

**HALIÇ METRO KÖPRÜSÜ SAĞLIK İZLEME SİSTEMİ
VE ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL
SONLU ELEMAN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Galip PINAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

**HALIÇ METRO KÖPRÜSÜ SAĞLIK İZLEME SİSTEMİ
VE ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL
SONLU ELEMAN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ömer Galip PINAR
(501131036)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501131036 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ömer Galip PINAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HALIÇ METRO KÖPRÜSÜ SAĞLIK İZLEME SİSTEMİ VE ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL SONLU ELEMAN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr.Barlas Özden ÇAĞLAYAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr.Yasin FAHJAN
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Temmuz 2020**
Savunma Tarihi : **10 Temmuz 2020**





Oğlum Ömer ASAF'ın anısına,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bana kıymetli vaktini ayıran, çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisinin ilgi, özveri ve desteği sayesinde çalışmam nihayete ermiş olmakla beraber hayat felsememde büyük bir katkı sunmuştur.

Yüksek lisans hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve her türlü desteğini esirgemeyerek beni yalnız bırakmayan kıymetli hocalarım Doç. Dr. Barlas Özden ÇAĞLAYAN ve Prof. Dr. Sumru PALA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez jürimde olmayı kabul ederek değerli vaktini ayıran değerli hocam Prof. Dr. Yasin FAHJAN'a çok teşekkür ederim.

Desteğini ve ilgisini benden esirgemeyen, her sıkıntıda yanımda olan çok değerli eşim Saime PINAR'a, bana bu hayatı ve şansı sunan çok kıymetli aileme, çok kıymetli arkadaşlarım Kubilay ÇİÇEK ve Barış KASAPOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca kahrımı çeken, bana gösterdiği ilgi,alaka ve yakın bilgi birikim paylaşma isteği sayesinde çalışma motivasyonumu artıran kıymetli meslektaşım, arkadaşım Eray TEMUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2020

Ömer Galip PINAR
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bakış	1
1.2 Çalışmanın Genel Yaklaşımı	3
1.3 Çalışmanın Yapılma Amacı.....	4
1.4 Çalışmada İzlenen Yol.....	6
2. LİTERATÜR ARAŞTIRILMASI VE TEMEL BİLGİLER	7
2.1 Giriş	7
2.2 Yapısal Sağlık İzleme Nedir?	7
2.3 Yapısal Sağlık İzlemenin Kullanım Şekli ve İçeriği.....	8
2.4 Yapısal Sağlık İzleme Teknikleri ve Bu Tür Tekniklere İstinaden Yapılan Çalışmalar.....	11
2.4.1 Sürekli izleme (Gerçek zamanlı 7/24-365 gün).....	12
2.4.2 Periyodik izleme (kısa süreli-modal analiz çalışması)	13
2.5 Yapısal Sistemlerin Hesabı ve Yapısal Modelleme	14
2.5.1 Yapı metametik modeli.....	16
2.5.1.1 Tek serbestlik dereceli sistemler	17
2.5.1.2 Çok serbestlik dereceli sistemler	18
2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi	19
2.6.1 Sonlu eleman türleri	22
2.6.1.1 Düzlem eleman (Plane).....	22
2.6.1.2 Çubuk eleman	22
2.6.1.3 Kabuk eleman (Shell)	23
2.6.1.4 Katı eleman (Solid).....	23
2.6.2 Sonlu eleman analizinde izlenen yol ve içeriği	23
2.7 Fiziksel ve Matematiksel Modelleme Süreçleri Ve Temel Kavramlar	26
2.7.1 Modellemede temel kavramlar	27
3. YAPI MODELLEMESİNE GİRİŞ, KULLANILAN YÖNTEMLER VE YAPILAN ANALİZLER	29
3.1 Giriş	29

3.2 Haliç Metro Köprüsü (HMK) Modellemesine Giriş ve Köprü Eleman- larının Tanıtılması.....	29
3.3 Yay ve Çubuk Eleman Modelleri.....	48
3.3.1 Yay eleman modeli	49
3.3.2 Çubuk eleman modeli.....	52
3.4 Sistem Rijitlik, Kütle ve Dönüşüm Matrisleri	53
3.5 Modal Analiz Çalışmaları, Periyot ve Frekans Değerleri.....	64
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	73
EKLER	77
Ek A: Tasarım Dökümanları.....	79
Ek B: Saha Çalışmaları.....	89
Ek C: Tez Sonuçları.....	93
ÖZGEÇMİŞ	99

KISALTMALAR

HMK	: Halic Metro Köprüsü
GHB	: Golden Horn Bridge
YSİ	: Yapısal Sağlık İzleme
VCE	: Vienna Consulting Engineers
UBC	: Uniform Building Code
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
DOF	: Degree Of Freedom
DN	: Düğüm Noktası
LFRD	: Load And Resistance Factor Design
MAC	: Modal Assurance Criteria
FEE	: Funtional Evaluation Earthquake
SEE	: Safety Evaluation Earthquake



SEMBOLLER

A	: Çubuk eleman kesit alanı
A_s	: Tellerin nominal alanı
a_0	: Rayleigh sönüm matrisi için kütle matrisi çarpanı
a_1	: Rayleigh sönüm matrisi için rijitlik matrisi çarpanı
a	: Mod şekli
c	: Sönümleme oranı
C	: Sönüm matrisi
E_s	: Elastisite modülü
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülü
E_i	: Dinamik öz form
d'	: Lokal koordinat sistemi deplasman vektörü
d	: Global koordinat sistemi deplasman vektörü
f'	: Lokal koordinat sistemi kuvvet vektörü
f	: Global koordinat sistemi kuvvet vektörü
$F(t)$	: Dış kuvvet vektörü
F_1	: Atalet kuvveti
F_s	: Elastik yay kuvveti
F_D	: Viskoz sönümleme kuvveti
$F(x)$	: Forier dönüşümü fonksiyonu
f_w	: Frekans
f_u	: Çekme gerilmesi sınırı
$G_y(f)$	: Yapısal tepki spektral yoğunluk matrisi
$G_q(f)$	: Otokorelasyon fonksiyonu matrisi
I	: Toplam atalet
i	: Yay elemanı i noktası
j	: Yay elemanı j noktası
K	: Global koordinat sistemi rijitlik matrisi
k'	: Lokal koordinat sistemi rijitlik matrisi
k	: Rijitlik
K_s	: Pekleşme rijitliği
K_e	: Başlangıç rijitliği
k_y	: Zemin etkisi için kullanılan yay sabiti
K	: Rijitlik matrisi
m	: Kütle
M	: Kütle matrisi
L	: Çubuk eleman uzunluğu

$\mathbf{L}$: Eleman uzunluk matrisi
 $\mathbf{p}$: Global koordinat sistemi sabit kuvvet vektörü
 $\mathbf{p}'$: Lokal koordinat sistemi sabit kuvvet vektörü
 $\mathbf{q}(t)$: Modun zamana bağlı koordinatı
 $\mathbf{Q}(t)$: Yay dış kuvveti
 $\mathbf{R}(\tau)$: Korelasyon fonksiyonu
 $\mathbf{R}_q(\tau)$: Modal koordinatların otokorelasyon fonksiyonu
 $\mathbf{u}_i$: Yay elemanı i noktasına ait deplasman
 $\mathbf{u}_j$: Yay elemanı j noktasına ait deplasman
 $\mathbf{R}$: Global koordinat sistemi dönüşüm matrisi
 $\mathbf{T}(D)$: Deplasman dönüşüm matrisi
 $\mathbf{T}(F)$: Kuvvet dönüşüm matrisi
 $\mathbf{T}$: Periyot
 $\mathbf{x}(t)$: Yerdeğiştirme vektörü
 $\ddot{\mathbf{x}}_g$: Yer ivmesi
 $\mathbf{v}$: Hız
 $\mathbf{w}$: Açısal frekans
 $\mathbf{y}(t)$: Yapısal davranış

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Kullanılan malzemelerin yoğunlukları [1].....	30
Çizelge 3.2 : Tabliye atalet momentleri [1].	31
Çizelge 3.3 : Model-kablo adet ve isimlendirmeleri [2].....	35
Çizelge 3.4 : Kabloların oluştuğu tellerin mekanik özellikleri [3].....	35
Çizelge 3.5 : Kazık yerleri,cinsleri ve uzunlukları [3].	38
Çizelge 3.6 : P2-2 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].....	43
Çizelge 3.7 : P3-1 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].....	44
Çizelge 3.8 : P3-3 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].....	45
Çizelge 3.9 : P3-4 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].....	45
Çizelge 3.10 : Zemin etkisi için kullanılan yay sabitleri [3].	46
Çizelge 3.11 : Sıkıştırılmış ve dağıtılmış kütle matrisleri [5].....	64
Çizelge A.1 : P2-2 gerilme kontrol değerleri [3].....	83
Çizelge A.2 : P3-1 gerilme kontrol değerleri [3].....	84
Çizelge A.3 : P3-3 gerilme kontrol değerleri [3].....	85
Çizelge A.4 : P3-4 gerilme kontrol değerleri [3].....	86



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Nissibi köprüsü [6].	1
Şekil 1.2 : Haliç Metro Köprüsü (HMK) [4].	5
Şekil 1.3 : Haliç Metro Köprüsü yerleşimi [4].	5
Şekil 2.1 : Veri toplama enstrümanları [7].	8
Şekil 2.2 : Sağlık izleme enstrümanlarının köprü üzerindeki yerleşimi [8].	8
Şekil 2.3 : Amerikan UBC standartları [9].	9
Şekil 2.4 : İdeal enstrümantasyon formatı [9].	9
Şekil 2.5 : Sol-Tacoma Narrows Köprüsü,1940. Sağ-Çaycuma,Türkiye,2012 [10].	10
Şekil 2.6 : Sol-Chirajara Köprüsü,Kolombiya. Sağ-Minnesota Köprüsü,ABD [10].	10
Şekil 2.7 : Yapısal sağlık izleme enstrümanları [11].	13
Şekil 2.8 : Tipik bir Yükleme - Şekildeğiştirme grafiği [12].	15
Şekil 2.9 : Basit bir kirişte bağımsız değişkenler [13].	16
Şekil 2.10 : Tek sebestlik dereceli sistem [6].	17
Şekil 2.11 : Sürekli ortam elemanları [14].	20
Şekil 2.12 : Basit eleman tipleri [15].	20
Şekil 2.13 : Sonlu Elemanlar Metodu taslak senaryo [6].	21
Şekil 2.14 : Çubuk eleman [16].	22
Şekil 2.15 : Kabuk eleman [16].	23
Şekil 2.16 : Katı eleman [16].	23
Şekil 2.17 : Sonlu Eleman analiz adımları [6].	25
Şekil 2.18 : Onay ve doğrulama [6].	26
Şekil 2.19 : Sistem modellemesi [6].	27
Şekil 3.1 : Açılır kapanır köprü ve eğik askılı köprü-Tasarım raporu [3].	30
Şekil 3.2 : Köprünün basit olarak şematik görünümü.	30
Şekil 3.3 : Tabliye kesiti [8].	31
Şekil 3.4 : Modellenmiş pylonlar.Sol-Tasarım raporları,Sağ-SAP2000 modeli [1].	32
Şekil 3.5 : SAP2000 parabolik girdi değerleri.	33
Şekil 3.6 : Kablo yerleşimleri ve oluştukları iplik adetleri [3].	34
Şekil 3.7 : C1,C2 ve C3 kablo malzeme ve kesit özellikleri-SAP2000.	36
Şekil 3.8 : Tasarım dökümanı - kullanılan ayakların kesiti [3].	38
Şekil 3.9 : P3-1 ve P3-3 kazığının malzeme ve mekanik özellikleri - AUTOCAD [2].	39
Şekil 3.10 : Tasarım raporu - P3-1 mesnet ve ayak birleşim modeli [8].	40
Şekil 3.11 : SAP2000 modeli-P3-1 mesnet ve ayak modeli.	41

Şekil 3.12 : Zemin etkisi için kullanılan nonlinear yay yerleşimi [8].	42
Şekil 3.13 : Üç farklı doğrusal rijitlik modeli [17].	46
Şekil 3.14 : Doğrusal yayların yerleşimi [3].	46
Şekil 3.15 : SAP2000 Yay yerleşimleri.	47
Şekil 3.16 : SAP2000 modeli.	47
Şekil 3.17 : MATLAB modeli.	48
Şekil 3.18 : Basit yay eleman modeli.	50
Şekil 3.19 : Gerilme - Deformasyon ilişkisi.	50
Şekil 3.20 : Çubuk eleman modeli.	52
Şekil 3.21 : İki ve üç boyutlu serbestlik dereceleri [18].	53
Şekil 3.22 : Çubuk eleman - lokal koordinatlar [19].	54
Şekil 3.23 : Çubuk eleman - global koordinat sistemi [19].	55
Şekil 3.24 : Rijitlik matrisi - global eksen takımı [20].	57
Şekil 3.25 : Üç boyutlu sistemlerde rijitlik matrisi [21].	59
Şekil 3.26 : Örnek elemanların kütle matrisleri [22].	62
Şekil 3.27 : Statik ve Dinamik kuvvetler [23].	63
Şekil 3.28 : Örnek çubuk eleman.	63
Şekil 3.29 : Deformasyonların gösterimi [22].	66
Şekil 4.1 : Karşılaştırmalı mod şekli ve frekansları [3].	68
Şekil 4.2 : MAC değeri [8].	69
Şekil A.1 : HMK genel görünüm [3].	80
Şekil A.2 : HMK genel enstrüman yerleşimi [8].	81
Şekil A.3 : HMK tez kapsamında incelenen bölümleri [3].	82
Şekil A.4 : FEE depremi response spectrum [2].	87
Şekil A.5 : SEE depremi response spectrum [2].	88
Şekil B.1 : Geçici sensör - saha çalışmaları 1 [8].	90
Şekil B.2 : Geçici sensör izlemesi - saha çalışmaları 2 [8].	91
Şekil B.3 : Geçici sensörler - saha çalışmaları 3 [8].	92
Şekil C.1 : Response spectrum [2].	94
Şekil C.3 : Fourier analizleri [11].	95
Şekil C.2 : Köprü ivme kayıtları [11].	96
Şekil C.4 : Fourier analizleri [11].	97
Şekil C.5 : Mod şekli karşılaştırmalı [11].	97

HALIÇ METRO KÖPRÜSÜ SAĞLIK İZLEME SİSTEMİ VE ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL SONLU ELEMAN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüz inşaat mühendisliğinde tasarım olarak öngörülen metodlardan biride performansa bağlı olarak yapılan yaklaşımdır. Performansa bağlı olarak yapılan yaklaşım tarzı sadece yapı ortaya çıktıktan sonra değil bu yapının bütününe kapsayan bir hizmet süresi içinde göstermiş olduğu ya da göstereceği performansında tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Zira günümüzde bu konuyla ilgili olarak yaşanan gelişmelerden ötürü yapısal sağlık takibi dinamik yapı davranışını araştırabilmek için en gerçekçi yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkar. Bu sistemin kullanılması, yüksek derecede önemli olan yapılarda yeni bakış açılarına sebep olur. Özellikle şiddetli depremler yaşanmasının ardından, yaşanabilecek ağır yıkımlara karşı, bir dizi önlem almada ve bu depremlerden sonra meydana gelen hasarların analiz çalışmalarında büyük bir ışık tutar. Yapılarda değişen dış koşullar ve ani oluşabilecek yüklemeler gibi hareketlerin kaynağının bulanabilmesi ile beraber, sağlık izleme sistemi beraberce uygulanabildiği zaman elde edilen sonuçlarında daha gerçekçi olduğu görülmektedir.

Yapısal sağlık izleme de nelerden yararlanır? Bu sorunun cevabı olarak da aslında yapılmış olan yapısal sağlık izleme çalışmalarının genel olarak nasıl işlediğine dair bir fikir elde edilebilir. Bu sürecin ilk aşaması olarak yapının davranış tahminini için ivme ve yerdeğiştirme ölçümlerinden faydalanılmaktadır. Bu ölçümlerin yapılmasını sağlayan cihazlarla, mevcut yapının modal özellikleri elde edilebilmektedir. Yapının modal özellikleri elde edildikten sonra ise elde bulunan yapının teorik modeli ile gerçek fiziksel model arasında karşılaştırmak adına temel bir referans noktası sunar. Bu temel referans noktası sayesinde teorik model ile fiziksel model birbirlerine belli bir yaklaşım olarak karşılaştırılabilir. Yapısal sağlık izlemenin temelinde olan, incelenen yapının bir hasara sahip olup olmadığının anlaşılmasından sonra, bu hasarın lokasyonu üzerine yoğunlaşılabilir. Eğer bu hasarın lokasyonu bulunabilirse herhangi bir kayba mahal vermeden bu hasar onarılabilir ve bir sonraki aşama olan hasar var ise bu hasarın seviyesi belirlenebilir. İnşaat mühendisliğinin temelini oluşturan, ana temalardan biri olan ‘uzun ömürlü ve güvenilir yapılar oluşturmak’ için bu çalışma bizleri nihai amacımıza götürür ki o da; mevcut yapının kalan ömrünün tespit edilmesi ve bu ömrü boyunca daha güvenilir bir kullanım sağlayabilir.

Yapılan bu çalışmada ise Haliç Metro Köprüsünün (HMK) sistem tanınması ve performans seviyesinin belirlenme çalışmaları yapılmıştır. Çalışma yapılan bu köprü inşaatı 2009 yılında başlamış olup 2014 yılında hizmete açılmıştır. Eğik askılı çelik bir köprü olarak imal edilmiş olan bu köprü; eğik askılı çelik köprü, Beyoğlu ve Unkapanı yaklaşım köprüsü, açılır/kapanır köprü ve tek açıklıklı köprü olmak üzere 5 ayrı bölümden teşekküldür. Bu bölümlerden sadece Beyoğlu ve Unkapanı yaklaşım köprüleri betonarme olarak diğer bölümler ise çelik olarak inşa edilmiştir. Ayrıca bu köprü Hacıosman-Yenikapı metro hattı içinde kullanılmaktadır. Tasarımı Wiecon firması tarafından yapılan bu köprünün üzerindeki kalıcı sağlık izleme sistemi Vienna

Consulting Engineers firması tarafından kurulmuştur. HMK sağlık izleme sisteminde 61 adet sıcaklık, rüzgar, yerdeğiştirme, eğim, ivme ölçümü için kullanılan sensörler ve GPS'ler bulunmakta, veriler ise sürekli olarak kaydedilmektedir. Kaydedilen bu veriler köprü sorumlu kuruluşu olan Metro İstanbul A.Ş. işletim merkezinde toplanmaktadır. Köprü üzerinde sağlık izleme sistemini kuran VCE firması tarafından harici olarak, köprünün ilk yapım aşamasında ilk ölçümler geçici sensörlerle gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ölçümler ile ilk sistem tanılama çalışmalarında yapı ve kablo salınım ölçümleri yapılmış, mod şekilleri, içsel sönümleme gibi temel mekanik özellikler elde edilmiştir. Elde edilen bu özelliklerin köprü tasarımı yapılırken kullanılan değerlere yakın olduğu saptanmıştır. Lakin güncel halde sistem tanılama sisteminin yapılması için geliştirilmiş olan bir yazılım köprü işletmesi olan Metro İstanbul A.Ş. elinde bulunmamaktadır. Tam olarak da bu noktada, yapılan bu çalışmanın amacı HMK özelinde geliştirilecek olan bir yazılım ile köprünün mevcut sistemini değerlendirmek ve yapının kullanımı boyunca karşılaştığı yüklemeler neticesinde yapı sağlığını değerlendirebilecek olan bir çalışmaya çatı oluşturmaktır.

Yapılan bu çalışmada ise yapı üzerinde bulunan ivme ölçerler vasıtası ile yapılarda kullanılan sistem tanılama çalışmalarının deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması, saha çalışmaları ile eş zamanlı olarak ölçülen yapısal ivmelerin yapıda bulunan sensör ölçümleri ile karşılaştırılması, sistem tanılama çalışmalarının HMK üzerinde uygulanarak karşılaştırılması ve son olarak da iki farklı paket program vasıtası ile (MATLAB, SAP2000) modelleme çalışmasıyla HMK performans seviyesinin, mod şekillerinin ve frekanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalar sistem tanılama algoritmaları eşliğinde başlatılmış olup, bu algoritmalar MATLAB yazılımı kullanılarak programlanmıştır. Bu çalışmada frekans alanında çizilmiş güç spektrumundan pik seçimi metodu kullanılmıştır. Bu yöntemin seçilme sebebi ise uygulama kolaylığı ve seçilecek mod frekanslarının bulunmasında yeterli olmasıdır. Bu işlemler sırasında, sonlu eleman programı yazılarak bu köprüye özel olan doğrusal analiz programı kullanılarak sistem tanılama yöntemlerine bir katkı sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca yine MATLAB programı kullanılarak 3 boyutlu yapısal analiz programı geliştirilmiş, doğruluğuda yine SAP2000 programında geliştirilen 3 boyutlu modelle karşılaştırılmalı olarak yapılmıştır. Buna ek olarak da ITU Çelik Laboratuvarında hazırlanmış olan deney düzeneğinde farklı sensör sayılarının sistem tanılamaya etkisi karşılaştırılmıştır. Bu kurulan deney düzeneğinde iki farklı ivme ölçerden alınan titreşim verileri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ise ivme ölçümlerinden deplasman sinyaline geçişte filtreleme ve referans doğrulama etkisi araştırılmıştır. Bütün bunlara ek olarak yapılan sonlu elemanlar modeli mevcut inceleme raporları, proje çizimleri, köprü tasarım firmasından elde edilen diğer raporlar ışığında kurulmuş olup bu aşamada bütün raporlardan yararlanılmıştır. Yapısal analizler ise SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıya uygulanan deprem etkileri altında doğrusal davranışa geçmesi öngörülen bölgeler tasarım raporlarına istinaden sünek davranış kabulü yapılan yapı bölgeleri olarak seçilmiş, doğrusal olmayan davranış ise SAP2000 programı kullanılarak rijit-plastik olarak modellenmiştir. Yine SAP2000 modelinde ayakların deniz tabanı ile temas ettiği bölgeler lineer olmayan yaylar ile modellenmiş ve bu bağlamda yapısal modelin modal analizleri sonucunda tasarım raporlarında da belirtildiği üzere modal analiz yapıldığı zaman var olan modelin güncellenmesi süreci takip edilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan bu çalışmada MATLAB ve SAP2000 programları yardımları ile köprüden elde edilen sensör verileri üzerinden modellenen yapının, modal analizlerinin örtüştüğü saptanmış ve mevcut yapının, deprem sonrası oluşabilecek hasarlar için, karar ve aksiyon alma süreçlerine dahil edilmesi, ancak bu çalışmanın geliştirilmesi ile oluşabileceği sonucuna varılmıştır.





HEALTH MONITORING SYSTEM OF GOLDEN HORN METRO BRIDGE AND DEVELOPMENT OF THREE DIMENSIONAL LINEAR FINITE ELEMENT MODEL

SUMMARY

One of the methods envisaged as a design in today's civil engineering is the approach made based on performance. The approach style based on performance must be predicted not only after the building has emerged, but also in the performance it has or will show within a period of service that covers the entire structure. Due to the developments about this subject on this day, structural health monitoring is one of the most realistic methods to investigate the dynamic structure behavior. The use of this system causes new perspectives in highly important structures. Especially after severe earthquakes, it sheds a great light against the severe destructions that may occur, in taking a series of measures and analyzing the damages that occur after these earthquakes. It can be seen that the source of the movements such as changing external conditions and sudden loading in the buildings can be found, the results are more realistic when the health monitoring system can be applied together.

What are the benefits of the structural health monitoring? As an answer to this question, with this idea can be obtained about how the structural health monitoring studies that have been done generally. As the first stage of this process, acceleration and displacement measurements are used for the behavior estimation of the building. Modal features of the structures can be obtained with devices that enable these measurements. After the modal properties of the building are obtained, it provides a basic reference point in order to compare the theoretical model of the building with the actual physical model. After understanding whether the structure under investigation has any damage, which is the basis of structural health monitoring, we can focus on the location of this damage. If the location of this damage can be found, it can not be any causing and loss and if the next step is damage, the level of this damage can be determined. One of the main themes that form the basis of civil engineering, building long-lasting and reliable structures, leads us to our ultimate goal, which is to determine the remaining life of the existing structure and provide a more reliable use throughout its lifetime.

In this study, system identification and determination of the level of performance of the Golden Horn Bridge (GHB) are performed. The construction of this bridge started in 2009 and was put into service in 2014. This bridge, which is manufactured as a bent hanging steel bridge, is composed of 5 different sections, the bent hanging steel bridge, Beyoğlu and Unkapanı approach bridge, open/ close bridge and single span bridge. Of these sections, only Beyoğlu and Unkapanı approach bridges are constructed with reinforced concrete and the other sections are made with steel. Also, this bridge is used within the Hacıosman-Yenikapı metro line. The permanent health monitoring system on this bridge, designed by Wiecon, was established by Vienna Consulting Engineers. In the health monitoring system of the Golden Horn Bridge (GHB), there are 61 sensors, GPS and used

for measurement of temperature ,wind,displacement,slope,acceleration,and data are recorded continuously.These recorded data,Metro Istanbul A.Ş. meets in the operating center. VCE has installed the health monitoring system on the bridge and the first measurements were made with temporary sensors during the first construction of the bridge. With these measurements, structure and cable oscillation measurements were made in the initial system diagnostic studies and basic mechanical properties such as mode shapes and internal damping were obtained. However, Metro Istanbul A.S., a software bridge business developed to make the system diagnostic system up to date not available. Precisely at this point, the aim of this study is to evaluate the existing system of the bridge with a software to be developed for the Halic Metro Bridge and to create a framework for a study that can evaluate the building health as a result of the loads encountered during the use of the building.

In this study, experimental and numerical comparison of the system diagnostics used in the buildings by means of the accelerometers on the building, comparing the structural accelerations measured simultaneously with the field studies and sensor measurements in the building, comparing the system diagnostics by applying on the GHB and finally with two different modeling, it is aimed to determine the performance level, mode shapes and frequencies by modeling with different package program (MATLAB, SAP2000) of the GHB. The studies have been started with the system diagnostic algorithms and then these algorithms have been programmed using MATLAB software. In this study, the method of peak selection from the power spectrum drawn in the frequency domain is used. The reason for choosing this method is that it is sufficient in terms of ease of application and finding the frequencies to be chosen. During these processes, it is aimed to contribute to the system diagnostic methods by writing a finite element program and using the linear analysis program especially to this bridge. In addition to, 3D structural analysis program was developed using the MATLAB program, and it was performed in comparison with the 3D model developed in the SAP2000 program. Moreover, the effect of different sensor numbers on system diagnostic was compared in the experimental setup prepared at ITU Steel Laboratory. Vibration data from two different accelerometers were compared to this experiment mechanism. During this study, the effect of filtering and reference verification on the transition from accelerometer measurements to displacement signal was investigated. In addition to all these, the finite element model has been established in the light of existing examination report, project drawings and other reports obtained from the bridge design company and all reports have been utilized at this stage. Structural analyzes were carried out using the SAP2000 program. Under the effects of the earthquake applied to the building, the regions that are foreseen to go into linear behavior have been selected as building zones with ductile behavior acceptance based on the design report and the nonlinear behavior has been modeled as rigid-plastic using the SAP2000 program. Again with the SAP2000 model, the regions where the feet are in contact with the seabed were modeled with non-linear springs and in this context, it was observed that the structural model switched to nonlinear behavior as indicated in the design reports as a result of modal analysis. In the SAP2000 model, the regions where the feet touch the sea floor were modeled with non-linear springs and in this context, as a result of the modal analysis of the structural model, as mentioned in the design reports, the update of existing model was emphasized.

As a result of this study, it was determined that the structure modeled over the sensor data obtained from the bridge with the help of MATLAB and SAP2000 programs

overlapped the modal analysis and included the existing structure in the decision and action taking processes for damages that may occur after the earthquake, but it can be formed by the development of this end of study.





1. GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

İstanbul gibi nüfus yoğunluğu fazla olan ve ülke ekonomilerinde önemli bir pay sahibi olan şehirlerde yapılan yapıların önemide bir okadar büyük önem arz etmektedir. Zira gelişen toplumlarda ve dünya koşullarında büyük afetlerden sonra dahi önem arz eden yapıların hizmet vermesi, yani şehir yaşamlarında ki hayatın devamlılığı için süregelen hizmetlerde de bir aksama olmaması gereklidir. Filhakika, metropol tarzındaki bu tür şehirler, içerisinde zor coğrafi özellikler barındırdıkları gibi, mevcut küçük topoğrafyalarında mümkün olan en üst hizmet sağlanabilmelidir. Bu tür yapılar çok katlı iş yerleri olacağı gibi köprüler gibi son teknolojik yapılarda olabilirler. Çünkü, ulaşım bir şehrin veya ülkenin can damarları olarak isimlendirilebilirler. Olası bir afet durumunda toplumun sağlığı ve refahının devamı için bilhassa apayrı bir hayati öneme sahiptirler. Buna örnek olarak Şekil 1.1’ de çevre ulaşımı ve taşımacılığı içinde hayati bir öneme sahip olan Nissibi Köprüsünden görseller mevcuttur [6].



Şekil 1.1 : Nissibi köprüsü [6].

