



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİSANSÜSTÜ

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FATİH SULTAN MEHMET ASMA KÖPRÜSÜNÜN DEPREM VE TAŞIT
YÜKLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

APAER MUBULI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ YAPI ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. BARIŞ SEVİM**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FATİH SULTAN MEHMET ASMA KÖPRÜSÜNÜN DEPREM VE TAŞIT
YÜKLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

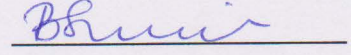
Apaer MUBULI tarafından hazırlanan tez çalışması 07.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

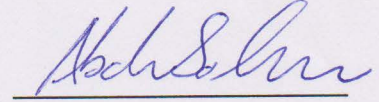
Doç. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

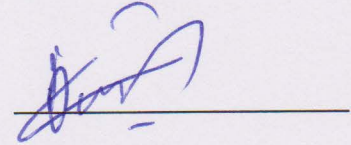
Doç. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Abdurrahman ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Barlas ÇAĞLAYAN
İstanbul Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışmada, İstanbul'da bulunan Kavacık ile Hisarüstü arasında, Asya ile Avrupa'yı bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışı deprem ve taşıt yükleri altında Sonlu Eleman yöntemiyle incelenmiştir.

Bu tez çalışması için değerli vaktini ayıran, bana fikir veren ve yol gösteren Saygıdeğer Hocam Doç. Dr. Barış SEVİM'E teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmamda bana yardım eden, bilgisini paylaşan Yapı Proje Uygulama İnşaat Taahhüt Nakliyat LTD. Şirket'in çalışanlarından Yük. İnş. Müh. Aliruzi ÖZUYGUR'A, Saygıdeğer jüri üyelerinden Doç. Dr. Abdurrahman ŞAHİN ve Yrd. Doç. Dr. Barlas ÇAĞLAYAN'A ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bugünlere gelmemde desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve daima yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

Nisan, 2016

Apaer MUBULI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	10
2.1 Asma Köprülerin Tarihsel Gelişimi	10
2.1.1 Avrupa Asma Köprüleri.....	11
2.1.2 Amerika Asma Köprüleri.....	13
2.1.3 Japonya Asma Köprüleri	16
2.1.4 Türkiye Asma Köprüleri	18
2.2 Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları.....	21
2.2.1 Kuleler.....	21
2.2.2 Ankrajlar	22
2.2.3 Ana Kablolar ve Askı Halatlar.....	23
2.2.4 Tabliyeler	24
BÖLÜM 3	
ASMA KÖPRÜLERİN TEORİK ANALİZİ	27

3.1	Asma Köprülerin Hesap Analiz Teorisi	27
3.1.1	Elastik Teori (19. Yüzyılın Sonu - 20. Yüzyılın Başları).....	27
3.1.2	Defleksiyon Teorisi	28
3.1.3	Sonlu Eleman Yöntemi.....	29
3.2	Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler.....	30
3.2.1	Kendi Ağırlığı	31
3.2.2	Trafik Yükleri	31
3.2.3	Sıcaklık Etkileri	32
3.2.4	Rüzgâr Etkileri	32
3.2.5	Deprem Yükleri	34
3.2.6	Tasarım Yük Kombinasyonları ve Sınır Durumları	34
3.3	Serbest Titreşim Analizi ve Modal Davranış	36
3.3.1	Davranış Spektrumu Analizi.....	39
3.3.2	Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analizi 40	

BÖLÜM 4

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜNÜN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ		44
4.1	Giriş	44
4.2	Büyük Açıklık Asma Köprülerin Dinamik Özellikleri	44
4.2.1	Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.....	44
4.2.2	Köprü Modal Analizi	47
4.3	FSM Köprüsünün Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Deprem Performansının Belirlenmesi	52
4.3.1	Hedeflenen Performans Düzeyi ve Kullanılan Deprem Düzeyleri	53
4.3.2	Deprem Yükleri	53
4.3.3	Deprem Düzeyleri	53
4.3.4	TDY 2007'ye Göre Spektral İvme Katsayısının Belirlenmesi.....	54
4.3.5	Bölgeye Özel Tasarım Spektrumu ve Deprem Kayıtlarının Elde Edilmesi.....	55
4.4	Deprem İvme Kayıtların Köprü Yapısına Etkileri	62
4.4.1	Boyuna Doğrultudaki İvme Kayıtlara Göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sismik Tepkisi	65
4.4.2	Enine Doğrultudaki İvme Kayıtlara Göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sismik Tepkisi	71

BÖLÜM 5

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜNÜN TAŞIT YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ		78
5.1	Giriş	78
5.2	Trafik Yüklemeleri	78
5.3	Hareketli Yük Modeli.....	80
5.4	Asma Köprülerin Taşıtlı Yükleri Altında Dinamik Analizi.....	82
5.4.1	Asma Köprülerin Yapısal Hesabı	82
5.4.2	Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sonlu Eleman Modeli	84

5.4.3	Hareketli Y¼kler Altındaki Dinamik Tepki Hesabı	84
5.5	Taşıt Y¼kleme Koşulları	85
5.5.1	Çeşitli Koşullarda Yapılan Analizler ve Sonuçlar	85
5.5.1.1	Çalışma Koşulu 1: Tek Aracın K¼pr¼ Orta şerit Geçişi.....	85
5.5.1.2	Çalışma Koşulu 2: Bir Grup Konvoyun Tek Y¼nl¼ (Avrupa-Asya Gidiş Y¼n¼) Geçişi.....	88
5.5.1.3	Çalışma Koşulu 3: İki Grup Konvoyun (Avrupa-Asya Geçiş Y¼n¼) (Asya-Avrupa Geçiş Y¼n¼) Karşılıklı Olarak K¼pr¼ Geçişleri.....	90
5.5.1.4	Çalışma Koşulu 4: 2014 Yılı Gişelerden Geçiş Yapan Gerçek Araç (Hsn-44-1 Araç Tipi) Sayısına G¼re, Farklı Hızlardaki K¼pr¼ Orta şerit Geçişi	91
5.5.1.5	Çalışma Koşulu 5: 50 Ton'luk Aracın Farklı Hızlarda K¼pr¼ Orta şerit Geçişi	94
5.5.1.6	Çalışma Koşulu 6: 60 Km/h Hızında Farklı Ağırlıklardaki Araç Geçişileri.....	96
B¼L¼M 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		
KAYNAKLAR.....		101
ÖZGEÇMİş.....		107

SİMGE LİSTESİ

A	Harmonik hareketin genliği
A_0	Etkin yer ivmesi katsıyısı
A_j	J'nci açısal frekanstan meydana gelen genlik vektörü
A_{ij}	İ'nci düğüm noktasında j numaralı açısal frekanstan meydana gelen genlik
$A(T)$	Spektral ivme katsıyısı
α_0	Faz açısı
α	Rayleigh faktörü
β	Rayleigh faktörü
C	Yatay, düşey ve eğik yüzeylerdeki farklı dış basınç değeri için belirlenen basınç katsıyısıdır
$[C]$	Sönüm matrisi
DC	Ölü yük bileşimleri ve ekleri
E	Malzeme elastik modülü
EQ	Deprem yükü
E_{eq}	Kablonun dönüşmüş elastik modülü
F	Eleman yükü
F_{α}, F_v	Kısa periyot zemin katsıyısı
G	Yükseklığe bağlı olarak hesaplanan rüzgâr tepki katsıyısı
g	Yerçekimi ivmesi
I	Bina önem katsıyısı
K	Rüzgâr hız basınç katsıyısı
$[K]$	Sistem rijitlik matrisi
K_G	Toplam geometrik rijitlik matrisi
K_E	Toplam standart elastik rijitlik matrisi
L	Eleman uzunluğu
LL	Hareketli Yükler
l	Kablo akor uzunluğunun yatay yöndeki izdüşüm uzunluğu
$[M]$	Sistem kütle matrisi
p	Havanın yoğunluğu
P_e	Yapı yüzeylerine etkiyen rüzgâr kuvveti (KN/m ²)
$q_i(t)$	İ'nci titreşim tek serbestlik denklem sonucu
$S(T)$	Spektral katsıyısı

S_{α}	Tasarım Spektrumu
S_{MS}	Kısa periyot tepki spektrumu ivme parametresi
S_{M1}	1 sn. periyodunda tepki spektrumu ivme parametresi
S_S, S_1	Kısa periyotlar
S_n	Saniye
T	Bina doğal periyotu
TU	Sıcaklık değişimi
T_A, T_B	Spektrum karakteristik periyotlar
t	Zaman
$\{u\}$	Rölatif yerdeğiştirme vektörü
$\{u(t)\}$	Yerdeğiştirme
$\{\ddot{u}\}$	İvme vektörü
V	Rüzgâr hızı (km/saat)
WS	Rüzgâr yükü
ω	Doğal frekans
ω_n	Doğal açısal frekans
δ_0	Doğal modlar
σ	Kablo gerilimi
γ	Kablo kütle yoğunluğu
γ_p	Yük faktörleri
φ	Hareketli yük titreşim katsayısı
Φ_i	İ'nci titreşim mod şekli
ξ_i	İ'nci titreşim temel periyotu
ξ_n, ξ_m	Modal sönüm oranları

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
K.G.M.	Karayolları Genel Müdürlüğü
Temp	Temperature (Sıcaklık)
SAP 2000	Structural Analysis Program
DBE	Design Basis Earthquake
MCE	Maximum Considered Earthquake

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Asma köprünün kısımları	10
Şekil 2. 2 Menai asma köprüsü.....	11
Şekil 2. 3 Clifton asma köprüsü	12
Şekil 2. 4 Forth köprüsü.....	12
Şekil 2. 5 Severn asma köprüsü	13
Şekil 2. 6 Jacobs Creek köprüsü.....	14
Şekil 2. 7 New York Esat nehri Üzerindeki Brooklyn köprüsü	14
Şekil 2. 8 New York George Washington köprüsü.....	14
Şekil 2. 9 Golden Gate asma köprüsü.....	15
Şekil 2. 10 Kojima-Sakaide güzergahındaki Bisan Seto köprüleri.....	16
Şekil 2. 11 İnnoshima asma köprüsü	17
Şekil 2. 12 Shimotusi asma köprüsü	17
Şekil 2. 13 Akashi Boğazi asma köprüsü	18
Şekil 2. 14 Boğaziçi asma köprüsü	19
Şekil 2. 15 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsü	19
Şekil 2. 16 Yavuz Sultan Selim asma köprüsü	20
Şekil 2. 17 İzmit Körfez asma köprüsü	20
Şekil 2. 18 Asma köprü kule kesitleri (a) Kefes şekilli kule; (b) Rijit çerçeve şekilli kule; (c) Kafes-Rijit çerçeve bileşik şekilli kule; (d) H şekilli kule	21
Şekil 2. 19 Ankraj türleri (a) Ağırlık Ankraj; (b) Tünel Ankraj.....	22
Şekil 2. 20 Asma köprü kablo tipleri	23
Şekil 2. 21 Tabliye kirişleri	24
Şekil 4. 1 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsünün genel düzenlenmesi	45
Şekil 4. 2 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsü üç boyutlu modeli.....	47
Şekil 4. 3 FSM köprüsü'nün dinamik karakteristikleri	51
Şekil 4. 4 Elastik tasarım ivme spektrumu (TDY 2007)	54
Şekil 4. 5 İstanbul il'inin deprem bölge haritası (TDY 2007)	54
Şekil 4. 6 Bölgeye ait spektral ivme değerleri	57
Şekil 4. 7 USGS sitesindeki spektral ivme değerleri	58
Şekil 4. 8 Tasarım spektrumu	58
Şekil 4. 9 Tasarım ivme spektrumları	59
Şekil 4. 10 Karşılaştırmalı D3 Spektrumu; (a) 0 derece; (b) 90 derece.....	61
Şekil 4. 11 Karşılaştırmalı D2 Spektrumu; (a) 0 derece; (b) 90 derece.....	62
Şekil 4. 12 D3 Spektrumuna uyumlu hale getirilmiş deprem kayıtları	64

Şekil 4. 13	Avrupa yakası Güney-Kuzey kule U1 yerdeğiştirmeleri	64
Şekil 4. 14	Avrupa yakası Güney-Kuzey kule U2 yerdeğiştirmeleri	64
Şekil 4. 15	Asya yakası Güney-Kuzey kule U1 yerdeğiştirmeleri	65
Şekil 4. 16	Asya yakası Güney-Kuzey kule U2 yerdeğiştirmeleri	65
Şekil 4. 17	Avrupa yakası kule yatay yerdeğiştirmeleri	66
Şekil 4. 18	Asya yakası kule yatay yerdeğiştirmeleri	66
Şekil 4. 19	Avrupa yakası kule eğilme momentleri (3-3).....	66
Şekil 4. 20	Asya yakası kule eğilme momentleri (3-3).....	66
Şekil 4. 21	Avrupa yakası kule normal kuvvetleri(P)	66
Şekil 4. 22	Asya yakası kule normal kuvvetleri(P)	66
Şekil 4. 23	Avrupa yakası kule kesme kuvvetleri(V3)	67
Şekil 4. 24	Asya yakası kule kesme kuvvetleri(V3)	67
Şekil 4. 25	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	67
Şekil 4. 26	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	68
Şekil 4. 27	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	68
Şekil 4. 28	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	69
Şekil 4. 29	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	69
Şekil 4. 30	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	70
Şekil 4. 31	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	70
Şekil 4. 32	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi	71
Şekil 4. 33	Avrupa yakası kule U2 yerdeğiştirmeleri	72
Şekil 4. 34	Asya yakası kule U2 yerdeğiştirmeleri	72
Şekil 4. 35	Avrupa yakası kule eğilme momentleri (2-2).....	72
Şekil 4. 36	Asya yakası kule eğilme momentleri (2-2).....	72
Şekil 4. 37	Avrupa yakası kule burulma momentleri	72
Şekil 4. 38	Asya yakası kule burulma momentleri.....	72
Şekil 4. 39	Avrupa yakası kule kesme kuvvetleri (V2)	73
Şekil 4. 40	Asya yakası kule kesme kuvvetleri (V2)	73
Şekil 4. 41	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	73
Şekil 4. 42	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	74
Şekil 4. 43	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	74
Şekil 4. 44	Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	75
Şekil 4. 45	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	75

Şekil 4. 46	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi.....	76
Şekil 4. 47	Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	76
Şekil 4. 48	Kocaeli Gebze 1161 deprem için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi	77
Şekil 5. 1	HS20-44 kamyonu	79
Şekil 5. 2	Taşıt yükünün üçgen yük simülasyonu	81
Şekil 5. 3	Fatih Sultan Mehmet köprüsü sonlu eleman modeli	84
Şekil 5. 4	Köprü tabliyesinin her bölümünün plan görünümü	85
Şekil 5. 5	50 Tonluk tek aracın orta şerit geçişi	86
Şekil 5. 6	Çalışma koşulu 1'deki P=50 tonluk aracın yerdeğiştirmeleri	87
Şekil 5. 7	Çalışma koşulu 1'deki P=150 tonluk aracın yerdeğiştirmeleri.....	88
Şekil 5. 8	50 Tonluk 12 aracın 30.5 m aralıklı Avrupa-Asya yönü geçişleri	88
Şekil 5. 9	Çalışma koşulu 2'deki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri.....	89
Şekil 5. 10	İki grup konvoyların Avrupa-Asya ve Asya-Avrupa yönü geçişleri.....	90
Şekil 5. 11	Çalışma koşulu 3'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri	91
Şekil 5. 12	3 Sn aralıklı araçların orta şerit geçişleri	92
Şekil 5. 13	Çalışma koşulu 4'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri	94
Şekil 5. 14	50 Tonluk aracın farklı hızlarda oluşturduğu yerdeğiştirmeleri.....	95
Şekil 5. 15	Farklı tonajlardaki araçların 60 km/h hızda oluşturduğu yerdeğiştirmesi..	97

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	TCK yol köprüleri teknik şartnamesi'ne göre taşıt yük sınıfları..... 32
Çizelge 3. 2	Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri 34
Çizelge 3. 3	AASHTO-LRFD Seçilen yük kombinezonu sınır durumu ve yük faktörü .. 35
Çizelge 3. 4	AASHTO-LRFD Sabit yükler için yük faktörleri 35
Çizelge 4. 1	Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün malzeme özellikleri 46
Çizelge 4. 2	Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün kesit özellikleri 46
Çizelge 4. 3	Yer hareketi kayıtlarına dayanarak elde edilen deprem kayıtları 60
Çizelge 5. 1	Hareketli yük azaltma kat sayısı (AASHTO-LRFD 3.6.1.1.2-1)..... 80
Çizelge 5. 2	Farklı hızlardaki zaman tanımı..... 81
Çizelge 5. 3	Çalışma koşulu 1'deki P=50 tonluk aracın düşey yerdeğiştirmeleri..... 86
Çizelge 5. 4	Çalışma koşulu 1'deki P=150 tonluk aracın düşey yerdeğiştirmeleri..... 86
Çizelge 5. 5	Çalışma koşulu 2'deki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri 89
Çizelge 5. 6	Çalışma koşulu 3'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri..... 90
Çizelge 5. 7	Çalışma koşulu 4'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri..... 92
Çizelge 5. 8	2013-2014 Yılı itibariyle araç sınıflarına göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünden geçen araç sayısı ve oranları (Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü)..... 92
Çizelge 5. 9	2014 Yılı Fatih Sultan Mehmet köprüsü saatlik araç geçişleri(OGS) 93
Çizelge 5. 10	Çalışma koşulu 5'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri..... 95
Çizelge 5. 11	Çalışma koşulu 6'daki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri 96

FATİH SULTAN MEHMET ASMA KÖPRÜSÜNÜN DEPREM VE TAŞIT YÜKLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Apaer MUBULI

İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı Yapı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Barış SEVİM

Son zamanlarda devlet ulusal ekonomisinin hızlı gelişimi, trafik ve ulaşım gelişmeleri ile büyük açıklıklı köprülerin yapımı gün geçtikçe artmaktadır. Asma köprüler ana kablo ve halatlar vasıtasıyla yapı taşıma özelliklerine sahip olduğundan büyük açıklıkların aşılmasında diğer köprü türü yapı taşıyıcı sistemlere göre üstün yapı tekniğe sahip olduğundan tasarımcılar tarafından çok tercih edilmektedir.

Büyük açıklıklı asma köprülerin dinamik özellikleri köprü titreşim analizlerinin temelidir. Asma köprüler açıklığın artmasıyla köprü yapısı daha hafifleyen, esnekliği daha büyüyen, güçlü doğrusal olmayan faktörler etkisine sahip bir kablo sistemi içeren köprü yapısıdır. Bu tür köprülerin ana taşıyıcı unsurları eğik kablo, askı halatı ve kule olup, bu unsurlar içinde kule köprü'nün bütün ağırlıklarını hatta araç, rüzgâr vb. diğer dış yükleri taşımaktadır. Asma köprüler deprem yükleri, rüzgâr yükleri, taşıt hareketli yükleri ve benzer dinamik uyarılara yüksek hassasiyet göstermekte olup, geometrik doğrusal olmayan davranışı daha belirgin, köprü inşaatındaki statik ve dinamik özellik etkileri daha karmaşıktır. Dolayısıyla asma köprülerin dinamik özellikleri köprü tasarımındaki en önemli kontrol adımlarının biridir. Bu tür köprülerin dinamik özellik analizlerinde, ilk olarak statik denge konumunun ve iç kuvvet durumunun belirlenmesi, daha sonra dinamik analizlerin belirlenmesi gerekir ve bu analizler diğer köprü yapı sistemlerinden çok farklı olduğundan, bu alanlarda konu ile ilgili araştırmaların yapılması her zaman çok önemli olmuştur.

