dinamik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, FDK-2019-3694.