Tarihin birçok farklı aşamalarından günümüz modern çağlarına kadar köprüler; akarsular, boğazlar, göller gibi birçok engelin aşılmasında kullanılmıştır. Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ve/veya uygarlıkları ile örtüşen ulaşımın da en temel sanat yapılarında köprüler bulunmaktadır. Yapılmış olan bu köprüler ise yapım amaçlarına

göre kendi içlerinde farklı kısımlara ayrılırlar. Zira özellikle metropollerde topoğrafyalar, kullanım amaçlarına göre farklı yapıların belirli bir tasarıma uygun olarak planlanıp yapılması gerekmektedir. Bu aşamada, özellikle kavramsal tasarım olarak adlandırılabilen bu safha, imalatı yapılacak olan köprünün en temel safhası sayılır. Çünkü kullanım amaçları, herhangi bir yapının imal edildiği o amaca yönelik olarak sınıflandırılır. Özellikle demiryolu taşımacılığı için inşa edilen köprülerinde, bu eksenle kavramsal tasarımında inşa şekli eğik askılı köprü olarak düşünülür, bu sayede her bir hareketi neticesinde köprü aksel olarak yüklenir ve yük dağılımı ve ömrü daha uzun olan köprüler imal edilmiş olurlar [7]. Ayrıca bu tip köprüler olası bir hasar durumunda kolay onarılabılır ve inşa süreçleride daha hızlı ve kolaydır. Bir diğer ifade ile, depreme dayanıklı bir köprü yapısında aslında aranacak temel özellikler şu şekilde ifade edilebilir;

- **Köprü düz / doğru eksenli olmalıdır:** Eğrisel (kurpta) köprü biçimleri yapısal tepkileri karmaşık hale getirir.
- **Üstyapı / tabliye, mümkün mertebe az sayıda hareket derzleriyle bölümlere ayrılmış ve sürekli olmalıdır:** Basit mesnetli açıklıkların hareketli mesnetleri ile depremlerde tepki dağılımında düzensizliklere neden olabilir.
- **Temeller kaya veya sıkı alüvyona oturtulmalıdır:** Yumuşak temel zeminin yapısal ötelenmeleri büyültür ve oturmaya veya sıvılaşmaya meyyal olabilir.
- **Köprü boyunca orta - ayak yükseklikleri sabit olmalıdır:** Farklı yükseklikler orta - ayak rijitliklerini farklılaştırarak rijit ayakların daha çok kuvvet ve hasar çekmesine neden olur.
- **Açıklıklar prensip olarak kısa tutulmalıdır:** Uzun açıklıklar büyük kolon kuvvetlerine ve potansiyel süneklilik azalmalarına yol açarlar.
- **Plastik mafsallar:** Ayak başlık kirişleri ve üst yapıdan ziyade kolonlarda oluşmalı ve bir deprem sonrası bu noktalara kontrol ve onarım için kolay ulaşılmalıdır.
- **Kenar ve orta ayaklar:** Köprü enine ve boyuna dik yönlendirilmiş olmalıdır, verev mesnetler, artırılmış ötelenmeleriyle dönme tepkilerine neden olurlar.

Bu tarzdaki yaklaşımların, köprülerin deprem dışı nedenlerle ilgili girdi ve kısıtlarından önce, sadece depreme dayanıklılık açısından uygulanabilecek başlıca özellikleri olduğu unutulmamalıdır. Çünkü, herhangi bir yapı elemanı deprem etkisi dışında birçok çevresel faktöre maruz kalır [24].

1.2 Çalışmanın Genel Yaklaşımı

Yapısal sağlık izlemeye tümünden varacak olursak; genel çerçevede inşaat mühendisliğinin temelini oluşturan parametreler üzerinden gitmeliyiz. Zira inşaat mühendisliğinin temeli, emniyetten ödün vermeden kullanılan malzemenin optimize edilerek somut veriler ortaya koymaktan geçmektedir. Bütün bu veriler ışığında bakacak olursak; köprüler ise diğer inşai yapılardan farklı olarak dinamik yüklere karşı oldukça hassas yapılardır. Özellikle köprülerde meydana gelen bu dinamik davranışlar titreşime bağlı olarak yapısal arızalara ve hizmette sorunlara neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı inşaat mühendisliğinde, özellikle köprü ve viyadük gibi özel sanat yapıları, hem inşaat süreçlerinde hem de inşa edildikten sonraki performans analizleri, her türlü maruz kalınacak koşullar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Özellikle köprüler ve yüksek binalar yapısal performans açısından maruz kaldıkları veya kalabilecekleri dinamik etkilerin yapısal sağlık izleme yöntemleri ile izlenilebilmeleri ve bu etkilere gösterecekleri tepkiler belirlenebilmelidir.

Literatürde, farklı yapıların deprem ve diğer etkilere karşı performanslarının belirlebilmesi açısından temelde üç farklı yöntemle başvurulabilir;

- Laboratuvar deneyleri,
- Bilgisayar analizleri,
- Gerçekte var olan yapılar ve izleme enstrümanları,

gibi yöntemler sonunda, ortak bir sonuç olarak incelenen yapının, en genel ifade ile nasıl bir yaklaşım ile ele alınacağı hususu;

- Matematiksel modelleme (bu çalışmada da kullanılan sonlu eleman modeli gibi),
- Sistem tanılama çalışmaları,
- Spektral analizler (Fourier analiz vb.),

şeklindeki genel bir yaklaşımla ele alınabilirler.

1.3 Çalışmanın Yapılma Amacı

Deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde dahi, inşa edilecek olan yapıların depreme dayanıklı olarak yapılmasında kullanılan performans değerlendirmesinde, birçok belirsizlik mevcuttur. Bahsi geçen matematiksel modeller ile gerçekte var olan yapının arasındaki farklılıklar bu belirsizliklerden sadece biridir. Yapının matematiksel modeli oluşturulurken yapısal sağlık izleme sonucunda çözümün sunulacağı sonlu elemanlar modelin güncellenmesi gibi bir yaklaşım tarzı ele alınabilir. Yapısal sağlık izleme sistemine duyulan ihtiyacın temelinde de aslında bu vardır. Bu durum mühendislik olarak performans değerlendirmesi yapılabilir bir durum ortaya çıkarır. Şekil 1.2’ de görseli paylaşılan Haliç Metro Köprüsü üzerinde de bu türden performans değerlendirmeleri yapılmıştır [4].

Mühendislik olarak performans değerlendirmesi yapılabilir bir durum bizlere, mühendisler olarak ne tür bir fayda sağlayacak türünde bir soru sorulduğu zaman ise bu sorunun cevabı aşağıdaki gibi üç başlık altında toplanabilir;

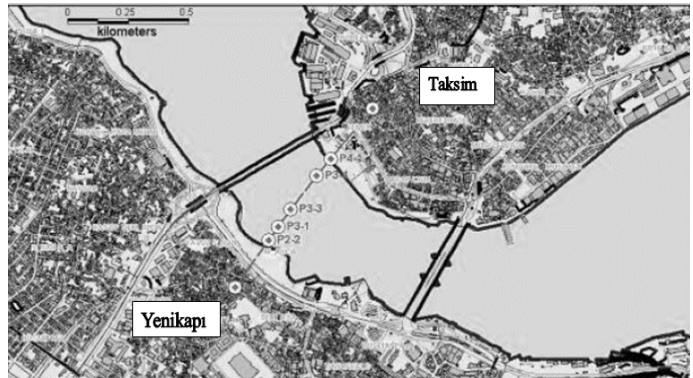
- Yapılan bu tür bir çalışma ile acil durum müdahalesi, ki bu durum gerçek zamanlı bir hasar analizi yapılabilir bir durum sağlar.
- Özellikle kritik öneme haiz olan köprü ve tüneller gibi metropol hayatının içinde sürekliliği sağlayan yapıların , trafiğe kapatılmaları veya trafiğe kapatılmadan erken uyarı sistemi vazifesi görebilir.
- Yapıların doğrusal olmayan davranışlarının tespitini yapar.



Şekil 1.2 : Haliç Metro Köprüsü (HMK) [4].

Verilen bu bilgiler ışığında yapılan bu çalışmada ise İstanbul'da bulunan Haliç Metro Köprüsü üzerinde bir takım incelemeler yapılmıştır. Şekil 1.3'de köprü yerleşimi verilen Haliç Metro Köprüsünü içinde barındıran dünyanın en önemli şehirlerinden biri olan İstanbul, özellikle topografik olarak zemin hareketliliğine çok yatkın bir bölgededir. Bu sebeple şehir hayatında önemli bir yere sahip olan bu tür yapıların ayrı bir başlık altında değerlendirilmesi gerekmektedir. Hazırlanan bu çalışmada da sistem tanılama çalışmaları, sonlu elemanlar model güncellemesi ile beraber çalıştırılmış, geline son noktada haliç metro geçiş köprüsünün bu bağlamda performans değerlendirilmesi yapılarak, paket programlar vasıtasıyla (MATLAB, SAP2000) köprünün iki ve üç boyutlu lineer modellemeleri yapılmış, köprü tasarım firması (Wiecon),Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) sistemini kuran firmadan (VCE) ve Metro İstanbul A.Ş'den temin edilen tüm raporlar ile mod freansları ve şekilleri karşılaştırılmış, yapılan çalışmanın sonucunda kabul edilebilir ölçüde bir örtüşme saptanmıştır [4].

- Yenikapı-Taksim arası
- Eğik askılı çelik köprü
- İnşaat Başlangıcı:2009
- Hizmete açılma yılı: 2014
- Metro geçişi



Şekil 1.3 : Haliç Metro Köprüsü yerleşimi [4].

1.4 Çalışmada İzlenen Yol

Bu çalışmaya, Haliç Metro Köprüsünün tasarımcı ve yüklenici firmalar tarafından köprünün tasarım ve inşaat süreçlerinde geçilen bütün süreçlerin yer aldığı bütün dökümanların taranması ve tek tek kontrol edilmesi ile başlanılmıştır. Söz konusu incelemeler, dinamik raporlar, çizimler, tasarım raporları, zemin etkileşim raporları gibi temel olarak inşa sürecinde izlenen yol ve ortaya çıkan eserin bütün aşamalarını içermektedir. Bütün bu dökümanlar kontrol edildikten sonra, deneysel verilerde kullanılarak önce köprünün ilgili dökümanlarının verileri ışığında bir modelleme üzerinden gidilerek, yapısal model için çubuk elemanların kullanıldığı bir model paket program (SAP2000) kullanılarak elde edilmiştir. Yapı tanılama yöntemi olaraksa, transfer fonksiyonu tepe seçme yöntemi kullanılmıştır. Bu yapılan modelde bazı kabuller yapılarak ilk mod frekanslarının yakalanmasına çalışılmıştır. Bu aşamada model olarak 3 boyutlu lineer bir model kurulmaya çalışılmış, elde edilen verilerin kabul edilebilir ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Yapı mekanik özelliklerinin geliştirilen matematiksel model özellikleri ve ilk yapılan tanı çalışmalarında elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür. Akabinde MATLAB programı vasıtası ile sistem algoritmaları oluşturularak köprünün 3 boyutlu lineer programı yazılmaya başlanılmış olup sonlu elemanlar yöntemi ile buradan elde edilen mod frekansları ile SAP2000 programından elde edilen mod ların örtüştürüldüğü gözlemlenmeye çalışılmış olup bu bağlamda başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir.

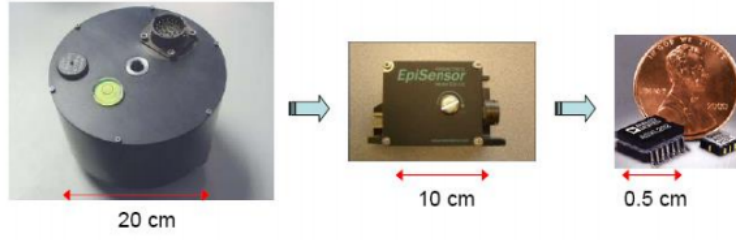
2. LİTERATÜR ARAŞTIRILMASI VE TEMEL BİLGİLER

2.1 Giriş

Tezin bu bölümünde, tezin ana omurgasını oluşturan bazı konularda küçük bilgiler verilerek, bir sonraki bölüme geçişte temel oluşturacak fikirlerin anlatımı yapılacaktır. Daha çok teorik temel bilgilerin yer alacağı bu bölümün içerisinde; Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) yönteminin ne olduğu, genel olarak kullanım şekli ve yerlerine istinaden yapılan çalışmalar, kullanım amaçları, yapısal modellemede izlenen yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemine göre iki ve üç boyutlu lineer programlama teknikleri hakkında temel bilgiler verilecektir.

2.2 Yapısal Sağlık İzleme Nedir?

Yapısal sağlık izlemesi denilince akla gelen ilk şeyin, yapının maruz kalmış olduğu dinamik etkenlerin çeşitli sensörler vasıtası ile (ivmeölçer, veri toplama cihazları v.b.) verilerin toplanması ve bu verilerin belli bir merkez vasıtası ile işlenerek yapının modal parametrelerinin belirlenmesiyle yapının hizmet süresi müddetince herhangi bir zaman aralığında hasarlı olup olmadığının tespitidir [6]. Bu hasarın tespiti de yine mevcut yapının kısa veya uzun süreli olarak takip edilmesine bağlıdır. Yapılacak olan bu takip işlemi, yapıya entegre edilmiş kalıcı veya geçici olarak geliştirilmiş sensörlerden gelen verilen toplanması ve incelenmesi yolu ile yapılır. Söz konusu sensörlerden birkaçının gösterimi Şekil 2.1’ de verilmiştir [7]. Yapısal Sağlık İzleme (YSİ), bir yapının hizmet ömrü boyunca tüm performans spektrumlarının (güvenlik, durabilite, stabilite, kullanım) sayısal değerlendirmesini mümkün kılar. Özellikle stratejik öneme haiz yapılar, ileri mühendislik yapıları (yüksek yapılar) ve tarihi eser niteliğindeki yapılar başta olmak üzere her türlü yapı sistemine uygulanabilen bu sistemlerin amacı, yapıların kısa ve uzun vadeli izlemeler ile; tasarımları aşamasında gözönüne alınmayan farklı dinamik etkilere karşı yapı davranışının belirlenmesi ve yapıda meydana gelebilecek her türlü deformasyonun hız ve sürekliliğini izleme ve bunlara karşı oluşturabilecek



VERİ TOPLAMA SİSTEMLERİ



Şekil 2.1 : Veri toplama enstrümanları [7].

optimum önlemi sağlar. Bu anlamdaki ölçümlerin yapılabilmesi açısından Şekil 2.2’ de HMK üzerindeki enstrümanların yerleşimi gösterilmiştir [8].



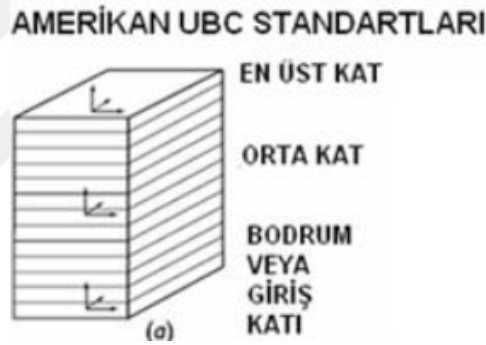
Şekil 2.2 : Sağlık izleme enstrümanlarının köprü üzerindeki yerleşimi [8].

2.3 Yapısal Sağlık İzlemenin Kullanım Şekli ve İçeriği

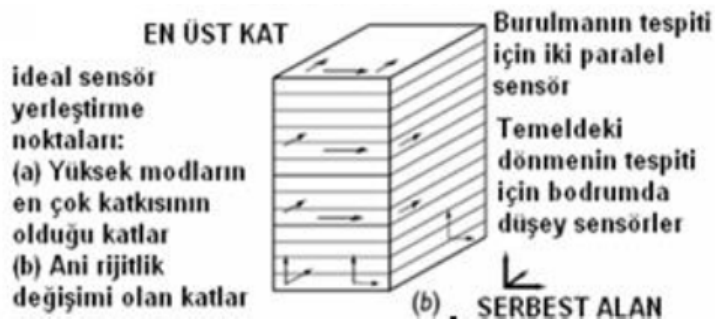
Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) kullanım şekli açısından günümüz mühendislik ölçütlerine göre değerlendirmek gerekmektedir. Zira, eğer ölçüm ve analiz doğru bir şekilde yapılır ise mevcut yapının dinamik kimliklendirme ve modal analiz çalışması sonuçlanmış demektir. Bu sayede hakim periyot, modal frekanslar, sönüm, mod şekilleri, burulmalar, salınımlar, ötelemeler ve zemin yapı etkileşimi gibi birçok alanda yapının gizli kalmış özelliklerini ve çevresel faktörler ile ortaya çıkarmaktadır. Bu gibi özelliklerin ortaya çıkarılması ve/veya sağlıklı sonuçlar elde edebilmek adına temel kıstasların sağlanmış olması gereklidir ki onlarda; 24 bit çözünürlüğünde ve

en az 120 db dinamik ölçüm aralığına sahip sayısallaştırıcılar (veri toplama sistemleri) kullanılmalıdır, her ivmeölçerden saniyede en az 100-200 örnek toplanmalıdır [25]. Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) kullanım şekilleri birçok yapıda kendini göstermekte olup özellikle, bu tez kapsamında da incelemeye tabi tutulan köprüler, tüneller ve eski eserler bu tarz çalışmalar için öncelikli hale gelmiştir. Bu bağlamdaki yapıların izlenilmesi ve gerekli önlemlerin alınması bu türden bir zaruriyet doğurmuştur. İnşaat mühendisliğinde ise özellikle bu alandaki dersler iyi kategorize edilmiş ve modern köprü izleme tekniklerinin incelenmesi gibi birçok yapıcı dersler ile desteklenmiştir.

Özellikle ABD’de yaygın olarak kullanılan UBC (Uniform Building Code,1997) standartlarında, kullanılan sensör yerleştirilmesi ve diğer enstrümanların kullanım şekli Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterilmiş olup temelde bu teknik baz alınarak enstrümantasyon formatı oluşturulabilir [9].



Şekil 2.3 : Amerikan UBC standartları [9].



Şekil 2.4 : İdeal enstrümantasyon formatı [9].

YSİ günümüz inşaat mühendisliğinde ayrı bir başlık altında incelenen konuların başlarında gelip bu alanda çeşitli akademik veriler ışığında çalışmalar başlatılmıştır. Zira özellikle kritik öneme sahip köprüler ve tünellerdeki beklenmedik arızalar ve çökmeler mühendislik tarihinde yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen Haliç Metro Köprüsü (HMK) olduğu içinde, bu tarzdaki

köprüler incelendiği zaman, yapımından sonra veya yapım aşamasında göçen yapılara örnek olarak herkesinde bildiği, görüntülerinde bir hayli izlenildiği, birkaç tanesine örnek verecek olursak, bunların görselleri Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da verilmektedir. Şekil 2.5’de sağ taraftaki köprü ülkemizde bulunan ve yine basınada yansımış olan, Çaycuma Köprüsü gösterilmektedir. Çaycuma Köprüsü yıkıldığı zaman 61 yaşındaydı ve yıkıldığı ana kadar da sürekli olarak hizmet vermekteydi. Sol tarafta görünen köprü ise ABD’nin Tacoma eyaletinde bulunan Tacoma Narrows köprüsü, bu köprü ise 1940 yılında inşa edilmiş ve açıldıktan 4 ay sonra eşi görülmemiş bir sarsıntı ile yıkılmıştı. Bu iki köprününde yıkılma sebepleri için halen belli varsayımlar üzerinde durulmakta olmasına rağmen kesin bir sonuca varılamamış olup farklı çalışmalar devam etmektedir [10,26]. Yine aynı şekilde iki köprü örneği Şekil 2.6’ da gösterilmektedir. Şekil 2.6’ da sol taraftaki köprü Kolombiya’da bulunan ve yapım aşamsında göçen ve birçok işinin ölmesine sebep olan Chirajara köprüsü, sağ tarafta ise ABD’ de bulunan Minnesota köprüsü, yine bu köprüde göçme aşamasında birçok cana mal olmuştur.



Şekil 2.5 : Sol-Tacoma Narrows Köprüsü,1940. Sağ-Çaycuma,Türkiye,2012 [10].



Şekil 2.6 : Sol-Chirajara Köprüsü,Kolombiya. Sağ-Minnesota Köprüsü,ABD [10].

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) icra edilirken belirlenmesi gereken belli başlı parametler mevcuttur, bu parametreler ışığında YSİ nin işlem adımlarında, YSİ

tamamlanıp kurulacak olan matematiksel modelin doğruluğuna, yürütülecek olan işlem adımlarından sonuç olarak elde edilecek olan bütün verilere kadar herhangi bir sürecin direkt olarak müdahili olan bu parametrelerin, yapılacak olan işlem adımlarına dikkatli ve tecrübeli bir şekilde sokulması gerekmektedir. Yapılan YSİ sonucunda elde edilecek olan yapının teorik modelleri ile gerçek fiziksel model arasında yapılacak karşılaştırmaların sağlıklı olması adına da bu parametrelerin dikkatli bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Söz konusu parametlerin tek tek irdelenmesi ve tüme varılması gerekeceği ayrıca belirlenecek olan parametrelerin her birinin kendi içinde doğruluğunun teyit edilerek ve kontrollerinin sağlanarak ilerlenmesi gerektiği unutulmamalıdır [6]. Bu belirlenmesi gereken parametreler ise;

- Frekanslar,
- Mod şekilleri,
- Sönüm oranları,
- Burulma,
- Temellerin dönmesi,
- Yapı-zemin etkileşimi,

şeklinde sıralanabilir.

2.4 Yapısal Sağlık İzleme Teknikleri ve Bu Tür Tekniklere İstinaden Yapılan Çalışmalar

YSİ özele indirgediğimiz zaman iki tip yapı sağlığı izlemesinin mevcudiyetinden bahsetmek mümkün olup, daha alt başlıklara indiğimiz zaman bunları da kendi aralarında daha farklı bölümlere ayırmamız mümkün olabilmektedir. Bunları irdelenecek olan problemin tipine göre de belirlemek mümkündür. YSİ nin bu bağlamda düşünülünce;

- Sürekli İzleme(Gerçek Zamanlı 7/24-365 Gün)
- Periyodik İzleme(Dinamik Kimliklendirme-Kısa Süreli- Modal Analiz Çalışması)

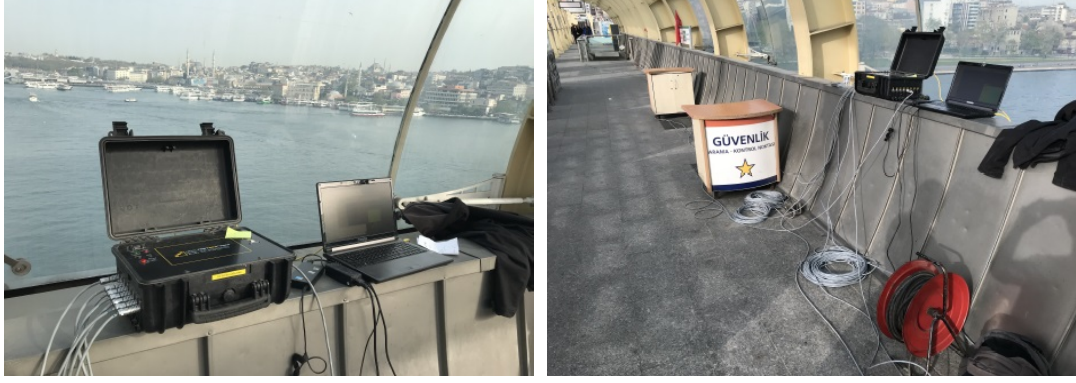
Olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Bu tez kapsamında yapılan modelleme çalışmasında ise yapının devamlılığı açısından iki tip izleme metodundan da yararlanılmış olup, yapılan modellemenin detaylarına ilerleyen konu başlıklarında değinilecektir. Bir alt başlıklarda ise Sürekli İzleme ve Periyodik izleme tekniklerine kavramsal olarak değinilmiş olup, bu tez kapsamında yapılan ve tezin ana omurgasını oluşturan modelleme çalışmalarına altlık oluşturulmuştur.

2.4.1 Sürekli izleme (7/24-365 gün)

Sürekli izleme tekniği ile izlenecek olan yapının diğer bir deyişle seçilecek olan kritik öneme haiz olan yapının, mühendislik olarak öngörülen kritik noktalarına, sensörler ve veri toplama cihazlarının yerleştirilmesi gereklidir. Yapılan bu izleme tekniği ile gerçek zamanlı ve post analizler sonucunda yapının etki öncesi ve sonrası analizinin yapılması, eşik değerlerin aşıldığı zamanlarda belirli uyarı mekanizmaların tatbiki, erken uyarı sistemleri gibi bazı hareket kabiliyetlerine erişilebilir. Sürekli izleme tekniği ilede ;

- Yüksek binalarda,
- Köprü ve tünellerde,
- Tarihi yapılarda,
- Stadyum, hastahane v.b. gibi özel yapılarda,

YSİ farklı şekillerle uygulanabilirler. Özellikle köprü ve tünellerde yapılan YSİ, yapısal sağlık takibinin tarihi boyunca en çok izlenen yapılar arasında olmuştur. Uygarlığın temel göstergelerinden olan köprü ve tünel gibi sanat yapıları olarak adlandırdığımız bu yapıların kavramsal tasarımlarının yanı sıra, bilimsel olarak da öngörülerde bulunmak ve herhangi bir yapının işletimsel ömrü boyunca doğru kararlar alarak hareket etmek çok önemlidir. YSİ bu türdeki yapıların durumu ile ilgili en güçlü karar alma sistemlerinden biri haline gelmiştir. YSİ sonucunda, ele alınan yapıların, matematiksel modeli ile hizmet alınan yapının gerçek modelleme çalışmaları ile bir bütünlük halinde değerlendirilerek, bu çalışmalardan çok başarılı ve faydalı sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın kapsamında da Şekil 2.7' de gösterildiği gibi söz konusu modelleme çalışmalarına başlanılmıştır [11].



Şekil 2.7 : Yapısal sağlık izleme enstrümanları [11].

2.4.2 Periyodik izleme (kısa süreli-modal analiz çalışması)

YSİ, temelinde yapının gösterge niteliğindeki önemli parametlerin sürekli ya da belli aralıklarla takibi ve analizi anlamına gelmekle beraber, bu parametlerin içine bazı statik değişkenler dahil olabilir. Bu statik değişkenler dahil olsa dahi asıl olarak bunun amacı dinamik bir analizdir. Dünya genelinde ki özellikle son çeyrek asırda elektronik ve bilgisayar alanındaki hızlı gelişmeler ile beraber yapı mühendisliği alanında da önemli ve hızlı değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler içinde de yapıların dinamik davranışlarının irdelenmesi yatmaktadır [7]. Yapının dinamik davranışları irdelenirken hakim periyot, sönüm, modal frekanslar, mod şekilleri, katlar arası öteleme oranları analizleri yapılır. Yapının dinamik kimliklendirme için yapılan bu tür çalışmalarında modal analiz yöntemleri kullanılır.

Bir dinamik sistemden elde edilen kayıtların ise analiz edilmesi ve sonucunda o yapının mekanik karakteristiklerinin bulunması işlemine ise Sistem Tanımlaması adı verilmektedir. Bu alanda ulusal ve uluslararası birçok çalışma ve makale bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise sistem tanımlama yöntemi olarak basit frekans dekompozisyonu yapılmıştır. Köprü üzerinde kurulu sensörlerden elde edilen ivme datalarının frekans içeriklerinin kontrolü ile köprünün frekansları gözlenmiştir. Bir sinyalin frekans içeriğinin araştırılması için ise Fourier dönüşümü kullanılmaktadır [27]. Fourier analizi, salınım ve titreşim hareketleri gibi periyodik olayları incelemek için kullanılan periyodik bir fonksiyon olup, Fourier dönüşümü, zamana bağlı sinyallerin sinüs ve cosinüs de sinyallerinin toplamı cinsinden yazmak için kullanılmaktadır, neredeyse her şey (zamana bağlı bir fonksiyon ya da sinyal, elektromanyetik dalgalar, ses dalgaları, hisse senetlerinin fiyat değişimi v.b.) bir dalga

formu şeklinde yazılabilir. İşte tüm bu noktalarda ise Fourier Dönüşümü bu formlarla işlem ve değeriendirme yapmak üzere kullanılan güçlü bir araç olarak ön plana çıkar.