Bu tez çalışmasında, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışı, kendi ağırlığı, deprem yükleri ve taşıt yükleri altında belirlenmesi incelenmiştir. Ana kablo, askı halat ve kule elemanlarının ilk gerilme kuvvetleri ayarlanarak, Sonlu Elemanlar Programı SAP 2000 ile üç boyutlu modeli oluşturulmuştur ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, farklı sayıda deprem kaydı altında ve bu kayıtların ortalaması dikkate alınarak yapılmıştır. Hareketli taşıt yükleri her şeritte farklı sayı ve hızda araçların geçirilmesiyle temsil edilmiş ve zaman bağılı dinamik analizler yapılmıştır. Çalışmada, Hem depremim hem de taşıt yüklerinin etkisinde, köprü temel elemanlarında elde edilen kesit etkileri ve yerdeğiştirmeleri grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Farklı deprem ivme kayıtlarının ve farklı taşıt hızlarının köprü'nün dinamik davranışını önemli ölçüde etkilediği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asma köprüler, Sonlu Elemanlar Yerdeğiştirme Yöntemi, Statik Analizi, Model Analizi, Deprem Analizi, Hareketli Taşıt Yük Analizi



**DETERMINING THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF FATİH SULTAN
MEHMET SUSPENSION BRIDGE UNDER EARTHQUAKE LOADS AND
VEHICLE LOADS**

Apaer MUBULI

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Doç. Dr. Barış SEVİM

In recent years, following the rapid development of the national economy and the advancement of communication and transportation, the construction of Long -Span Suspension Bridges has been increasing gradually.

Long-Span Suspension Bridges are greatly preferred by engineering designers rather than other bridges equipped with construction supporting systems, not only for economic reasons, but also Long-Span suspension bridges are in the possession of advanced construction techniques when we deal with long distances, for Long-Span suspension bridges acquire supporting constructions features rigged with main cables and ropes.

The dynamic features of Long-Span Suspension Bridges are the foundation of the vibration analysis of bridges. Long-Span suspension bridges are the bridge constructions with cable systems which include and under strong nonlinear factor effects, which in the more the suspension increases, the more the bridges construction lightens, and the more the flexibility grows. The main elements of carrying and supporting such bridges are deck sistem , H tower with suspension cables etc.; Among those factors, The H tower with suspension cables supports the total weight of bridges, even it supports the weight of vehicles, winds, and other heavy loads.

Therefore the safety of bridges is higher than other bridge types. It displays strong sensitivity to earthquake, heavy-loaded moving vehicles and other similar impulse and the geometric nonlinear reaction is more apparent. The effects of static and dynamic features in bridge construction are more complicate, therefore the properties of Long-Span suspension bridges in bridge design is one of the most vital control steps. In analysis of dynamic features of such types of bridges, first of all, the static equilibrium position and internal force states should be specified; then, dynamic analysis, is totally different from other bridges construction systems, need to be ascertained. Hence, it maintains great importance in doing researches in this filed. In this study, Fatih Sultan Mehmet Bridge project analysis is used as a base, and some important researches are carried out on the basis of previous studies and the analysis of the dynamic features of Long-Span suspension bridges.

On the basis of partial catenary theory, the calculation of suspension bridge main cables is established in interactive form, the calculation of saddle point of tower peak is done through linear correlation analysis. At the end of programming, the calculation of suspension bridge cable form is achieved by using analytic methods. The space model is created being used finite element program SAP2000, through utilizing the first strain of main cables, suspension ropes and tower and finite elements numerical simulation is carried out as well. By increasing the loads and speed of the different means of vehicles in different form, analysis is performed on both static and dynamic effect on those different situations. At the same time, under the effects of earthquake load, the effects of different dynamic moving loads on bridge construction systems are analyzed.

The investigation of dynamic features of suspension bridges, not only does it provide scientific base for the engineering designers, but also it provides base for strengthening designated bridges, therefore it is of most important practical significance.

Keywords: Suspension Bridges, Finite Element Displacement Method, Static Analysis, Model Analysis, Seismic Analysis, Moving Load Analysis

1.1 Literatür Özeti

Asma köprüler çekme kuvvete maruz bırakılan ana taşıyıcı kablolar vasıtasıyla köprü yapısında oluşan taşıyıcı yükleri askı çubuklar yardımıyla ana kabloya, ana kablolardan ankraj ve kule temeline iletilen bir köprü yapı sistemi olup, ana kablo, kule, ankraj, askı çubuğu, köprü tabliye giriş elemanlarından oluşan köprü kısımları içermektedir. Asma köprülerin büyük açıklıkların aşılma yeteneğinin yüksek olması, hafif köprü yapısı ve dış görünümün estetik güzellik nedenlerinden dolayı diğer köprü yapı sistemlerine göre çok tercih edilmektedir. Ayrıca yapımı sırasında kullanılan malzemelerin azlığı, inşaat yapım sürecindeki kolaylık ve güvenliği, uzun süre kullanımlık ve bakım onarım açısından diğer tür köprü yapı sistemlerine göre büyük bir avantaj sağlamaktadırlar.

Hızlı yükselen devlet ulusal ekonomi, yüksek teknoloji ve endüstriyel yapıların gelişimiyle beraber yaşam standartları da gün geçtikçe yükselmekte ve yeni büyük araçları üretimi çoğalmaktadır.

Şehirlerarasındaki iletişim kolaylığını sağlamak için yapılan yeni hızlı tren yolu köprüleri ve karayolu köprülerinden geçen araç hızı ve yeni tasarım şeklindeki büyük araçların trafiğe katılışı ve doğal afetlerin (deprem, fırtına, Tayfun) etkileri köprü üzerindeki dinamik yükleri ve titreşimlerin büyüklüklerini artırmış olup, doğrudan büyük açıklıklı köprülerin kullanım süresi ve servis ömürlerini azaltmıştır. Daha güvenli iletişim koşulların sağlanması, köprü güvenliği, bakım ve onarımların kolaylığı, servis ömürünün uzatılması, köprü güçlendirme ve yeni büyük açıklıklı köprülerin tasarlama hedefleri göz önünde bulundurarak günümüze dek asma köprülerin dinamik karakteristik

özellikleri ve dinamik etkiler altındaki davranışların analitik olarak belirmemesi konusunda birçok ülke’de araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk dönemlerde yapılan çalışmalarda asma köprülerin statik ve dinamik etkiler altındaki lineer davranışları çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra, meydana gelen büyük depremlerin, köprülerin analizlerinde lineer olmayan davranışın dikkate alınmasının önemini ortaya çıkarmış ve bu durum araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle, asma köprülerin çeşitli dinamik yükler altında doğrusal olmayan davranışları, titreşim özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlardan yararlanılarak asma köprülerin davranışlarını açıklamaya çalışmışlardır. Bu çalışmalar başlıca olarak şöyle sıralanmıştır:

Konishi ve Yamada [1] çalışmalarında, asma köprü sistemlerini çok serbestlik ayrık parametrelerinin yaylı kütle sistemi olarak düşünerek, sayısal yöntemleri kullanılarak dikey-boyuna doğrultudaki titreşim mod şekilleri ve frekansları hesaplayan yöntemi ve asma köprülerin titreşim analizlerinde sayısal yöntemi başlatmıştır.

İlk Sonlu elemanlar metodunu kullanarak asma köprülerin titreşim davranışlarını analize eden kişi Baron olup, 1975 yılında Golden Gate Asma Köprüsünün titreşim davranışları ve deprem tepki analizinde Sonlu elemanlar metodunu kullanılarak kapsamlı araştırma yapmıştır. Baron’un kullandığı Sonlu elemanlar ayrık modeli dikey-uzunlama düzlemindeki iki boyutlu ve üç boyutlu Sonlu Elemanlar modelini içermektedir [2].

Abdel-Ghaffar ve Housner [3] çalışmalarında, iki boyutlu ve üç boyutlu Sonlu elemanlar metodunu kullanılarak, asma köprülerin titreşim davranışları ve deprem tepki analizlerini araştırmıştır.

Fleming ve Eqsli [4] çalışmasında, lineer analiz yöntemleri kullanılarak, geometrik doğrusal olmayan analiz yöntemiyle yaklaşık 200 metre açıklığındaki kablolu köprülerin sismik tepki analizini yapmıştır. Fleming’in doğrusal olmayan analiz hesap teori araştırması, kablo ve asma köprülerin doğrusal olmayan özelliklerinin araştırılması için büyük bir katkıda bulunmuştur.

Dumanoglu ve Adanur [5] çalışmalarında, asma köprülerin senkronize ve anti senkronize dinamik analizlerini, sonlu eleman yöntemi kullanarak analiz etmişler ve

analizlerinde geometrik olarak lineer olmayan davranışları dikkate almışlardır. Anti senkronize dinamik analizlerde yer hareketinin sonsuz ve çeşitli sonlu dalga hızlarıyla, asenkronize hareketin aksine son iki mesnette zıt fazla yayıldığı kabul edilerek, yatay ve düşey doğrultularda gerçekleştirmişlerdir. Uygulama olarak seçilen İstanbul Boğaziçi Köprüsünde, yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan depreminin doğu-batı bileşenini kullanmışlar ve düşey doğrultudaki analizler sırasında yer hareketinin 2/3 katını almışlardır. Analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme ve kesit tesirlerini karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır.

Lei ve Noda [6] çalışmalarında, köprülerin günümüz yükleri altında davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada hareketli araç ve araç hatları için dinamik sayısal modeller sonlu elemanlar metodu kullanılarak geliştirilmiştir. Araç ve araç katarı sistemi zayıf ve güçlü olarak iki şekilde oluşturulmuştur. Güçlü sistemde hem araç hem de tren yükü, zayıf sistemlerde ise sadece tren yükü dikkate alınmıştır. İki sistem birbirinden bağımsız analiz edilmiştir. Araç ve tren katarlarının analizinde araç tekeri ve ray arasındaki kuvvet etkilerini sabit ve hareketli olarak karşılaştırılması trigonometrik serileri de kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada trafik yoğunluğunun da işlemlere dâhil etmek için farklı hızlarda farklı araçlarla analizler yapılmıştır. Sonuçlarda köprülerin günümüz yükleri altında dinamik tepkilerinin oluşmasında rastgele düzensiz katar hareketlerinin önemi vurgulanmış ve yeni tasarımlar için önerilerde bulunulmuştur.

Pan vd. [7] çalışmalarında, ölü yük koşulları altında, geometrik doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodunu kullanılarak iki aşamada modellenmiş bir asma köprünün iç kuvveti ve gerçek geometrik modelini iteratif yöntemi ile elde etmişler. Yatay birim uzunluk başına sabitlenen ve ana kablo tarafından özel olarak desteklenen ölü yüklerin geleneksel yöntemde yaygın kullanılmı varsayımı gerekli değildir. Sayısal hesap sonuçları ölü yük etkileri altında oluşan tabliye moment değerlerinden göz ardı edilmez, ölü yüklerin ana kablo şekilleri ile parabolük şekil arasında büyük farklılıkların olduğunu sunmuşlardır.

Song vd. [8] çalışmalarında, Guang Dong Humen asma köprüsünü örnek alarak, rüzgâr hızı değişimindeki büyük açıklıklı asma köprülerin dinamik özelliklerinin hesap

yöntemleri açıklamışlar ve rüzgâr hızı değişimlerine uygun olarak değişen asma köprü dinamik özelliklerini analize etmişlerdir.

Apaydın [9] çalışmasında, Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sonlu elemanlar metodu ile hazırlanmış üç boyutlu matematik modelini oluşturmuş ve serbest titreşim analizini yapmıştır. Köprünün lineer ve lineer olmayan davranışlarını özel algoritmalar yardımıyla belirtmiş, SAP 2000 Yapısal Analiz Programını kullanarak köprünün ilk 50 titreşim şekli ve ilgili doğal titreşim frekanslarını belirlemiştir. Köprünün dinamik özellikleri belirterek, analitik sonuçlar, çevreli titreşim deneyi ve GPS kayıtlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak, yapılan deney sonuçları ile hesapla bulunan dinamik değerlerin birbirileri ile uyumlu bulmuş, sonuçta farklı kayıtlardaki kuvvetli deprem olması durumunda oluşacak maksimum yer değiştirmeler ve kuvvet seviyeleri hesaplamıştır.

Adanur vd. [10] çalışmalarında, asma köprülerin geometrik olarak lineer olmayan dinamik davranışlarını elastik zemin analogisi ve sonlu eleman yöntemini kullanarak gerçekleştirmişler. Geometrik olarak lineer olmayan davranış, P- Δ etkileri dikkate alınarak belirlenmektedir. Uygulama olarak seçilen İstanbul Boğaziçi Köprüsünde, yer hareketi olarak Pacoima barajında kaydedilen 1971 San Fernando depremi S16E bileşeninin 2/3 katı düşey doğrultuda köprüye etkilemişler. Analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme ve kesit tesirleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır.

Jiao vd. [11] çalışmalarında, ABAQUS Programı ile üç kuleli asma köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelini kurmuşlar ve Lanczos özdeğer yöntemini kullanarak, köprünün parametrelerini belirlemişlerdir. Tabliye kirişinin dikey, yanal ve burulma rijitliği ve kule tabliye giriş bağlantısındaki elastik sınırlamaların köprü dinamik özelliklerine etkileri araştırmışlar. Sonuç olarak, tabliye kirişinin dikey, yanal ve burulma rijitliklerinin değişiminin aynı yöndeki titreşim frekanslarına fazla, farklı yöndeki titreşim frekanslarına ise az etki yaptığını vurgulamışlardır.

Grigorjeva vd. [12] çalışmalarında, statik yükler altındaki ana kablo ve tabliye girişlerin iç kuvvetlerin belirlenmesini analiz ederek, rijit kablolu asma köprü tasarımı için öneriler sunmuşlardır. Ana kablo ve tabliye girişlerinin yer değiştirmeleri, iç kuvvetleri ve gerilmelerinin belirlenmesi için basit formüller sunmuşlar ve Sonlu eleman

modellemesi yapmışlardır. Sonuçta, bir yaya asma köprüsünü örnek alarak, asma köprülerin tasarım prosedürlerini anlatmışlardır.

Günaydın vd. [13] çalışmalarında, SAP 2000 Programını kullanarak Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün Sonlu eleman modellini yapmışlar ve zamana bağlı malzeme özelliklerini kullanarak asma köprünün inşaat aşaması analizini gerçekleştirmişlerdir. P-Delta büyük yer değiştirme kriterleri kullanılan analizlerde doğrusal olmayan geometrik davranışı dikkate almış ve zamana bağlı olarak değişen malzeme dayanımlık değişimi ve geometrik değişimleri analize dâhil etmişlerdir. Köprü sistemi çelik yapı sistemi olduğundan, sadece ön gerilime çeliklerinde zamana bağlı malzeme özellikleri kabul edilerek, farklı yapım aşamalarındaki köprünün yapısal davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında, yapım aşamalı ve yapım aşamalı olmayan farklı iki analiz yaparak, sonuçları birbiri ile karşılaştırmışlar. Analiz sonucunda köprü güvertesi ve kuleler için yer değiştirme, eğilme momenti, eksensel kuvvet ve kesme kuvvet değişimleri ayrıntılı olarak elde etmişler ve köprü inşaat aşamalı analizlerinin köprünün yapısal davranışı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Günaydın vd. [14] çalışmalarında, SAP 2000 Programını kullanarak Boğaziçi Asma Köprüsü'nün Sonlu eleman modellini yapmışlar ve zamana bağlı malzeme özelliklerini kullanarak asma köprünün inşaat aşaması analizini gerçekleştirmişler. P-Delta büyük yer değiştirme kriterleri kullanılan analizlerde doğrusal olmayan geometrik davranışı dikkate almış ve zamana bağlı olarak değişen malzeme dayanımlık değişimi ve geometrik değişimleri analize dâhil etmişler. Zamana bağlı malzeme özellikleri, çelik basınç dayanımı, yaşlanma ve betonun sünme ve dinlenmeleri olarak kabul edilmiştir. Toprak koşullarının asma köprülerin yapısal davranışı üzerindeki etki analizlerine, sert, orta ve yumuşak zeminlerin etkilerini dâhil etmişler ve farklı inşaat aşamalarında farklı toprak koşullarında köprünün yapısal davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında, inşaat aşamalı ve inşaat aşamalı olmayan farklı iki analiz yaparak, sonuçları birbiri ile karşılaştırmışlar. Analiz sonucunda köprü güvertesi ve kuleler için yer değiştirme, eğilme momenti, eksensel kuvvet ve kesme kuvvet değişimleri ayrıntılı olarak elde etmişler ve köprü inşaat aşamalı analizlerinin köprünün yapısal davranışı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Cengiz vd. [15] çalışmalarında, taşıt-köprü etkileşiminde önemli parametrelerden biri olan taşıt hızının ve hızda meydana gelen değişimlerin köprü davranışı üzerindeki etkileri incelemişler. Dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü olan Tatar köprüsünü nümerik model olarak seçmişler ve üç boyutlu olarak modellemişler. Üç farklı taşıt hızı için farklı trafik kombinasyonu oluşturmuş ve köprünün hıza bağlı dinamik davranışını incelemişler. Çalışma sonucunda, en büyük tepki kuvvetlerin genellikle düşük hızlarda meydana geldiğini görmüşler.

Apaydın ve Erdik [16] çalışmalarında, Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün detaylı olarak hazırlanmış üç boyutlu sonlu eleman modeli ve bu modelden elde edilen analiz sonuçları sunmuşlardır. Çalışmalarında, planlanan ve trafik olmadığı durumda tam köprü boyutunda gerçekleştirilmiş olan çevresel titreşim testi sonuçlarını analiz etmişler ve köprünün dinamik parametreleri belirlemişler. Son olarak köprünün ölçülmüş dinamik özellikleri, üç boyutlu Sonlu eleman modelinden elde edilen değerler ile karşılaştırmışlar. Hazırlanan detaylı model, köprünün projesinde yer alan köprünün beşik mesnetlerini, kablo ve tabliyenin geometrik süreksizliklerini ve tabliyenin ters sehim işlemlerinin geri çekilerek inşa edilmesi gibi yapısal unsurların tüm detaylarını içermektedir. Bu unsurların doğal frekansı ve buna tekabül eden mod şekillerini etkilediği bilinmektedir. Böylece bu çalışmalarında doğal frekanslar ve buna tekabül eden mod şekilleri yapım aşamalarını da içeren üç boyutlu tam güvenilir bir sonlu eleman modelini kullanılarak hesaplamışlar. Köprünün dinamik parametrelerini belirleyebilmek için yapılan çevreli titreşim testi, analitik çalışmadan bulunan sonuçlarla doğru bir kıyas yapılabilmesi amacıyla trafiğin olmadığı halde gerçekleştirmişler. Köprünün ölçülerek bulunan dinamik özellikleri, analitik araştırmalarla bulunanlarla karşılaştırmışlar ve hesapta bulunan dinamik özellikler ile çevresel titreşim testinden elde edilen dinamik karakteristikler arasında kabul edilebilir bir uyum bulmuşlardır.

Pan vd. [17] çalışmalarında, Tai Zhou köprüsünün yapısal dinamik özellik hesaplarında, farklı hareket hızları ve farklı ağırlıklardaki hareketli yüklerin üç kuleli iki açıklıklı asma köprü yapısal dinamik tepki etkisi analizi yapmışlar. Çalışma sonuçları, üç kuleli iki açıklıklı asma köprülerin ilk dikey taban titreşim frekansının 0.08 Hz olduğu, kamyon doğal frekansından daha düşük olduğunu ve rezonans durumunun oluşmayacağını

bulmuşlar. Üç kuleli iki açıklıklı asma köprülerin iç kuvvetleri, yer değiştirme etkileri basit hareketli yükler etkisi altında, statik yük etkisi altındaki değerlere yakın bir sonuç gösterdiği ve yapıların iç kuvvet ve yer değiştirmelerinin hareketli yük ağırlığı ve hızıyla doğru orantılı ilişkisini bulmuşlardır.

Kartal ve Soyluk [18] çalışmalarında, üniforma ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamalarının, asma ve kablolu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, birbirine yakın merkez açıklıklara sahip bir kablolu köprü sistemi ile bir asma köprü sistemi ele almışlar. Örnek alınan köprü sistemine uygulanan yer hareketlerini, rastgele titreşim teorisi esas alınarak üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının asma köprü modeli üzerindeki etkisinin, kablolu köprü modeli üzerindeki etkisine oranla daha büyük olduğunu, üniforma yer hareketi etkisi için ise kablolu köprü modelinin asma köprü modeline göre daha duyarlı olduğunu görmüşler.

Apaydın ve Bas [19] çalışmalarında, köprülerin yapısal performanslarının belirlenmesine dayalı olarak Fatih Sultan Mehmet asma köprüsünün çok noktalı deprem etkisi altındaki davranışını incelemişler.

Jiang vd. [20] çalışmalarında, Runyang Asma Köprüsünün sonlu elemanlar modelini kullanılarak, rastgele hareketli araç yükleri etkisi altındaki asma köprünün titreşim tepki hesap yöntemleri için bir öneride bulunmuşlar. Doğrusal modellenen köprü sonlu eleman modeli temelinde, gerçek ölçülen hareketli araç istatistikî verilere dayalı dizi dağılımı kullanılarak rastgele araç simülasyonu yapmış, daha sonra asma köprü dinamik tepki analizi yapmışlar. Analizi sonuçları, yapının önemli noktalarında yapılan dinamikler yöntemin hesapladığı tepkiler daha gerçek durumu yansıtacak şekilde göstermişler. Asma köprülerin 1/8 ve 7/8 noktalarındaki yer değiştirme tepkilerin en şiddetli olduğunu ve köprü kullanım sürecindeki denetimlerde bu iki önemli noktaya odaklanması gerektiğini önermişler. Aşırı yüklenmiş araçların köprü yapısının dinamik tepkilerine önemli derecede etkilediğini ve günlük taşımacılık kontrollerinde aşırı yüklenmiş araçların köprüden geçişleri kontrol edilmeli gerektiğini önermişler.

Yukarda bahsi geçilen çalışmaların dışında, birçok ülkede gün geçtikçe açıklıkları artan modern asma köprülerin yapım sayıları artmakta ve bu tür köprülerin trafik, rüzgâr ve

deprem gibi dinamik yüklere karşı güvenliğinin sağlanması konularında çok araştırmalar yapılmıştır (Liu [21]; Apaydın [22]; Song vd. [23]; Cheng vd. [24]; Xiao vd. [25]; Guo vd. [26]; Zhang ve Ge [27]; Pedro [28]; Xu ve Li [29]; Çavdar vd. [30]; Long vd. [31]; Li vd. [32]; Zhao vd. [33]; Altın vd. [34]; Çavdar [35]; Soyluk vd. [36]; Günaydın vd. [37]; Sarker vd. [38]; Peng vd. [39]).

1.2 Tezin Amacı

Deprem ve tayfunlar ise insanların güvenliğine ciddi zarar veren doğal afet türüdür. Köprü yapıları için, deprem ve tayfun etkileri köprü yapısına daha kolay zarar veren bir doğal afettir. Ekonomik gelişmelerle beraber insanların trafik yollarına bağlılığı gün geçtikçe yükselen bu modern yaşamımızda, bu doğal afetlerden kaynaklanan köprü ve diğer inşaat yapıların yıkılmaları insanların can güvenliğine ve ekonomisine doğrudan veya dolaylı olarak zarar verebilirler. Büyük açıklıklı asma köprülerin yapım özellikleri esnekliği yüksek, açıklıklar büyük olup, deprem, tayfun ve hareketli taşıt yüklerinin dinamik etkileri altındaki tepkileri çok hassastır. Dolayısıyla bu dinamik etkiler altındaki köprü yapısının dinamik tepkileri, titreşim prensipleri ve dinamik etkilerin yapısal hasar oluşturma güçlerinin azaltılması üzerindeki çalışmaların yapılması, dinamik etkiler altındaki köprü yapı güvenliğini önlemenin önemli kefaletidir.

Bu tez çalışmasının amacı, FSM Asma Köprüsünün yapısal davranışını hareketli araç yükleri ve çeşitli büyüklüklerdeki deprem etkileri altında SAP 2000 yazılımı ile çeşitli analizler yaparak belirlemek, büyük açıklıklı asma köprülerin servis ömrünün uzatılması, bakım ve onarım çalışmaları ve yeni yapılacak olan büyük açıklıklı asma köprülerin tasarımı için yararlı sonuçlar temin etmektir.

1.3 Hipotez

Bu tezin ilk bölümünde, günümüze dek asma köprülerin çeşitli dinamik etkileri altındaki davranışları üstüne yapılan literatür taraması, tezin amacı ve hipotez hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, Asma köprüler ile ilgili tarihsel gelişmeler, asma köprülerin temel özellikleri ve elemanları hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, Asma köprülerin hesabında kullanılan teoriler, asma köprülere etkileyen köprü yapısının kendi ağırlığı, trafik yükü, deprem yükleri, rüzgâr yükleri ve sıcaklık etkileri gibi büyüklükler ve serbest titreşim analizleri ve modal davranışı hakkına bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, yapılan çalışmalarla ilgili olarak Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsünün tarihçesi ve genel bilgileri, Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsünün SAP 2000 Programı ile yapılan Sonlu eleman modeli, kendi ağırlığı ve çeşitli deprem yükleri altındaki bölgeye özel spektruma uyumlu hale getirilmiş ivme kayıtlara göre köprünün boyuna ve enine doğrultusunda zaman tanım alanında doğrusal olmayan deprem analizleri ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

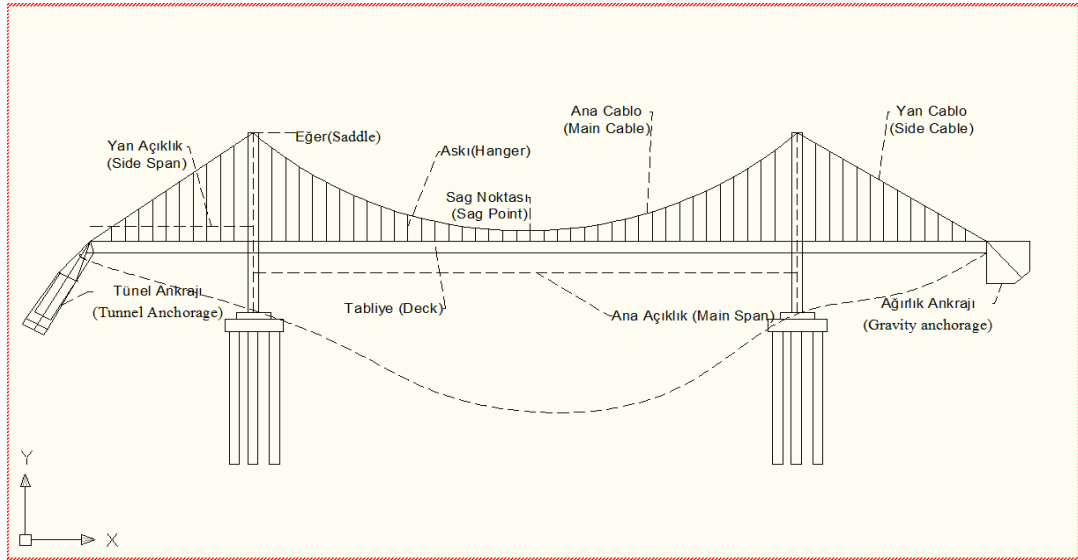
Beşinci bölümde, yapılan çalışmalarla ilgili olarak Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsünün çeşitli araç yükleri ve araç hızlarını farklı şeritlerden geçirerek, taşıt- köprü etkileşimindeki dinamik analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar taşıt ağırlığı ve taşıt hızlarına göre çizelge ve grafik şeklinde verilmiştir.

Altıncı bölümde, bu tez çalışma kapsamında yapılan analizlerin sonuçları ve bu sonuçlara dayalı olarak büyük açıklık asma köprüleri tasarımı, normal kullanım ve bakım kontrolleriyle ilgili öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Asma köprüler çekme kuvvete maruz bırakılan ana taşıyıcı kablolar vasıtasıyla köprü yapısında oluşan taşıyıcı yükleri askı çubuklar yardımıyla ana kabloya, ana kablolardan ankraj ve kule temeline iletilen bir köprü yapı sistemi olup, ana kablo, tabliye, kuleler, askı çubuğu, kule tepe semeri, ankraj blokları vd. farklı davranış gösteren elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 2. 1 Asma köprünün kısımları

2.1 Asma Köprülerin Tarihsel Gelişimi

Asma köprülerin ilk kullanılışı tarih öncesi devirlere kadar uzanır. İlk çağ insanı asma ağacı ve bambu gibi bazı bitkilerin bükülebilir(fleksibl) bir çekme elemanını ifade eden kablolarla nehir, dere, vadi gibi benzeri engellerden geçebilmeyi başarmış olup, milattan önceki 250 yıllarında Çinliler tarafından inşa edilmiştir. Daha sonra demir

Üretim teknolojisinin gelişmesiyle birlikte birçok ülke’de zincir ve ip halatlar kullanılarak asma köprüler inşa edilmiştir [40].

Asma köprülerin tarihsel gelişimlerine bakılırsa, asma köprülerin inşaatı ilk olarak in’de başlatılmıştır, devrimsel yenilirliği ise İngiltere’de, gelişimi ise Amerika’da, yaygın kullanılışı ise Japon’da olmuştur.

2.1.1 Avrupa Asma Köprüleri

Batıda dövme demirin çıkışından sonra, asma köprüler zincirli olarak ortaya çıkmıştır. İngiltere’de 1741 yılında Tees nehir üzerine 21,34 metre açıklığa sahip ilk demir zincirli Winch asma köprüsü inşa edilmiş olup, bu köprü 61 sene kullanıldıktan sonra 1802 yılında çökmüştür [40]. Sonradan zincir yerine delikli çubukların kullanıldığı da olmuştur. Bu ilk zincir köprülerin ekserisi şiddetli rzgrlarda salınımlardan zarar görmüşler ve kmşlerdir. İngiltere’de birçok demir zincirli asma köprüler inşa edilmiş olup, bunlardan çok ünlüleri ise Telford’un inşa ettiği 174 metre açıklıktaki “Menai Asma Köprüsü” (şekil 2. 2) [41] ve Brunel’in inşa ettiği “Clifton Asma Köprüsü” dr (şekil 2. 3) [42].



şekil 2. 2 Menai asma köprüsü



Şekil 2. 3 Clifton asma köprüsü

1808 yılında, modern asma köprülerin temel asası olan askı çubuklu ve tabliye tasarımındaki Finley Asma Köprüsü'nü inşa edilmiştir. 1816 yılında ise 124 metre açıklığa sahip ilk çelik tellerden tasarlanmış ana kablolu yaya asma köprüyü inşa edilmiştir. Fransa'da 1959 yılında ana açıklığı 608 metrelik Taunka Nashville Köprüsü inşa edilmiştir. İngiltere'de sırasıyla 1964 ve 1966 yıllarında ardı ardına ana açıklığı 1006 metrelik Forth (Şekil 2. 4) [43] ve ana açıklığı 988 metrelik Severn Asma Köprü'leri (Şekil 2. 5) [44] inşa edilmiştir.



Şekil 2. 4 Forth köprüsü

Severn Asma Köprüsü dünya çapında ilk olarak yassı çelik kutu kirişi kullanılarak inşa edilmiş köprü olup, tüm dünyada İngiliz tasarımındaki asma köprü inşaatı sürecini

başlatmıştır. Portekiz’de 1966 yılında başkent Lizbon’da ana açıklığı 1013 metrelik 25 Nisan köprüsü inşa edilmiştir.



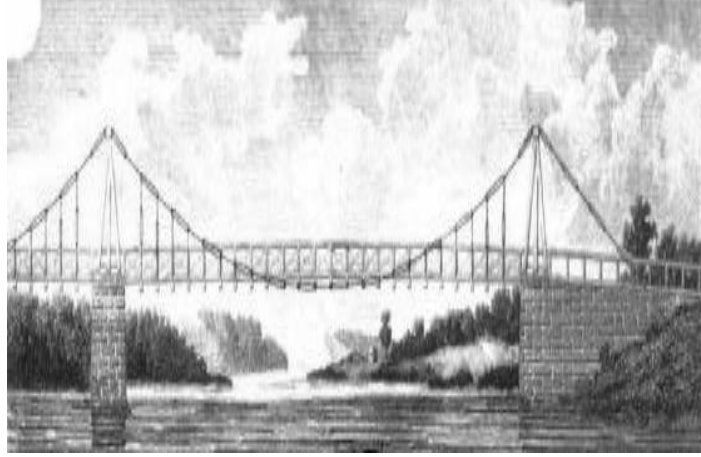
Şekil 2. 5 Severn asma köprüsü

Danimark’ta, 1970 yılında ana açıklığı 600 metrelik Lillebælt köprüsü inşa edilmiştir. 1981 yılında İngiltere’de ana açıklığı 1410 metrelik Humber Köprüsü inşa edilmiştir. İngiliz asma köprülerin özellikleri:

- Ortotropik yassı çelik kutu tabliye kirişlerinin kullanımı,
- Kulelerin kaynaklı çelik veya betonarme yapılardan inşa edilmesi,
- Askı halatların ana kablo ile alt üst iki adet klipsten tutturulmuş ve yüksek mukavemetli cıvatalar ile iki yandan sıkıştırılmasıdır.

2.1.2 Amerika Asma Köprüleri

Amerika’da ilk demir asma köprü, Pensylvama’da 1796 yılında J. Finley tarafından yapılan Jacobs Creek köprüsüdür (Şekil 2. 6) [45],[46]. Amerika’nın New York İl’indeki East Nehri üzerine inşa edilmiş Brooklyn Köprüsü o zamandaki en uzun asma köprü olarak kabul edilmiştir (Şekil 2. 7) [47]. Bu köprü 1883 yılında trafiğe açılmış olup, orta açıklığı 488 metre, yan açıklıkları ise 284 metre olmak üzere toplam köprü uzunluğu 1056 metredir.



Şekil 2. 6 Jacobs Creek köprüsü



Şekil 2. 7 New York East nehri üzerindeki Brooklyn köprüsü

1931 yılında, Amerika uluslararası başlıca olarak ana açıklığı 1067 metre olan George Washington köprüsünü inşa etmiştir. Bu köprü'nün denizden yüksekliği 64 metre, ayakların yüksekliği ise 182 metredir (Şekil 2. 8) [48].



Şekil 2. 8 New York George Washington köprüsü

1937 yılında ise Amerika'da ana açıklığı 1280 metre olan Golden Gates Asma Köprüsü inşa edilmiş olup (Şekil 2. 9) [49], bu köprü dünya çapında inşa edilmiş büyük açıklıklı asma köprüler içinde 27 senelik rekor sağlamıştır.



Şekil 2. 9 Golden Gate asma köprüsü

1940 yılından sonra Tacıma Asma Köprüsü'nün yıkılışından dolayı Amerikan asma köprülerin inşaatı yavaş ilerlemiş olup, rüzgârdan kaynaklanan bu problemin çözümünden sonra tekrar asma köprü inşaatı yapılmaya başlamıştır. 1957 yılında ana açıklığı 1158 metrelik Mackinac Straits Köprüsü'nü inşa etmişlerdir. 1964 yılında ana açıklığı 1298 metrelik Verrazano Narrows Köprüsü inşa edilmiştir.

Amerika asma köprü inşaatında diğer ülkelere göre daha geniş araştırma, yüksek tasarım ve inşaat teknolojisine sahip olup tasarım özellikleri ise aşağıdaki gibidir [50]:

- Ana kablolar havada montajı (aerial spinning, AS method) yapılmış yüksek mukavemetli galvanize tel grupların birikimden oluşmuştur.
- Askı halatlar dikey olarak tasarlanmış olup, ana kablo ile alt üst kelepçe ve civatalar ile bağlanmıştır.
- Kuleler genel olarak perçinli evya civatalı rijit çerçeve olarak tasarlanmıştır.
- Tabliye kirişleri kafes giriş şeklinde tasarlanmış ve betonarme döşemeler ile köprü tabliyesi örtülmüştür.

2.1.3 Japonya Asma Köprüleri

Japonya asma köprülerinin gelişimi Honshu ve Shikoku adalarını birbirine bağlayan köprülerin yapımıyla başlamış, bu proje kapsamında toplam 22 tane büyük açıklıklı köprü inşa edilmiştir. Bu köprülerin 11 tanesi asma köprüdür. Köprülerin çoğu, alt tabliyede trenler, üst tabliyede ise otomobiller olmak üzere, hem karayolu, hem de demiryolu trafiğini taşıyacak şekilde inşa edilmiştir. Honshu-Shikoku projesindeki geniş köprülerin (açıklıkları 500 metreden fazla) hepsi, klasik rijitlik kafes ve düşey askılara sahip asma sistemli asma köprüler olarak yapılması planlanmıştır. Honshu ve Shikoku arasında tamamlanacak olan ilk bağlantıda (Kojima-Sakaide güzergâhı), en geniş ana açıklığın, Güney BisanSeto Köprüsü'nde 1100 m, Kuzey BisanSeto Köprüsü'nde ise 990 m olarak planlanmıştır (Şekil 2. 10) [51].



Şekil 2. 10 Kojima-Sakaide güzergâhındaki Bisan Seto köprüleri

Bu iki köprü, üst tabliyede dört şeritli bir karayolunu, alt tabliyede ise özellikle ikisi Shinkansen olarak adlandırılan yüksek hızlı trenlerin kullanıldığı dört demiryolunu taşımaktadır.

Sonra, 1973 yılında 178+712+178 (m) açıklığındaki Kanman Köprüsünü; 1977 yılında ana açıklığı 465 metrelik Hirada Köprüsünü; 1983 yılında 205+770+250 (m) açıklığındaki Innoshima Köprüsünü (Şekil 2. 11) [52].



Şekil 2. 11 Innoshima asma köprüsü

1985 yılında 423+876+423 (m) açıklığındaki Great Naruto Köprüsünü; 1988 yılında 230+940+230 (m) açıklığındaki Shimotsui Köprüsünü (Şekil 2. 12) [53]. 274+990+274 (m) açıklığındaki Kuzey Bisan Köprüsünü, 274+1100+274 (m) açıklığındaki Güney Bisan Köprüsünü ve dünya çapındaki büyük açıklıklı asma köprüler listesinde yer alan 960+1990+960 (m) açıklığındaki Akashi Boğazı Köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 2. 13) [54].



Şekil 2. 12 Shimotsui asma köprüsü



Şekil 2. 13 Akashi Boğazi asma köprüsü

Endüstriyel ve teknolojik gelişmelerden dolayı Japonya asma köprülerinin de kendine mahsus tasarım özellikleri vardır [50]. Bu özellikler aşağıdaki gibidir:

- Ana Kabloların imalatı ve montajlarında genel olarak havada montaj (aerial spinning, As method) yerine prefabrik paralel tel (Prefabrication Parallel Wire Strand, PWS method) yöntemi kullanılmaktadır. Askı halatlar dikey olarak tasarlanmış olup, ana kablo ile alt üst kelepçe ve civatalar ile bağlanmıştır.
- Ana Büyük açıklıklı karayolu-demiryolu çift kullanışlı asma köprülerin tasarımı kirişler ile demiryolunun köprü güvertesi esnekliği sağlamaktadır.
- Kule iskelesinde sürekli kafes kirişlerin kullanımı eklemlerin oluşmasını engellemektedir.
- Öngörülmesi Beton döşemelerin yerine ortotropik plaklar kullanılmaktadır.