Basit frekans dekompozisyonunda, mod şekillerinin yakalanabilmesi için mod frekanslarının birbirinden ayrık olması gerekmektedir [28]. Gerçek hayatta ise yapılan yapıların mod frekanslarının aslında birbirinden fazla uzak olmadığı gözlemlenmektedir. Yapılan bu çalışmada ise ancak belirli bir bölgede birinci mod frekansı seçilmiştir. Bu mod frekansı seçildikten sonra, diğer modların yeterince uzak olduğu kabulü ile Denklem 2.1 yazılabilir.

$$y(t) = aq(t) \quad (2.1)$$

Bu denklemde y, yapısal davranış, a mod şekli ve q ise modun modal koordinatı, olarak işleme katıldığı zaman, korelasyon fonksiyonu matrisin tamamından hareketle;

$$R(\tau) = E \left[y(t)y(t + \tau)^T \right] = aE \left[q(t)q(t + \tau) \right] a^T = R_q(\tau)aa^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{G}_y(\mathbf{f}) = \mathbf{G}_q(\mathbf{f})aa^T$$

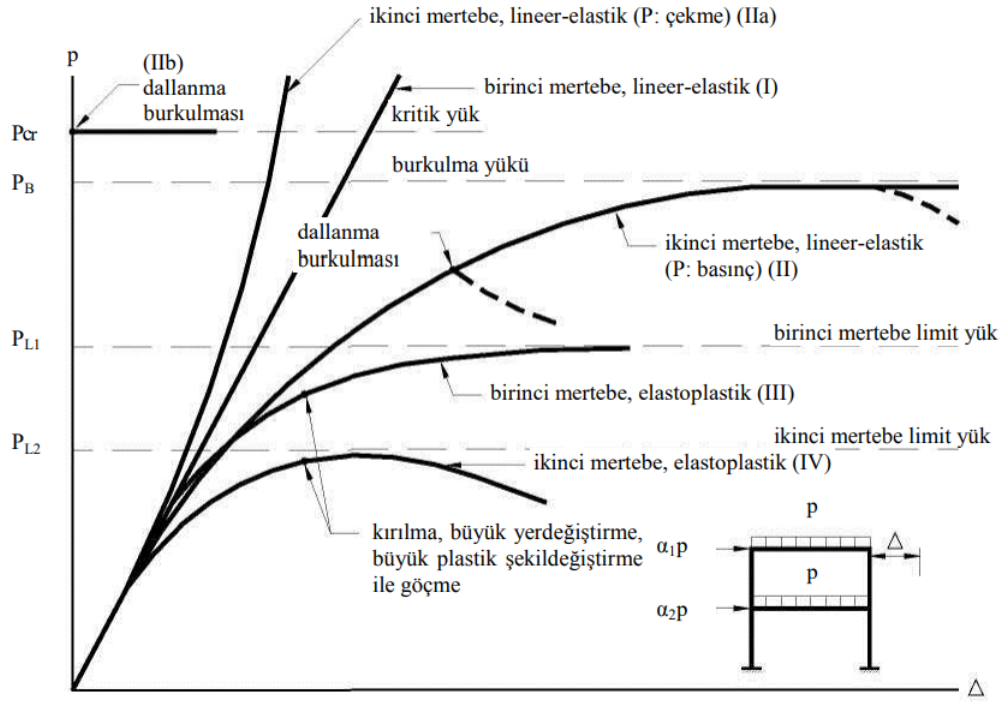
şeklinde gerçekleşir. Burada, $R_q(\tau)$, modal koordinatların otokorelasyon fonksiyonu ve $\mathbf{G}_y(\mathbf{f})$ yapısal tepki spektral yoğunluk matrisi ve $\mathbf{G}_q(\mathbf{f})$ otokorelasyon fonksiyon matrisi olduğuna göre, spektral matrisinin herhangi bir satırı ya da kolonu mod şekli vektörü ile orantılı olduğu görülür. Aslında fourier dönüşümü, zamana bağlı sinyallerin sinüs ve cosinüs da sinyallerinin toplamı cinsinden yazmak için kullanılır.

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi(x\frac{n}{N})} \quad (2.3)$$

2.5 Yapısal Sistemlerin Hesabı ve Yapısal Modelleme

Mühendislikte yapı malzemelerinin genelde lineer elastik olduğu kabulü vardır. En basit ve temel anlatımı ile; lineer esnek demek, malzeme ne kadar sıkışır o kadar kısalır anlamına gelir ve bu da doğrusal olarak kabul edilir. Lineer analiz yöntemlerinde genel olarak bu kural düşünülür ve hesaplar buna göre yapılır. Gerçekte ise malzemenin her an bu özelliği göstermediği görülür, yani malzeme lineer özelliğini

kaybeder bu noktadan sonra ise yapılan hesaplamalar lineer olmayan hesap yöntemleri ile yapılır. Bu duruma göre aşağıdaki Şekil 2.8’ de malzemenin lineer ve lineer olmaması durumunda yük-yerdeğiştirme grafiğinden bir örnek verilmiştir [12].



Şekil 2.8 : Tipik bir Yükleme - Şekildeğiştirme grafiği [12].

Yapı sistemlerinin hesabında ise, yapılar bulundukları ortama göre farklı yüklerin etkisinde kalacakları için, özellikle bu tür durumlarda mevcut yapının hangi etkilere maruz kaldığını iyi tetkik etmek gerekir. Özellikle bu çalışma kapsamında da yapılan çalışmada da mevcutta var olan yapının hangi etkilere maruz kaldığı Wiecon firmasının ilgili dökümanlarından tek tek irdelenmiştir ve çalışma kapsamında da tekrarlı olarak yerinde incelemeler yapılmış, Metro İstanbul A.Ş. yetkilileri ile görüşmeler yapılmıştır. Bu bağlamda genel bir notasyon ile modellemeye giden yoldaki değerlerin içeriğine geçmeden önce; genel parametreler ile hareketi tanımlayan parametreleri inceleyecek olursak;

Hareket halindeki bir sistemin birim zamanda tamamladığı devir sayısına frekans denir. Daire üzerinde bir devir, 2π radyanlık bir açıya denk geldiğinden, açısal frekansı w olan bir sistemin frekansı,

$$f_w = w / 2\pi \quad (2.4)$$

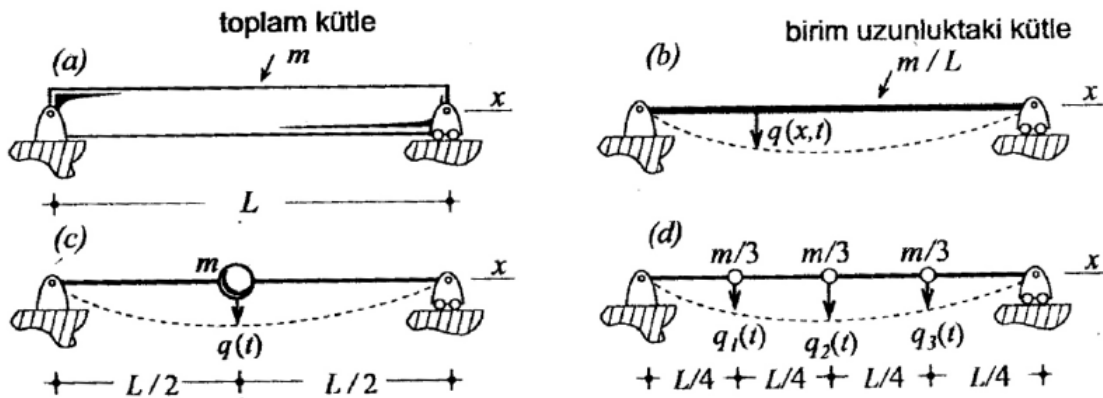
olur. Frekans birimi devir/birim zaman dır. Sistemin bir devri tamamlaması için geçen süreye ise hareketin periyodu adı verilir ve;

$$T = 1 / f = 2\pi / \omega \quad (2.5)$$

denklemleri ile ifade edilir.

2.5.1 Yapı matematik modeli

Çalışılan bu tez kapsamında da olduğu gibi, dinamik hesaplar idealleştirilmiş yapı matematik modeli üzerinde yine idealleştirilmiş yüklemeler kullanılarak gerçekleştirilir. Gerçekte HMK de olduğu gibi, kütle dağılımlarının sürekliliğinden dolayı, sistemler sonsuz sayıda serbestlik derecelerine sahiptirler. Dinamik hesapların kolaylaştırılması ve yapısal modellemenin gerçeğe en yakın şekilde elde edilebilmesi açısından, kullanılan matematiksel modellerde ise sınırlı sayıda serbestlik derecesi kullanmak genelde başvurulan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapının matematik modeline giden yolda, bahsetmiş olduğumuz dinamik serbestlik derecesi ise; bir sistemin önemli olabilecek tüm kütlelerinin pozisyonunu tanımlamak için gerekli olan bağımsız değişken sayısına denir. Bu en temel anlamda Şekil 2.9' da gösterilmiştir [13].



Şekil 2.9 : Basit bir kirişte bağımsız değişkenler [13].

Yapının matematiksel modeli elde edilirken, üzerinde çalışılan yapının sisteminin serbestlik derecesi, bu matematiksel modelin elde edilmesinde incelenen yolun tayini için önemlidir. Herhangi bir çözüm yöntemi açısından sistemlerin serbestlik dereceleri, o sistemlerin bütün davranış modellerini, statik ve/veya dinamik açıdan

kimliklendirme çalışmalarını, bir tepkiye cevap verme şekillerini değiştireceği gibi, modelleme yapılırken izlenen bütün süreçlerin temel etkenidir. Bu anlamda serbestlik derecesine göre sistemler içinde temel bazı hususları hakkında bilgi vererek ve kaç gruba ayrıldığı hakkında kavramsal ifadelerini açıklayarak bu sistemlerin tanıtılması gereklidir. Bu anlamda serbestlik derecelerine göre sistemleri inceleyecek olursak;

- Tek serbestlik dereceli sistemler,
- Çok serbestlik dereceli sistemler,

olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.5.1.1 Tek serbestlik dereceli sistemler

Gerçek yapı sistemi yerine kurgulanan matematiksel model, sistemin sadece tek bir yönde hareket yapmasına (öteleme veya dönme) izin veriyorsa tek serbestlik dereceli sistemdir. Bu anlamda Şekil 2.10’ da basit bir şekilde tek serbestlik dereceli bir sistemin örneği verilmiştir [6]. Bu çalışma kapsamında da, SAP2000 ve MATLAB paket programları kullanılarak modellenen sisteminde temelini oluşturan, statik ve dinamik yükler altındaki tek serbestlik dereceli sistemin temel parametrik özelliklerine bakılacak olursa;



Şekil 2.10 : Tek serbestlik dereceli sistem [6].

$$f_I(t) + f_D(t) + f_s(t) = Q(t) \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da tek serbestlik dereceli bir sistemin en temel haldeki denklemi ifade edilebilmiştir. Eğer kuvvetler kütlenin cinsinden yazılırsa Newton’un ikinci yasasına göre;

$$f_I(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{du(t)}{dt} \right) = m \frac{d^2u(t)}{dt^2} = m\ddot{u}(t) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7’de ki gibi ifade edilir. Viskoz bir sönümleyici için sönümleme kuvveti kütlenin hızı ile orantılıdır.

$$f_D(t) = c \frac{du(t)}{dt} = c\dot{u}(t) \quad (2.8)$$

Yay ile sağlanan kuvvet ise yay rijitliği ile yerdeğiştirme miktarının çarpımına eşittir.

$$f_s(t) = ku(t) \quad (2.9)$$

Tüm bunların sonunda tek serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemi Denklem 2.10’da ki şekilde ortaya çıkar;

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = Q(t) \quad (2.10)$$

Bütün bu denklemler göz önünde bulundurulunca, tek serbestlik dereceli sistemlerin genel davranışları ile ilgili aşağıdaki çıkarımlarda bulunabilir;

- Hareketin diferansiyel denklemi doğrusaldır.
- Tüm terimlerin sabit bir katsayısı vardır. Bunun sonucunda analitik çözüme ulaşmak kolay hale gelir ve süperpozisyon ilkesi geçerlidir.
- Ancak katsayılardan biri sabit olmadığında davranış doğrusal halden çıkar ve çözüm zorlaşır [13].

2.5.1.2 Çok serbestlik dereceli sistemler

Bir sistemin çok serbestlik derecesine sahip olması demek sistemin eksenleri doğrultusundaki titreşimleri ile beraber dönme ve/veya burulma etkileşimlerini de eş zamanlı yaptığı anlamına gelir. Bu olaylar silsilesi gerçekte var olan fiziksel modelin de davranışı anlamına gelir. Gerçekte var olan bir yapı çevresel faktörler ile beraber diğer dış etkenler ile birçok zorlanma hareketini aynı anda yapabilir. Teorik model ve fiziksel model arasındaki örtüşmenin yüksek oranda benzerlik göstermesi açısından, yapısal sistemlerdeki kütle ve rijitliklerin genelde bütün yapı üzerine dağıldığı bilinmelidir. Bu tarzdaki sistemlerin dinamik hareketlerini belirlemek için de, birçok serbestlik derecesine ihtiyaç duyulur ve sistemler idealleştirerek çok serbestlik

dereceli sistemler olarak ifade edilebilirler. Bu idealleştirmelerin başarısının ise, kütle ve rijitliğin dağılımı ile beraber yapıya etkiyen dış kuvvetlerin değişimi ile ilintili olduğu unutulmamalıdır [29].

Verilen bir N-serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi şu şekildedir;

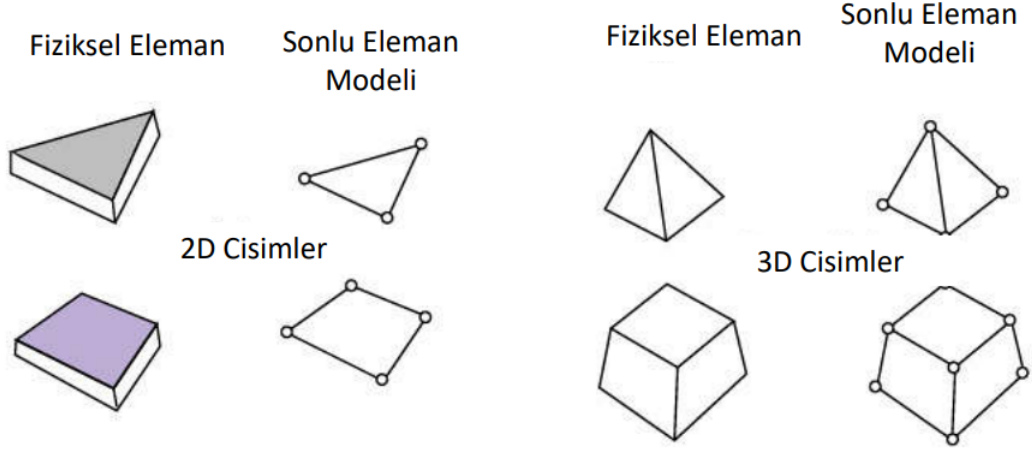
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.11)$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$, $\mathbf{N} \times \mathbf{N}$ boyutunda kütle ,sönümleme ve rijitlik matrisleridir, $\mathbf{x}(t)$ $\mathbf{N} \times 1$ boyutunda yerdeğiştirme vektörü ve $\mathbf{F}(t)$, $\mathbf{N} \times 1$ boyutunda dış kuvvet vektörüdür. Tek yönlü deprem yükleri altında $\mathbf{F}(t) = -M\ddot{x}_g(t)$ olmaktadır. Burada $\ddot{x}_g$ yer ivmesidir [19].

Mantıklı bir model olan klasik sönümlü lineer sistemlerin dinamik tepkisi birçok yapı için modal analiz ile belirlenebilir. Bu sayede, doğal frekanslar ve bu tür sistemlerin titreşim modları ve bunların hareket denklemleri, modal koordinatlara dönüştürüldüğü zaman birbirinden ayrılır. Böylece her doğal titreşim modundaki tepki ve diğer bütün modal yanıtları belirlemek mümkünleşir [5]. Modal yanıtların belirlenmesi ile çalışılan model üzerinde, varsa yapılacak olan iyileştirmeler ve doğruluğunu tayin etmek için çalışılır. Bu tarzdaki bir çözüm adımı, bu çalışma içerisinde yapılmış olup, yine ilerleyen bölümlerde bu konu hakkında daha detaylı bir şekilde anlatımı yapılacaktır.

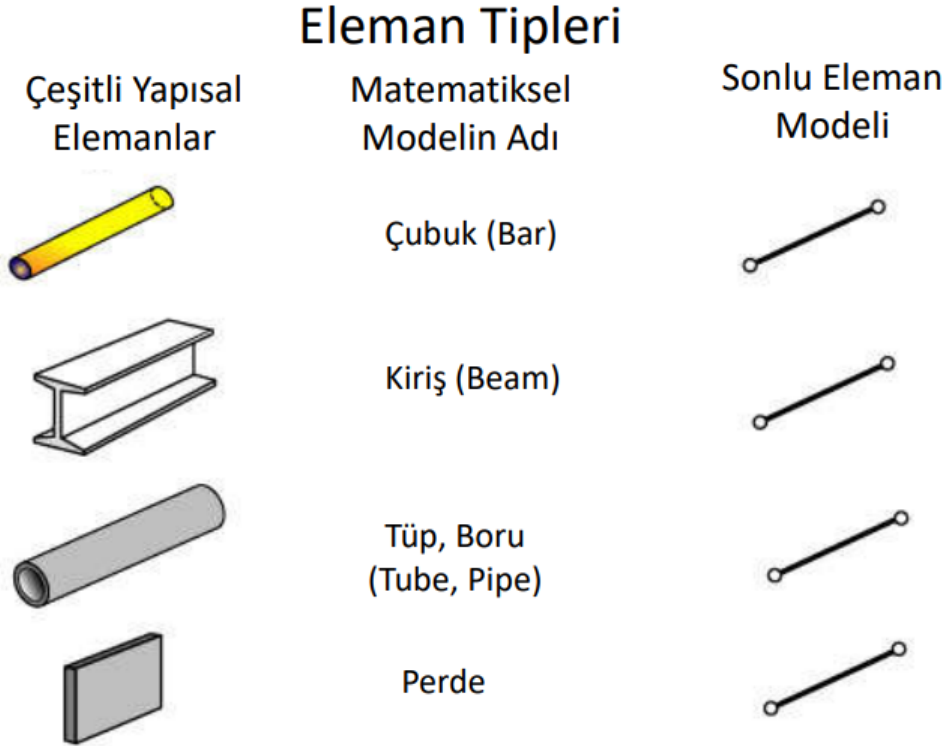
2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi en genel tabiri ile, parçadan bütüne gitmeyi hedef almıştır. Sonlu eleman demek aslında; iki veya üç boyutlu yapıların bir bölümü veya bir bölgesidir. Bu yöntemin ilk ve en geniş alanı gerilme analizidir. Gelişen mühendislik bilimi ile sonlu elemanlar, geniş bir yelpazede bazı bilinmezliklerin çözüm adresi olarak sunulmuştur. Geldiğimiz bugünkü noktada akışkanlar mekaniği, zemin mekaniği, uçak ve uzay mühendisliği, elektromanyetik alanlar ve daha birçok mühendislik alanında problemlerin çözümünde bir araç olarak kullanılmaktadır [23, 30]. Aşağıdaki Şekil 2.11’de bazı temel fiziksel elemanlar ve bunların sonlu eleman modelleri 2D ve 3D cisimler için gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Sürekli ortam elemanları [14].

Gerçekte var olan bazı yapısal elemanlarda yine matematiksel modeli ve sonlu eleman modelleri olarak, modellemesi yapılan çalışmalara göre uyarlanabilirler. Bu sayede çeşitli yapılarda kullanılan ve malzemelerin mekanik özelliklerine ait olan, bu tarzdaki basit bağlantılar kullanılarak elde edilen basit eleman tipleri Şekil 2.12’de verilmiştir [15].

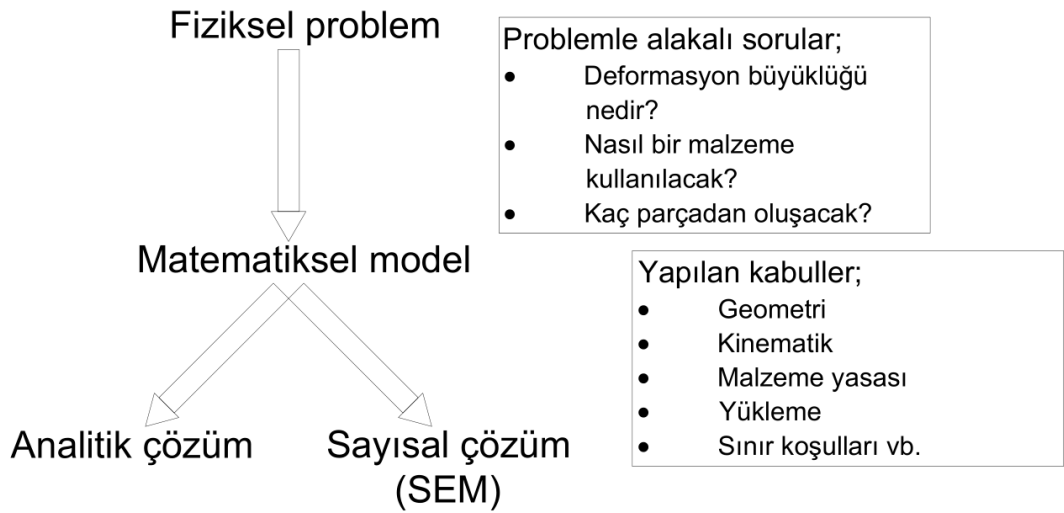


Şekil 2.12 : Basit eleman tipleri [15].

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanabilmek ve doğru sonuçlar elde edebilmek için bir takım temel seviyeleri yapabilmek ve yerine getirmek gereklidir. Bu temel görevler şu şekilde sıralanabilir;

- Herhangi bir paket program kullanarak oluşacak denklem takımlarını çözebilmek gereklidir. Bir başka deyişle bu yöntem tamamına yakını bilgisayar destekli çözümler gerektirir.
- Mevcut denklem takımlarının çözüm adımlarının yerine getirilmesi için temel matris işlemlerinin yerine getirilmesi gereklidir.

Bir anlamda tasarıma giden yolda, genel bir senaryo üzerinde durmak gerekirse, elde var olan fiziksel problemi tanımlamak için doğru soruları sormak ve bu sorulardan sonra matematiksel modeli elde etmek için kullanılan çözüm yönteminin en kabul gören şeklidir Sonlu Elemanlar Metodu (SEM). Kabaca genel senaryo üzerinde düşündüğümüz yol Şekil 2.13’de gösterilmektedir [15].



Şekil 2.13 : Sonlu Elemanlar Metodu taslak senaryo [6].

Bu çalışma kapsamında uygulanan çözüm adımları ve modelleme ile ilgili daha detaylı bilgilerin yer alacağı 3.Bölüm içerisinde, yapılan çalışmaların daha kavramsal ve kuramsal açıklamaları ve örneklerine yer verilecektir.

Bir bütün olarak SEM incelendiği zaman birçok bilim dalında başvurulan bir method olması, SEM birçok avantajının olmasından kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar birkaç madde içerisinde toparlanırsa;

- SEM, karmaşık sistemlerde bulunan, karmaşık şekillerin incelenmesine olanak tanır. Çözümü istenilen bölge daha alt bölgelere ayrılarak farklı sonlu elemanlar kullanılabilir,
- Geometrisi karmaşık olan sistemlerde kullanıldığı gibi, malzeme özellikleri bakımından da karmaşık sistemlerde kullanılabilir,
- Modellenmesi gerekli olan sistemin sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, basit satır sütun işlemleri ile genel denklem sistemine dahil edilebilir,
- Matematiksel modellemelerin genelleştirilmesi ile birlikte çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir,
- Günümüz mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek bir çok yazılım mevcuttur (Fortran kodları, ABAQUS, Patran, Marc vs.).

Her ne kadar çok avantajlı bir yöntem de olsa her mühendislik probleminde olduğu gibi uygulanan çözümlerin doğruluğu, farklı kaynaklardan teyit edilmeli ve çıkabilecek sorunlar önceden kestrilmeli ve sonuçlar ona göre yorumlanmalıdır [31].

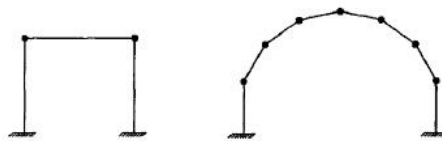
2.6.1 Sonlu eleman türleri

2.6.1.1 Düzlem eleman (Plane)

Kabuk eleman özelliklerini göstermektedir. Kabuk elemandan farkı ise etrafındaki dönme ihmal edilmiştir. Düzleme dik olan yükler için uygun değildir.

2.6.1.2 Çubuk eleman

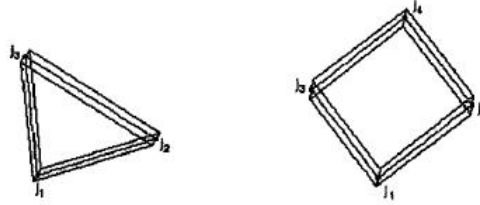
Kolon, kiriş, üç boyutlu çerçeveler, düzlem çerçeveler ile kabloların modellenmesinde kullanılırlar. Genellikle iki eksenli basınç, eğilme ve kesme deformasyonu etkisinde olurlar. Basit bir ifade ile Şekil 2.14' de çubuk eleman gösterilmiştir [16].



Şekil 2.14 : Çubuk eleman [16].

2.6.1.3 Kabuk eleman (Shell)

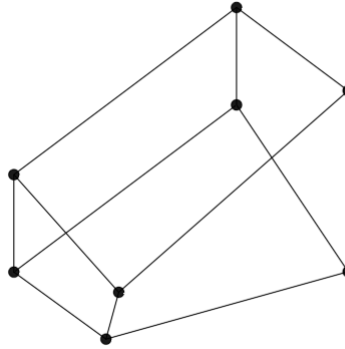
Bir boyutu diğer iki boyutunun yanında ihmal edilecek kadar küçük olan yapı elemanlarının modellenmesinde kullanılırlar. Kabuk elemanı basit bir ifade ile Şekil 2.15’ de göstermek mümkündür [16].



Şekil 2.15 : Kabuk eleman [16].

2.6.1.4 Katı eleman (Solid)

3 boyutlu eleman türüdür. Kenarları eşit veya en/boy oranının en uygun olduğu koşullarda en iyi hesap sonuçlarını vermektedir. Yine Solid elemanı en basit Şekil 2.16’ da ki gibi gösterebiliriz [16].



Şekil 2.16 : Katı eleman [16].

2.6.2 Sonlu eleman analizinde izlenen yol ve içeriği

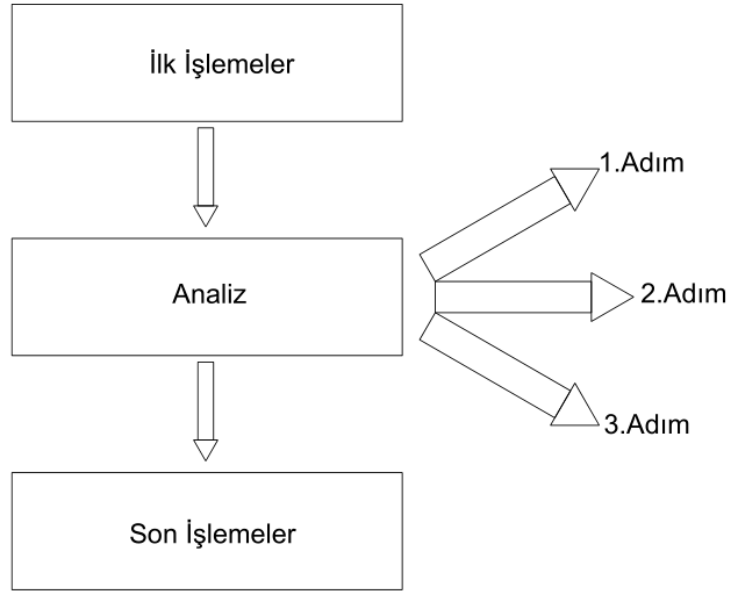
Sonlu Elemanlar Yönteminde (SEM), yükler sisteme giriş verisi olarak uygulanır, mesnetler ise sistemi sabitlemek için kullanılırlar. Bu tezinde kapsamında olan üç boyutlu bir sistemde ise her bir eleman 3’ü dönme ve 3’ü öteleme olmak üzere 6 adet serbestlik derecesine sahiptir. Sistemi sınırlayan mesnetler ise elemanlara ait olan bu serbestlikleri sınırlandırılırlar [32, 33]. Bu sınır şartlarına özellikle dikkat edilmelidir. Genel anlamda sonlu eleman analizinde izlenen yol altı adımda özetlenebilir;

- Çözüm aranan bölgenin ayrıklaştırılması,
- Şekil fonksiyonlarının seçimi (yapı problemlerinde yer değiştirme modeli),
- Eleman davranış (rijitlik) matrisinin varyasyon ilkesi veya ağırlıklı artıklar yöntemlerinden biri ile çıkarılması,
- Eleman denklemlerinin bir araya getirilmesi ve sınır koşullarının uygulanması,
- Tüm sistemin çözülerek bilinmeyenlerin (yapı problemlerinde genellikle yer değiştirmelerin) elde edilmesi,
- Tasarım veya kontrol amacına yönelik olarak diğer büyüklüklerin düğüm noktası bilinmeyenlerinden hareketle hesabı.