2.1.4 Türkiye Asma Köprüleri

Türkiye’de şuan için 1974 yılında inşa edilen Boğaziçi Köprüsü ve 1988 yılında inşa edilen Fatih Sultan Mehmet Köprüleri aerodinamik kutu kirişlere sahip asma köprülerdir. Her iki köprüde tabliye en kesitleri, Severn Köprüsüyle benzerlik gösterir ve her iki köprüdeki tabliye kirişi yüksekliği 3.00 m’dir. Boğaziçi köprüsünde ana kablolar tabliyeye eğik askılarla bağlarken, 2015 yılı itibariyle ana kablo tabliyeye Fatih Sultan Mehmet Köprüsü’nde olduğu gibi dikey askı halatlarıyla bağlanmıştır. Ana

açıklıkların uzunlukları Boğaziçi Köprüsü'nde 1074 metre (Şekil 2. 14) [55], Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nde 1090 metredir (Şekil 2. 15) [56]. Severn Köprüsü'nden farklı olarak, yalnızca ana açıklıkta kablolu sistemin kullanılması yapısal sistemde önemli ölçüde değişiklikler oluşturmuştur.



Şekil 2. 14 Boğaziçi asma köprüsü



Şekil 2. 15 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsü

İnşaat halinde olan Yavuz Sultan Selim Asma Köprüsü (Üçüncü Boğaz köprüsü) yapımı tamamlandığında, 59 metre genişliği ile dünyanın en geniş, 320 metreyi aşan kule yüksekliği ile dünyanın en yüksek, 1408 metrelik ana açıklığı ile üzerinde raylı sistem bulunan en uzun asma köprüsü olacaktır (Şekil 2. 16). Köprü güzergâhı, Avrupa

Yakasında Sarıyer'in Garipçe köyü ile Anadolu Yakasında Beykoz'un Poyraz köy semtinde yer almaktadır [57].



Şekil 2. 16 Yavuz Sultan Selim asma köprüsü

İnşaat halinde olan İzmit Körfez Köprüsü, Marmara Denizi'nin doğusunda İzmit Körfezi'nin Dil ovası Dil Burnu ile Altınova'nın Hersek Burnu arasında yapılması planlanan asma köprü, köprü tamamlandığında dünyanın dördüncü en uzun açıklıklı asma köprüsü olacaktır (Şekil 2. 17). Gebze – Orhangazi – İzmir otoyol projesi kapsamında inşa edilmekte olan asma köprünün orta açıklığı 1550 metre ve toplam uzunluğu 2682 metre, genişliği 35,93 metredir [58].



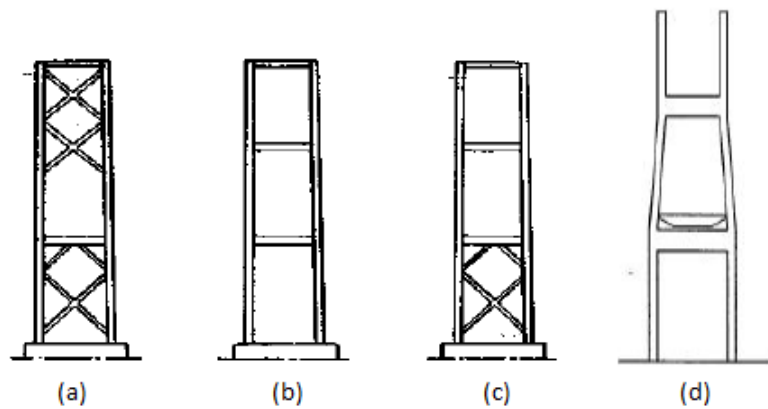
Şekil 2. 17 İzmit Körfez asma köprüsü

2.2 Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları

Asma köprüler, 550 metreden büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılan yapılardır. Kenar açıklıkları zemin üzerindedir [59]. Zeminle kenar açıklık tabliyeleri arasındaki uzunluk az ise kenar açıklıklar asma yapılmayıp, maddi açıdan daha ekonomik çözüm olan, zemine oturan ayaklar üzerine inşa edilerek tek bir asılı açıklıktan oluşabilirler. Büyük açıklıkların geçilmesi istenildiğinde orta ve kenar açıklıklar asılı olarak yapılabilmektedir. Çok daha büyük açıklıkların geçilmesi söz konusu olduğu durumlarda ise dört veya daha büyük açıklıklı olarak tasarlanmaktadır [46], [60]. Asma köprüler ana kablo, tabliye, kuleler, askı çubuğu, kule tepe semeri, ankraj blokları gibi farklı davranış gösteren elemanlardan oluşmaktadır.

2.2.1 Kuleler

Asma köprü kuleleri, tabliye yüzeyinden daha yüksekte inşa edilen betonarme veya çelik dikimlerdir. Kuleler, tepelerindeki mesnet semerleri aracılığı ile ana kabloların orta ve kenar açıklıkta her zaman aynı değerde olmayan çekme kuvvetlerine maruzdurlar. Ancak kulelerin devrilmesini engellemek için, bu çekme kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin eşit olmasına gayret edilir. Kuleyi meydana getiren dikmelerin içi boş olup kutu kesitlidir ve yol seviyesine ve bakım ve onarımlarını sağlamak üzere mesnet semerlerine çıkmak imkânını veren asansör tertibatını intiva ederler. Dikmeleri tepelerinde, tabliye altında ve kuleler çok yüksekse bazen orta seviyede bir-birlerine bağlayan kirişler kontrvantman görevi yaparlar [46], [60].

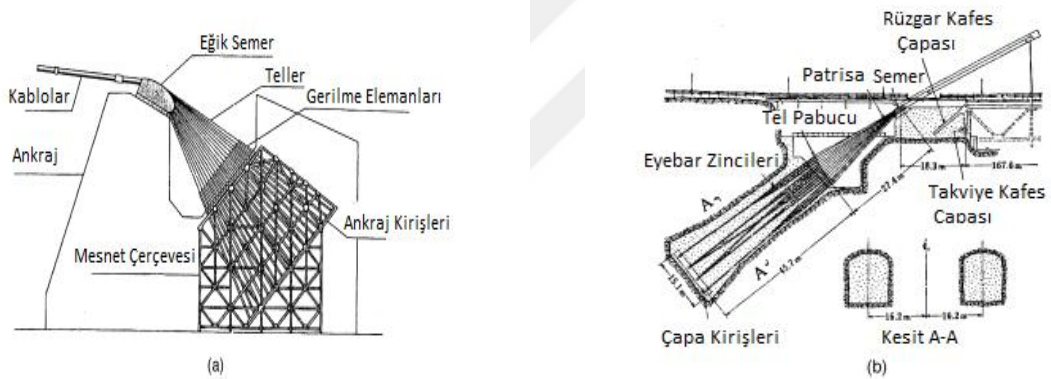


Şekil 2. 18 Asma köprü kule kesitleri (a) Kafes şekilli kule; (b) Rijit çerçeve şekilli kule; (c) Kafes –Rijit çerçeve bileşik şekilli kule; (d) H Şekilli kule

Asma köprülerin kuleleri genelde esnek yapı olarak tasarlanmış olup, orta kiriş bağlantı şekli kulelerin estetik güzel tasarlanmasında çok önem gösterir ve yaygın olarak kafes kiriş, rijit çerçeve ve kafes-rijit çerçeve bileşeni şeklinde tasarlanır (Şekil 2. 18).

2.2.2 Ankrajlar

Ankrajlar, kablolardaki çekme kuvvetlerini dengelerler ve yapının stabilizesini sağlarlar. Genelde ağırlık ankrajı ve tünel ankrajı (Şekil 2. 19) olmak üzere iki tip ankraj kullanılmaktadırlar. Ankrajların projelendirilmesinde dikkat edilmesi gereken husus, ankrajlardan zemine iletilen büyük yatay kuvvetlerin oluşturduğu kaymaya karşı, bir güvenlik faktörü temin etmektir. Kablodan ankraja gelen çekme kuvvetlerinden düşey bileşeni ankraj ağırlığı ile yatay bileşeni ise, zemin yüzeyinde oluşturulan kademelerle zemin kohezyonundan faydalanılarak, zemin ile ankraj arasındaki sürtünmeyi artırarak karşılanmaktadır.



Şekil 2. 19 Ankraj türleri (a) Ağırlık ankraj; (b) Tünel ankraj

Ankrajlar kabloların çekme kuvvetlerini dengeleyip, yapının stabilizesini sağlamaktadırlar. Ankraj bloklarının çözümü zemin cinsine göre değişmektedir. Eğer blokların inşa edilecekleri yer kayalıksa ve bu kayalık yeterli mukavemete sahipse, blokların inşasından vazgeçilebilmektedir. Kabloların uzantısında, içine kabloların ankraj uzantılarının gömüleceği, beton kütlesiyle doldurulan, galeriler açılmaktadır. Ankrajın emniyetini artırmak için söz konusu galeriler alt kısımlarından betonarme bir kiriş ile birbirine bağlanmaktadır. Diğer inşa durumlarında, kabloların çekme kuvveti ve ankraj kütesine ait kuvvetlerin (ölü ağırlık, toprak etkisi, vs.) bileşkesi gibi iki kuvvetin

etkisi altında dengede bulunan kütleler inşa edilmektedir. Bu dengenin sağlanmasında ağırlık kütlesi denilen ankraj blokları önemli rol oynamaktadırlar [60].

2.2.3 Ana Kablolar ve Askı Halatlar

Asma köprülerin ana taşıyıcı elemanı olarak adlandırılan ana kablolar, asma tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar vasıtasıyla zemine aktaran elemanlar olup, kenarlarda yapının iki ucunda ankraj bloklarına monte edilmekte ve mesnet semerleri aracılığı ile üzerlerine oturdukları kulelerin tepelerinden geçmektedirler. Yaklaşık olarak her 50 santimetrede bir bağlı paralel telli kablolar ve soğukta işlenmiş yüksek dayanımlı çelik telden yapılmış kablolar olmak üzere iki çeşit kablo vardır [46].

Modern büyük açıklıklı asma köprülerin ana kablo kesiti genelde çapları ϕ 5-7mm arasında değişen galvanizli yüksek mukavemetli çelik tellerin bileşiminden oluşan bükümlerden yapılmıştır (Şekil 2. 20), kopma dayanımı 1570-1860 MPa arasında değişmektedir. Çelik tel bükümlerinin montajı havada montaj (aerial spinning, AS method) ve Prefabrik paralel tel montaj (Prefabricated Parallel Wire Strand, PWS method) şeklinde olup, ana kabloların düzenlemesi genel olarak iki adet paralel kablo kullanılır.

İsimleri	Kesit Şekilleri	Yapısı	Köprüler
Paralel Tekil Kablo		Tellerin paralel düzende bir araya gelmesiyle yapılır.	Brooklyn Humber Great Belt East Akashi Kaikyo
Demetlenmiş Kabloları		Birkaç tel guruplarından oluşan altı tel gurubunun merkez tel gurubu etrafında sarılmasıyla yapılır.	St. Johns
Spirel Halat		Bir merkez tel etrafında helisel olarak sarılan bir ya da daha çok tabakalı telden oluşur.	Little Belt Tancarville Wakato
Kilit Sargılı Kablo		Tel gruplarının bir çekirdek etrafında helisel olarak sarılmasıyla elde edilir.	Kvalsund Emmerich Albsborg

Şekil 2. 20 Asma köprü kablo tipleri [61]

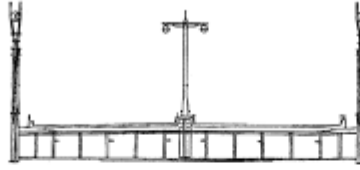
Askılar paralel çelik telli veya esnek çelik halatlardan yapılmış olup, üstyapı yüklerini ana taşıyıcı elemanı ana kabloya bağlayarak, tabliye zati ağırlığı ve dış yük etkilerini ana kabloya taşınmasını sağlamıştır. Düşey veya eğilimli olmak üzere iki çeşit askı vardır.

Askılar üç elemandan oluşmaktadır:

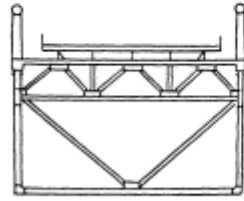
- Alt'ta, askı- rijitlik kirişi bağlantı tertibatı,
- Üst'te, özel olarak ana kablo üzerine çelik döküm kelepçiler belli aralıkla tertip edilmiş olup, Askı-kablo bağlantısını sağlarlar,
- Bir askı çubuğu veya bir kablodan ibaret olabilen askının kendisi,

2.2.4 Tabliyeler

Tabliye kirişi münferit hareketli yüklerin tesiri altında, köprünün deformasyonlarını sınırlayan ve köprü rijitliği sağlayan ikincil yapı olup, çelik kafes kirişli ve ortotropik kutu şeklindedir (Şekil 2. 21). Bükülme kuvvetlere maruz olup, genellikle kafes kiriş şeklinde veya rüzgârlardan meydana gelen salınım tesirlerine karşı koymak için kutu kesitli ve aerodinamik formda yapılmaktadır.



(a) I-Kirişli Tabliye



(b) Çelik Kafes Kirişli Tabliye



(c) Ortotropik Kutu Tabliye

Şekil 2. 21 Tabliye kirişleri

Tabliye rijidlik kirişlerinin mesnet bağlantıları aşağıdaki yerdeğiştirmelere imkân vermelidir [46]:

- Sıcaklık değişimlerinden oluşan uzamalardan meydana gelen boyuna ötelenmelere,

- Hareketli yüklerden oluşan deformasyonlardan meydana gelen, mesnet çizgisine Paralel yatay bir eksen etrafındaki dönmelere,
- Rüzgârdan oluşan deformasyonlar sebebiyle düşey bir eksen etrafındaki dönmelere,

Ana kablolar kendi yer değiştirmeleri ile etkileyen dış yüklerin dengesini sağlayabildiklerinden dolayı, köprü geometrisi belirgin doğrusal olmayan özelliklere sahip olup, bu özellikleri etkileyen üç ana faktör vardır.

- Yapısal büyük yer değiştirmelerin oluşturduğu doğrusal olmayan davranış;

Bu davranış esnek yapılarıdaki en önemli doğrusal olmayan faktörlerdir. Asma köprüler dış yüklerin etkisi altında yapı geometrisi önemli ölçülerde değişir ve iç kuvvetlerin oluşumunu etkiler. Yapısal analizde, kuvvetlerin denge denklemleri yer değiştirdikten sonraki yer değiştirmelere göre kurulmalı, çünkü kuvvet ve yer değiştirme ilişkisi doğrusal olmayan bir ilişkidir.

- Ana Kablo sehim ağırlığının oluşturduğu doğrusal olmayan davranış;

Ana kablolar kendinde oluşan çekme kuvvetleri altında boyutlarında şekil değiştirme yapacaktır ve şekil değiştirme büyüklüğü ana kablo ağırlığına bağlıdır:

- Kablo kuvvet etkisi altında oluşan malzeme elastik deformasyonu doğrusal davranıştır, bu davranışın büyüklüğü malzemenin elastik modülüne bağlıdır.
- Yük etkisi altındaki kablo sehim ağırlık geometrik değişimi ile kuvvetler doğrusal olmayan ilişkiye bağlıdır.
- Kuvvet etkisi altında kablo üzerindeki düğüm noktalarında kayma oluşur ve tekrar düğümleme yaptığında düğüm kesiti kabloya daha yakın sıkı tutulur, böyle dizayn şeklide ulaşan uzamaya yapısal uzama denilir. Genelde belli bir çekme kuvveti etkisi altında oluşuyor ve büyü çoğunluğu kalıcı olup, geri alınamaz.

- İlk gerilimlerden oluşan doğrusal olmayan davranış;

Kablolarda ölü yükler altında büyük bir başlangıç gerilimi oluşur ve belli bir yer değiştirme yaparlar ve daha sonra etkileyen diğer yükler altında geometrik değişimi değişir ve yer değiştirmelere karşı direnç sağlar. Sonradan oluşan yükler altında köprü

yapı dengesinin sağlanması için başlangıç gerilerini ve artan yeni yükleri dikkate alarak yeni bir denge durumu altındaki dengeyi hesaplamak gerekmektedir.



ASMA KÖPRÜLERİN TEORİK ANALİZİ

Büyük açıklıklı asma köprüler esnekliği fazla, doğrusal olmayan faktörleri içeren kablo-halat sistemindeki köprü yapı sistemidir. Asma köprüler deprem yükleri, rüzgâr yükleri, hareketli araç yükleri vb. dinamik etkilere karşı yüksek hassasiyet gösterirler. Bu nedenle, asma köprülerin dinamik performansları, köprü yapısal tasarımının anahtar prosedürlerinin biridir. Bu tür köprülerin dinamik analizleri için, öncelikle statik denge konumunu ve iç kuvvet durumunun belirlenmesi, daha sonra dinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu tür analizler diğer köprü sistemlerine göre çok farklıdır.

3.1 Asma Köprülerin Hesap Analiz Teorisi

Asma köprülerin sürekli gelişimleriyle beraber, aynı zamanda hesap teorileri de sürekli olarak geliştirilmiş ve güncellenmiştir. Modern asma köprülerin hesap teorileri yıllara ve içeriğine dayalı olarak farklıdır.

3.1.1 Elastik Teori (19. Yüzyılın Sonu - 20. Yüzyılın Başları)

Bu teori asma köprü hesabında ilk olarak kullanılan teoridir. Navier 1823 yılında asma köprülerin analizinde kullanılan Elastik teoriyi ilere sürmüştür, ondan önceki asma köprü tasarımları tecrübeye dayalı yaklaşımlardı. Asma köprülerin elastik teorisi, deformasyon enerjisi esası üzerinden geliştirilen çok daha ileri bir teori olup, kablonun ve tabliyenin diferansiyel denklemlerine ve Hiperstatik yapısal çözümleme yöntemine dayalı bir çözüm yöntemidir. Elastik teori ile hesaplanan asma kabloların iç kuvvetleri ve tabliye moment değerleri açıklığın artmasıyla azalmaktadır. Dolayısıyla bu teori

açıklığı 200 metreden küçük olan ve tabliye yüksekliği açıklığın 1/40 olduğu durumlarda kullanıma uygun görülmüştür.

Elastik teoriyi kullanarak asma köprü yapı analizinde aşağıdaki varsayımlar göz önünde bulunmaktadır:

- Ana kablolar tamamen esnek olup sadece çekme kuvveti taşıyor, eğilme momenti taşıyor. Üniform yayılı ölü yükler etkisinde kablo geometrisi ikinci dereceden parabolik olup, tüm ölü yükleri ana kablo taşıyor. Hareketler yüklerin köprü üzerindeki etkisinde ana kablo geometrisi ve kablo uzunluğu değişmez.
- Tabliye kirişleri yatay ve düz olup, geometrik atalet momenti sabittir.
- Tabliye kirişi ve ana kabloların ölü yükleri üniforma yük olduğundan, kablonun koordinatları paraboliktir. Yoğun olarak yerleştiren askı halatlar perde olarak düşünülür, hareketli yüklerin etkisi altında askı halatların boyunda uzama görülmez, ana kablo üzerindeki düşey deformasyonlar ile tabliye üzerindeki deformasyonlar aynı olarak kabul edilir.
- Tüm ölü yükleri ana kablolar taşımaktadır.

3.1.2 Defleksiyon Teorisi

Ritter (1877), ve Melan (1888), asma köprülerin analizinde defleksiyon teorisini ileri sürmüştür, sonra Steinman ve Timoshenko bu teori üzerinde araştırma yapmışlar ve bu teoriyi geliştirerek büyük açıklıklı asma köprülerin analizinde uygulamışlardır. Defleksiyon teorisinin genel formu için seri yaklaşımı kullanılabilir ve bugün asma köprü mühendisleri tarafından gerçekte en çok kullanılan yöntemdir. 1930 yılında Timoshenko tarafından verilen bir tebliğde, sehimleri bir trigonometrik seri cinsinden ifade edilerek, defleksiyon teorisi denklemlerinin bir çözümü verilmiş ve özellikle Steuerman tarafından, tebliğin tartışılmasıyla geliştirilmiştir.

Defleksiyon teorisinin özellikleri, aslında var olan ölü yüklerin oluşturduğu ana kablo eksensel kuvvetleri, deformasyon ilişkisi nedeniyle yeniden bir direnç kuvveti oluşturur ve bu direnç kuvveti hareketli yük etkisi altında düşey deformasyon yaptığında hesaba katılır. Bu teori ilk olarak American Man Walton Köprüsünde uygulanmıştır. Ama bu

teorinin bazı temel varsayımları ile fiili durumları tutarlı değildir. Mesela, sabit yüklerin köprü doğrultusu boyunca yayılı yük olarak dağıtılma varsayımı, askı halatların köprü açıklığı boyunca perde olarak kıyaslanması ve elastik uzama ve yatay yer değiştirmelerin şekillenmemesi varsayımı, statik yükler altında, tabliyelerin gerilimsiz durumda ve tabliye boyuna doğrultuda deformasyonun yok sayılmasıdır. Bu varsayımlar yapı hesabında hem doğruluğu azaltır hem de tüm hesap yöntemi doğrusal olmayan analiz olduğu için, Süper pozisyon prensibi ve yük tesir çizgisi yöntemi kullanılamaz.

Defleksiyon teoreisi hesap varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Sabit ölü yükler köprü doğrultusunda üniforma yükler olarak dağılmıştır.
- Askı halatları dikeydir ve yoğun aralıklı tasarımı yapılmıştır.
- Hareketli yükler etkisi altında, sadece askı halatların çekme kuvveti esasa alınır ve gerilme, eğilmeleri dikkate alınmaz.
- Kiriş tabliyelerin düz ve eşit kesite sahiptir.
- Sadece ana kablo ve tabliyelerin dikey deformasyonu hesaplanır, askı halatların boyuna deformasyonu dikkate alınmaz.

3.1.3 Sonlu Eleman Yöntemi

Brotton (1966) yılında, İngiltere Severn Köprü'sünün inşaatında, ilk olarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar teorisi ile spiral askı halat problemini çözmüştür. O asma köprü ana kablosunun sadece eksenel kuvvetlere maruz kaldığını düşünerek, ilk eksenel kuvvet ve büyük yer değiştirmelerin ikincil etkileri ile lineer çubuk sonlu elemanların rijitlik matrisi düzeltilir. Böylece doğrusal olmayan davranışlar altındaki teğet rijitlik matris denklemleri elde edilir, sonra Newton-Raphson iteratif yöntemi ile artımsal Cebirsel denklemleri çözülür. Aynı yıl, Saafan (1966) daha kapsamlı olan doğrusal olmayan sonlu elemanlar teorisini önermiştir. Saafan, ilk eksenel kuvveti ve büyük yer değiştirmeleri hesaba dâhil etmekle kalmamış, ilk eğilme momenti ve kesme kuvveti, hatta eksenel kuvvet–Moment etkileşimlerinden oluşan ikincil etkileri de hesaba dâhil etmiştir. Böylece doğrusal olmayan davranışlar altındaki teğet rijitlik

matris denklemini elde etmiştir. Elde edilen doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde, yine artımsal Newton-Raphson iteratif yöntemi kullanılmıştır. Tezcan büyük yer değiştirme matris çerçeve analizlerinde, esnekliklerin ikincil etkilerini hesaba tam dâhil ederek, artımsal rijitlik denge denklemleri ile doğrusal olmayan denklemleri çözmüştür. Sonra Timoshenko ana kablo ve askı halatı sadece eksensel kuvvete maruz yapı sistemi olarak kıyaslayıp, düğüm nokta yer değiştirmeler ile düğüm noktası kuvvetleri arasındaki Sonlu elemanların yer değiştirme ilişkisini ortaya koydu.

Sonlu eleman yönteminin varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Yapının tüm yapısal bileşenlerinin gerilme oranları sınır koşulları içindedir, yapının doğrusal olmayan malzeme özellikleri dikkate alınmaz.
- Eleman olarak seçilen birim boydaki çubuk kesit boyları eşittir.
- Malzeme özellikleri Hook kanununa uyum sağlamalıdır.
- Yapının dış yüzey burkulmasını önlemek için, yapı dış yüzeyi burkulmasız sayılır.
- Ana kablo ve askı halatları tamamen esnek olup sadece çekme kuvveti etkisi vardır.
- Tekil yükler düğüm noktası üzerine etkiler.

3.2 Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler

Mühendislik yapıları her bir yapı elemanının kendi ağırlığından kaynaklanan yükler, hareketli yükler (taşıt ve yayaların ağırlığı), hareketli yüklerin çarpma ve dinamik etkisi, rüzgâr yükleri, kar yükü, deprem ve akarsu kuvvetleri gibi yükleri taşıyacak şekilde boyutlandırılır. Bütün bu yüklerle karşılık farklı tiplerde ve özelliklerde tepkiler gösterirler.

Asma köprüler de değişik yükler altında farklı davranışlar sergilerler. Bu nedenle gerek yapı olarak gerekse etkileyen yükler olarak çok fazla karmaşık özelliklere sahiptirler. Özel bir yapı olan asma köprülere etki eden büyüklükler, çoğunlukla yapının kendi ağırlığı, trafik yükü, deprem yükü, rüzgâr kuvveti ve sıcaklık değişimleri olarak ele alınmaktadır [62].

3.2.1 Kendi Ağırlığı

Ana kabloların geometrisi dış yüklerin etkisi altındaki denge koşulları tarafından belirlenir. Bu dış yükler Ölü yük (sabit yük) ve Hareketli yükleri dâhil etmekte olup, ölü yükler ana kablo ve askı halatların kendi ağırlığı, tabliye kirişi ağırlığı, hareketli yükler ise köprü tabliyesinden geçen araç ve rüzgâr yükleri içermektedir. Eğer ölü yükler oldukça büyük ise, ölü yüklerin belirttiği köprü geometrisi küçük hareketli yüklerin etkisi altında değişiklik oluşturmaz. Köprü tabliyesinin doğrusallığı ana kablo ve askı halatı tarafından belirlenir, dolayısıyla tabliyede de büyük yer değiştirmeler meydana gelmez.

3.2.2 Trafik Yükleri

Elastik yapılarda, özellikle köprülerde hareketli yüklerin dinamik etkisinin belirlenmesi çok karmaşık bir problemdir. Fazla sayıda parametreye sahip bu tür problemler pek çok araştırmacı tarafından çözümlenmeye çalışılmış ve güvenilir sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu amaçla çalışmalar, ya teorik ya da deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, hareketli yüklerin bazı parametrelerini indirgemek, genellikle de ihmal etmek suretiyle köprülerin dinamik davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Örneğin taşıt tipinin ihmal edilmesi ve sönüm parametresinin sabit alınması gibi yaklaşımlarla problem basite indirgenmeye çalışılmıştır [63]. Diğer yandan hareketli yüklerin, köprü titreşimine neden olan en önemli parametresinin hız olduğu yapılan araştırmalarda belirtilmiştir [64]. Köprülerin üzerinden geçen taşıt yükleri, standart kamyonlardan veya bunlara eşdeğer olan şerit yüklerinden oluşmaktadır. Standart kamyonlara eşdeğer şerit yükleri, trafik şeridi boyunca üniforma yayılı yük ile bir tekil yükten oluşmaktadır. Üniforma yayılı yükün ve tekil yükün şeridin eksen çizgisine dik üç metrelik bir genişliğe yayılı olduğu kabul edilmektedir. TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesine [65] göre dört ayrı standart yükleme sınıfı bulunmaktadır ve bu yükler Çizelge 3. 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 TCK yol köprüleri teknik şartnamesi'ne göre taşıt yük sınıfları

Yük Sınıfı	Araç Tipi
0	Otomobil, motorsiklet, kamyonet ve minibüsler (aks Aralığı <3,20 m)
1	Kamyonet, midibüs, kamyon, ambulans, belediye/halk otobüsü ve büyük otobüs (aks Aralığı >3,20 m)
2	Otobüs, kamyon ve treyler (3 akslı)
3	Otobüs, kamyon ve treyler (4 ve 5 akslı)

3.2.3 Sıcaklık Etkileri

Sıcaklık değişimleri malzemelerin uzunluklarının değişimine neden olmaktadır. Malzemelerin bu temel özelliğinin bir sonucu olarak, köprülerde üst yapı çelik elemanlarında uzama ve kısalma değişimleri meydana gelmektedir. Sıcaklığın artması ile köprü elemanlarında uzama, sıcaklık düştüğünde ise kısalma oluşmaktadır. Geleneksel olarak köprülerde bu değişimleri karşılamak için mesnet (yapının dayanak noktası) ile üst yapı arasında genişleme mafsalları bulunmaktadır [66]. Yapı sıcaklıkları, sürekli değişen meteorolojik koşullarda belirlenmektedir.

3.2.4 Rüzgâr Etkileri

Asma köprülerde tabliye rüzgâr kuvvetinden en fazla etkilenen bölümdür. Tabliye kirişi, yanal rüzgâr kuvvetlerine karşı çok esnektir. Bunun açıklık ortasındaki yanal yer değiştirmelerin üstte genişmez kabloların varlığı dolayısı ile tabliyenin ortasında bir yükselme ortaya çıkacak kadar büyük olmaktadır. Köprülerde rüzgâr kuvveti kısmen tabliye sisteminin yatay bir düzlemdeki elastik eğilmesi ile ve kısmen de kabloların ortaya koyduğu yerçekimi etkisi ile karşılanmaktadır. Gerçek bir aerodinamik kesit, rüzgâr akımını bölmek için keskin uçlar (rüzgâr burnu) yapılarak sağlanabilmektedir. Bunun için levhalara rüzgâr yönü ile ilgili olarak eğim verilir. Bu rüzgârın sürüklenme katsayısını 0,5'e kadar indirebilmektedir. Aerodinamik kesitlerin uygulanması rüzgârdan doğacak titreşimlerden kurtulmanın en etkili yoludur. Aerodinamik kesit

prensibi ilk kez 1960'lı yılların ortasında Severn Köprüsü'nde de uygulanmıştır. Buna benzer bir kesit daha sonra Boğaziçi Köprüsü'nde ve Humber Köprüsü'nde kullanılmıştır. Ayrıca Boğaziçi Köprüsü'nün etkiyen rüzgâr yükü altında salanımına geçmediğinden emin olmak için tabliyenin 100'mlik bir bölümünün 1/50 ölçekli model, İngiltere'de Ulusal Fiziksel Laboratuvarı'nda rüzgâr tüneline denemiştir [67].

TCK Yol Köprüleri Teknik Şartname'sine göre; rüzgâr yükü köprü boş iken 2,5 KN/m² alınmaktadır. Dolu köprülerde rüzgâr yükünün 1,25 KN/m² olduğu ve hem köprüye hem de trafik şeridine etkidiği kabul edilir (bu yükler 160 km/saatlik rüzgâr hızı temel alınarak hesaplanmıştır).

Yapılan rüzgâr analizi çalışmalarında, rüzgârın yatay olarak her yönde esebileceği kabul edilmektedir. Diğer yandan rüzgârın esme yönü de önemli bir etken olup, yüksekliğe bağlı olarak da değişim göstermektedir. Ayrıca rüzgâr tüm yüzey boyunca etkili olmaktadır. Genel olarak rüzgâr kuvvetinin hesaplanmasında matematiksel olarak kullanılan eşitliğin temeli Bernoulli eşitliğine dayanmaktadır. Bu eşitlik,

$$q = 0.5pv^2 \quad (3.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada q rüzgâr basıncı, p havanın yoğunluğu (1,225kg/m³) ve V'de rüzgâr hızıdır. Yüksekliğe bağlı olarak yapı yüzeylerine rüzgârın uyguladığı kuvvet,

$$P_e = (0.0000474KGC)v^2 \quad (3.2)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada:

P_e: Yapı yüzeylerine etkiyen rüzgâr kuvveti (KN/m²)

K: Rüzgâr hız basınç katsayısı

G: Yüksekliğe bağlı olarak hesaplanan rüzgâr tepki katsayısı

C: Yatay, Düşey ve eğik yüzeylerdeki farklı dış değerleri için belirlenen basınç katsayısı

v: Rüzgâr hızı (km/saat)

ifade eder [68]. Çizelge 3. 2 yüksekliğe bağlı olarak belirlenen K ve G değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3. 2 Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri [68]

Yükseklik	K	G
0-4,5	0,80	1,32
6	0,87	1,29
10	1,00	1,25
15	1,13	1,21
30	1,38	1,16
90	1,88	1,09
150	2,18	1,06

3.2.5 Deprem Yükleri

Doğal afetlerin en önemlilerinden biri olan deprem, yer kabuğunun bir titreşimi olduğu için, yapıların mesnetlerinde zamana bağlı bir yer değiştirme hareketi doğurarak dinamik bir etki oluşturur. Deprem etkisi, yapının kullanılma ömründe en ağır bir yükleme türü olduğu halde, yapının bu etki altında kalma olasılığı düşüktür. Bu nedenle problemin uygun değer bir mühendislik yaklaşımı ile ele alınması ve deprem etkisi altında yapının davranışının incelenmesi çok önemlidir.

Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nde deprem yükleri, köprü'nün geçiş ekseninde ve bu eksene dik yönde hesaba katılmış, yatayda deprem ivmesi 0.1 g, düşeyde deprem ivmesi ise 0.05 g olarak tasarımda yer almıştır.

3.2.6 Tasarım Yük Kombinasyonları ve Sınır Durumları

Bu çalışmada modellenen köprü ölü yük, hareketli yük, deprem etkileri dâhil olmak üzere tasarım yüklerinin çeşitli türlerinde, kod-uyumlu Kombinasyonlar tabii tutularak analiz yapılmıştır. Köprü modeline etkileyen ölü yük ise çelik birim ağırlığı için belirtilen değere dayalı hesaplanan yapısal bileşenlerinin kendi ağırlığını dâhil etmektedir.

Yapısal olmayan elemanları, bağlantı ve Köprü güvertesinin enine doğrultudaki diyafram kirişleri basitlik amacıyla analiz modeline dâhil değildir. Ancak, köprü güvertesini oluşturan tabliye kirişlerin ağırlığı ölü yük olarak model analizine dahil edilmiştir. Hareketli yük etkilerinde her yüklü şartların olasılık Kombinasyonları eş zamanlı şerit doluluk olasılığı karşılıklı gelen birden fazla faktörler ile çarpılarak belirlenmiştir. Hareketli yük analizi için AASHTO-LRFD da belirtilen tasarım trafik yükleri özellikleri kullanılmıştır. Deprem yüklerinde ise spektrum analizi ve direkt entegrasyon

doğrusal zaman alanı analiz yöntemleri uygulanmıştır. Analizde, yük etkileri AASHTO-LRFD 2007 [69], Bölüm 3, Madde 3. 4 sınır durumlarına göre kat sayı faktörleri ile ilave edilmiştir. AASHTO yük faktörleri ve seçilen farklı sınır durumları için kullanılan Kombinezonlar Çizelge 3. 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3 AASHTO-LRFD Seçilen yük kombinezonu sınır durumu ve yük faktörü

Yük kombinezonu sınır durumu	Yük Faktörleri				
	DC	LL	WS	TU	EQ
Dayanımlık I	γ_p	1.75	-	0.5	-
Dayanımlık V	γ_p	1.35	0.4	0.5	-
Aşırı-I	γ_p	0.5	-	-	1.0

DC : Ölü yük bileşimleri ve ekleri
LL : Hareketli yükler
WS: Rüzgar yükü
TU : Sıcaklık değişimi
EQ : Deprem yükü

Buna ek olarak, kalıcı yükler için yük faktörleri yapısal bileşenler ve yapısal olmayan ekleri (γ_p) ölü yük için kalıcı yük faktörü değeri 0.90 ve 1.25 Aralığında olabileceği belirtilen Çizelge 3. 4'te sunulmuştur.

Çizelge 3. 4 AASHTO-LRFD Sabit yükler için yük faktörleri (γ_p)

Yük çeşitleri, temel türler ve hesaplarda kullanılan yöntemler	Yük Faktörü	
	Maximum	Minimum
DC: Bileşenleri ve ekler	1.25	0.90
DC: Dayanım IV	1.50	0.90

Eğer yapı sadece sabit yük (DL), hareketli yük (LL), rüzgâr yükü (WS), ve deprem yükü(EQ) etkisi altında ise, rüzgâr ve deprem yükünün yön değiştirebilir özelliği göz önüne alınarak, Dayanım ve Aşırı (Ekstrem) Olay sınır durumunda aşağıdaki hazır (default) olan yük durumları göz önüne alınır (AASHTO 3.4.1):

$$1.0 DL + 1.75 LL + 0.50 Temp^{(+)}$$

$$1.0 DL + 1.75 LL + 0.50 Temp^{(-)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.35 \text{ LL} + 0.40 \text{ Wind}_{(x)} + 0.50 \text{ Temp}^{(+)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.35 \text{ LL} + 0.40 \text{ Wind}_{(x)} + 0.50 \text{ Temp}^{(-)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.35 \text{ LL} + 0.40 \text{ Wind}_{(y)} + 0.50 \text{ Temp}^{(+)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.35 \text{ LL} + 0.40 \text{ Wind}_{(y)} + 0.50 \text{ Temp}^{(-)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 0.50 \text{ LL} + 1.0 \text{ EQ}_{(x)} + 0.30 \text{ EQ}_{(y)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 0.50 \text{ LL} + 1.0 \text{ EQ}_{(y)} + 0.30 \text{ EQ}_{(x)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ Wind}_{(x)} + 0.50 \text{ Temp}^{(+)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ Wind}_{(x)} + 0.50 \text{ Temp}^{(-)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ Wind}_{(y)} + 0.50 \text{ Temp}^{(+)}$$

$$1.0 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} + 1.0 \text{ Wind}_{(y)} + 0.50 \text{ Temp}^{(-)}$$

Bunlar aynı zamanda, AASHTO LRFD 1997 şartnamesi kullanıldığında SAP2000 in önceden hazır olan (default) boyutlama yük kombinezonlarıdır. Kullanıcı gerektiğinde diğer yük kombinezonlarını tanımlayabilir.

Çarpanlarla artırılmış yüklerde hareketli yükün payını azaltmak için, hareketli yük azaltma çarpanı, eleman hareketli yük kuvvetlerine eleman-eleman uygulanır.

Bu çalışmada, bu değer daha gerçekçi köprünün ilk denge durumunu elde etmek üzere, yük kombinasyonlarında 1.0 olarak alınmıştır. Bu çalışmada analiz edilen köprü tasarımı değerlendirmesi için kullanılan AASHTO-LRFD limit durumları olarak şunlar seçildi:

- Dayanımlık I: Rüzgâr yükleme olmadan köprü normal araç kullanımı ile ilgili Yük Kombinezonu.
- Dayanımlık V: 90 km / saat rüzgâr hızı ile köprü kullanımının normal araç kullanımına ilişkin yük Kombinezonu.
- Aşırı-I: Deprem etkileri de dâhil olmak üzere yük Kombinezonu.