Sonlu elemanlar metodu (SEM) ile problemlerin tanımlama ve çözülmesi için bu izlenilen adımlardan sonra kullanılacak olan programa tanıtılması gereken hususlar ise;

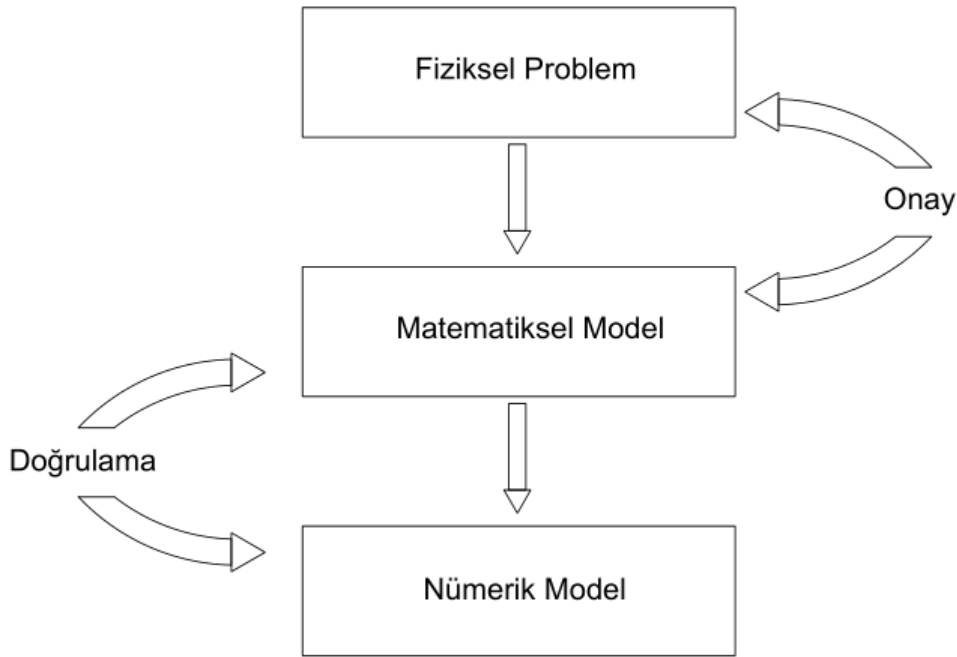
- Öncelikle yapılacak olan analizin şekline karar verilmelidir,
- Elemanların mekanik özellikleri tanıtılmalıdır,
- Başlangıç koşullarına ve sınır koşullarına ve en sonda yüklemelere karar verilmelidir,
- Cismin geometrik modeli yapılmalıdır [34].

Yapının türetilen olan teorik modeli ve fiziksel modelleri üzerinden SEM uygulanabilirliği için izlenen yolda ana tema olarak kabul edilebilecek olan adımlar Şekil 2.17’de, onay ve doğrulama adımları ise Şekil 2.18’ de verilmiştir [6].



Şekil 2.17 : Sonlu Eleman analiz adımları [6].

Bu anlamda üzerinde çalışılan model için uygulanan, çözüme götürmesi beklenen SEM için daha önceki bölümlerde verilen temel parametlerin doğruluğu teyite muhtaç olduğu gibi, izlenilen her adımda bir önceki adımın verilerinin doğruluğu teyit edilerek devam edilirse, ele alınan problemin sonucunda elde edilen model bir okadar gerçeğe ve mühendislik bilimine daha yakın olur [35, 36]. Diğer bir deyişle ele alınmış olan fiziksel problem üzerinden türetilecek olan matematiksel model ve bunun sonucunda çözüme gidecek olan numerik modelin, birbirlerini doğrulama ve onaylama süreçlerini takip etmesi gereklidir [37].



Şekil 2.18 : Onay ve doğrulama [6].

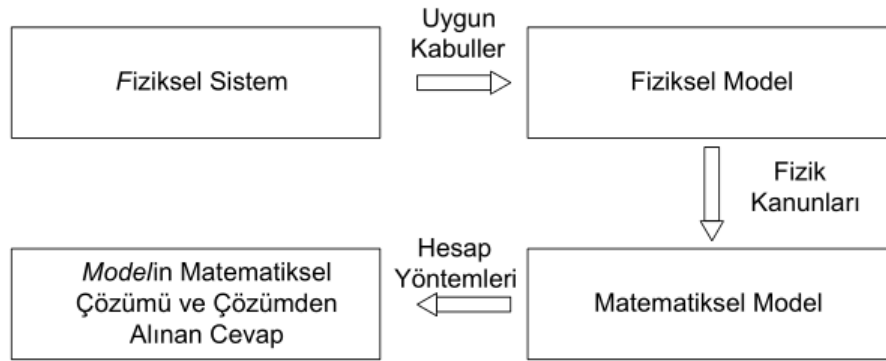
2.7 Fiziksel ve Matematiksel Modelleme Süreçleri Ve Temel Kavramlar

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi modeller aslında, gerçekliğin sadeleştirildiği biçimlerdir. Bu modellemeler yapılırken, bazı kabuller yapılarak sistemlerin matematiksel modeli, farklı yöntemler ve bilgisayarlar yardımıyla yapılır. Çok basit olarak düşünersek, belirli bir hızda giden trenin belirli bir süre sonunda nerede olacağını bilmek için o trene binip gidilmesi gerekmez. Newton'un hareket yasasına göre alınacak yolun matematiksel formülü;

$$x = v * t \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. Burada x, gidilecek mesafe, v, ortalama hız, t, geçen süre olarak isimlendirilir. Daha sonra bu trenin hızının değişmediği kabulü ile, bu matematiksel modeli çözerek trenin belirli bir süre sonunda nerede olacağı tahmininde bulunulabilir. Bu şekilde, dinamik karakteristikleri olan sistemlerin modellenmesi demek, o sistemlerin matematik modelinin oluşturulması anlamına gelmektedir. Burada önemli olan husus, sistemlerin tek bir matematiksel modelinin olmadığıdır, yani sistemler farklı yöntemler kullanılarak modellenebilirler (doğrusal modelleme, doğrusal olmayan modelleme v.b.). Yapılan bu çalışma kapsamında da takip edilen

süreç gibi, özetle; matematiksel model bir çözüm yöntemi olup, fiziksel model ise mevcut yapının şeklidir. Aslında hemen hemen bütün fiziksel sistemler doğrusal olmayan bir yapıya sahip olmasına rağmen, yapılan matematiksel modeller çoğu zaman doğrusal olduğu kabulü ile yapılmaktadır. En basit anlamda ise sistem modellemesinin şematik olarak gösterimi Şekil 2.19’ da verilmektedir [6].



Şekil 2.19 : Sistem modellemesi [6].

Sistemlerin modellenmesi yapılırken, bütün yapı elemanlarının ortak olarak yapabileceği hareketler öteleme, dönme veya bunların birleşimi şeklinde olacağı ve yapılacak modellemelerin bunlar öngörülerek olması gerekliliği bilinmelidir. Bu tarzdaki hareketleri ifade eden denklemlerinde temelini Newton’un ikinci yasası ifade eder [38].

2.7.1 Modellemede temel kavramlar

Uygulanacak olan matematiksel model ve çözüm yöntemlerinde bulunan denklemlerin temelini oluşturan öteleme hareketi, üç boyutlu uzayda x, y, z olarak adlandırılan eksenlerde yer değiştirme, hız ve ivme olarak öne çıkar.

$$\sum \mathbf{F} = m * \mathbf{a} \quad (2.13)$$

Denklem 2.13’de, $\mathbf{F}$, rijit cisme etki eden toplam kuvvet, m, rijit cismin kütlesi, $\mathbf{a}$, rijit cismin ivmesi anlamındadır. Öteleme hareketi ile beraber olarak dönme hareketi, yine üç boyutlu uzay sistemde, x, y, z olarak adlandırılan eksenlerde açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme olarak adlandırılan hareketlerdir. Yapılacak olan modelleme çalışmalarında oluşturulacak bütün denklemler, matrisler çözüm yöntemleri v.b.olarak

adlandırılan bütün adımlarda, bu iki hareket temel alınarak oluşturulacak bütün denklem takımları ile çözüme gidilir [38].

$$\sum \mathbf{T} = I * \alpha \quad (2.14)$$

Denklem 2.14’de, $\mathbf{T}$, rijit cisme etki eden toplam tork, I rijit cismin ataleti, α rijit cismin açısal ivmesi, anlamlarını ifade eder.



3. YAPI MODELLEMESİNE GİRİŞ, KULLANILAN YÖNTEMLER VE YAPILAN ANALİZLER

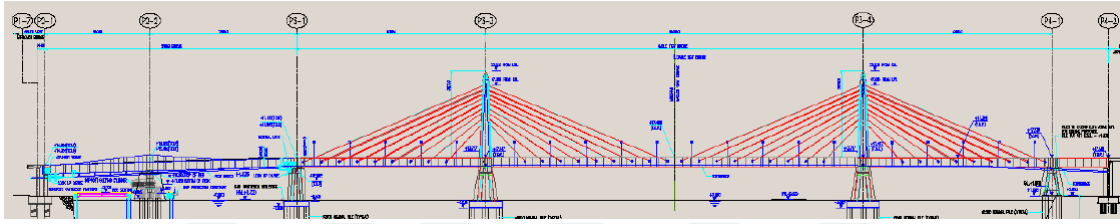
3.1 Giriş

Bu bölümün ilk aşamasında, yapılan çalışma kapsamında Haliç Metro Köprüsünün (HMK) modellemesine giriş bilgilerinden, modellemesi yapılan köprünün sebep sonuç ilişkileri ile beraber elemanlarının tanıtılmasından, modellemede hangi paket programların kullanıldığından ve bu paket programlarda nasıl bir yol izlendiği hakkında bilgiler verilecek, akabinde ise, çubuk ve yay elemanların genel modellerinden, sistem rijitlik, kütle, dönüşüm matrislerinin iki ve üç boyutlu olarak oluşturulmasının genel yöntemleri ve bu modeldeki uygulaması hakkında bilgiler verilecektir. Bu bölümün son safhasına geçildiğinde ise üç boyutlu analiz sonucunda ortaya çıkan modal analizlerin ve periyot, frekans verilerinin ne anlam ifade ettiği gibi tezin sonuç verileri ve yapıma amaçlarının neler olduğu hakkında başlıklar halinde bilgiler verilerek, çalışmanın son kısmı olan sonuç ve öneriler bölümüne geçilecektir.

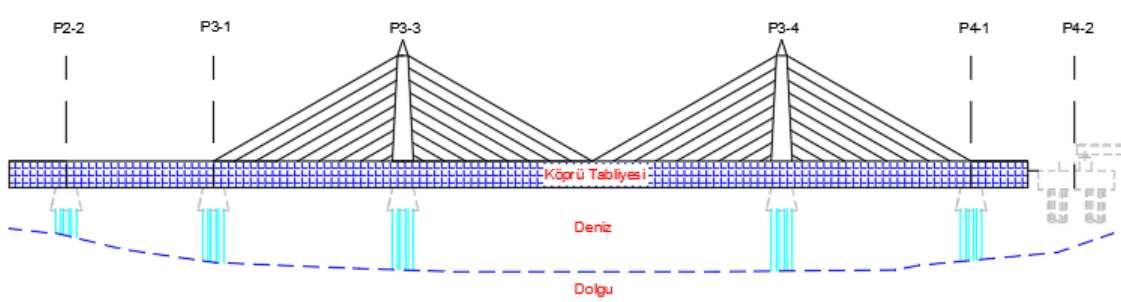
3.2 Haliç Metro Köprüsü (HMK) Modellemesine Giriş ve Köprü Elemanlarının Tanıtılması

Haliç Metro Köprüsü (HMK), 2014 yılında hizmete açıldıktan sonra günün her saatinde işleyen ve gün geçtikçe daha fazla hizmet veren bir yapı hüviyetine bürünmüştür. Bu çalışma kapsamında da köprü üzerinde bulunan ve ilk sistem tanı çalışmalarında yapı ve kablo salınım periyotları, mod şekilleri, içsel sönümleme gibi temel mekanik özellikler elde edildikten sonra, bu özelliklerin köprü tasarımında kullanılan değerlere yakın olduğu saptanmıştır. Bu yapılan çalışmanın akabinde, kalıcı yapı sağlığı izleme sistemi ile toplanan verilerin incelenmesi ile de farklı bir irdeleme yapılabilir hale getirilmiştir. Yapılan çalışmanın ilk aşaması olarak, yapısal model elde edilmek istenilmiş ve bu kapsamda çalışmalar yapılmıştır. Modelleme çalışmalarının tanıtılmasına başlanırken, öncelikle kullanılan elemanlar çubuk eleman

olarak ele alındığı bir model geliştirilmiştir. Wiecon ve VCE firmalarının ilgili tasarım raporlarından ve çizimlerinden elde edilen modeller AUTOCAD yardımıyla detaylı olarak irdelenmiş ve söz konusu elemanlar tek tek daha küçük parçalara ayrılarak, SEM düşüncesi ile parçasal olarak incelenmiştir. Şekil 3.1’de tasarım raporlarından elde edilen, bu çalışma kapsamında da ayrıca modellenen açılır kapanır köprü ve eğik askılı köprü gözükmektedir [3]. Bu anlamda modelleme çalışmasının en başında Şekil 3.2’de de köprü’nün özellikle bu teze konu olan bölgesinin çok basite indirgenmiş bir halde şematik olarak gösterimi gözükmektedir.



Şekil 3.1 : Açılır kapanır köprü ve eğik askılı köprü-Tasarım raporu [3].



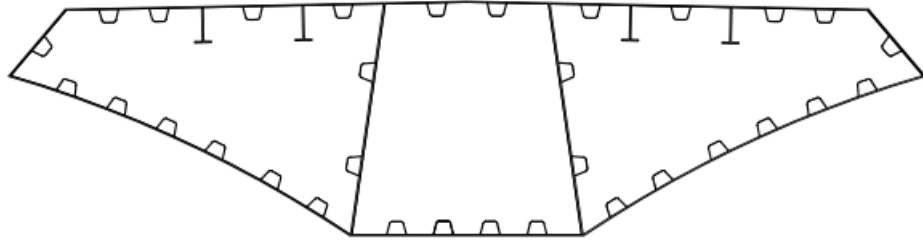
Şekil 3.2 : Köprü’nün basit olarak şematik görünümü.

Köprü’nün modellemeye kullanılan elemanlarının malzeme özellikleri ve mekanik özellikleri tasarım raporlarından elde edilmiştir. Köprü’nün modelde kullanılan yapısal elemanlarının yoğunluklarının yer aldığı Çizelge 3.1’de ise güçlendirilmiş beton, basit beton ve yapısal çelik malzemelerinin özgül ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan malzemelerin yoğunlukları [1].

Kullanılan malzeme	Özgül ağırlık
Güçlendirilmiş beton	25.0 kN/m^3
Basit beton	24.0 kN/m^3
Yapısal çelik	78.5 kN/m^3

Bu anlamda bir diğer taraftanda köprünün fiziksel modeli incelendiği zaman, tabliye kesitinden başlanıldığında, köprünün tabliye kesiti genel olarak 32 adet U profil, 4 adet I profil ve 5 adet plaka elemandan imal edildiği gözlemlenmiştir. Bu elemanların beraber oluşturdıkları eşdeğer çubuk elaman özellikleri, Şekil 3.3’de gösterilen çubuk modelde kullanılmıştır. Söz konusu model, tasarım raporlarından elde edilen çizimlerin irdelenmesi sonucu, harici olarakda yine AUTOCAD ortamında yapılan bu çalışma kapsamında çıkarılmıştır. Bu modelde kullanılan elemana ait eşdeğer atalet moment değerleride Çizelge 3.2’de gösterilen kutu profil ve I profil şeklinde modelde tanımlanan malzeme için hesaplanmıştır. Söz konusu çizelgede değerleri verilen ifadeler yapılan modelleme çalışması kapsamında mesnetlerin modellenmesi aşamasında kullanılmıştır [8].



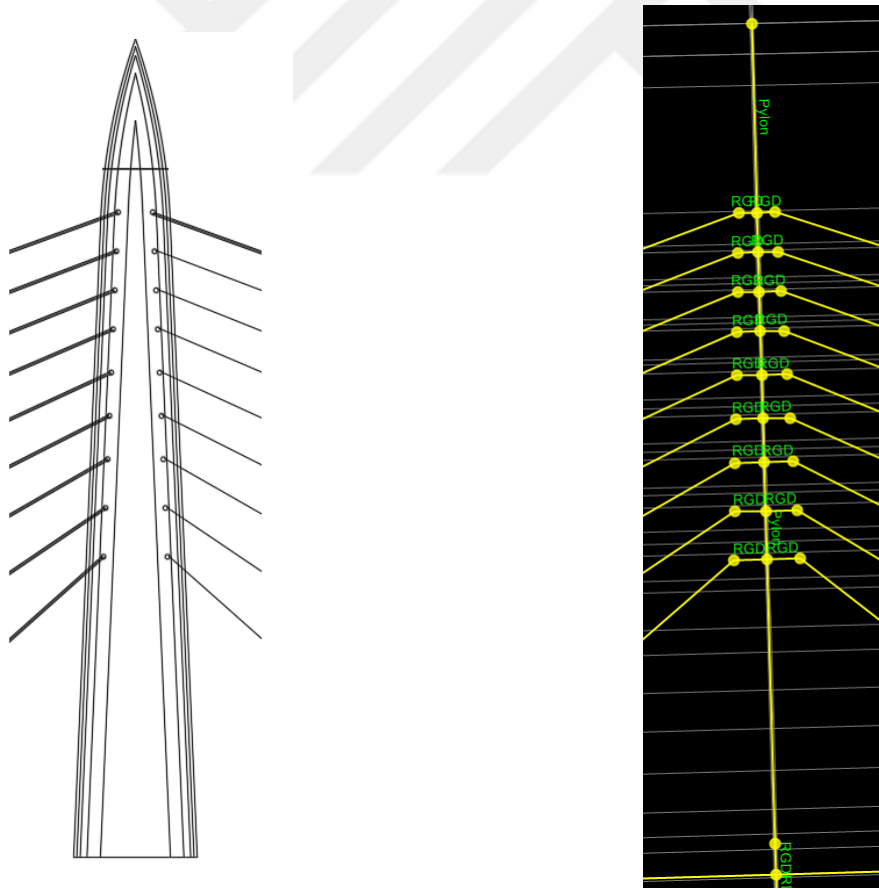
Şekil 3.3 : Tabliye kesiti [8].

Çizelge 3.2 : Tabliye atalet momentleri [1].

Tabliye		
Alan (m^2)		0.889
Atalet Momenti (m^2)	X	1.27
Atalet Momenti (m^2)	Y	11.84
Atalet Yarıçapı (m)	X	1.198
Atalet Yarıçapı (m)	Y	3.648

Köprüde kablolardan gelen yükü taşıyan ve tabliyeye rijit bağlı olan iki adet pilon vardır. Bu pilonların kesit alanları aşağıdan yukarıya doğru gidildikçe azalmaktadır. Şekil 3.4’de bu pilonların tasarım raporlarından elde edilen görselleri ve yine aynı görsel içerisinde sağ tarafta ise bu çalışma kapsamında SAP2000’de yapılan modeldeki pylon görüntüsü paylaşılmıştır. Köprünün fiziksel modelinde pilonların dizaynı yapılırken Load and Resistance Factor Design (LFRD) yöntemi kullanılmıştır [26].

Bu tez kapsamında uygulanmaya çalışılan model de ise, kesiti değişken kesitli eleman olarak modellenmiş, prizmatik olmayan 11 farklı kesitin birleştirilmesi ile ve bu kesitlerin parabolik değişken olarak ayarlanması ile modele eklenmiştir. Bu yapılan işlem için yine tasarım raporlarından ve izimlerinden AUTOCAD ortamında daha küçük elemanlara indirgenen tasarımların malzeme ve kesit özellikleri belirlenerek, bahsi geçtiği şekilde parabolik olarak girdileri yapılmış ve SAP2000’de yapılan bu belirli adımlar şekil 3.5’de gösterilmiştir. Filhakika ortaya çıkan modelde kabloların pylonlar ile keşiştiği noktalar arasında kalan kısımlar rijitliği çok yüksek olan eleman olarak tanımlanmış olup, en st kısımda kablonun pylon ile keşiştiği noktadan sonra yine rijitliği yüksek bir eleman tanıtılarak ortalama bir kesit değeri kabul edilmiştir. Pylonların en st kısımlarında minare şeklinde görülen kısımlar ise modele etkitilmemiş, onun yerine yaklaşık değeri verecek şekilde pylon eleman olarak tanıtılan kısmın ağırlılığı ve rijitliği artırılmıştır [2].



şekil 3.4 : Modellenmiş pylonlar.Sol-Tasarım raporları,Sağ-SAP2000 modeli [1].

Nonprismatic Section Definition

Nonprismatic Section Name: Display Color: ■

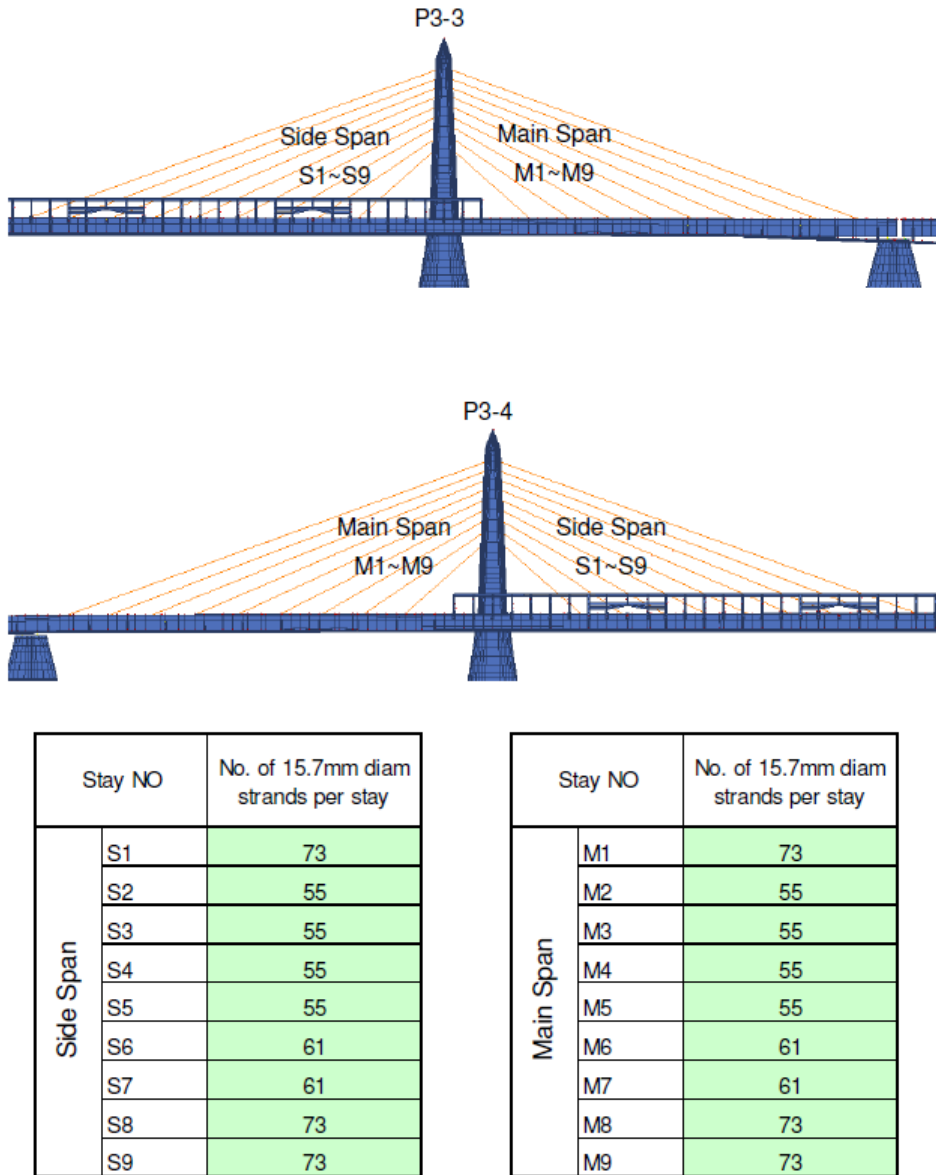
Section Notes:

Start Section	End Section	Length	Length Type	EI33 Variation	EI22 Variation
Py1	Py1	3,05	Absolute	Parabolic	Linear
Py1	Py1	3,05	Absolute	Parabolic	Linear
Py1	Py2	5,6	Absolute	Parabolic	Linear
Py2	Py3	4,653	Absolute	Parabolic	Linear
Py3	Py4	2,25	Absolute	Parabolic	Linear
Py4	Py5	2,25	Absolute	Parabolic	Linear
Py5	Py6	2,	Absolute	Parabolic	Linear
Py6	Py7	2,	Absolute	Parabolic	Linear
Py7	Py8	2,	Absolute	Parabolic	Linear

Şekil 3.5 : SAP2000 parabolik girdi değerleri.

Köprüde bulunan iki adet piona her biri farklı adetlerden oluşan ve kalınlıkları birbirlerinden farklı olan daha ince iplik tarzı çelik halatlardan oluşan toplamda 36 adet kablo-halat sistemi mevcuttur. Şekil 3.6'de gözüken durum da tasarım raporlarında bu kabloların nasıl bağlandığı gösterilmektedir. Yine aynı şekil içerisinde direkt olarak tasarım raporlarından alınmış olan söz konusu kabloların kaç adet iplikden oluştuğu verilmektedir [2]. Uygulanan model çalışmasında ise, her bir piona gelen kablo, bulunduğu bölümde bağlantı elemanı olarak rijitliği yüksek bir çubuk eleman ile bağlanmıştır. Kurgulanan modelde kablolar aynı tasarım raporlarında yer alan dizilim şekline göre, kendi içlerinde farklı türlerdedir. Bu isimlendirmeler aynı tasarım raporlarında yer alan malzeme özellikleri ve mekanik özellikleri ile paralel olarak sadece isimlendirmeleri değiştirilmiş şekilde Çizelge 3.3'de gösterilmektedir. Bu tabloda yer alan adetler birebir olarak tasarım raporlarındaki model ile bu çalışma kapsamında yapılan modelde aynı şekilde girdi olarak verilmiştir. Her bir kablo elemanın malzeme ve kesit özellikleri yine ayrı ayrı tanıtılmış olup, SAP2000 ve MATLAB programlarında yapılan modellerde aynı değerler olacak şekilde modellenmiştir. Yine bu modellerde anılan değerler ise tasarım raporlarından ve çizimlerinden elde edilen dökümanlar vasıtası ile eleman eleman tetkik edilip malzeme özellikleri, çalışması yapılan modellere tanıtılmıştır. Hangi kablo türünden

ne kadar olarak modele etkitildiği Çizelge 3.3’de verilmiş olup bu tez çalışmasında da SAP2000 modelinde malzeme özellikleri olarak hangi değerlerin ekletildiği Şekil 3.7’de ayrıca gösterilmiştir. Söz konusu kabloların tabliyeye bağlandığı noktalarda ise modelde ayrı birer eleman türettiği için yine bütün elemanların özellikleri bu sisteme ve sıraya göre tanıtılmıştır. Burada özellikle dikkat edilen husus bütünlüğü oluşturması açısından, hem tasarım raporları hemde türetilen modelin elemanlarının belli bir sıraya göre devam ettirilmesidir.



Şekil 3.6 : Kablo yerleşimleri ve oluştukları iplik adetleri [3].

Çizelge 3.3 : Model-kablo adet ve isimlendirmeleri [2].

Kablo ismi	Adet
C1 (S1,S8,S9,M1,M8,M9)	12
C2 (S2,S3,S4,S5,M2,M3,M4,M5)	16
C3 (S6,S7,M6,M7)	8

Çizelge 3.3’de gösterilen veriler ışığında yer alan kabloların modelde yer alması ile beraber bu kabloların üzerlerinde bulunan ölçüm enstrümanlarından elde edilen verilerde yine bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır. Bu ölçüm verileri ise yine tasarım raporlarından görüldüğü kadarıyla, özel bir yazılım sistemi (BRIMOS®) geliştirilerek yorumlanmıştır [1]. Bu ölçümlerden elde edilen söz konusu sonuçlar ise ;

- Kabloların frekans ve periyotları,
- Kablo kuvvetleri,

şeklinde olmuştur. Söz konusu olan değerler yine tasarım raporlarından elde edilen verilere göre irdelenmiş ve bu tez çalışması kapsamında yapılan işlemlerin sonucunda da yüksek bir yakınsama yüzdesi ile beraber örtüşmüştür. İki adet pılona ana açıklık ve yan açıklıklarda bağlı olan bu kabloların oluştukları tellerin tasarım raporlarından elde edilen ve yapılan modelleme çalışmasında da kullanılan, bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kabloların oluştugu tellerin mekanik özellikleri [3].