3.3 Serbest Titreşim Analizi ve Modal Davranış

Yapıların doğal titreşim özelliklerinin araştırılması teorik önemi ve uygulama değeri açısından çok önemlidir. Öncelikle, Nitel özellik teorisi titreşim etkisi probleminin temel

tartışma konusudur, bu tür problemlerde frekans ve mod değerlerinden yararlanarak yapının fiziksel parametreleri belirlenmektedir; İkinci olarak, Nitelik özellik teorisi frekans ve modların doğruluğuna karar vermesine yardımcı olmuştur.

Köprü yapısının titreşimi köprünün kullanımı ve güvenliğini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Dolayısıyla, köprülerin tasarım hesapları araç yük dinamik etkilerinin içeriğini kapsamaktadır. Köprü yapı sisteminin dış yük etkileri altındaki indüksiyon derecesi, köprü kendi doğal titreşim frekansı hatta dış yükler etkisi altındaki frekans oranı ile yakın ilgili olduğundan, köprü yapı sistemlerinin titreşim analizlerinde, kesin olarak öncelikle yapı sistemin kendisinin dinamik özellikleri olan kendi doğal frekansı ve sönümünün (sürtünme) belirlenmesi gerekiyor. Doğal titreşim ise titreşim sisteminin doğal özelliğın yansıtılmasıdır.

Dinamik analizlerde ilk adım olarak genelde doğal frekans değerleri ve bu frekanslara ait Şekil değiştirme modları hesaplanmaktadır. Bu değerlere yapının her hangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışını tespit etmektedirler. Bu modalı inceleyerek zorlayıcı kuvvetlerin yapıya hangi modlarda daha çok enerji verebileceğı ve yapının hangi noktasındaki tepkiye hangi modların daha büyük katkı yapacağı tespit edilmektedir. Genellikle yapılan çalışmalarda az sayıda modların ve bunlarla ilgili frekans değerlerinin hesaplanması pratik açıdan yeterli olduğı ifade edilmektedir.

Herhangi bir yapının frekansları, yapının sadece kütle matrisi ve rijitlik matrisi dikkate alınarak sönümsüz serbest titreşimi sonucu elde edilmektedir. Dolayısıyla bir yapının doğal frekansları, yapıya etkiyen diğer yüklerden (rüzgâr, deprem, hareketli araç ve vb) bağımsız hesaplanmaktadır.

Buna göre sönümsüz serbest titreşim eşitliğı,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3.3)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada:

[M]: Sistem Kütle Matrisini

[K]: Sistem Rijitlik Matrisini

{ü}: İvme Vektörünü

{u}: Rölatif Yerdeğıştirme

vektörünü göstermektedir. Sistemin toplam rijitlik matrisi $[K] = K_E + K_G$ dir.

K_E :Toplam standart elastik rijitlik matrisini, K_G : ise toplam geometrik rijitlik matrisini göstermektedir. Harmonik hareket için sistemin $\{u\}$ yerdeğiştirmeleri,

$$\{u(t)\} = A \cos(\omega_n t - \alpha_0) \quad (3.4)$$

elde edilebilir. Burada:

$\{u(t)\}$: Yerdeğiştirmeyi; A : Harmonik hareketin genliğini;

ω_n : Doğal açısal frekansı; t : Zamanı; α_0 : Faz açıını;

ifade etmektedir. (3. 4) denklemini, denklem (3. 3)'de yerine konursa:

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{u\} = 0 \quad (3.5)$$

şeklinde elde edilebilmektedir. Sıfırdan farklı çözüm ancak katsayı determinantının sıfıra eşit olmasıyla mümkün olmaktadır.

$$|[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (3.6)$$

Bu eşitliğe yapısal sistemin frekans eşitliği denir ve serbestlik derecesi kadar köke sahiptir. Bulunan köklerin karekökleri $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ köprünün n adet titreşim modunun doğal açısal frekanslarını göstermektedir. Sistemin doğal frekanslarının en küçüğüne temel frekans denilmektedir. Modal titreşim frekansları büyüklüklerine göre sıralanarak belirlenmektedir.

$$0 \leq \omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_3 \leq \dots \leq \omega_n \quad (3.7)$$

Her bir doğal açısal frekans için Eşitlik (3. 5)'teki katsayı matrisi hesaplanıp i'inci modal frekans karşılık gelen harmonik titreşim genlikleri hesaplanabilmektedir.

$$A_i^T = [A_{1i} A_{2i} A_{3i} \dots A_{ni}] \quad (3.8)$$

Her bir doğal açısal titreşim frekansı için hesaplanan genlik vektörleri: modal vektör, doğal mod veya kısaca mod olarak adlandırılmaktadır. Maxwell-Betti Teorisi

kullanılarak normalleştirilmiş modlar bulunabilir. Bu teoriye göre i'inci doğal titreşim modları arasındaki ortogonallik (3. 9) Eşitliği ile gösterilmektedir.

$$A_i^T [M] A_j = 0 \quad i \neq j \quad (3.9)$$

Serbest titreşim normalleştirilmiş modu Φ_{ij}

$$\Phi_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{A_j^T [M] A_j}} \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu

A_{ij} : i'nci düğüm noktasında j numaralı açılal frekanstan meydana gelen genlik

$[M]$: Sistem kütle matrisi

A_j : j'nci açılal frekanstan meydana gelen genlik vektörüdür.

Diğler yandan, Dumanoğlu ve Severn (1989)'da rüzgâr ve trafik yükü nedeniyle meydana gelen geçici titreşimlerin ölçümleri sonucunda asma köprülerin mod şekilleri ve doğal frekanslarının elde edilebileceğini göstermişler ve örnek olarak da Boğaziçi ve Humber köprülerini seçmişlerdir [62].

Dinamik analizlerde, yapı davranışının doğru olarak belirlenmesi yeterli sayıda mod sayısının dikkate alınması ile mümkün olmaktadır. Asma ve kablolu köprülerin düşey doğrultudaki analizinde ilk 15 modun dikkate alınması yeterli olmaktadır [70].

3.3.1 Davranış Spektrumu Analizi

Davranış spektrum analizi, deprem etkisinde yapılan maksimum tepkisini bulmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Verilen bir yer hareket ivmesi için davranış spektrumu; doğal açılal frekansının ve sönüm oranının fonksiyonu olan tek serbestlik dereceli sistemin, yerdeğıştirme spektrumu, hız spektrumu, ivme spektrumu ile gösterilen, maksimum tepkisinin grafiksel gösterimidir. Yapının her modundaki maksimum tepkisi modal frekanslardaki davranış spektrum genlikleriyle belirlenir.

Daha sonrayapının yaklaşık maksimum tepkisi, maksimum modal tepkiler toplanarak elde edilir [71].

Modal tepkilerin toplanması için çeşitli yöntemleri mevcuttur. Davranış spektrumu yönteminin en çok bilinen şekli, modlara ait tepkilerin karelerinin karekökünü alarak tepki büyüklüklerinin maksimumlarını hesaplayan Square Roots Sum of Squares (SRSS) Yöntemi'dir. SRSS Yöntemi, modal tepkilerin istatistiksel olarak bağımsız olduğunu kabul etmektedir. Dolayısıyla SRSS Yöntemi karşıt korelasyon etkilerinin önemsiz olduğu, doğal frekansları birbirine yakın olmayan yapılar için geçerlidir [71]. Eğer modal frekanslar birbirine yakınsa, karşıt korelasyon etkileri ilave edilmelidir.

Davranış spektrumu metodunun bu özel hali Complete Quadratic Combination (CQC) Metodu olarak bilinir. CQC Metodu ilk olarak Der Kiureghian tarafından ortaya atılmıştır. CQC Metodu modal Kombinezondaki hataları azaltmaktadır [71], [72].

Kısaca, SRSS Yöntemi karşıt korelasyon etkilerinin önemsiz olduğu ve doğal frekansları birbirine yakın olmayan; CQC Yöntemi ise karşıt korelasyon etkilerinin önemli olduğu ve doğal frekansları birbirine yakın yapılar için geçerlidir [71].

Asma köprüler, karşıt korelasyon etkileri önemli ve doğal frekansları birbirine yakın yapılar olduğu için spektrum analizleri sırasında CQC Yöntemi kullanılmalıdır [71].

3.3.2 Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analizi

Deprem ivme kayıtları ve hareketli araç yükleri gibi dinamik yüklere maruz kalan bir yapı sisteminin dinamik yükler etkisi altındaki davranışların zamana bağlı çözümlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem yapı sisteminin dinamik özellikleri ve yer hareketi özelliklerine dayalı olarak, zamana bağlı olarak değişen yükleri uygulanır ve bu yükler etkisi altındaki değişen düğüm nokta yer değiştirmesi ve eleman kuvvetleri hesaplanır. Hesaplamalarda, bir zaman alanı fonksiyonuna gereksinim vardır. Çözümler modal veya doğrudan entegrasyon metotlarından birini kullanılarak yapılabilir. Hareket denkleminin çözümü için iki farklı nümerik analiz yöntemleri vardır ve her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Doğrusal olmayan sorunları için, doğrudan entegrasyon zaman tanımı analizleri mod birleştirmelerdeki doğrusal olmayan

davranışlara önem gösterir. Doğrudan entegrasyon sonuçları mod birleştirme sonuçlarına göre zaman adım boyutuna çok hassasiyet gösterir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, asma köprünün sonlu eleman modeli Sap 2000 programında oluşturulmuştur. Ayrıca Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün yapısal performansının değerlendirilmesi için Sap 2000 programında gerçekleştirilen dinamik analizlerde Newmark yöntemi tercih edilmiştir.

Newmark yönteminde, hız ve yer değiştirmeler t ile $t + \Delta t$ zamanı arasında,

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1 - \gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (3.11)$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t(\Delta t) + [(0.5 - \beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [73], [74]. Burada, U_t , \dot{U}_t , \ddot{U}_t sırasıyla t anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $U_{t+\Delta t}$, $\dot{U}_{t+\Delta t}$, $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ sırasıyla $t + 1$ anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde β ve γ integrasyon parametreleri olup Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntem stabilize ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir. $\gamma = 1/2$ ve $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır [74].

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = R \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$, $[K]$ ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; U , \dot{U} , \ddot{U} ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. R ise ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

yukarıda verilen (3.13) denkleminin t ve $t + 1$ anındaki dengesi dikkate alındığında,

$$[M]\ddot{U}_t + [C]\dot{U}_t + [K]U_t = R_t \quad (3.14)$$

$$[M]\ddot{U}_{t+1} + [C]\dot{U}_{t+1} + [K]U_{t+1} = R_{t+1} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eğer (3.15) denkleminde (3.14) denklemi çıkarılırsa artımsal hareket denklemi,

$$[M]\Delta\ddot{U}_t + [C]\Delta\dot{U}_t + [K]\Delta U_t = \Delta R_t \quad (3.16)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, Δ değişim operatörünü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\ddot{U}_t &= \ddot{U}_{t+1} - \ddot{U}_t \\ \Delta\dot{U}_t &= \dot{U}_{t+1} - \dot{U}_t \\ \Delta U_t &= U_{t+1} - U_t \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (3.11) ve (3.12) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_t = (\Delta t)\ddot{U}_t + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_t \quad (3.18)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t)\dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_t + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_t \quad (3.19)$$

ifadelerinde edilmektedir. (3.19) denkleminde $\Delta\ddot{U}_t$ çekilecek olursa;

$$\Delta\ddot{U}_t = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_t - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_t - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_t \quad (3.20)$$

şeklinde elde edilmektedir. (3.20) denklemi (3.18) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta\dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_t + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_t \quad (3.21)$$

Şeklinde elde edilmektedir. (3.20) ve (3.21) denklemleri artımsal hareket denklemi

(3.16)'de yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left. \begin{aligned} \left([K] + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}[C] + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}[M]\right)\Delta U_t &= \Delta R_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)}[M] + \frac{\gamma}{\beta}[C]\right)\dot{U}_t \\ &+ \left\{\frac{1}{2\beta}[M] + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)[C]\right\}\ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

ifadesi elde edilmektedir. Dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumunu sağlayarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce ΔU_t (3.22) denkleminde bulunmuştur. Daha sonra, (3.20) ve (3.21) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{U}_t$, $\Delta \ddot{U}_t$ elde edilmektedir. Bir sonraki adıma ait değerler, (3.23) denkleminde elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} U_{t+1} &= U_t + \Delta U_t \\ \dot{U}_{t+1} &= \dot{U}_t + \Delta \dot{U}_t \\ \ddot{U}_{t+1} &= \ddot{U}_t + \Delta \ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜNÜN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

4.1 Giriş

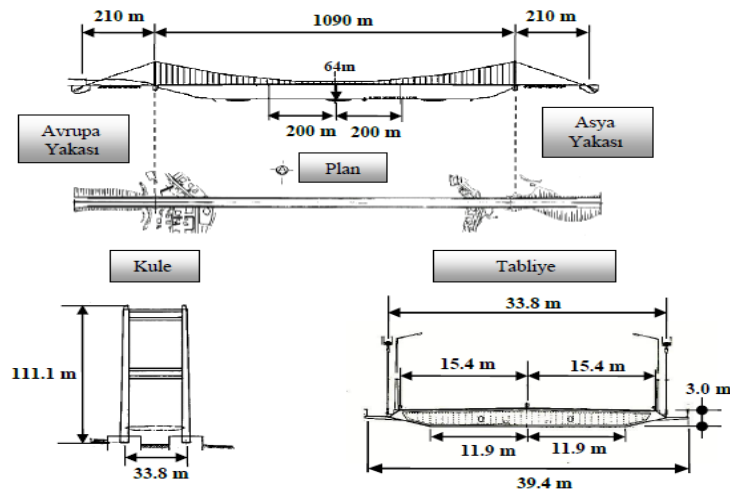
Köprü yapısının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları, yapı sisteminin kendinde var olan özellikler olup, yapıların sismik tepkileri ile yakın ilişkilidir. Yapının dinamik özelliklerinin doğru analizi sismik tepki analizinin temelidir. Yapının dinamik özellikleri yapı bileşim sistemi, yapı rijitliği, kütle ve direnç koşullarına bağlıdır. Dolayısıyla uzun açıklıklı asma köprülerin ideal dinamik analiz modelinin oluşturulması, hem dinamik analizin yapılması hem de bu analizlerin kavranılması bakımından çok önemlidir.

4.2 Büyük Açıklık Asma Köprülerin Dinamik Özellikleri

4.2.1 Fatih Sultan Mehmet Köprüsü

Bu tez çalışmasında sayısal uygulama olarak İstanbul'da bulunan ve Asya ile Avrupa'yı birbirine bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (Şekil 4. 1) seçilmiştir. Yapımına 1985 yılında başlanmış olan köprü 1988 yılında tamamlanmıştır. Fatih Sultan Mehmet (FSM) Asma Köprüsü kenar açıklıkları olmayan, çelik kulesi ve çift düşey askı kabloları olan ve ağırlık ankraj sistemine sahip bir asma köprüdür. Ana açıklığı 1090 m olup deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 64 m dir. Kule temelleri Boğaz'ın iki yakasındaki yamaçlara yerleştirilmiş olup, kuleler hemen hemen tabliye mesnet seviyesinden

başlamaktadır. 111.1 m yüksekliğinde olan çelik kuleler ikişer adet yatay kiriş ile birbirine bağlanmıştır. Kulelerin boyutları tabanda 5x4 metre, tepede ise 4x3 metredir. Ana kablolar arasındaki mesafe 33,8 metredir. Her biri 4 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır. Tabliye aerodinamik enkesitli kutu şeklindedir. Kutu kesitli tabliye 33,80 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde olup her iki yanında 2,8 m genişliğinde konsol şeklinde yaya yolları yer almaktadır. Tabliye 61 üniteden oluşmaktadır.



Şekil 4. 1 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsünün genel düzenlemesi[75]

Gerçekçi deprem analizi için asma köprüün üç boyutlu analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 4. 2). Köprüün geometrik malzeme ve kesit özellikleri Çizelge 4. 1 ve Çizelge 4. 2'de verilmiştir. İki boyutlu model ile hesaba katılmayan burulma modları ve kabloların anti-faz yanal titreşim modları, üç boyutlu modelleme yapılarak dikkate alınmıştır. Tabliye, kuleler ve kablolar çubuk kiriş elemanlar ile modellenirken, askılar kafes elemanı ile modellenmiştir. Köprüün sonlu eleman modeli, 356 adet düğüm noktasına, 227 adet kiriş elemanına, 120 adet rijit bağlantı elemanına ve 120 adet kafes elemanına sahiptir. Tabliye geometrisi, tabliye kesitinin orta noktasından geçen bir çizgi üzerinde tariflendiğinden, rijit bağlantı elemanları ile modellenmiştir. Rijit bağlantı elemanları tabliye ile askılar arasında bağlayıcı görevi görmektedir. Bu kütsüz bağlantı elemanları rijit cisim davranışını yansıtabilmek amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli 2048 adet serbestlik derecesi

ile tanımlanırken, hesaplamalarda sönüm oranı %2 olarak ele alınmıştır. Analizler ilk 15 mod için gerçekleştirilirken, P- Δ etkileri kablolar ve askılar için göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 4. 1 Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün malzeme özellikler

	Kütle Yoğunluğu (t/m ³)	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Poisson Oranı
Ana kablo	8,3013	81,4393	1.893E11	0,3
Yan Kablo	8,0836	79,3049	1.893E11	0,3
Askı Halatı	8,8221	86,5447	980.665E8	0,3
Kule	7,8453	76,9822	1.961E11	0,3
Tabliye	12,3525	121,179	1.961E11	0,3
Fiktif Eleman	-	-	1.961E11	0,3

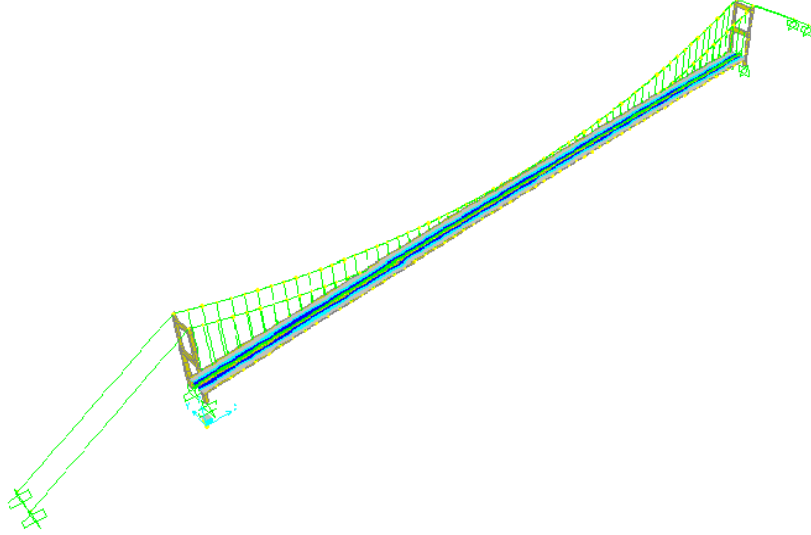
Çizelge 4. 2 Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün kesit özellikleri

	A m ²	I _{yy} m ⁴	I _{zz} m ⁴	J m ⁴
Ana Kablo	0,36615	0,0107	0,0107	0,0213
Yan Açıklık kablosu	0,39129	0,0122	0,0122	0,0244
Askı Halatı	0,005064	2,041E-06	2,041E-06	4,082E-06
Tabliye Kirişi	1,25816	1,7318	129,273	4,754
Kuleler	1,4865	0,9929	5,0152	-
	1,441	0,7924	4,2921	-

Çizelge 4. 2 Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün kesit özellikleri(devami)

	1,374	0,5494	3,3472	-
	1,3335	0,43	2,8398	-
	1,2751	0,2901	2,1927	-
	1,2029	0,1874	1,6311	-
	0,4699	-	3,5925	-
	0,3109	-	2,4191	-
Fiktif	0,0625	0,0003255	0,0003255	0,0005501

A:Kesit Alanı; J:Burulma Sabiti; Iyy, Izz: Atalet Momenti



Şekil 4. 2 Fatih Sultan Mehmet asma köprüsü üç boyutlu modeli

4.2.2 Köprü Modal Analizi

Köprü yapısının modal analizi yapı sismik tepki analizinin temeli olup, doğal frekanslarını ve titreşim mod şekillerini içermektedir. Fatih Sultan Mehmet köprüsü tek açıklıklı çift kuleli asma köprü olup, Sonlu eleman programı Sap 2000 ile modellenmiştir. Yapının genel dinamik denklemi aşağıdaki gibidir,

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (4.1)$$

Yapıların serbest titreşim özellik analizlerinde genelde sönüm dikkate alınmadığı için sönüm matrisi $[C] = 0$ ve kuvvet $\{F\} = 0$ sifıra eşit olacaktır. Böylece yapının sönümsüz serbest titreşim denklemini elde edebiliriz:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad (4.2)$$

denkleminde, $[M]$ yapının kütle matrisi, $[K]$ yapının rijitlik matrisi ifade etmektedir.