Mekanik özellik/Kuvvet	Büyüklik
Tellerin nominal alanı	$As = 150 mm^2$
Çekme gerilmesi sınırı	$fu = 1770 MPa$
İzin verilebilir gerilme	$0.4 * fu = 708 Mpa$
Ölü yük altında izin verilebilir gerilme	$0.25 * fu = 442.5 Mpa$
Elastisite modülü	$Es = 1.95e5 MPa$
Termal genleşme katsayısı	$\alpha = 1.1 e - 5 I^0 C$

Property Data

Section Name: C1

Properties

Cross-section (axial) area	0,0283	Section modulus about 3 axis	6,702E-04
Moment of Inertia about 3 axis	6,357E-05	Section modulus about 2 axis	6,702E-04
Moment of Inertia about 2 axis	6,357E-05	Plastic modulus about 3 axis	1,138E-03
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	1,138E-03
Shear area in 2 direction	0,0254	Radius of Gyration about 3 axis	0,0474
Shear area in 3 direction	0,0254	Radius of Gyration about 2 axis	0,0474
Torsional constant	1,271E-04	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

OK

Property Data

Section Name: C2

Properties

Cross-section (axial) area	0,0213	Section modulus about 3 axis	4,383E-04
Moment of Inertia about 3 axis	3,609E-05	Section modulus about 2 axis	4,383E-04
Moment of Inertia about 2 axis	3,609E-05	Plastic modulus about 3 axis	7,441E-04
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	7,441E-04
Shear area in 2 direction	0,0192	Radius of Gyration about 3 axis	0,0412
Shear area in 3 direction	0,0192	Radius of Gyration about 2 axis	0,0412
Torsional constant	7,217E-05	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

OK

Property Data

Section Name: C3

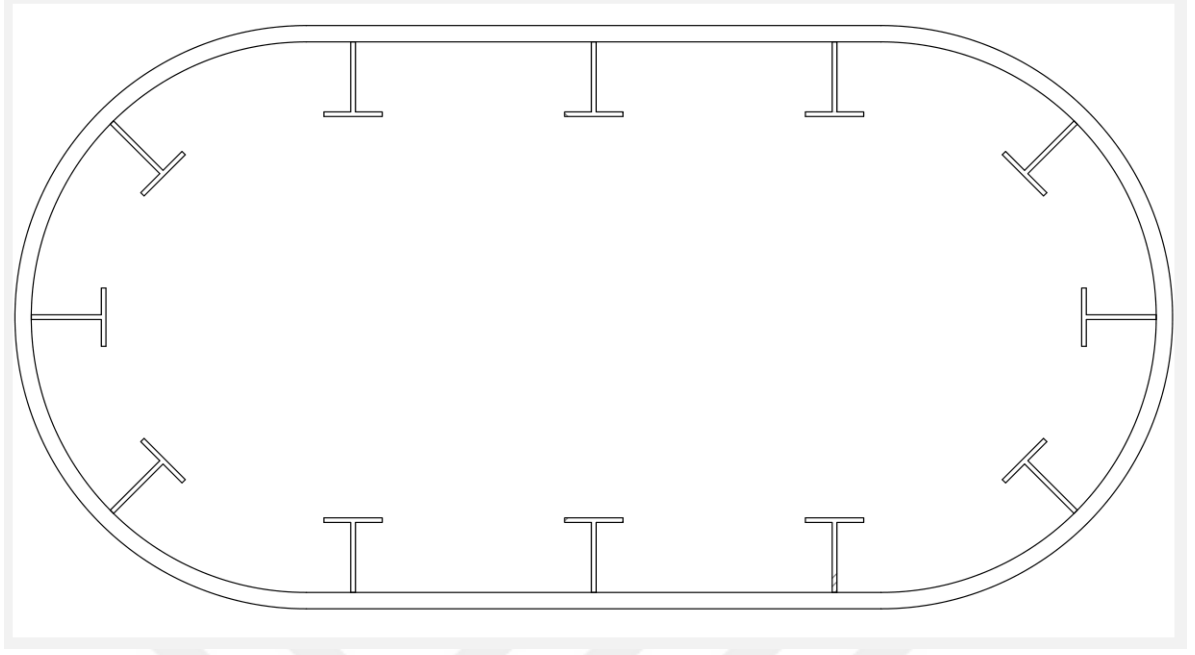
Properties

Cross-section (axial) area	0,0236	Section modulus about 3 axis	5,120E-04
Moment of Inertia about 3 axis	4,439E-05	Section modulus about 2 axis	5,120E-04
Moment of Inertia about 2 axis	4,439E-05	Plastic modulus about 3 axis	8,691E-04
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	8,691E-04
Shear area in 2 direction	0,0213	Radius of Gyration about 3 axis	0,0434
Shear area in 3 direction	0,0213	Radius of Gyration about 2 axis	0,0434
Torsional constant	8,878E-05	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

OK

Şekil 3.7 : C1,C2 ve C3 kablo malzeme ve kesit özellikleri-SAP2000.

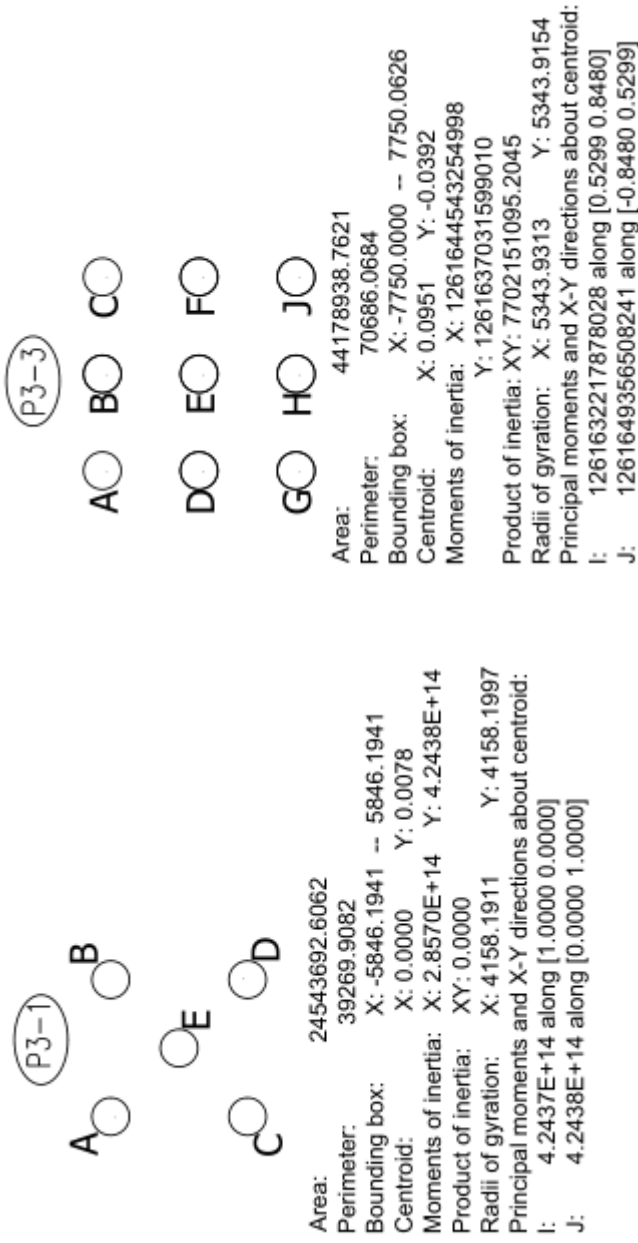
Köprünün ayakları ise içi boş dairesel kesitlerden imal edilmiştir ve tasarım dökümanlarından elde edilen bilgiler ışığında kesit özellikleri, yapılan model çalışmasında ona göre eklenmiştir. Çubuk elemanlardan oluşan, üstten ve alttan rijit bağlantılarla birbirlerine göre hareketleri kısıtlanmış elemanlar olarak hesaba katılmış olup, bu bağlantı elemanları ise yine rijitliği çok yüksek olan malzemeler tanımlanarak yapılan modele entegre edilmiştir. Uygulanan bu çalışmada yine tek tip olarak, çubuk eleman olarak modellenen ayakların farklılık gösteren tarafı boyları ve adetleri olmuştur. Tek bir kesit özelliğine sahip olan elemanın, her ayakta farklı sayıda kullanılması ile oluşturulan modelde, bu kullanılan eleman 40 mm et kalınlığına sahip ve dairesel kesitlerden modellenmiştir. Yapısal modelde kullanılan ayakalar ise daha farklı şekillerde modellenmiş olup, söz konusu kesit Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Temel kazıkları, her bir aksda farklılık gösterecek şekilde tasarım raporlarında dizayn edildiği için, bu tez kapsamında tasarlanan modellerde yine aynı şekilde bulunan akslarda ki adetlerine sadık kalarak modellenmiştir. Bu anlamda tasarımsal çizimlerden elde edilen veriler AUTOCAD ortamında yine tek tek ayrılmış ve modele entegre edilen çubuk elemanların özellikleri belirlenerek yerleştirilmiştir. Tasarım raporlarından elde edilen kazıkların içi dolu ve boş oluşları, uzunlukları, yarıçapları ve ilgili aks numaralarını gösterir bilgiler Çizelge 3.5’de verilmiştir. Bu işlemler sırasında kazıkların boyları ve malzeme mekanik özellikleri aynı şekilde modele entegre edilmiştir. İlgili aks numarasına göre yapısal modelin çizimlerinden yararlanılarak bir ayakta 4, iki ayakta 9 ve bir ayakta 5 adet olacak şekilde modellemesi yapılmış olup, yapılan bu çalışmaya örnek olarak P3-1 ve P3-3 aks numaralı kazıkların Şekil 3.9’da AUTOCAD ortamındaki çalışmalardan bir kesit görülmektedir. Söz konusu görseldeki bütün ifadeler SAP2000 ve MATLAB modellerinde tanımlanan bütün elemanların, yapısal ve mekanik özellikleri olarak tek tek girilmiştir. Bu sayede üst seviyede, yapısal model ve matematiksel modeller arasında örtüşmelerin sağlanmasına katkı sağlanılmıştır.



Şekil 3.8 : Tasarım dökümanı - kullanılan ayakların kesiti [3].

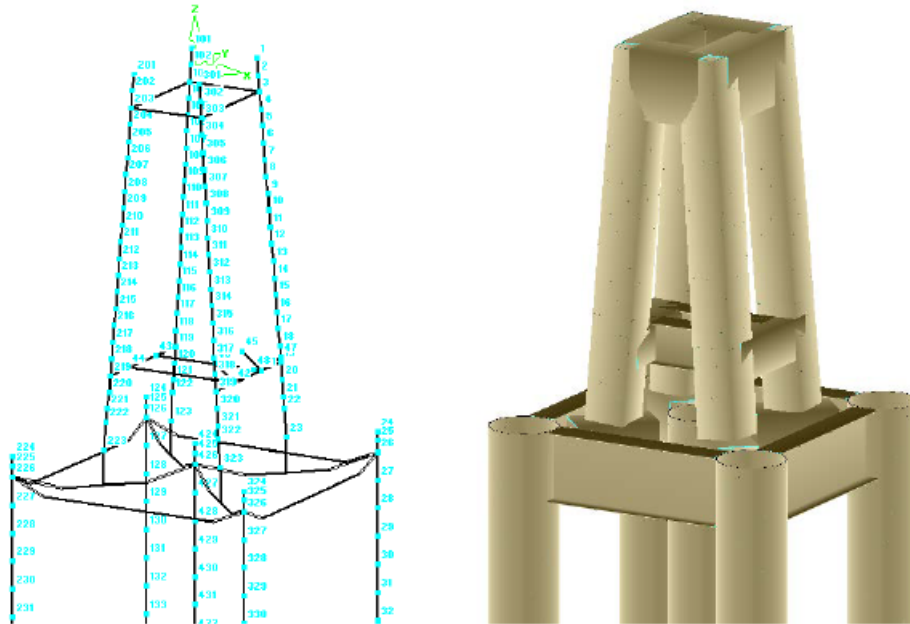
Çizelge 3.5 : Kazık yerleri,cinsleri ve uzunlukları [3].

	Kazık sayısı	Çelik kazığın yarıçapı (m)	Beton kazığın yarıçapı (m)	Çelik kazığın toplam uzunluğu (m)	Çelik soket uzunluğu (m)	Beton soket uzunluğu (m)	Toplam soket uzunluğu (m)
P2-2	5	2.50	2.20	80.48	1	30	31
P3-1	5	2.50	2.20	85.35	1	17	18
P3-3	9	2.50	2.20	69.80	5	25	30
P3-4	9	2.50	2.20	55.50	8	22	30
P4-1	4	2.50	2.20	30.39	1	10	11

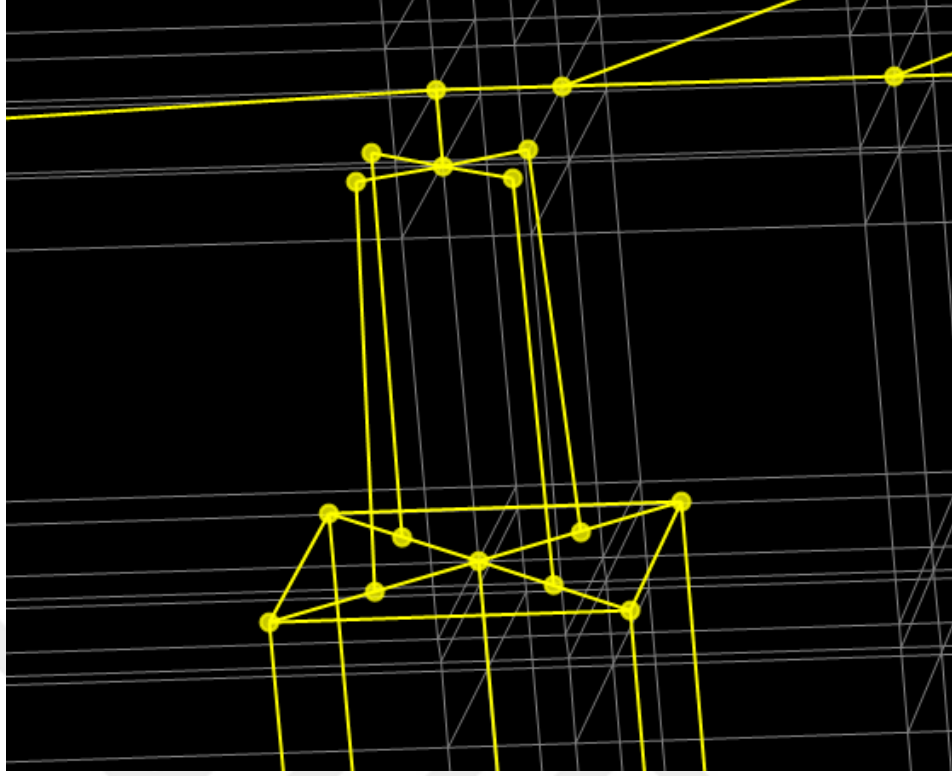


Şekil 3.9 : P3-1 ve P3-3 kazığının malzeme ve mekanik özellikleri - AUTOCAD [2].

Yapısal tasarımda kullanılan model düzeninde, kazık başlıkları ve mesnetlerde yine çubuk elemanlar kullanılmıştır. Mesnetlerin tabliyeye birleştiği bölgeler ise rijitliği çok yüksek olan elemanlar olarak tanımlanmış olup, bütün mesnetlerin birleşim yerlerinde aynı tip malzeme ile modellenmiştir. Akabinde birleşim noktalarının alt kısımlarında yer alan bölgeler ilgili aks bölgesine göre isimlendirilerek, yine tasarım raporlarından elde edilen değerler ışığında malzeme ve mekanik özellikleri baz alınarak modellenmiştir [4, 8]. Şekil 3.10'da tasarım raporlarından elde edilen, mesnetlerin tabliye bağlantı elemanları olarak yapısal tasarım raporlarında yer alan görseli paylaşılmakta olup, Şekil 3.11'de ise SAP2000 modelinden alınan bir görsel paylaşılmaktadır. İlerleyen bölümlerde SAP2000 modelinin genel görünümü verilirken genel hatları ile ilgili bilgiler paylaşılacaktır. Ayrıca, söz konusu bağlantı elemanları yine MATLAB programı vasıtası ile de bütün değerleri programa tanıtılmış şekilde modellemesi yapılmış, yine SAP2000 programı vasıtası ile yapılan modelleme ile paralellik göstermesi açısından değerler aynı alınmıştır. Bu şekilde iki farklı paket programda modellenen bu yapının izlenilen değerlerinin (Mod analizi,frekansı vb.) yüksek oranda benzerlik göstermesi amaçlanmıştır.



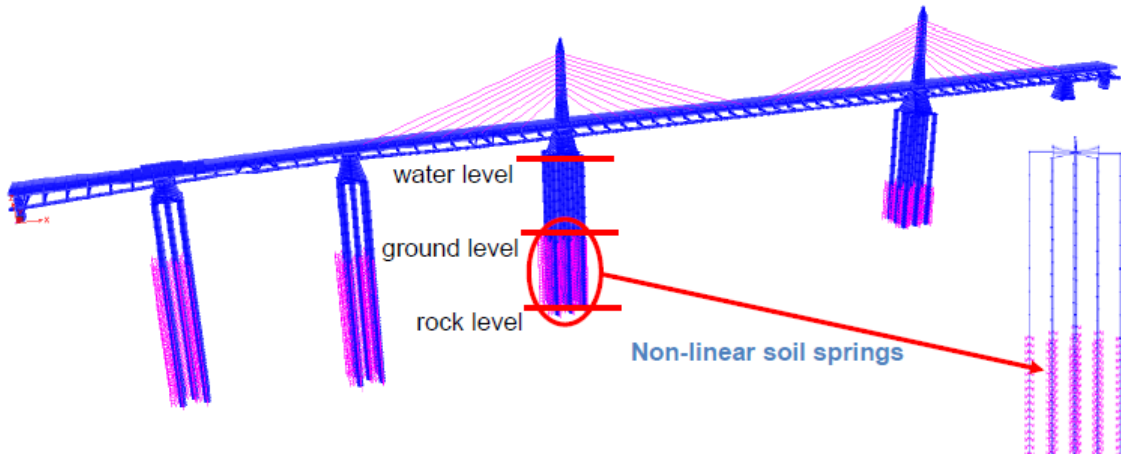
Şekil 3.10 : Tasarım raporu - P3-1 mesnet ve ayak birleşim modeli [8].



Şekil 3.11 : SAP2000 modeli-P3-1 mesnet ve ayak modeli.

İlgili idareden temin edilmiş olan tasarım raporlarından görüldüğü kadarıyla, zemindeki toprak etkilerinin modele uygulanması doğrusal olmayan yaylar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu doğrusal olmayan yayların yerleşimi belli bir koordinatta tasarımcı firma tarafından özel bir program kullanılarak yerleştirildiği ve modellendiği belirlenmiştir. Bahsi geçen program ALLPILE ile yayların belirli koordinatlara yerleştirildiği görülmüştür. Tasarım raporlarından elde edilen Şekil 3.12’de görüleceği üzere lineer olmayan yayların model üzerindeki yerleşimi verilmiş ve bu yayların yine zeminde konumlandıkları lokasyonlara ait bilgiler (kuvvet, yer değiştirme ve rijitlikler) Çizelge 3.6, Çizelge 3.7, Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir. Bu yay yerleşimleri yapılırken toprağın doğrusal olmayan davranışının, üç adet doğrusal modele göre modellenmiş olduğu, her mevsim için maksimum üç adet farklı rijitlik düşünüldüğünü göstermektedir. Söz konusu rijitlikler üç parçaya ayrılmış şekilde grafiksel olarak Şekil 3.13’de gösterilmektedir. Zemin seviyesinin altındaki etkiyi simüle edebilmek için efektif yay elemanları her bir kazık elemanın altında sağlanmıştır. Bu bağlantıların üst kısmı ekzantrik yay bağlantı elemanları ile ayaklara bağlanmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise, modal analiz yapıldığı için doğrusal yay elemanları kullanılmıştır. Söz konusu değerler tek bir kazık elemana

yerleştirilen yay özelliği olup, ilgili aksda bulunan kazık sayısı kadar elemanların herbirine etkitilmiştir. Bu yayların lokasyonu olaraksa tasarım dökümanlarının tetkik edilmesi sonucunda Şekil 3.14’de verilen bir görsel ve ilgili açıklamalar taranılarak deniz tabanı olarak seçildiği görülmüş ve bu yapılan çalışmada, tasarlanan modelde de aynı lokasyonda kullanılan bu doğrusal yayların özellikleri yine ilgili tasarımcı firmanın dökümanlarından faydalanılarak Çizelge 3.10’da verilmiştir [8]. Aynı şekilde SAP2000 modelinde uygulanan yay yerleşimi ise Şekil 3.14’de sırasıyla P2-2, P3-1, P3-3, P3-4 ve P4-1 ayaklarında konumlanmış olarak verilmiştir. SAP2000 modelinde uygulanan yayların özellikleri Çizelge 3.10’da verilen değerler olarak alınmıştır.



Şekil 3.12 : Zemin etkisi için kullanılan nonlinear yay yerleşimi [8].

Tasarım raporlarından elde edilen Şekil 3.12’, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’ de görüldüğü üzere nonlinear yaylar aslında toprak itkisini tasarlanan modele uygulamak amacı ile yapılmıştır. Özellikle deniz tabanından itibaren 50 mt derinlikten sonra ana kaya tabanına ulaşıldığı zemin raporlarından görüldükten sonra sert zemine ulaşılabilecek derinliğe kadar her bir aksda farklı uzunluklar boyunca bu yay modelleri uygulanmış olup, ilgili yay değerleri yine zemin raporlarından elde edilen değerlere istinaden seçilmiştir. Bu anlamdaki zemin inceleme raporları ise yine köprü tasarım aşamasında iken İTÜ laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir [4].

Çizelge 3.6 : P2-2 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].

Yay no	Derinlik (m)	$F_1(kN)$	$F_2(kN)$	$F_3(kN)$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
1	1.50	30	97	0	0.03	1.00	0.00
2	3.00	70	223	0	0.03	1.00	0.00
3	4.50	89	281	0	0.03	1.00	0.00
4	6.00	107	340	0	0.03	1.00	0.00
5	7.50	122	387	0	0.03	1.00	0.00
6	9.00	172	545	0	0.02	0.50	0.00
7	10.50	227	719	0	0.02	0.50	0.00
8	12.00	241	766	0	0.02	0.50	0.00
9	13.50	245	776	0	0.02	0.50	0.00
10	15.00	245	776	0	0.02	0.50	0.00
11	16.50	245	776	0	0.02	0.50	0.00
12	18.00	245	776	0	0.02	0.50	0.00
13	19.50	245	776	0	0.02	0.50	0.00
14	21.00	669	474	0	0.05	0.19	0.00
15	22.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
16	24.00	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
17	25.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
18	27.00	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
19	28.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
20	30.00	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
21	31.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
22	33.00	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
23	34.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
24	36.00	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
25	37.50	1094	172	0	0.05	0.19	0.00
26	39.00	1497	235	0	0.03	0.14	0.00
27	40.50	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
28	42.00	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
29	43.50	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
30	45.00	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
31	46.50	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
32	48.00	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
33	49.50	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
34	51.00	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
35	52.50	1900	298	0	0.03	0.14	0.00
36	54.00	8544	57534	0	0.01	0.09	0.00
37	55.50	15398	116613	0	0.01	0.09	0.00
38	57.00	15820	120300	0	0.01	0.09	0.00
39	58.50	1242	123986	0	0.01	0.09	0.00
40	60.00	9233	64896	0	0.01	0.09	0.00

Çizelge 3.7 : P3-1 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].

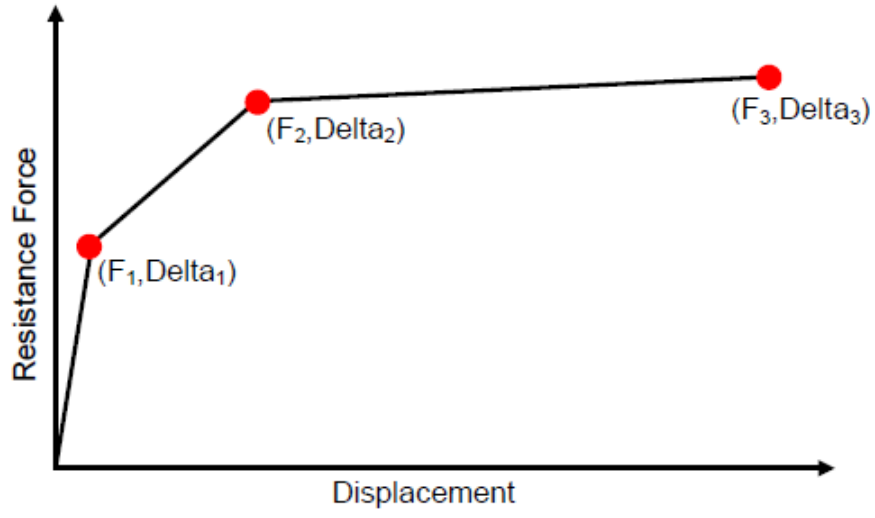
Yay no	Derinlik (m)	$F_1(kN)$	$F_2(kN)$	$F_3(kN)$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
1	1.50	30	97	0	0.03	1.00	0.00
2	3.00	70	223	0	0.03	1.00	0.00
3	4.50	89	281	0	0.03	1.00	0.00
4	6.00	107	340	0	0.03	1.00	0.00
5	7.50	122	387	0	0.03	1.00	0.00
6	9.00	186	590	0	0.02	0.50	0.00
7	10.50	256	812	0	0.02	0.50	0.00
8	12.00	280	889	0	0.02	0.50	0.00
9	13.50	295	936	0	0.02	0.50	0.00
10	15.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
11	16.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
12	18.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
13	19.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
14	21.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
15	22.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
16	24.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
17	25.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
18	27.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
19	28.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
20	30.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
21	31.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
22	33.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
23	34.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
24	36.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
25	37.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
26	39.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
27	40.50	298	945	0	0.02	0.50	0.00
28	42.00	298	945	0	0.02	0.50	0.00
29	43.50	6266	39937	0	0.01	0.90	0.00
30	45.00	12445	81958	0	0.01	0.90	0.00
31	46.50	12867	88126	0	0.01	0.90	0.00
32	48.00	13289	94195	0	0.01	0.90	0.00
33	49.50	13711	98968	0	0.01	0.90	0.00
34	51.00	14133	102654	0	0.01	0.90	0.00
35	52.50	14555	106341	0	0.01	0.90	0.00
36	54.00	14977	110027	0	0.01	0.90	0.00
37	55.50	8769	58249	0	0.01	0.90	0.00
38	57.00	3416	6723	0	0.01	0.90	0.00

Çizelge 3.8 : P3-3 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].

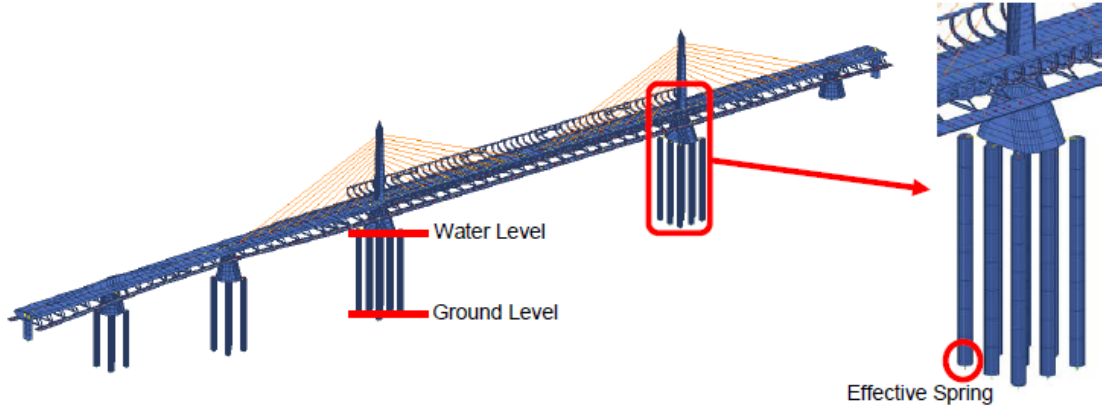
<i>Yay no</i>	<i>Derinlik (m)</i>	$F_1(kN)$	$F_2(kN)$	$F_3(kN)$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
1	1.50	44	140	0	0.03	1.00	0.00
2	3.00	99	313	0	0.03	1.00	0.00
3	4.50	120	380	0	0.03	1.00	0.00
4	6.00	141	446	0	0.03	1.00	0.00
5	7.50	161	512	0	0.03	1.00	0.00
6	9.00	182	579	0	0.03	1.00	0.00
7	10.50	197	627	0	0.03	1.00	0.00
8	12.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
9	13.50	202	641	0	0.03	1.00	0.00
10	15.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
11	16.50	202	641	0	0.03	1.00	0.00
12	18.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
13	19.50	202	641	0	0.03	1.00	0.00
14	21.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
15	22.50	202	641	0	0.03	1.00	0.00
16	24.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
17	25.50	202	641	0	0.03	1.00	0.00
18	27.00	202	641	0	0.03	1.00	0.00
19	28.50	271	861	0	0.02	0.50	0.00
20	30.00	340	1080	0	0.02	0.50	0.00
21	31.50	340	1080	0	0.02	0.50	0.00
22	33.00	1528	3213	0	0.01	0.09	0.00
23	34.50	3900	7676	0	0.01	0.09	0.00

Çizelge 3.9 : P3-4 Aksı-nonlinear yay konum ve rijitlikleri [4].

<i>Yay no</i>	<i>Derinlik (m)</i>	$F_1(kN)$	$F_2(kN)$	$F_3(kN)$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
1	1.50	27	84	0	0.03	1.00	0.00
2	3.00	62	197	0	0.03	1.00	0.00
3	4.50	80	253	0	0.03	1.00	0.00
4	6.00	97	309	0	0.03	1.00	0.00
5	7.50	106	338	0	0.03	1.00	0.00
6	9.00	138	439	0	0.03	1.00	0.00
7	10.50	170	540	0	0.03	1.00	0.00
8	12.00	170	540	0	0.03	1.00	0.00
9	13.50	170	540	0	0.03	1.00	0.00
10	15.00	170	540	0	0.03	1.00	0.00
11	16.50	170	540	0	0.03	1.00	0.00
12	18.00	1222	2507	0	0.01	0.09	0.00
13	19.50	3691	7264	0	0.01	0.09	0.00



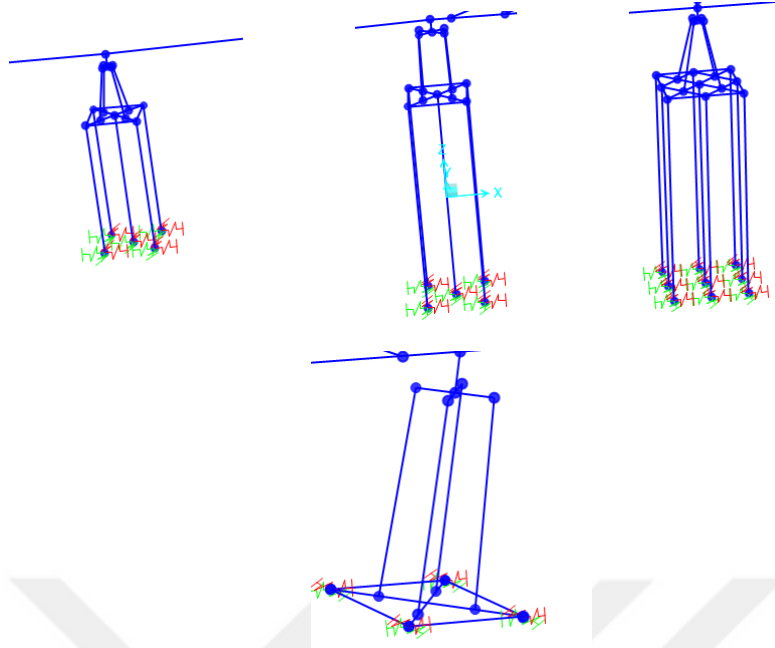
Şekil 3.13 : Üç farklı doğrusal rijitlik modeli [17].



Şekil 3.14 : Doğrusal yayların yerleşimi [3].

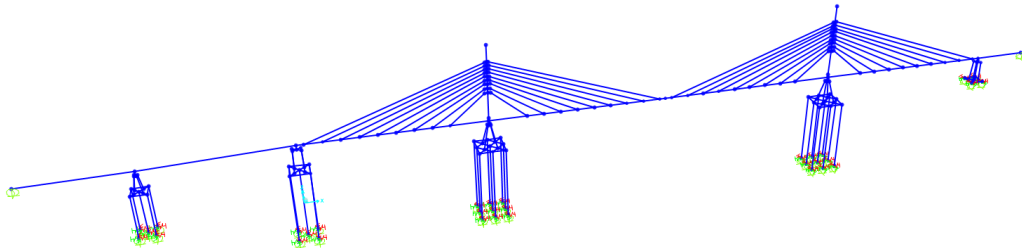
Çizelge 3.10 : Zemin etkisi için kullanılan yay sabitleri [3].

	P2-2	P3-1	P3-3	P3-4	P4-1
$k_y(kN/m)$	9700	16000	11800	16200	38200



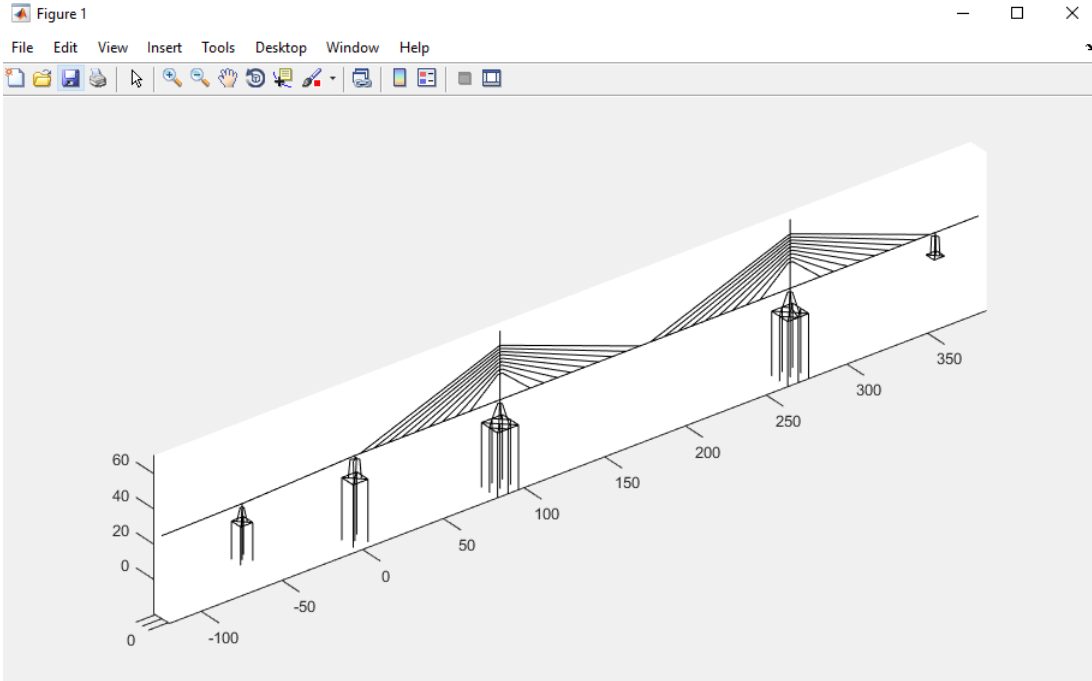
Şekil 3.15 : SAP2000 Yay yerleşimleri.

Yapının genel modellemesine giriş hakkında, bütün elemanlar tek tek ele alınarak modellenmesi hususunda izlenilen süreç ile ilgili detaylı bilgiler paylaşılmıştır. Bu anlamda yapısal tasarım dökümanlarından faydalanılarak, elemanların fiziksel ve mekanik özellikleri, maruz kaldıkları etkiler ve modellenmesi hususunda izlenilen yöntemler, ilgili tasarım firmasının gerekli olan bütün dökümantasyonlarından sağlanmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile parçasal olarak elemanlar incelenmiş, yapılan SAP2000 ve MATLAB modellerinde bu metodun ışığında yol alınmıştır. Yapısal model oluşturulurken tabliye, pilon, kablolar ve kazıklar çubuk model olarak tasarlanmış ve kazıkların en alt kısmına eşdeğer yaylar modellenmiştir. Bu anlamda Şekil 3.16'de SAP2000 modelinin ve Şekil 3.17'da MATLAB modelinin son halleri paylaşılmaktadır.



Şekil 3.16 : SAP2000 modeli.

Görselleri paylaşılan ve bu tez çalışması kapsamında yürütülen çalışma ile ilgili olarak verilen ana hatların bilgilerinden sonra, yapılan modelin son halini alması için hangi çözüm metodolojilerinin uygulandığı hakkında daha teorik bilgiler ışığında yol alınacaktır. Özellikle modelleme çalışması yapılırken genel sistemin malzeme ve mekanik özelliklerinin tek tek tasarım raporlarından elde edildiği unutulmamalıdır. İzlenilen yolun tutarlı olması ve fiziksel model ile örtüşmesi açısından bazı varsayımların modele etkiltilirken yine karşılıklı kontroller ile doğruluğu teyit edilerek yol alındığı, bu sayede yüksek bir yakınsama elde edildiği anlaşılmıştır.



Şekil 3.17 : MATLAB modeli.

3.3 Yay ve Çubuk Eleman Modelleri

Haliç Metro Köprüsü (HMK) modelleme çalışmaları hakkında bilgiler verildikten sonra, bu modelleme çalışmalarında kullanılan elemanlar hakkında bilgiler vermek gerekmektedir. Bu bağlamda, köprü modelleme çalışması kapsamında modelin oluştuğu bölümler olan; tabliye, kablolar, ayaklar, kazıklar ve kazık başlıklarının çubuk elemanlardan oluşturulduğu, zemin etkisinde kazıkların en altlarına yerleştirilen eşdeğer yaylardan meydana geldiği bilgisi paylaşılmıştır. Oluşturulan bu köprü bölümlerinin meydana geldiği bu elemanların nelerden müteşekkil olduğu, literatürde ne anlama geldiği ve modele nasıl entegre edildiği hakkında bilgiler verilerek, bu

eleman modellerinin SEM içerisinde nasıl kurgulandığı ve bu şekilde parçalardan bir araya gelerek bütün modeli nasıl oluşturduğu konusunda verilen bilgiler bu çalışmaya büyük bir ışık tutacaktır.

3.3.1 Yay eleman modeli

Modelleme içerisindeki yay elemanın tanımına girmeden önce en basit anlamda yay tanımını yapacak olursak; belirli bir kuvvet ile basılarak ve/veya çekilerek üzerine yüklenen yükün etkisi yönünde bu etkiyi karşılayan ve üzerindeki yük kalktığında tekrar ilk durumunu alması istenilen elemana yay adı verilir [39]. Biraz daha mesleki açıdan bakıldığında zaman ise, herhangi bir sistemde, bu basit ya da komplike sistem olabilir, deforme olan eleman direnç kuvvetini ortaya çıkarır veya biriktirir. Ortaya çıkan bu direnç kuvveti ise yerdeğiştirmenin bir fonksiyonu olarak temsil edilebilir. Deforme olmuş bu elemana ise yay adı verilir. Mühendislik açısından irdelendiğinde zaman yaylar, yapıldıkları malzemelerin mekanik özellikleri ve dış etkenlerden (kuvvet, moment) dolayı diğer elemanlara göre oransal olarak daha büyük şekil değişikliğine uğrayabilirler ve söz konusu olan dış etkenler ortadan kalkınca tekrar eski hallerine geri dönerler. Bu sırada ise, belli miktarda potansiyel enerji depo edebilir ve bu enerjiyi kısmen geri verebilirler. Bu özellik bakımından özellikle yapısal eleman olarak birçok kere tercih sebebi olur ve modelleme teknikleri içerisinde belli varsayımlarda kullanılırlar. Özetle bakacak olduğumuz zaman teknik olarak yaylar;

- Enerji depolayıcı olarak,
- Kuvvet sınırlayıcı olarak,
- Darbe sönümleyici olarak,
- Kuvvet ölçmek amacıyla,
- Kuvvetlerin dağıtılması amacıyla,

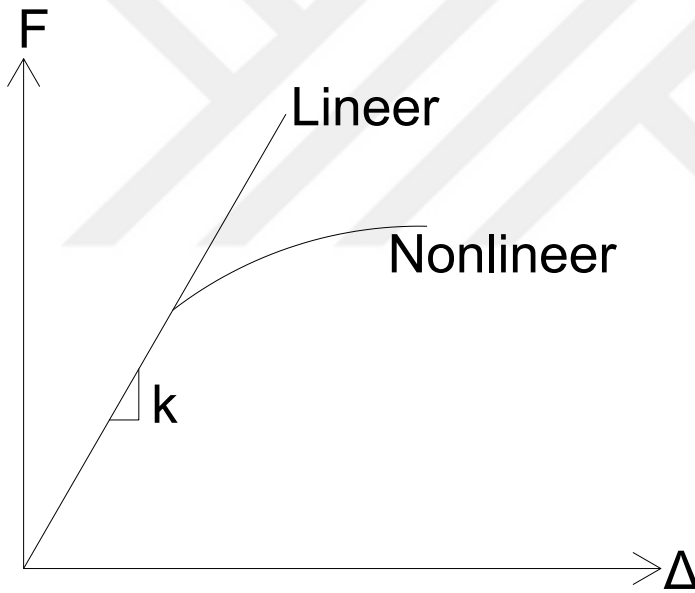
olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılabilirler. Bu bilgilerden sonra basit bir yay elemanı tanıtabileceğiz; Şekil 3.18’ de basit bir yay eleman modeli verilmektedir.



Eleman noktaları : i, j
 Noktalara ait deplasmanlar : u_i, u_j (in, m, mm)
 Noktalara ait kuvvetler : f_i, f_j (lb, Newton)
 Yay sabiti (Rijitlik) : k (lb/in, N/m, N/mm)

Şekil 3.18 : Basit yay eleman modeli.

Verilen basit yay elemanına ait olarak Şekil 3.19’de yayın lineer bölgede davrandığı kabul edildiği zamana ait olan gerilme - deformasyon ilişkisi gösterilmektedir.



$$F = k\Delta$$

$$\Delta = u_j - u_i$$

Şekil 3.19 : Gerilme - Deformasyon ilişkisi.

Şekil 3.18’de görülen elastik yayda, dış kuvvet ile yerdeğiştirme arasındaki ilişki grafiksel olarak çizilmek istenildiği zaman Şekil 3.19’de gösterilen grafik elde edilir. Dış kuvvet ile yerdeğiştirme arasındaki bu bağıntının eğimi ”elastik yayın rijitliği” olarak adlandırılır ve ”k” ile gösterilir. k yay rijitliğine göre bu bağıntı;

$$F = k \times u \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 3.1’de $u = 1$ alınırsa $F = k$ olur. Bu, rijitliğin birim yerdeğiştirmeden dolayı meydana gelen kuvvet olduğu anlamına gelir.

Bu tez çalışması kapsamında uygulanan modelleme çalışması içerisinde etkitilen yay modellerinin hesaplamaları içerisinde yer alan ve MATLAB programında yapılan modelleme çalışmasınada altlık oluşturan bu tarzdaki basit bir yay sisteminin basit notasyonlarla çözüm mantığını açıklayacak olursak; basit bir yayın her iki ucundaki kuvvetler ve yerdeğiştirmeler Şekil 3.18’de verilen gibi olsun. Bu yay için kuvvet ve yerdeğiştirme vektörleri,

$$\{f\} = \left\{ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \end{matrix} \right\}; \quad u = \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \end{matrix} \right\} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bahsi geçen f_1 ve f_2 Denklem 3.3 ve Denklem 3.4’de ki gibi ifade edilebilir.

$$f_1 = k_{11}u_1 + k_{12}u_2 \quad (3.3)$$

$$f_2 = k_{21}u_1 + k_{22}u_2 \quad (3.4)$$

k_{ij} ’de; i yeri, j sebebin yerini göstermektedir.

Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 matris formda yazılırsa;

$$\left\{ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \end{matrix} \right\} \quad (3.5)$$

veya kısaca;

$$\{f\} = [k] \{u\} \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir. Söz konusu denklemlerden de anlaşılacağı üzere rijitlik matrisi, uç kuvvetleri ile uç yerdeğiştirmeleri arasındaki bağıntıdır.

Burada özellikle modelleme çalışmasında da görüldüğü üzere unutulmaması gereken husus yay eleman rijitliğinin yapı sistemi geometrisine, malzeme özelliklerine ve kazıkların bağlandığı mesnet özelliklerine bağlı olduğudur. Yani, yapılan çalışma kapsamında yapının fiziksel ve tasarım modellerine bağlı kalarak aynı değerleri yakalayabilmek açısından tasarım raporlarından elde edilen değerler, yapılan çalışma kapsamında yüksek doğrulukla entegre edilerek modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada yay elemanlar kullanılarak;

- Yapılan analizlerde, deformasyonlar tasarım raporları ile örtüşmesi yüksek oranda sağlanmış,
- Eksenel yüklemelerin sonucunda kazıklardaki deplasmanlar aynı şekilde yakalanmıştır.

3.3.2 Çubuk eleman modeli

En genel anlamda köprü modellemesi yapılırken, şimdiye kadarki yapılan açıklamalar ışığında, tasarım raporlarından elde edilen veriler bir araya getirilerek, köprünün modellemeye konu olan elemanları çubuk eleman olarak modellenmiştir. Bu anlamda en temel olarak, modellemede komplike sistemlere altlık olan 1 boyutlu eksenel yük taşıyabilen çubuk eleman modeli Şekil 3.20’de gösterildiği gibidir. Bu çubuk elemana ait olan çubuk eleman sonlu eleman eşitliği ise Denklem 3.7’de gösterildiği gibidir. 1 boyutlu çubuk eleman her bir düğüm noktası için sadece öteleme hareketi yapabildiği için bu elemana ait düğüm noktası serbestlik derecesi bir olur (Degree of freedom DOF=1) [17].

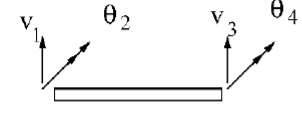
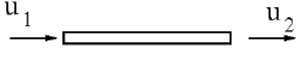
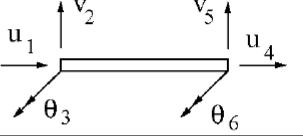
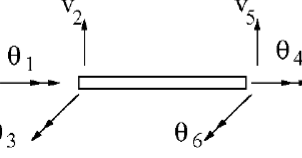
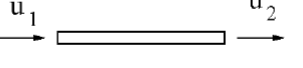
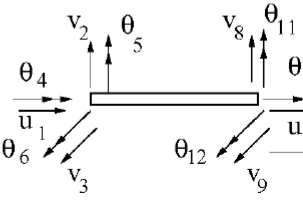


Şekil 3.20 : Çubuk eleman modeli.

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

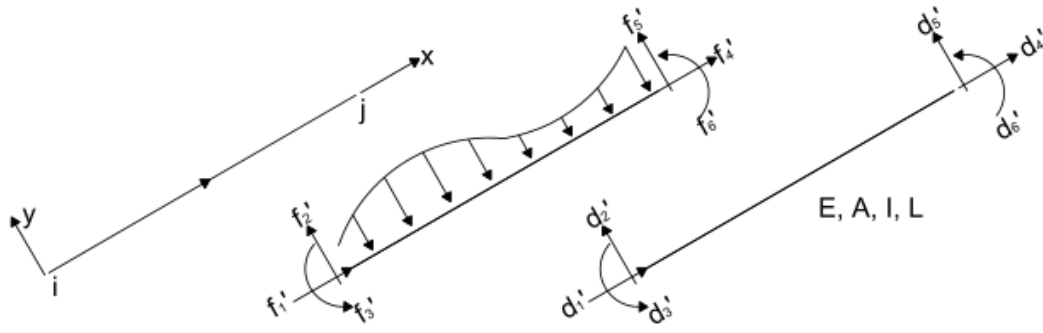
3.4 Sistem Rijitlik, Kütle ve Dönüşüm Matrisleri

Yapılan çalışmanın bölümlerini oluşturan yay eleman ve çubuk eleman modelleri tanıtıldıktan sonra, sistemin çözüm metodolojisini oluşturan, özellikle MATLAB’de yapılan modelleme çalışmasının çözüm yolu olan sistemlerin oluşturulması için her bir elemanın rijitlik, kütle ve bunlara bağlı olarak koordinat sistemlerine göre dönüşüm matrisleri oluşturulmuştur. İçinde yer aldığımız bu bölümde bu matrislerin nasıl oluşturulduğu hakkında bilgiler verilecektir. Öncelikle en temel anlamda gösterilmek istenirse, Şekil 3.21’de çubuk elemanların 2 ve 3 boyutlu olmasına göre toplam serbestlik dereceleri gösterilmiştir [18].

I_x, L Beam E 	A, L 2D Truss E 	A, I_x, L 2D Frame E 
I, I_x, L_y Grd E 	A, L 3D Truss E 	A, I_x, I_y, I_z, L 3D Frame E 

Şekil 3.21 : İki ve üç boyutlu serbestlik dereceleri [18].

2 ve 3 boyutlu problemlerde bir elemanın herhangi bir düğüm noktası global eksen takımında 2 adet koordinat değeri ile ifade edilebildiği için tek boyutlu problemlerde kullanılan 2x2 boyutundaki eleman rijitlik matrisi, trigonometrik bağıntılar kullanılarak 2 ve 3 boyutlu düzlemlerde kullanılabilecek transforme edilmiş halleri elde edilir. Bu anlamda, eleman eksen takımında düzlem kafes elemanın rijitlik matrisi elde edilmek istenirse ve bu elemanın sadece eksenel kuvvete maruz kaldığı düşünülürse, lokal koordinat sistemine göre rijitlik matrisi Şekil 3.22’ de verildiği üzere şu şekilde ifade edilir;



Şekil 3.22 : Çubuk eleman - lokal koordinatlar [19].

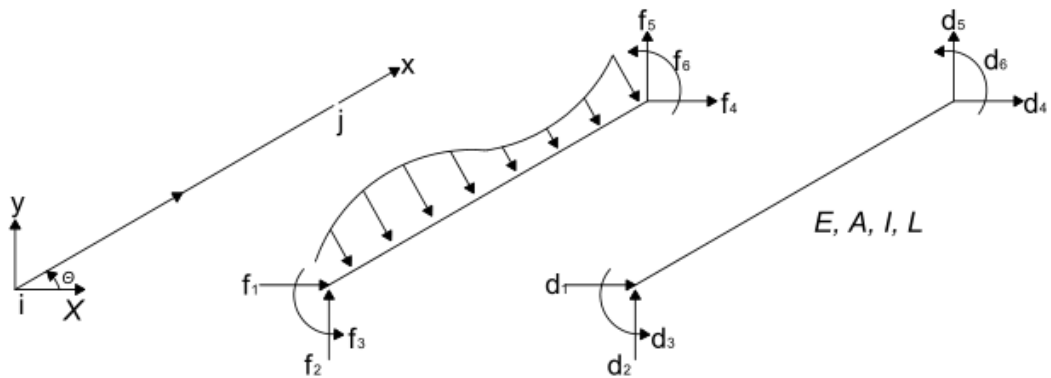
$$\text{Kuvvet Vektörü} = \mathbf{f}' = \begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \\ f'_4 \\ f'_5 \\ f'_6 \end{bmatrix} \quad \text{Deplasman Vektörü} : \mathbf{d}' = \begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \\ d'_4 \\ d'_5 \\ d'_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{Sabit ve Kuvvet Vektörü} : \mathbf{p}' = \begin{bmatrix} p'_1 \\ p'_2 \\ p'_3 \\ p'_4 \\ p'_5 \\ p'_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rijitlik Matrisi : } \mathbf{k}' = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

$$\text{Kuvvet , Deplasman İlişkisi : } \mathbf{f}' = \mathbf{k}' \mathbf{d}' + \mathbf{p}' \quad (3.8)$$

Benzer bir şekilde, eleman eksen takımında düzlem kafes elemanın rijitlik matrisi elde edilmek istenirse ve yine bu elemanın sadece eksenel kuvvete maruz kaldığı düşünülürse, global koordinat sistemine göre ise Şekil 3.23' de verildiği üzere rijitlik matrisi ise ifade edildikten sonra, Şekil 3.24' de gösterildiği üzere rijitlik matrisi elde edilir [20].



Şekil 3.23 : Çubuk eleman - global koordinat sistemi [19].

$$\text{Kuvvet Vektörü} = \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad \text{Deplasman Vektörü} : \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{Sabit ve Kuvvet Vektörü} : \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{Kuvvet Deplasman İlişkisi} : \mathbf{f} = \mathbf{k}\mathbf{d} + \mathbf{p} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} C^2 \frac{EA}{L} + S^2 \frac{12EI}{L^3} & CS \frac{EA}{L} - CS \frac{12EI}{L^3} & -C^2 \frac{EA}{L} - S^2 \frac{12EI}{L^3} & -S \frac{6EI}{L^2} \\ CS \frac{EA}{L} - CS \frac{12EI}{L^3} & S^2 \frac{EA}{L} + C^2 \frac{12EI}{L^3} & -CS \frac{EA}{L} + CS \frac{12EI}{L^3} & C \frac{6EI}{L^2} \\ -S \frac{6EI}{L^2} & C \frac{6EI}{L^2} & -C \frac{EA}{L} - S^2 \frac{12EI}{L^3} & -S \frac{6EI}{L^2} \\ -C^2 \frac{EA}{L} - S^2 \frac{12EI}{L^3} & -CS \frac{EA}{L} + CS \frac{12EI}{L^3} & CS \frac{EA}{L} - CS \frac{12EI}{L^3} & S \frac{6EI}{L^2} \\ -CS \frac{EA}{L} + CS \frac{12EI}{L^3} & -S^2 \frac{EA}{L} - C^2 \frac{12EI}{L^3} & S^2 \frac{EA}{L} + C^2 \frac{12EI}{L^3} & -C \frac{6EI}{L^2} \\ -S \frac{6EI}{L^2} & C \frac{6EI}{L^2} & -C \frac{EA}{L} - S^2 \frac{12EI}{L^3} & -S \frac{6EI}{L^2} \end{bmatrix}$$

$C = \cos(\theta)$ ve $S = \sin(\theta)$

Şekil 3.24 : Rijitlik matrisi - global eksen takımı [20].

Lokal ve global koordinat sistemlerinde kuvvetlerin ve deplasmanların arasındaki ilişki ise;

$$\text{Elamanların uç deplasman ve dönmeleri : } \mathbf{d}' = \mathbf{T}_D \mathbf{d} = \mathbf{T} \mathbf{d}$$

$$\text{Elamanların uç deplasman ve momentleri : } \mathbf{f} = \mathbf{T}_F \mathbf{f}' = \mathbf{T}^T \mathbf{f}'$$

$$\text{Sabit uç kuvvetleri ve momentleri : } \mathbf{p} = \mathbf{T}_F \mathbf{p}' = \mathbf{T}^T \mathbf{p}'$$

$$\text{Eleman rijitlik matrisleri : } \mathbf{k} = \mathbf{T}_F \mathbf{k}' \mathbf{T}_D = \mathbf{T}^T \mathbf{k}' \mathbf{T}$$

şeklindeki ifadeler transformasyon matrislerinde tek tek yerlerine koyulursa;

$$\mathbf{T}_D = \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_F = \mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} C & -S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & -S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

şekinde gerçekleşir. Ayrıca; $C = \cos(\theta)$ ve $S = \sin(\theta)$ olduğu unutulmamalıdır [20, 21].

İki boyutlu sistemlerde uygulanan sistem rijitlik matrisinin yapılan bu çalışma kapsamında 3 boyutlu sisteme entegrasi aşamasında ise dönmeler ve burulmalar olarak adlandırdığımız büyüklükler ve diğer boyuttaki değerlerde işlemlere girmektedir. Bu anlamda 3 boyutlu bir sistemin rijitlik matrisinin elde edilmesi, en genel anlamda lokal koordinat sisteminde Şekil 3.25’de ifade edilmektedir [18,40].

$$\mathbf{K}'^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 \\ \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ \frac{4EI_z}{L} & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 \\ \frac{4EI_z}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \text{ sim.}$$

Şekil 3.25 : Üç boyutlu sistemlerde rijitlik matrisi [21] .

Global koordinat sistemine göre transformasyon matrisi yazıldıktan sonra, global koordinat sistemine göre rijitlik matrisi en genel ifadesi ile Denklem 3.10'da verilen şekilde elde edilir.

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^T \mathbf{K}' \mathbf{R} \quad (3.10)$$

buradaki $\mathbf{R}$ matrisi dönüşüm olarak adlandırıldığında;

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

matris içerisinde geçen r ise;

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} C_{Xx} & C_{Yx} & C_{Zx} \\ C_{Xy} & C_{Yy} & C_{Zy} \\ C_{Xz} & C_{Yz} & C_{Zz} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ayrıca; $C_{Xx} = \cos\theta_{xx}$ şeklinde olur.

Burada θ_{Xx} , θ_{Yx} ve θ_{Zx} , açıları, sırasıyla lokal eksen x 'e göre global X, Y ve Z eksenlerinden ölçülür. İki düğüm noktalı üç boyutlu çerçeve elemanı, her bir düğüm noktasına (DN) altı adet serbestlik derecesine sahiptir. Bu şekilde mesnetlerin tepkilerini Denklem 3.13 ile hesaplamak mümkün olabilir.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (3.13)$$

Burada $\mathbf{K}$ ve $\mathbf{U}$, sırasıyla yapı rijitlik matrisi ve düğüm noktası (DN) yer değiştirmesi vektörleridir. Eleman kuvvetleri aynı zamanda eksen dönüşümü ile de;

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{k}_e \mathbf{R} \mathbf{U}^e \quad (3.14)$$

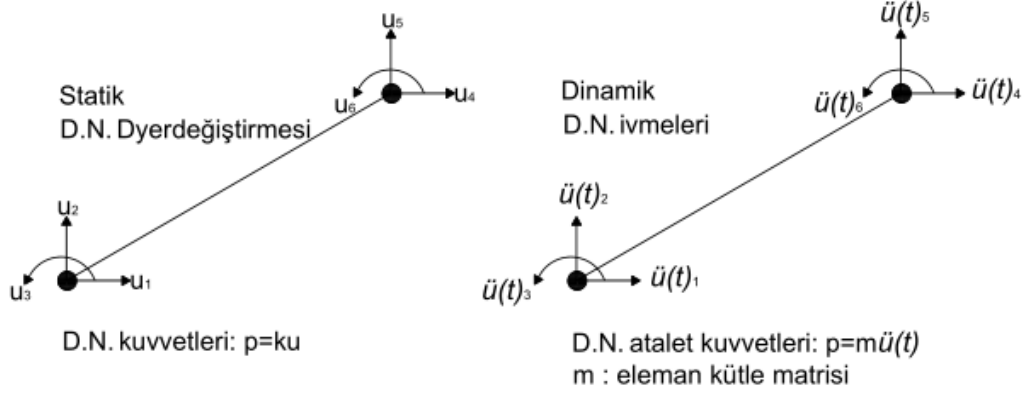
olarak ifade edilir [17, 22].

Sistemin genel rijitlik matrisi ve buna bağılı olarak global koordinat sistemlerinde dönüşüm matrislerinin bulunması ile ilgili temel veriler açıklandıktan sonra, modellemeye giden yolda son aşama olan sistemin kütle matrislerinin oluşturulması yönünde açıklamalarda bulunmak gereklidir. Bu çalışma kapsamında sistemin kütle matrisleri elde edilirken, tasarım raporlarından elde edilen verilere göre bütün sistemde kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve hacim unsurları (en, boy, uzunluk) tek tek elde edilmiştir. Sistem bütünsel olarak ortaya çıktıktan sonra, her bir düğüm noktasına birleşen elemanların yaklaşık olarak kütle değerleri, o düğüm noktasına birleşen elemanları hacim ve yoğunluk değerlerinin ortalaması alınarak o noktanın kütlesi elde edildikten sonra, bu yaklaşık değer aslında genel anlamda kütle matrislerinin elde edilmesi yöntemi ile paralellik gösterdiği ortaya konmuştur. Elde edilen değerler bu varsayımla hareket edilerek tasarım raporlarının sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman mod analizlerine göre yüksek doğruluk oranı ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Sistemin modal analizini yapmak ve frekans, periyot karşılaştırmalarını farklı programlardan karşılaştırmalı olarak yapabilmek adınada aslında kütle matrislerinin doğru bir şekilde ortaya konması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında aslında modal analize giden yoldada dinamik etkiler için yapısal tasarımın amacı; yük frekanslarının, öz frekans değerlerine eşit olmaması durumudur. Dinamik öz modların bulunması olarak bilinen bu süreç aslında modal analizin kendisidir. Modal analiz çalışması ile beraber bu çalışmada SAP2000 ve MATLAB verilerinin örtüşmesi ile nihayetine ermiştir. Bu nihayete giden yolda, yine kütle matrisinin oluşturulmasına dair bilgiler verecek olursak; Şekil 3.26'de bazı çubuk elemanların örnek kütle matrisleri görülmektedir [22].