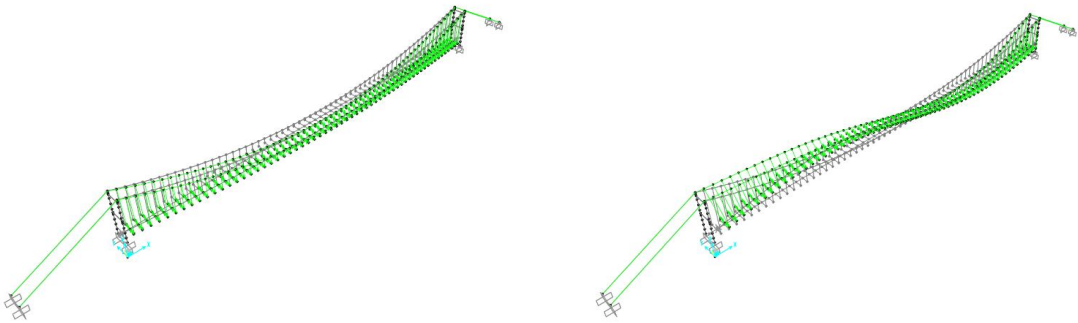
Yapı serbest titreşiminin karakteristik denklemini,

$$([K] - \omega^2[M])\{\delta_0\} = \{0\} \quad (4.3)$$

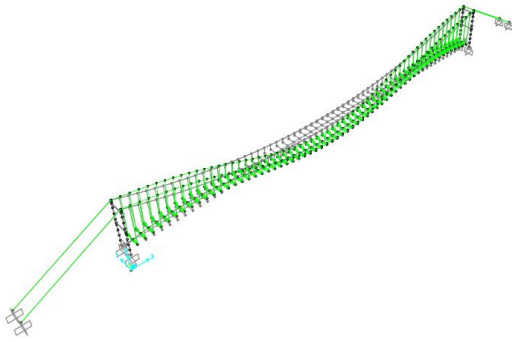
olup denkleminde, ω ve $\{\delta_0\}$ sırasıyla yapının doğal frekans ve doğal modlarını göstermektedir. Diğerleri ise yapının kütle matrisi ve rijitlik matris değerlerine bağlıdır. Köprü yapısının serbest titreşim özellikleri, dinamik analiz için önemli parametresi olup, doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranını içermekte ve köprü rijitlik indeksleri yansıtmaktadır. Bu özellik yapı sisteminin bileşenlerine, yapı rijitliğine, kütle dağılımına ve sınır koşullarına bağlıdır. Serbest titreşim analizi, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanlı dinamik analiz davranışının belirlenmesinde çok önemlidir. Şekil 4. 2’de üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanarak modal analizi yapılan köprünün ilk 20 doğal periyod, doğal frekans ve mod şekli Şekil 4. 3’te verilmektedir.

Mod 1 – $T_1=13.92774$ s ; $F_1=0.0718$ Hz

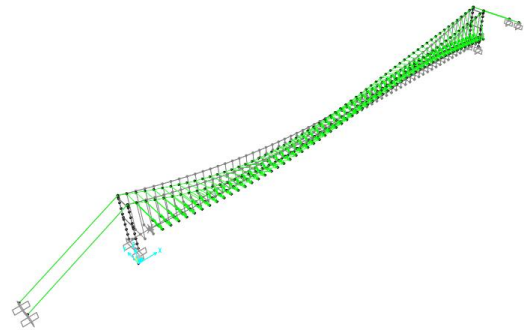
Mod 2 – $T_2=7.23358$ s ; $F_2=0.13824$ Hz



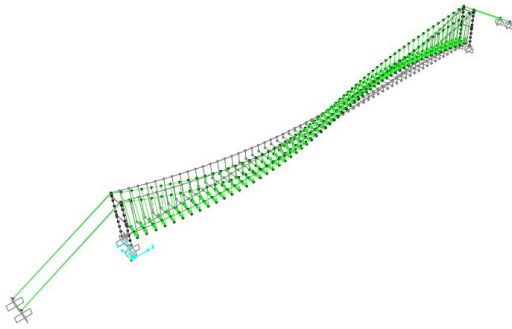
Mod 3 – $T_3=5.14488$ s ; $F_3=0.19437$ Hz



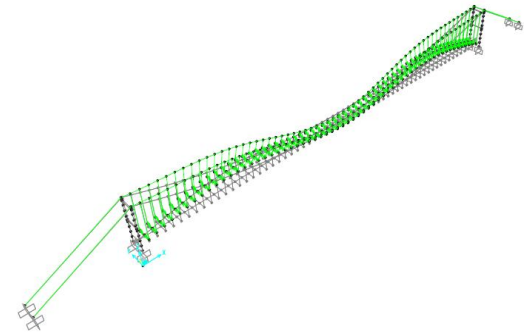
Mod 4 – $T_4=5.01326$ s ; $F_4=0.19947$ Hz



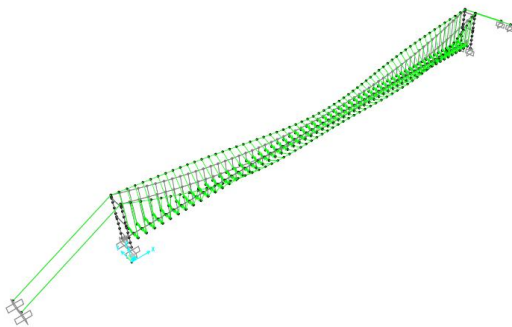
Mod 5 – $T_5= 4.70094$ s ; $F_5= 0.21272$ Hz



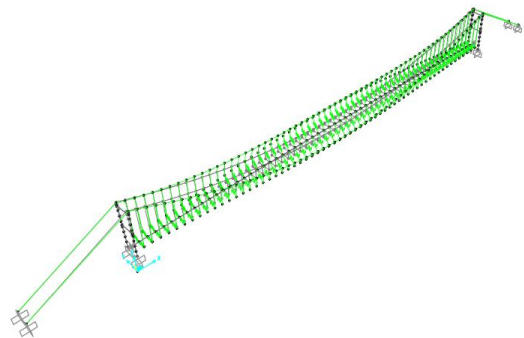
Mod 6 – $T_6= 3.88659$ s ; $F_6= 0.25729$ Hz



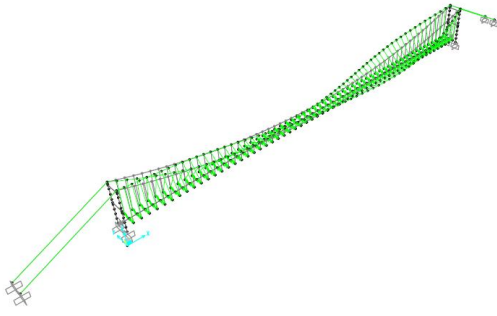
Mod 7 – $T_7= 3.86871$ s ; $F_7= 0.25848$ Hz



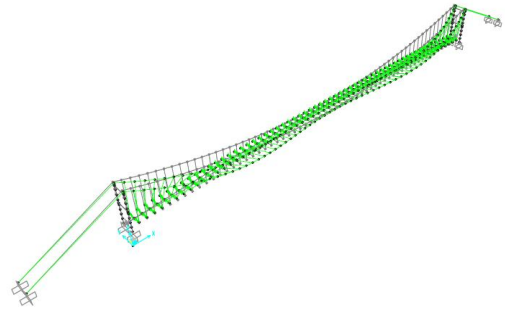
Mod 8 – $T_8= 3.85924$ s ; $F_8= 0.25912$ Hz



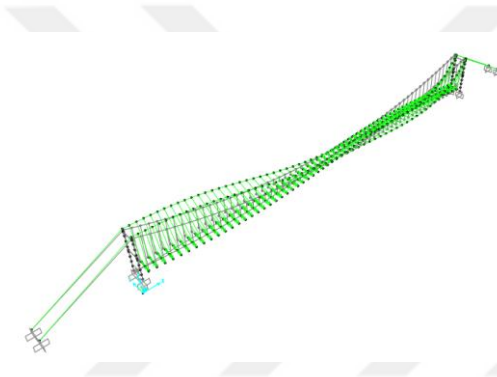
Mod 9 - $T_9 = 3.64237$ s ; $F_9 = 0.27455$ Hz



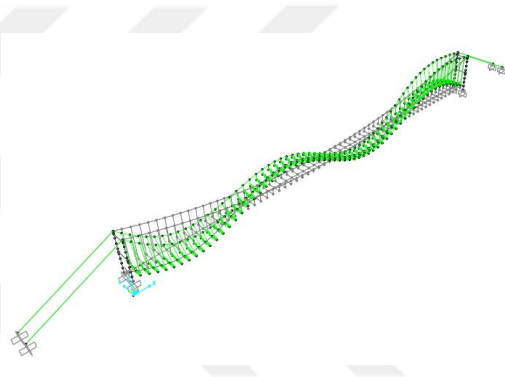
Mod 10 - $T_{10} = 3.59412$ s ; $F_{10} = 0.27823$ Hz



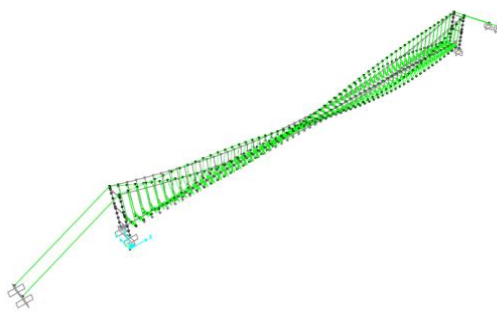
Mod 11 - $T_{11} = 3.48145$ s ; $F_{11} = 0.28724$ Hz



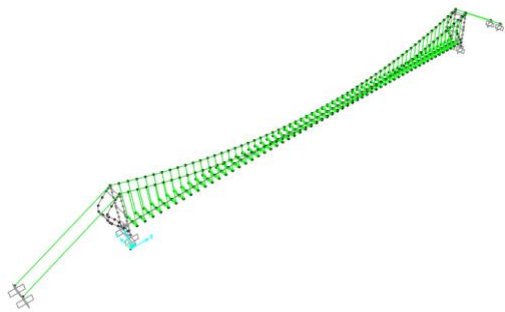
Mod 12 - $T_{12} = 3.25528$ s ; $F_{12} = 0.30719$ Hz



Mod 13 - $T_{13} = 3.24831$ s ; $F_{13} = 0.30785$ Hz

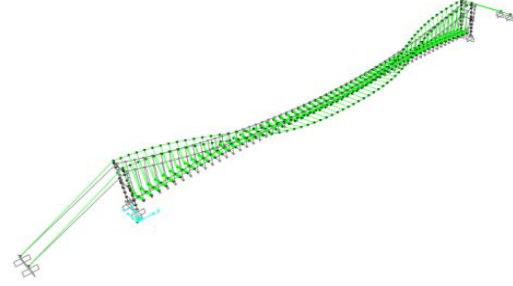
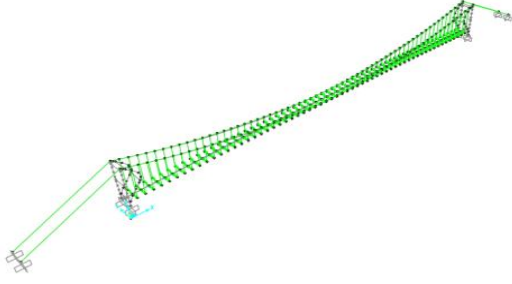


Mod 14 - $T_{14} = 2.90303$ s ; $F_{14} = 0.34447$ Hz



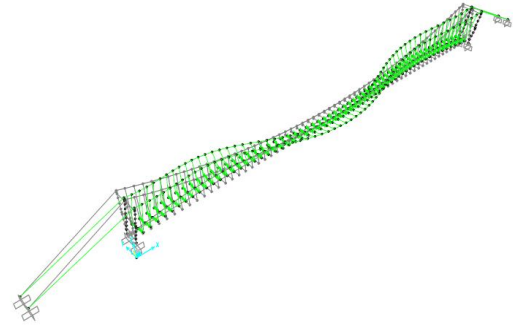
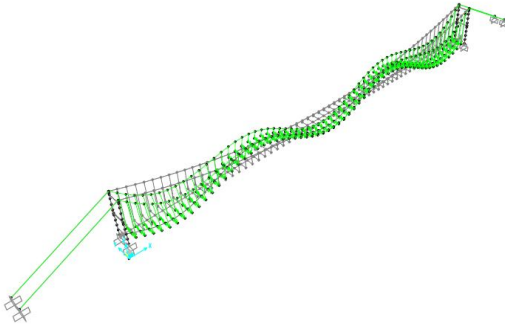
Mod 15 - $T_{15}= 2.89387$ s ; $F_{15}= 0.34556$ Hz

Mod 16 - $T_{16}= 2.55243$ s ; $F_{16}= 0.39178$ Hz



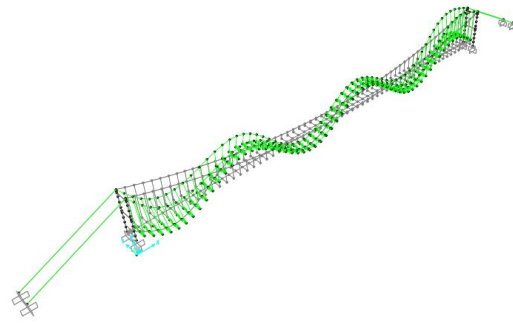
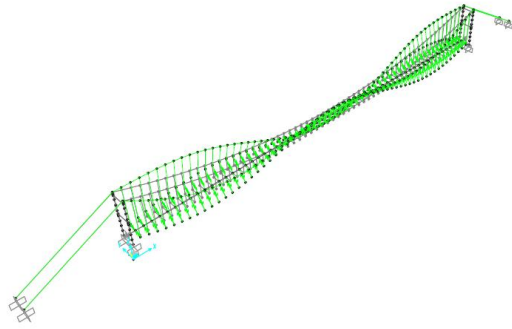
Mod 17 - $T_{17}= 2.51065$ s ; $F_{17}= 0.3983$ Hz

Mod 18 - $T_{18}= 2.25043$ s ; $F_{18}= 0.44436$ Hz



Mod 19 - $T_{19}= 2.14322$ s ; $F_{19}= 0.46659$ Hz

Mod 20 - $T_{20}= 2.03893$ s ; $F_{20}= 0.49045$ Hz



Şekil 4. 3 FSM köprüsü'nün dinamik karakteristikleri

4.3 FSM Köprüsünün Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Deprem Performansının Belirlenmesi

Mevcut köprünün deprem etkisi altındaki performanslarının değerlendirilmesi için, genel olarak iki farklı kriter geçerlidir. Birinci kritere göre, yapıya etkiyen deprem yükleri yönetmeliklerde öngörülen düzeye ulaştığında yapının istenilen performans hedefini dayanım, yer değiştirme ve şekil değiştirmeler bakımından karşılayıp karşılamadığı araştırılır. İkinci kritere göre yapılan araştırmada ise, belirli bir deprem etkisi altında yapıdaki yer değiştirme istemine ulaşıldığında, yapıdan beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Yönetmeliklerde yer alan ve yapıların deprem yükleri altında analizi için kullanılmakta olan yöntemler, genel olarak yapıların doğrusal-elastik davranış göstereceği esasına dayanmaktadır. Deprem etkilerine göre yapı sistemlerinin analizinde, malzemenin doğrusal- elastik sınır ötesindeki davranışını dikkate almak üzere, taşıyıcı sistem davranış katsayısı tanımlanmakta ve elastik deprem yükleri bu katsayıya bağlı olarak bir deprem yükü azaltma katsayısı ile küçültülmektedir. Dolayısıyla doğrusal-elastik analiz yöntemlerinde yapının davranışı hesaplanan katsayıya bağlı kılınmaktadır. Gerçekte ise deprem etkileri, yapıların büyük miktarda enerji sönümlendiği elastik ötesi davranışa neden olmakta ve bunun sonucunda doğrusal-elastik analiz yöntemleri ile tasarlanan yapılarda ağır hasara neden olabilmektedir. 'Doğrusal-elastik davranış' varsayımı, analizleri önemli miktarda kolaylaştırmasına ve yapının elastik kapasitesini iyi bir şekilde belirlemesine karşın, yapının göçme mekanizmasının belirlenmesi ve elastik ötesi kapasitesinin devreye sokulması konusunda yetersiz kalmaktadır. Ayrıca doğrusal-elastik analiz yöntemleri ile yapı sisteminin deprem etkileri altında gerçek performansının anlaşılması da mümkün olmamaktadır. Depremlerde oluşan hasarın ve ekonomik kayıpların çok büyük miktarda olması, depreme dayanıklı yapı tasarımında hasar kontrolünün, dolayısıyla performansa dayalı tasarım ve değerlendirmenin önemini ortaya çıkarmıştır. Yapı sistemlerinin deprem etkileri altında performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesinde, yapının doğrusal olmayan davranışının belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla kullanılan yöntemler, doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemleri ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntemle ilgili bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

4.3.1 Hedeflenen Performans Düzeyi ve Kullanılan Deprem Düzeyleri

Performans seviyeleri, yapıda belirli bir deprem etkisi altında meydana gelmesi öngörülen hasar miktarının sınır durumlarıdır. Bu sınır durumlar, yapı elemanlardaki fiziksel hasarın miktarına, bu hasarın can güvenliği bakımından bir tehlike oluşturup oluşturumamasına, deprem sonrasında yapının kullanılabilirlik durumuna ve hasarın neden olduğu ekonomik kayıplara bağlı olarak belirlenmektedir.

4.3.2 Deprem Yükleri

Doğrusal elastik yöntemle deprem yüklerinin hesabında kullanılacak tasarım ivme spektrumları TDY 2007 ve bölgeye özel verilere dayalı olmak üzere iki farklı yöntemle elde edilmiştir. Tasarımda daha olumsuz değere sahip olan bölgeye özel ivme spektrumu kullanılmıştır.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminde kullanılacak yer hareketi ivme kayıtları bölgeye özel deprem verileri kullanılarak üretilmiştir.