Element	N	$M_{(e)}$	M_c	M_d	M_f
1-D 	2	$\rho AL/2$	$\frac{m}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$	$m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{m}{3} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
2-D 	3	$\rho A\zeta/3$	$\frac{m}{4} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$	$m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{m}{4} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$
2-D 	4	$\rho A\zeta/4$	$\frac{m}{9} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 4 \end{bmatrix}$	$m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{m}{9} \begin{bmatrix} -5 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & -5 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & -5 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & -5 \end{bmatrix}$
3-D 	8	$\rho V/8$	$\frac{m}{27} \begin{bmatrix} 8 & 4 & 2 & 4 & 4 & 2 & 1 & 2 \\ 4 & 8 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 1 & 2 & 4 & 2 \\ 4 & 2 & 4 & 8 & 2 & 1 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & 8 & 4 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 8 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & 8 \end{bmatrix}$	$m \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{m}{27} \begin{bmatrix} -19 & 4 & 2 & 4 & 4 & 2 & 1 & 2 \\ 4 & -19 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & -19 & 4 & 1 & 2 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & -19 & 2 & 1 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & -19 & 4 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 4 & -19 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & -19 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 2 & 4 & -19 \end{bmatrix}$

Şekil 3.26 : Örnek elemanların kütle matrisleri [22].

Modal analiz çalışması yapmadan önce elbetteki düğüm noktalarının dinamik kuvvetlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu anlamda düğüm noktalarının dinamik kuvvetlerine bağlı olarak kütle matrisinin gösterimi Şekil 3.27’da yapılmaktadır [23].

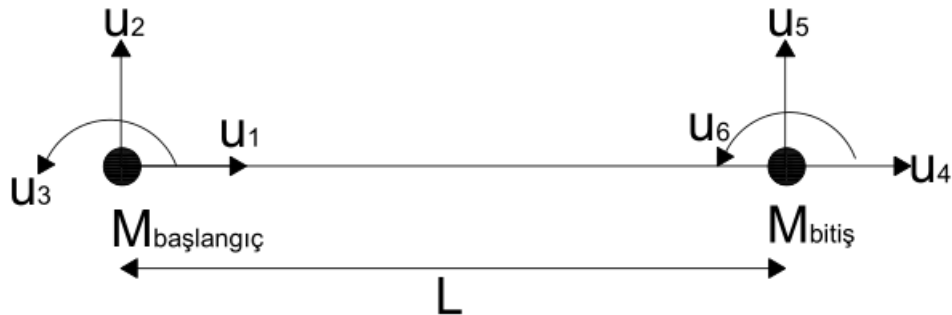


Şekil 3.27 : Statik ve Dinamik kuvvetler [23].

Bu bağlamda bakıldığında zaman titreşen bir elemanın DN kuvvetleri Denklem 3.15’ de gösterilmektedir.

$$\mathbf{p} = \mathbf{k} \mathbf{u}(t) + \mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}}(t) \quad (3.15)$$

Bu bilgilerden sonra en genel anlamda kütle matrisi ifade edilmek istenirse Şekil 3.28’de verilen bir eleman için toplanmış kütle matrisi Çizelge 3.11’de ifade edilmektedir. Ayrıca sadece genel bir yaklaşım ile de bu tez çalışması kapsamında özellikle MATLAB içerisinde kullanılan şekli ile de yine Çizelge 3.11’ de dağıtılmış kütle matrisi verilmektedir [41].



Şekil 3.28 : Örnek çubuk eleman.

Çizelge 3.11 : Sıkıştırılmış ve dağıtılmış kütle matrisleri [5].

Sıkıştırılmış kütle matrisi					
$M_{başlangıç}$	0	0	0	0	0
0	$M_{bitiş}$	0	0	0	0
0	0	$M_{başlangıç}$	0	0	0
0	0	0	$M_{bitiş}$	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Dağıtılmış kütle matrisi					
$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	0	0	0	0
$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
0	0	$\frac{13}{35}$	$\frac{9}{70}$	$\frac{11L}{210}$	$\frac{-13L}{420}$
0	0	$\frac{11L}{210}$	$\frac{13}{35}$	$\frac{13L}{35}$	$\frac{-11L}{210}$
0	0	$\frac{11L}{210}$	$\frac{13L}{420}$	$\frac{L^2}{105}$	$\frac{-L^2}{140}$
0	0	$\frac{-13L}{420}$	$\frac{-11L}{210}$	$\frac{-L^2}{140}$	$\frac{L^2}{105}$

ρAL

Burada ρ , dinamik kütle katılım oranı, A , elemanın kesit alanı, L , elemanın uzunluğunu ifade eder.

3.5 Modal Analiz Çalışmaları, Periyot ve Frekans Değerleri

Tez çalışması kapsamında şimdiye kadar anlatılan konular, çalışma bütünlüğünü oluşturması açısından hem tez çalışmasında yapılan işlemler hemde bu çalışmaları yaparken hangi akademik verilerin, nasıl kullanıldığına dair etap etap olacak şekilde anlatılmıştır. Bu sayede hem yapılan çalışmadan kesitler sunulmuş hem de bu yapılan çalışmaya altlık oluşturan literatür bilgileri verilmiştir. Diğer bir ifade ile, sebep – sonuç ilişkisi içerisinde bu çalışma yapılmıştır. Bu ifadeler ışığında rijitlik, kütle ve dönüşüm matrislerinin en genel ifade ile ne anlama geldiği ve bu çalışma kapsamında nasıl kullanıldığı açıklandıktan sonra, sonuçlar kısmına geçmeden

önce tezi sonuçlandırıp, nihayete erdirmek adına yapılan mod analizi çalışmasından bahsedilecektir.

Herhangi bir yapısal sistemin modelleme çalışması yapılırken, statik ve dinamik yükler altında malzeme karakteristik özellikleri ile beraber sistemin bütün rijitlik değerleri elde edildikten sonra, varsa mevcut dış yükler altında nasıl bir davranış göstereceğinin tayini açısından mod analizi yapmak gerekmektedir. Bu anlamda şu soruyu sormak gereklidir; Belirli bir yapının öz modları nelerdir? Bu sorunun cevabına geçmeden önce aşağıdaki ifadelerde ki tanımlamaları bilmek gerekmektedir.

Global sistemlerin denklemlerindeki bazı ifadelerin tanımları;;

- $\mathbf{F}(t)$ = global yük vektörü = birleştirilince $\mathbf{f}_e$
- $\mathbf{K}$ = global rijitlik matrisi = birleştirilince $\mathbf{k}_e$
- $\mathbf{M}$ = global kütle matrisi = birleştirilince $\mathbf{m}_e$
- $\mathbf{M}(t)$ = global deplasman vektörü
- $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ = global ivme vektörü

Bir yapının herhangi bir noktasındaki global koordinat sistemine göre denklemi;

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) \quad (3.16)$$

şeklinde olur.

Harmonik deplasmanlar için öz mod vektörü $(\mathbf{E}_i, \Omega_i)$;

$$\mathbf{U}_i(t) = \mathbf{E}_i \cos(2\pi\Omega_i t) \quad (3.17)$$

$$(\mathbf{K} - (2\pi\Omega_i)^2 \mathbf{M})\mathbf{E}_i \cos(2\pi\Omega_i t) = \mathbf{0} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18' de yükler birbirinden bağımsız olarak alınır ve böylece herhangi bir zaman dilimi içerisindeki değeri;

$$(\mathbf{K} - (2\pi\Omega_i)^2 \mathbf{M})\mathbf{E}_i = \mathbf{0} \quad (3.19)$$

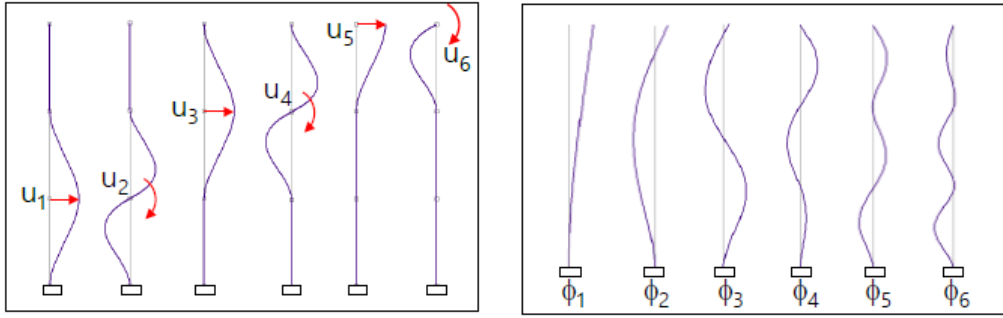
şeklinde olur.

Buradaki öz vektör problem çözümünde;

Ω_i = dinamik öz frekans

E_i = dinamik öz form olarak tanımlanırlar.

Herhangi bir yapının sayısal yapısal modeli içerisindeki yapının deformasyonları Şekil 3.29'de gösterilmekte olan deforme olmuş her konfigürasyon için yapılırsa;



Şekil 3.29 : Deformasyonların gösterimi [22].

Şekil 3.29'de sol tarafda gösterilen şekilde ;

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$ u_i : D.N. deplasmanı

Şekil 3.28'de sağ tarafta gösterilen şekilde ise;

$U = \Phi_1 q_1 + \Phi_2 q_2 + \dots + \Phi_6 q_6$: Φ : modal koordinat

şeklinde ifade edilir.

Bu çalışmalardan sonra, bir araya getirmek amacı ile, modal analiz çalışmasının bir bilgisayar programı iş akışını oluşturursak;

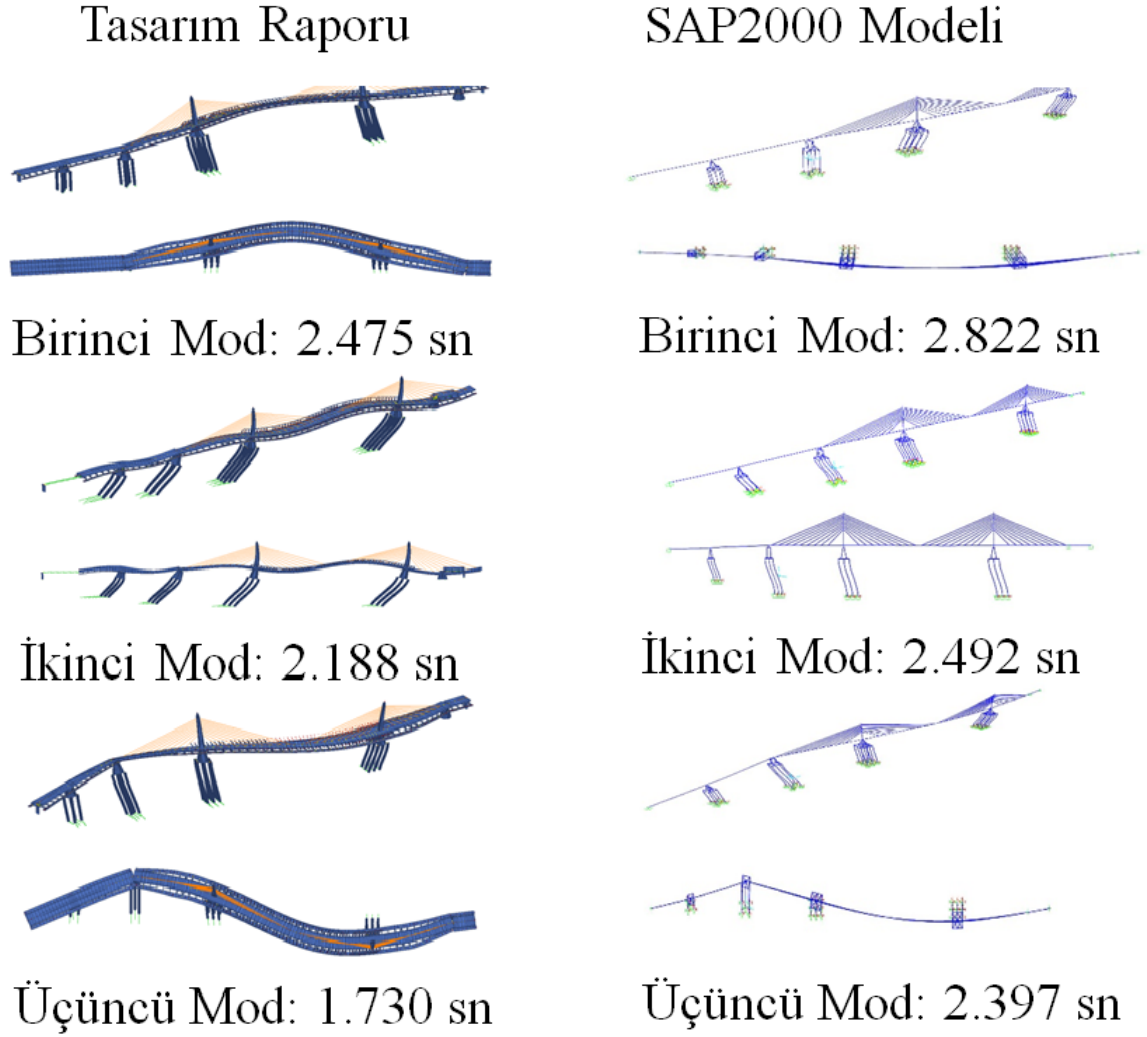
- Sistem tanılama çalışmaları; elemanlar, düğüm noktaları (D.N), yay elemanları ve yükler,
- Lokal koordinat sisteminde yapının rijitlik, kütle ve dönüşüm matrislerinin oluşturulması,
- Global koordinat sisteminde yapının aynı matrislerinin yeniden dizayn edilmesi,
- Öz mod değerleri için özdeğer problemlerinin çözümü,
- Daha fazla analiz yapmak (Time – history analizleri, respons spektrumları)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

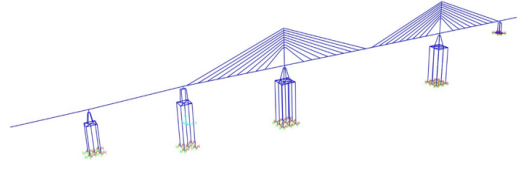
Bu çalışma kapsamında, HMK' nün sistem tanılama çalışmalarına paralel olarak yürütülen bir program yürütülmüştür. Bu anlamda sayısal model ve köprü üzerinde konumlanmış olan sensörlerden elde edilen veriler ışığında karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar yapılırken, yapısal model çubuk elemanlar ile oluşturulmuştur. Yapısal model oluşturulurken özellikle tasarım dökümanlarından faydalanılmış ve köprünün tasarimsal olarak planlanıp imal edilen bütün elemanları tek tek irdelenmiştir. Çalışmanın başlangıç aşamasında planlanmış olan; yapısal modelin MATLAB programı ile üç boyutlu olarak modellenmesi, böylece bir çalışma kapsamı içerisinde kontrol mekanizması geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol mekanizmasının geliştirilmesi için öncelikle HMK' nün matematiksel modeli SAP2000 ticari yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken özellikle kullanılan malzemelerin mekanik ve karakteristik özellikleri yine tasarım dökümanlarından yararlanılarak elde edilmiştir. İlgili dökümanların taranması sırasında elde edilen ivme verilerinin frekans analizlerinden elde edilen mod frekansına göre çizilen mod şekillerinin, SAP2000 programı ile karşılaştırıldığı zaman öncelikle mod şekillerinin yakın olduğu gözlemlenmiştir.

SEM metoduna göre izlenen yolda SAP2000 programı vasıtası ile yapılan modelleme çalışmasında izlenen yollar ve tetkik edilen elemanlar yine bu tez çalışması içerisinde tek tek ele alınmıştır. Bu kapsamda tasarım dökümanlarından elde edilen ilk üç mod şekli ve SAP2000 programından elde edilen mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu görselden görüleceği üzere özellikle mod şekilleri yüksek oranda benzerlik göstermiş olup mod frekansları da yüksek oranda yakınsaklık göstermektedir. Bu anlamda karşılaştırılan mod şekillerinin MAC sayısı üzerinden sayısal ifadesi de Şekil 4.2'de verilmiştir. MAC sayısı olarak ifade edilen rakam ise açıklamalı olarak verilmek istenirse; Modal güvence kriteri olarak iki mod şeklinin benzerliğini ifade etmektedir. Mesleki olarak ifade edilmek istenirse; iki mod arasındaki MAC değeri, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, her ortak D.N' da karmaşık

modal vektörün normalize edilmiş noktasal çarpımı olarak ifade edilmektedir. Bu değer SEM veya deneysel bir modal analizden oluşturulabilir. Bu denklem sonucu çıkan değer, sıfıra yakınsadığı miktarda mod şekilleri farklılık gösterirler. Bu tez kapsamında yapılan çalışma neticesinde elde edilen değer ise Şekil 4.2’de görüleceği üzere 0.72 elde edilmiştir [3] [8].



Şekil 4.1 : Karşılaştırmalı mod şekli ve frekansları [3].



$$MAC_j = \frac{|(\phi_j)_{teor}^T (\phi_j)_{gozl}|^2}{((\phi_j)_{teor}^T (\phi_j)_{teor})((\phi_j)_{gozl}^T (\phi_j)_{gozl})} = 0.72$$

Şekil 4.2 : MAC değeri [8].

Tezin ilk aşamasında tasarım dökümanları ve SAP2000 yazılımı ile yapılan modelleme çalışmasından elde edilen veriler yorumlandığı zaman;

- Tasarım dökümanlarından görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan sistem tanılama algoritmaları dikkate değer ölçüde faydalıdır. Ayrıca sensör sayıları ve sensörlerin modu önemli ölçüde acil durum eylem planlarının ortaya konulmasında etkilidir. Ayrıca kullanılacak sensör sayısı, yapının olası mod şekilleri dikkate alınarak seçilmelidir.

- HMK yapısal sağlık izleme sisteminde birçok sensörün kalıcı cihazlarda güvenilir olmayan veriler ürettiği gözlemlenmiştir. HMK' nin modal özellikleri mevcut sensörler kullanılarak elde edilememiş, tasarım raporlarında yer alan modal özellikler kullanılmıştır.

- Köprü tabliyesinde ölçülen ivmeler ve elde edilen mod frekansları, ilk ölçümlerden elde edilen değerler ile uyumlu şekilde elde edilmiştir. Ancak yüksek frekanslara ait mod şekilleri elde edilememiştir.

- Doğrusal olmayan yapısal model oluşturulacağı zaman, oluşturulacak farklı deprem seviyelerindeki yapısal modelin görebileceği hasarın grafiğe dökülmesi ile hasar görebilirlik analizi uygulaması yapılabilecek düzeye gelmiştir.

SAP2000 programı vasıtası ile model oluşturulduktan sonra, MATLAB programı vasıtası ile oluşturulan algoritmalar neticesinde tez kapsamı içerisinde karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiş ve bu anlamda SAP2000 sonucunda elde edilen mod

frekanslarının MATLAB ile oluşturulan algoritmalar ile örtüşen değerler bulunmuştur. Özellikle MATLAB da oluşturulan algoritmalar SEM uygulanmış ve üç boyutlu olarak sistemlerin rijitlik, kütle ve dönüşüm matrisleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matrisler, kurulan algoritmalar ile SAP2000 model sonucu ortaya çıkan rijitlik ve kütle matrislerinin MATLAB programına entegre edilmesi ile aynı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yani yapılan çalışmada kontrol mekanizmasının daha sağlıklı olması açısından, malzeme karakteristik özelliklerinin SAP2000 modelinde alınan değerler ile aynı olmasına dikkat edilmiş ve kurulan algoritmaların her adımında bu kontrol sağlanmıştır. Oluşturulan algoritmalar neticesinde HMK üç boyutlu lineer olarak modellemesi yapılmış ve çıkan neticede tez kapsamında iki farklı paket program vasıtası ile mod şekilleri ve frekansları sağlıklı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Tezin ikinci aşaması olan MATLAB programlaması neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlandığı zaman ise aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Yapısal sağlık izleme sisteminin sismik kullanımı için ve yüksek frekans mod şeklini yakalamak için sensör sayısının artırılması gerekmektedir. Çözünürlüğü artırmak mod şekilleri hakkında daha fazla bilgi sağlar ve hasar tanımlamanın doğruluğunu artırır.
- Köprünün belirli periyotlarla bakımı ve işletimi hakkında bir oluşumun profesyonel olarak geliştirilmesi gereklidir.
- Köprünün boş olan alanlarına veya zemine sismik uyarım için sensörler gereklidir, çünkü bilinen sismik uyarım altında, HMK' nün performansı bu sismik ölçümlerle daha doğru bir şekilde değerlendirilebilir. Böylece, HMK performans değerlendirmesi, deprem ve yapısal sağlığı hakkında daha sağlıklı kararlar verilebilir.
- Tasarım raporlarından elde edilen bilgilere göre sensör konumları deprem sonrası davranış için yapısal sağlık izleme sisteminin beklenen doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak özenle seçilmiştir.
- Yapının sonlu elemanlar modelinin daha gerçekçi olmasını sağlamak için iki veya üç boyutlu eleman modelinin doğrusal olmayan sistemler için kurgulanması gereklidir.



KAYNAKLAR

- [1] **VCE** (2015). *Golden Horn Metro Crossing Baseline Monitoring and Assessment of the Halic Metro Crossing*, cilt507.
- [2] **Wiecon** (2011). *Golden Horn Metro Crossing Cable Stay Bridge Substructre Detail Design Report*, cilt152.
- [3] **Wiecon** (2011). *Golden Horn Metro Crossing Cable Stay Bridge Superstructure Detail Design Report*, cilt220.
- [4] **Sağlam, A.** (April,2009). Golden Horn Metro Crossing Bridge Geotechnical Report on Pier Foundations Of Cable Stayed and Swing Bridges, *İstanbul Technical University, Faculty of civil engineering, Department of geotechnical engineering*.
- [5] **Chopra, A.K.** (1995). *Dynamics of structures theory and practice*.
- [6] **Gündeş Bakır, P.** (2010). İstanbul'daki Kritik öneme Haiz Yapılarda Deprem Zararlarının Azaltılması, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, AZİS*, 20.
- [7] **Şafak, E.** (2007). Yapı Titreşilerinin İzlenmesi; Nedir, Neden Yapılır, Nasıl Yapılır ve Ne Elde Edilir? 6, *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16–20.
- [8] **Temur, E., Pınar, Ö.G., Erkuş, B. ve Çağlayan, B.Ö.** (2017). Haliç Köprüsü Sağlık İzleme Sisteminin Geliştirilmesi.
- [9] **KORKMAZ, M. ve EMİROĞLU, M.E.** Doksan Derece Kıvrım Açısında Köprü Kenar Ayağı Etrafında Oluşan Oyulmanın İncelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 21–34.
- [10] **Billah, K.Y. ve Scanlan, R.H.** (1991). Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks, *American Journal of Physics*, 59(2), 118–124.
- [11] **Temur, E.** (2019). *Evaluation Of Seismic Health Monitoring System Of Golden Horn Metro Bridge*, cilt143.
- [12] **Çukur, C.** (2006). Çelik Yapıların Nonlineer Analizi, *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [13] **Özer, E. ve Orakdöğen, E.**, (2008), İleri Yapı Statiği Ders Notları.
- [14] **Kumbasar, N. ve Celep, Z.** (2000). Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, *Beta Dağıtım*.

- [15] **Bathe, K.J.** (2006). *Finite element procedures*, Klaus-Jurgen Bathe.
- [16] **Tameroğlu, S.** (1991). Elastisite Teorisi, *İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası*, (1434).
- [17] **Sungur, İ.İ.** (2005). *Taşıyıcı sistemler ve yapı statiği*, Birsen Yayınevi.
- [18] **Kaplan, H.** (2013). *Yapı Statiği II*.
- [19] **Erkuş, B.** Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Modal Analizi.
- [20] **McGuire, W., Gallagher, R.H. ve Ziemian, R.D.** (2000). *Matrix structural analysis*.
- [21] **Erkus, B. ve Johnson, E.A.** (2006). Smart base-isolated benchmark building part III: a sample controller for bilinear isolation, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 13(2-3), 605–625.
- [22] **Ferreira, A.J.** (2008). *MATLAB codes for finite element analysis: solids and structures*, cilt157, Springer Science & Business Media.
- [23] **Omurtag, M.H.** (2010). *Çubuk sonlu elemanlar*, Birsen Yayınevi.
- [24] **Polat, Z.** (2018). *Depreme Dayanıklı Köprü Mühendisliğinde Kavramsal Tasarım*, cilt135.
- [25] **Dinçer, S., Aydın, E. ve Gencer, H.** BİNALARDA YAPISAL SAĞLIK TAKİBİ İÇİN CİHAZLANDIRMA YÖNTEMLERİ.
- [26] **Paikowsky, S.G.** (2004). *Load and resistance factor design (LRFD) for deep foundations*, cilt507, Transportation Research Board.
- [27] **Yiğit, C.Ö.** (2010). Yüksek yapıların farklı sensörler ile tam ölçekli izlenmesi ve dinamik parametrelerin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [28] **Brincker, R. ve Ventura, C.** (2015). *Introduction to operational modal analysis*, John Wiley & Sons.
- [29] **UMUDUM, A.** (2014). YAPI SİSTEMLERİNDE ÖZDEĞER PROBLEMİ ve ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ, *Doktora Tezi*.
- [30] **Nour-Omid, B. ve Clough, R.W.** (1984). Dynamic analysis of structures using Lanczos co-ordinates, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 12(4), 565–577.
- [31] **Hiller, J.F., De, S. ve Bathe, K.** (2000). On the state-of-the-art of finite element procedures and a meshless technique, *Computational mechanics for the twenty-first century (Leuven, 6-8 September 2000)*, s.23–49.
- [32] **Chandrupatla, T.R., Belegundu, A.D., Ramesh, T. ve Ray, C.** (2002). *Introduction to finite elements in engineering*, cilt 2, Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

- [33] **Madenci, E. ve Guven, I.** (2015). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*, Springer.
- [34] **Chapra, S.C. ve Canale, R.P.** (2003). Mühendisler için sayısal yöntemler, *Literatür Yayıncılık, İstanbul*.
- [35] **Kasumov, A.A.** (2000). *Elastisite teorisi: ve uzay çubuk, membran, plak kabuk, solid sistemlerin yapı statikği*, Beta.
- [36] **Gould, P.L. ve Feng, Y.** (1994). *Introduction to linear elasticity*, Springer.
- [37] **Aydoğan, M. ve Omurtag, M.** (2005). The finite element method: lecture notes, *İTÜ, İstanbul*.
- [38] **Karagülle, H.** (2002). Sistem Modelleme ve Analizi, *Demfo, Bornova-İzmir*.
- [39] **YAY, P.T.V.** (2006). MAKİNE TEKNOLOJİSİ.
- [40] **Spacone, E., Ciampi, V. ve Filippou, F.C.** (1992). *A beam element for seismic damage analysis*, Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA.
- [41] **Wu, S.R.** (2006). Lumped mass matrix in explicit finite element method for transient dynamics of elasticity, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195(44-47), 5983–5994.



EKLER

EK A : Tasarım Dökümanları

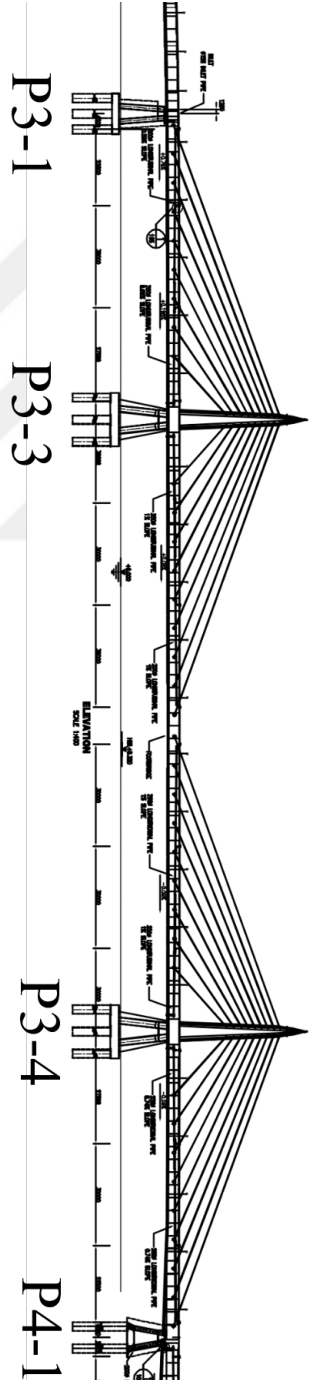
EK B : Saha Çalışmaları

EK C : Tez Sonuçları

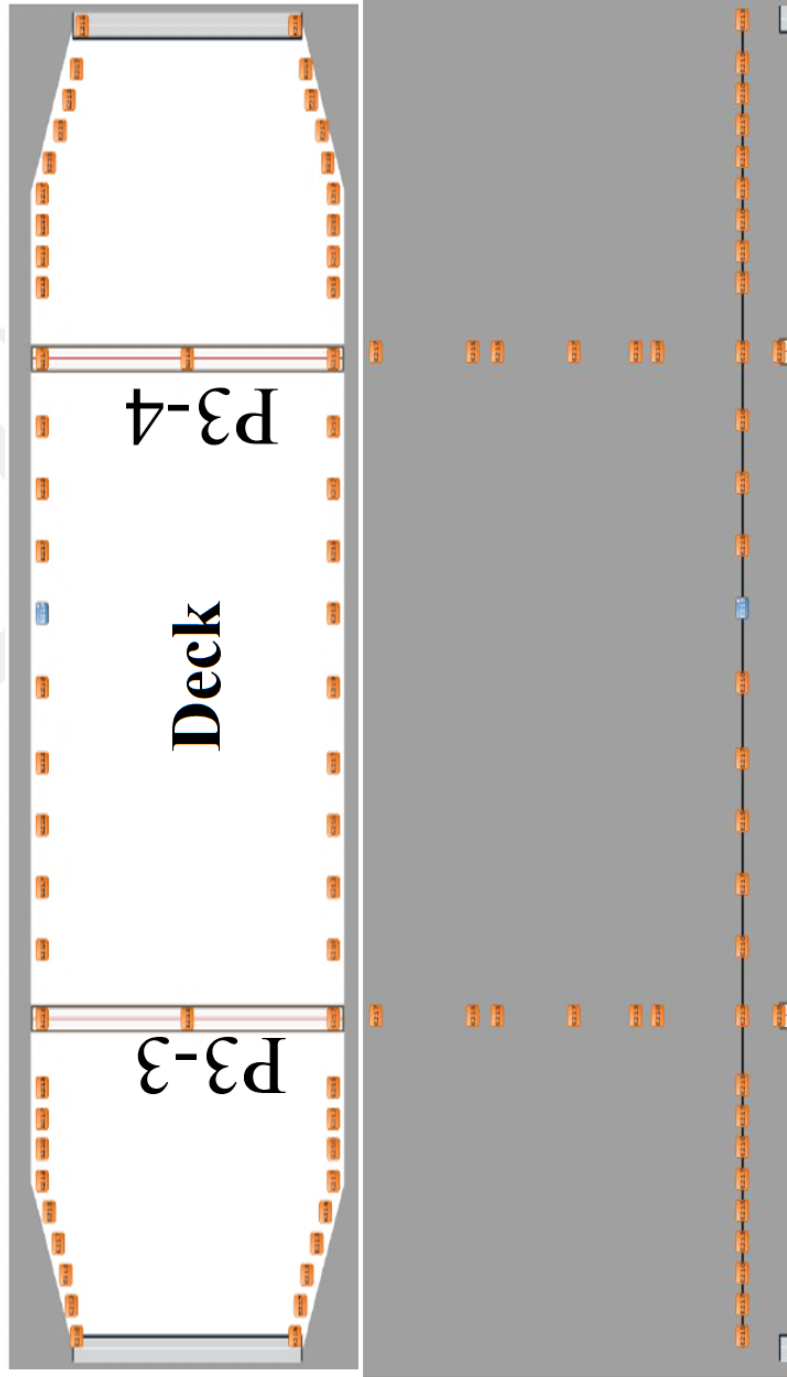




Ek A: Tasarım Dökümanları



Şekil A.1 : HMK genel görünüm [3].



Şekil A.2 : HMK genel enstrüman yerleşimi [8].

Single-Span Bridge



Çizelge A.1 : P2-2 gerilme kontrol değerleri [3].

specified yield strength of the steel	F_y	345	Mpa	composite column constants	C_1	1,00
specified yield strength of reinforcement	F_{yr}	420	Mpa	composite column constants	C_2	0,85
modulus of elasticity of the steel	E	200	GPa	composite column constants	C_3	0,40
specified compressive strength of the concrete	f'_c	35	MPa	effective length factor	k	1,20
resistance factor for tension	Φ_y	0,95		group effect factor	gf	1,16
resistance factor for compression	Φ_c	0,80				
resistance factor for flexure	Φ_f	1,00				

Çizelge A.2 : P3-1 gerilme kontrol değerleri [3].

specified yield strength of the steel	F_y	345	Mpa	composite column constants	C_1	1,00
specified yield strength of reinforcement	F_{yr}	420	Mpa	composite column constants	C_2	0,85
modulus of elasticity of the steel	E	200	GPa	composite column constants	C_3	0,40
specified compressive strength of the concrete	f'_c	35	MPa	effective length factor	k	1,20
resistance factor for tension	Φ_y	0,95		group effect factor	g_f	1,16
resistance factor for compression	Φ_c	0,80				
resistance factor for flexure	Φ_f	1,00				

Çizelge A.3 : P3-3 gerilme kontrol değerleri [3].

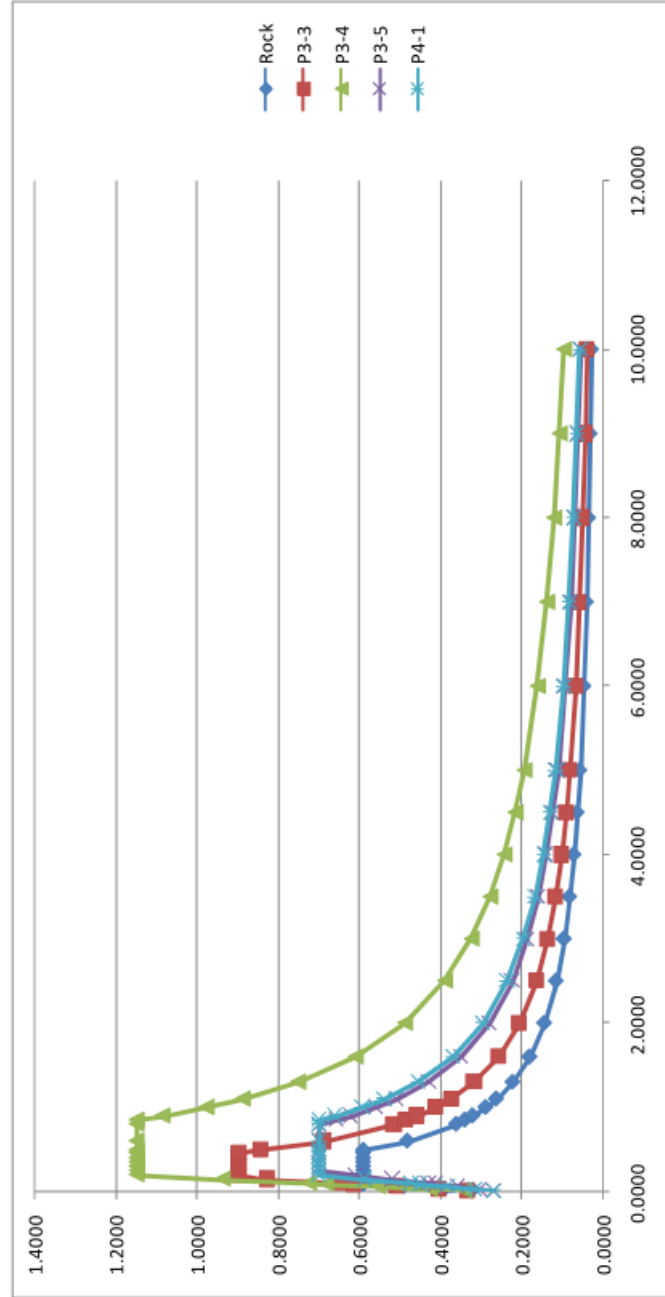
specified yield strength of the steel	F_y	345	Mpa	composite column constants	C_1	1,00
specified yield strength of reinforcement	F_{yr}	420	Mpa	composite column constants	C_2	0,85
modulus of elasticity of the steel	E	200	GPa	composite column constants	C_3	0,40
specified compressive strength of the concrete	f'_c	35	MPa	effective length factor	k	1,20
resistance factor for tension	Φ_y	0,95		group effect factor	g_f	1,16
resistance factor for compression	Φ_c	0,80				
resistance factor for flexure	Φ_f	1,00				

Çizelge A.4 : P3-4 gerilme kontrol değerleri [3].

specified yield strength of the steel	F_y	345	Mpa	composite column constants	C_1	1,00
specified yield strength of reinforcement	F_{yr}	420	Mpa	composite column constants	C_2	0,85
modulus of elasticity of the steel	E	200	GPa	composite column constants	C_3	0,40
specified compressive strength of the concrete	f'_c	35	MPa	effective length factor	k	1,20
resistance factor for tension	Φ_y	0,95		group effect factor	g_f	1,16
resistance factor for compression	Φ_c	0,80				
resistance factor for flexure	Φ_f	1,00				

FEE Earthquake :

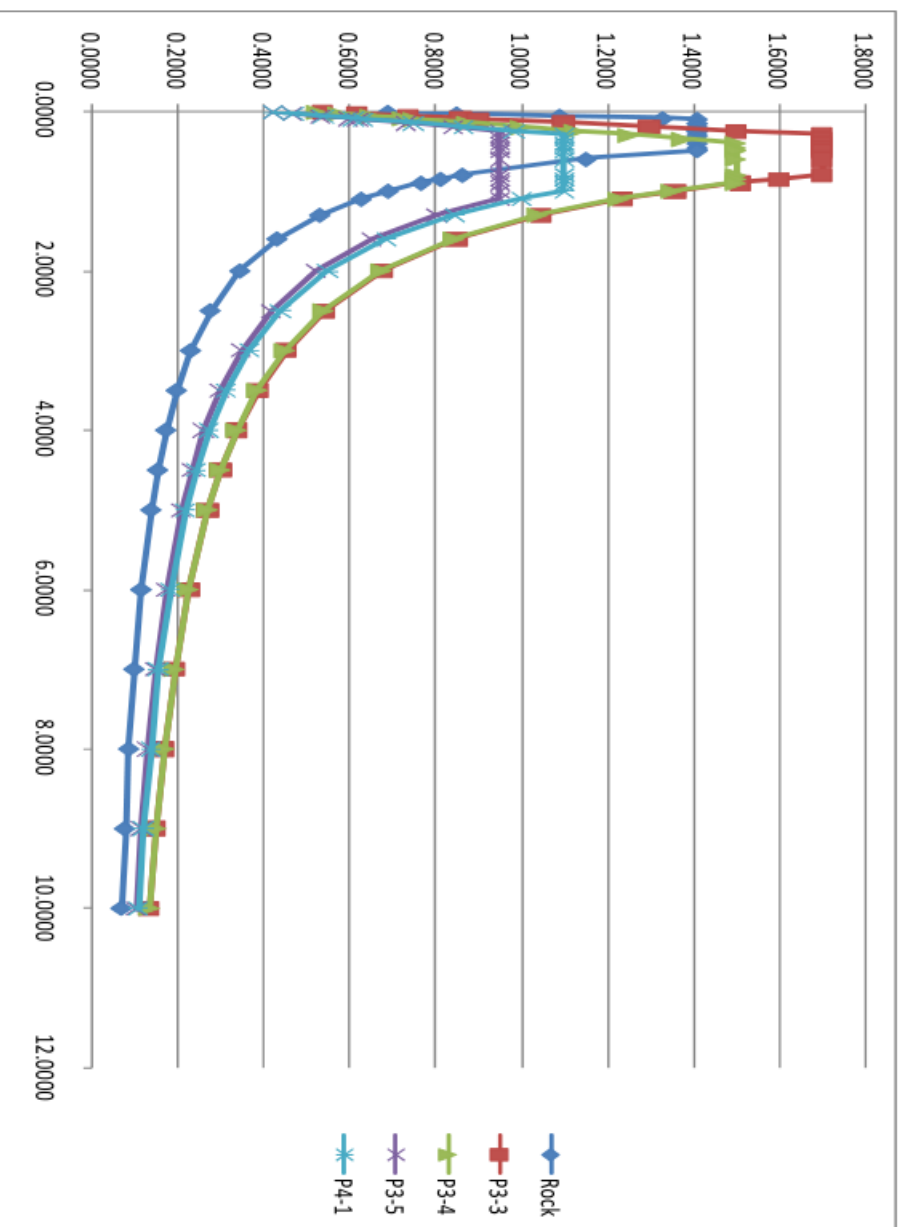
	Rock	P3-3	P3-4	P3-5	P4-1
PGA (g)	0.29	0.30	0.30	0.25	0.25
T₀ (s)	0.09	0.17	0.20	0.25	0.20
T_s (s)	0.49	0.46	0.85	0.80	0.85
S_{DS} (s)	0.59	0.90	1.15	0.70	0.70
S_{D1} (s)	0.27	0.77	0.92	0.60	0.60



Şekil A.4 : FEE depremi response spectrum [2].

SEE Earthquake :

	Rock	P3-3	P3-4	P3-5	P4-1
PGA (g)	0.61	0.50	0.50	0.40	0.40
T_0 (s)	0.10	0.30	0.40	0.25	0.30
T_s (s)	0.49	0.80	0.90	1.10	1.00
S_{DS} (s)	1.41	1.70	1.50	0.95	1.10
S_{D1} (s)	0.69	1.36	1.35	1.05	1.10



Şekil A.5 : SEE depremi response spectrum [2].



Ek B: Saha Çalışmaları



Şekil B.1 : Geçici sensör - saha çalışmaları 1 [8].



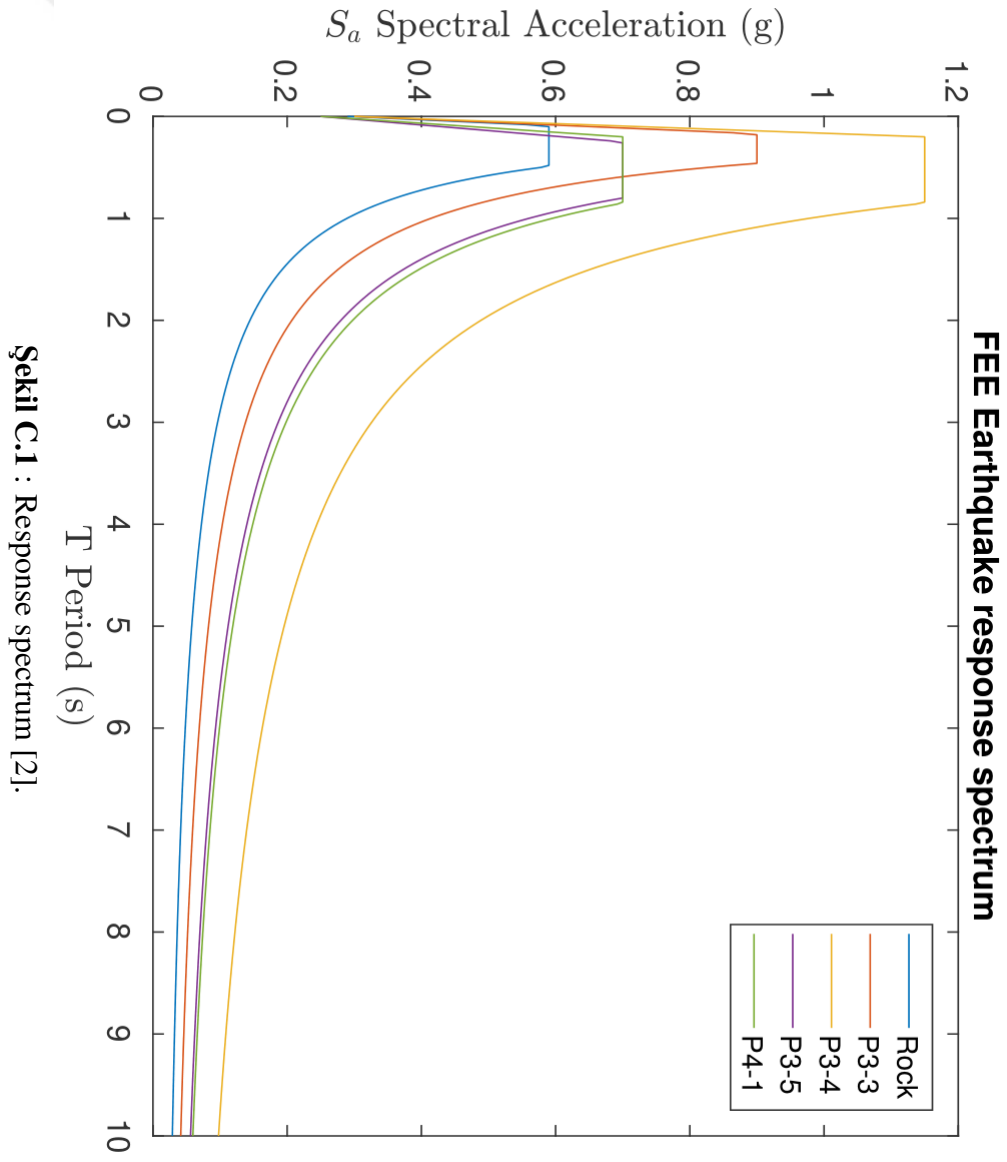
Şekil B.2 : Geçici sensör izlemesi - saha çalışmaları 2 [8].



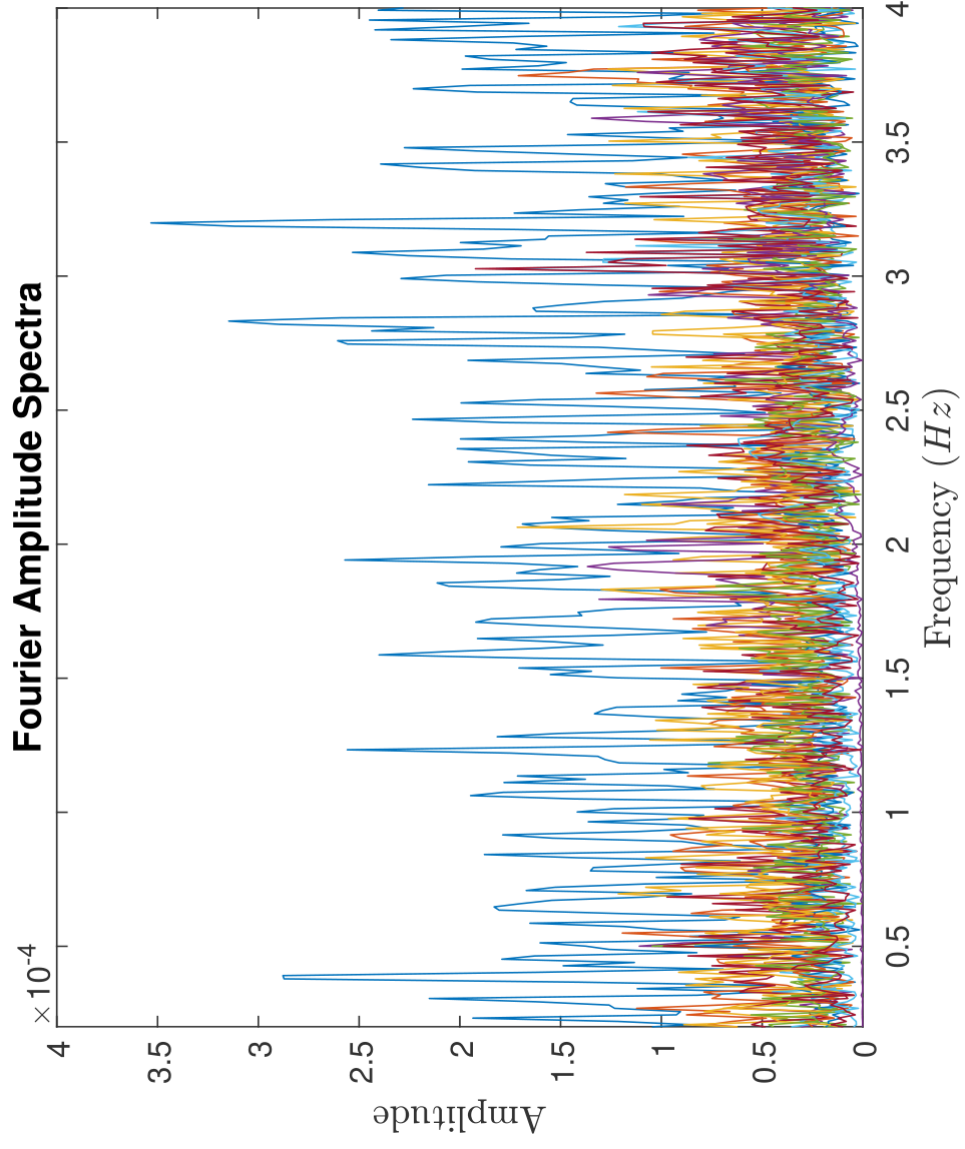
Şekil B.3 : Geçici sensörler - saha çalışmaları 3 [8].



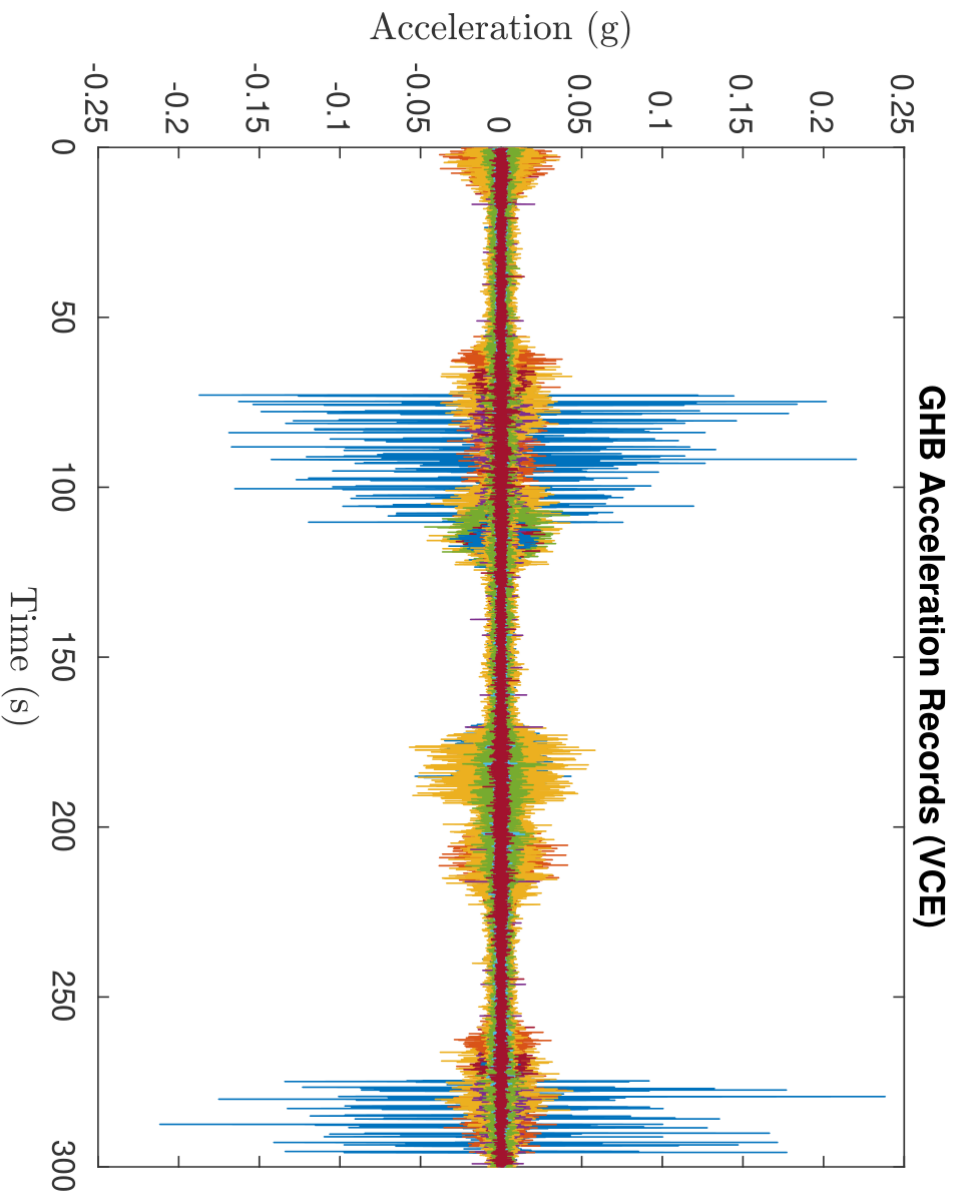
Ek C: Tez Sonuçları



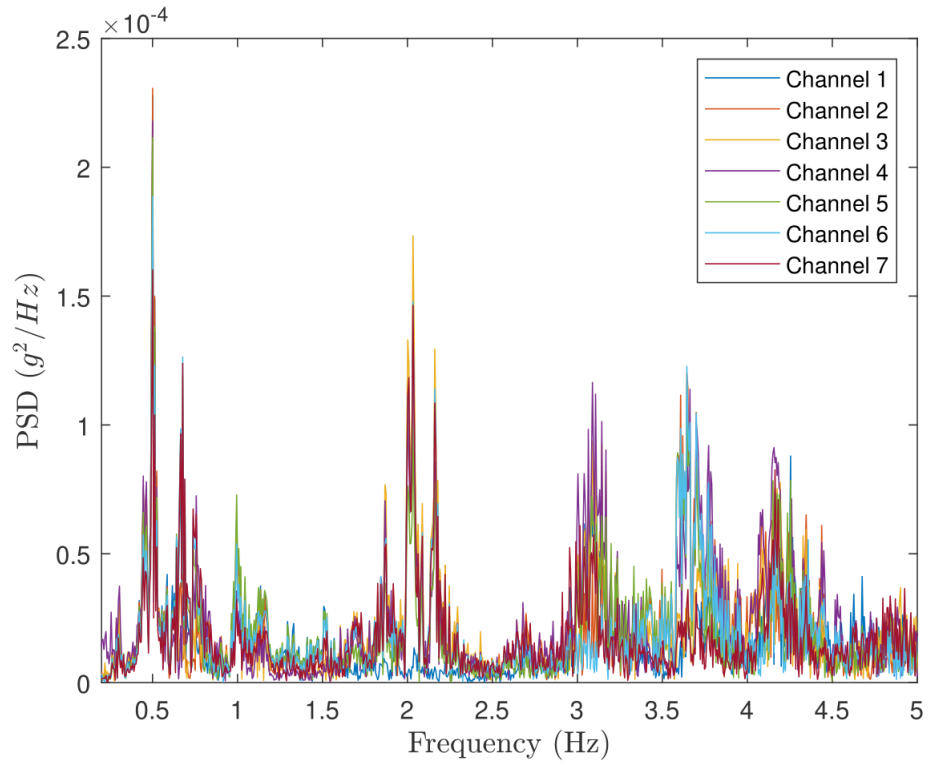
Şekil C.1 : Response spectrum [2].



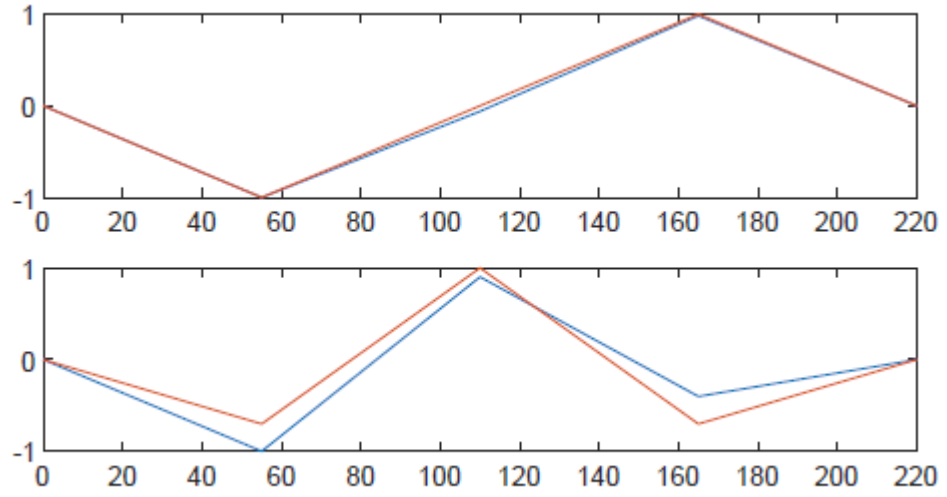
Şekil C.3 : Fourier analizleri [11].



Şekil C.2 : Köprü ivme kayıtları [11].



Şekil C.4 : Forier analizleri [11].



Şekil C.5 : Mod şekli karşılaştırmalı [11].



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ömer Galip Pınar

Doğum Tarihi ve Yeri: 1988, Erzincan

E-Posta: pinarom@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise:** 2006, Erzincan Nevzat Ayaz Fen Lisesi
- **Lisans:** 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİMLER:

- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Yol Bakım ve Onarım Daire Başkanlığı, Avrupa Yakası Teknik Ofis Şef Yardımcısı 2013-2014
- Şile Belediyesi, İmar ve Şehircilik Müdürlüğü, Müdür Yardımcısı 2014-2017
- Şile Belediyesi, Fen İşleri Müdürlüğü, Fen İşleri Müdürü 2017-

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Temur, E., Pınar, Galip, Ö., Erkuş, B., Çağlayan, Özden, B., 2017, Haliç Köprüsü Sağlık İzleme Sisteminin Geliştirilmesi, *7.Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu - Gaziantep*