4.3.3 Deprem Düzeyleri

Doğrusal elastik yöntemle yapılacak deprem hesabında kullanılacak deprem, TDY 2007'de [76] tasarım depremi (Design Basis Earthquake - DBE) olarak ifade edilen ve aşağıda D2 olarak açıklaması verilen deprem halidir. Doğrusal elastik olmayan yöntemle yapılacak performans analizinde dikkate alınacak en büyük deprem (Maximum Considered Earthquake - MCE) aşağıda D3 olarak açıklanmıştır.

1)D2 - Deprem Düzeyi

Bu deprem düzeyi, binanın servis ömürleri boyunca meydana gelebilme olasılığı çok fazla olmayan, seyrek ancak şiddetli deprem yer hareketlerini ifade etmektedir. D2 düzeyindeki depremin 50 yılda aşılma olasılığı %10, buna karşı gelen ortalama dönüş periyodu ise 475 yıldır.

2)D3- Deprem Düzeyi

Bu deprem düzeyi, binanın maruz kalabileceği en şiddetli deprem yer hareketini ifade

4.3.5 Bölgeye Özel Tasarım Spektrumu ve Deprem Kayıtlarının Elde Edilmesi

Bölgeye özel tasarım spektrumu ve deprem kayıtlarının elde edilmesi için gerekli olan depremsellik verileri Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) (<http://www.koeri.boun.edu.tr/>) ve ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) (<http://www.usgs.gov/>) internet sitesinden alınmıştır.

KRDAE'nin internet sitesinde D3 ve D2 depremleri için $T = 0.2$ s ve $T = 1.0$ s periyotlarına ait ivme değerleri aşağıdaki haritalarda (Şekil 4. 6) verildiği gibidir. Bu haritalardan bölgeye ait spektral ivme değerleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

D2 depremi için:

$$S_{0.2} = 1.4 \text{ g} \quad S_1 = 0.8 \text{ g}$$

D3 depremi için:

$$S_{0.2} = 2.1 \text{ g} \quad S_1 = 1.4 \text{ g}$$

USGS'in internet sitesinde D3 depremi için $T = 0.2$ s ve $T = 1.0$ s periyotlarına ait ivme değerleri Şekil 4. 7'de verildiği gibidir ve aşağıda özetlenmiştir:

$$\text{D3 depremi için:} \quad S_{0.2} = 2.18 \text{ g} \quad S_1 = 0.87 \text{ g}$$

Bölgeye özel ivme spektrumunun oluşturulmasında bu iki kaynaktan gelen verilerin zarfı aşağıda verildiği gibi kullanılmıştır.

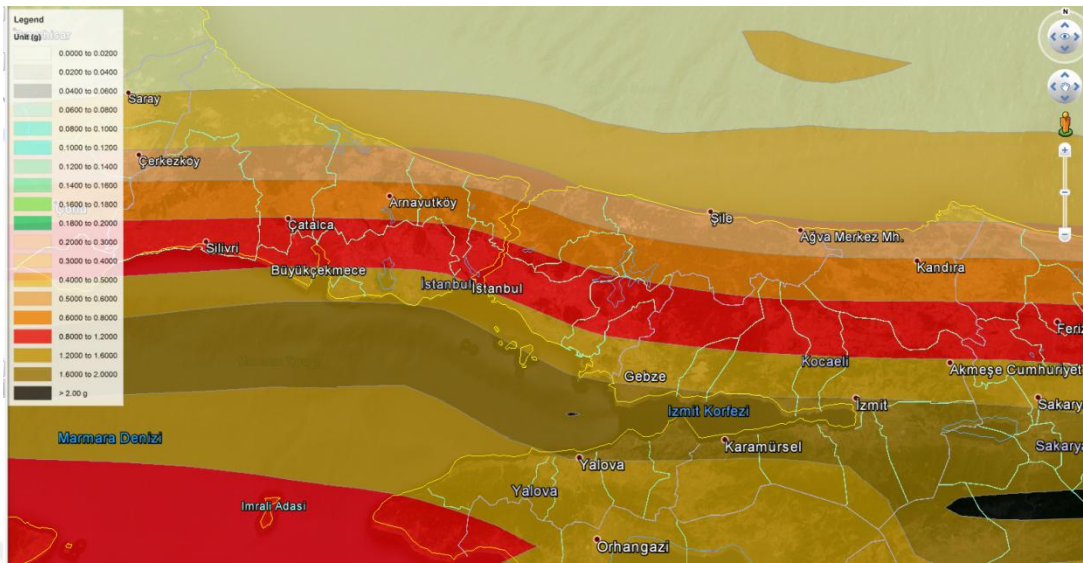
D2 depremi için:

$$S_{0.2} = 1.4 \text{ g} \quad S_1 = 0.8 \text{ g}$$

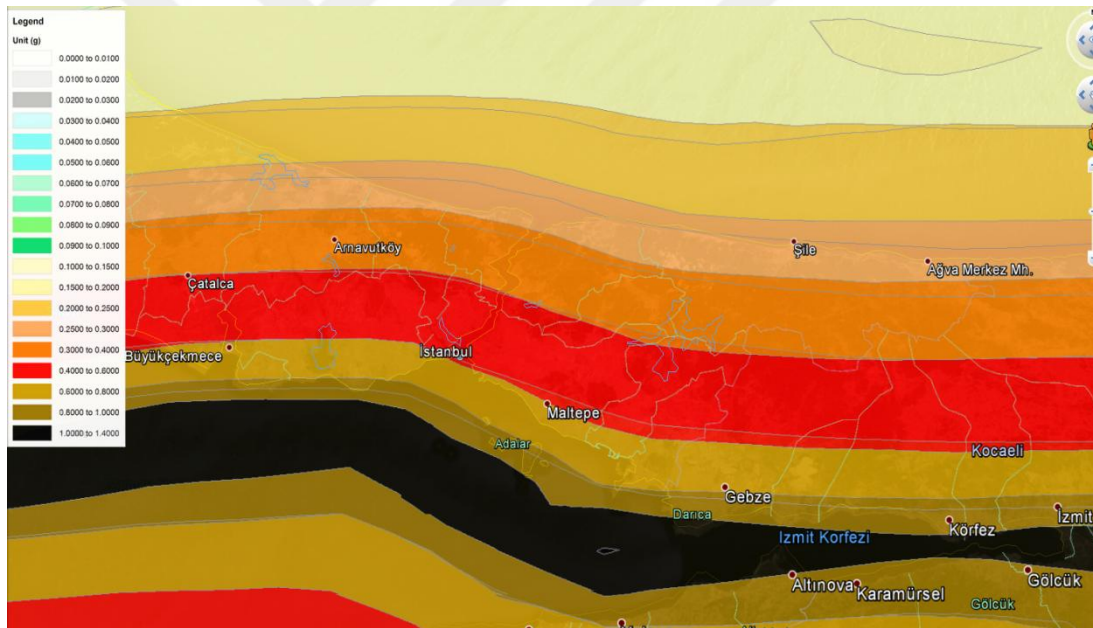
D3 depremi için:

$$S_{0.2} = 2.18 \text{ g} \quad S_1 = 1.4 \text{ g}$$

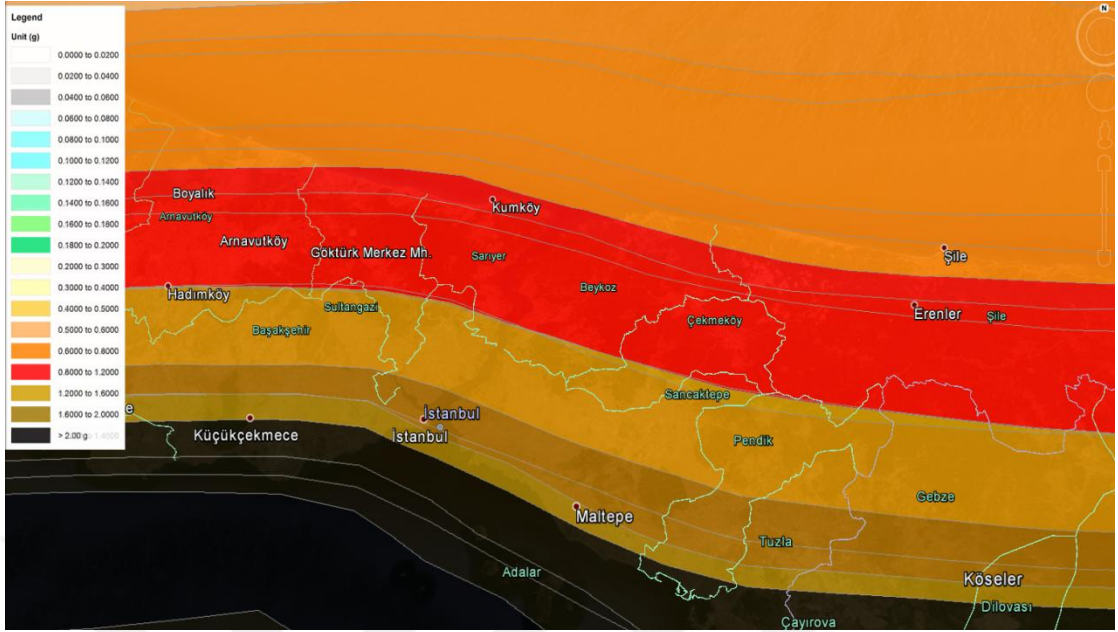
- 50 yılda %10, $T=0.2$ s, $S_a=1$ g



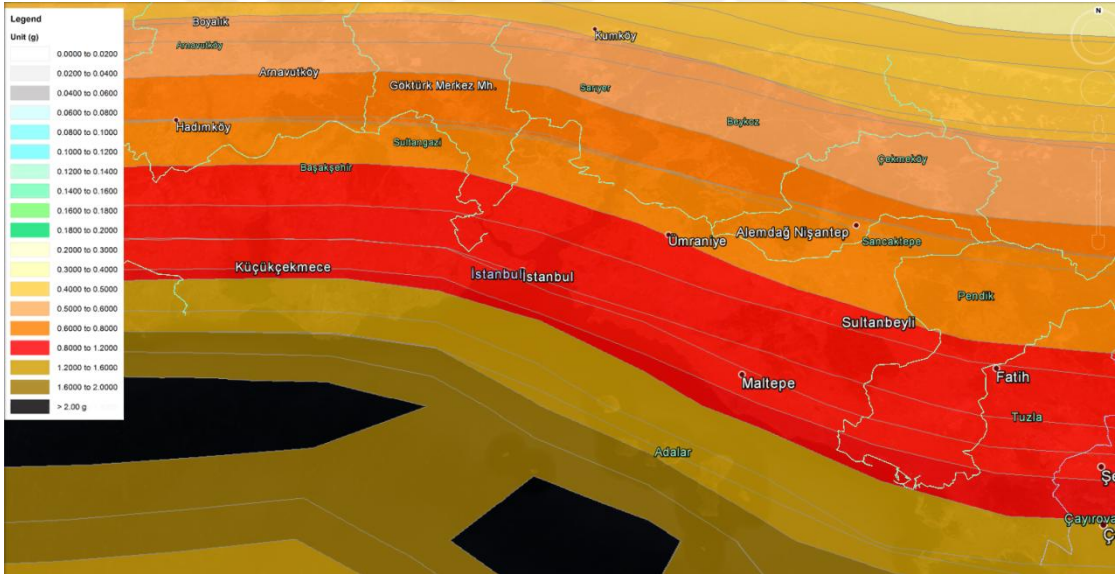
- 50 yılda %10, $T = 1$ s, $S_a = 0.5$ g



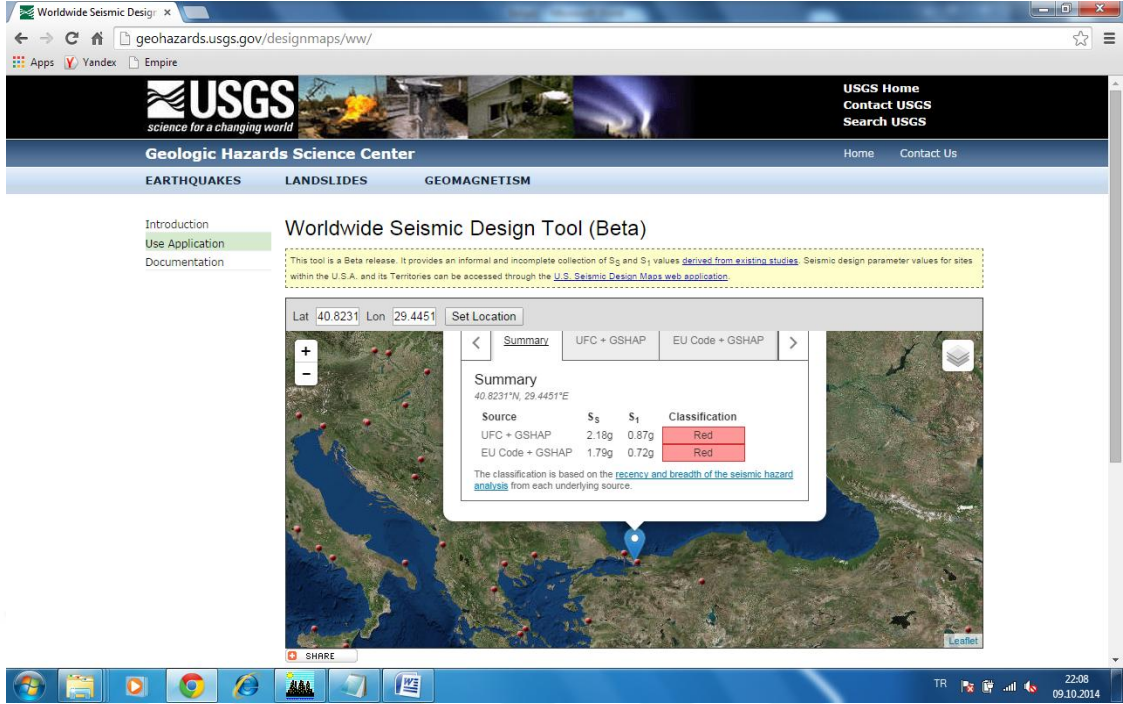
- 50 yılda %2, $T = 0.2$ s, $S_a = 1.4$ g



- 50 yılda %2, $T = 1$ s, $S_a = 1$ g

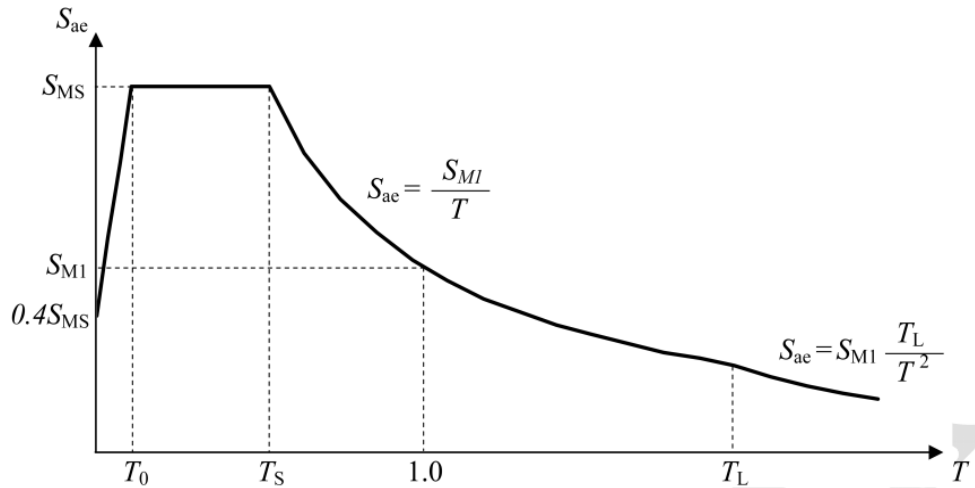


Şekil 4. 6 Bölgeye ait spektral ivme değerleri (<http://www.koeri.boun.edu.tr/>)



Şekil 4. 7 USGS sitesindeki spektral ivme değerleri
(<http://geohazards.usgs.gov/designmaps/ww/>)

Bölgeye özel tasarım spektrumunun elde edilmesi için İYBDY veya ASCE 7-10 şartnamesinde verilen 0.2s ve 1s periyodlarındaki zemine bağlı spektral genliklere dayalı olarak elde edilen ivme değerleri (Uniform Hazard Spectra) kullanılmıştır. Tasarım spektrumu Şekil 4. 8’de açıklandığı gibi elde edilmektedir.



Şekil 4. 8 Tasarım spektrumu

$$S_{MS} = F_a \times S_S$$

$$S_{MI} = F_v \times S_I$$

$$S_{ae}(T) = 0.4 S_{MS} + 0.6 \frac{S_{MS}}{T_0} T \quad (T_0 \leq T)$$

$$S_{ae}(T) = S_{MS} \quad (T_0 \leq T \leq T_S)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{M1}}{T} \quad (T_S \leq T \leq T_L)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{M1} T_L}{T^2} \quad (T_L \leq T)$$

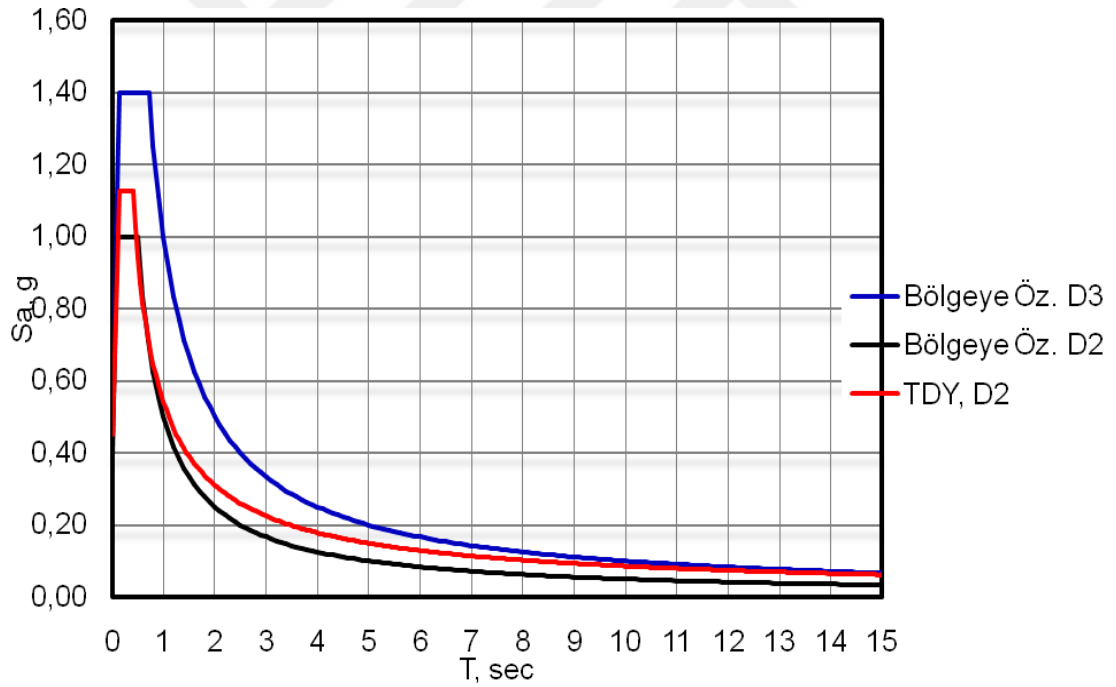
$$T_S = \frac{S_{M1}}{S_{MS}} \quad ; \quad T_0 = 0.2 T_S$$

Zemin sınıfına bağlı olarak

$$F_a = 1$$

$$F_v = 1.3$$

Bu şekilde elde edilen D2 ve D3 depremi spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 4. 9'da verilmiştir.



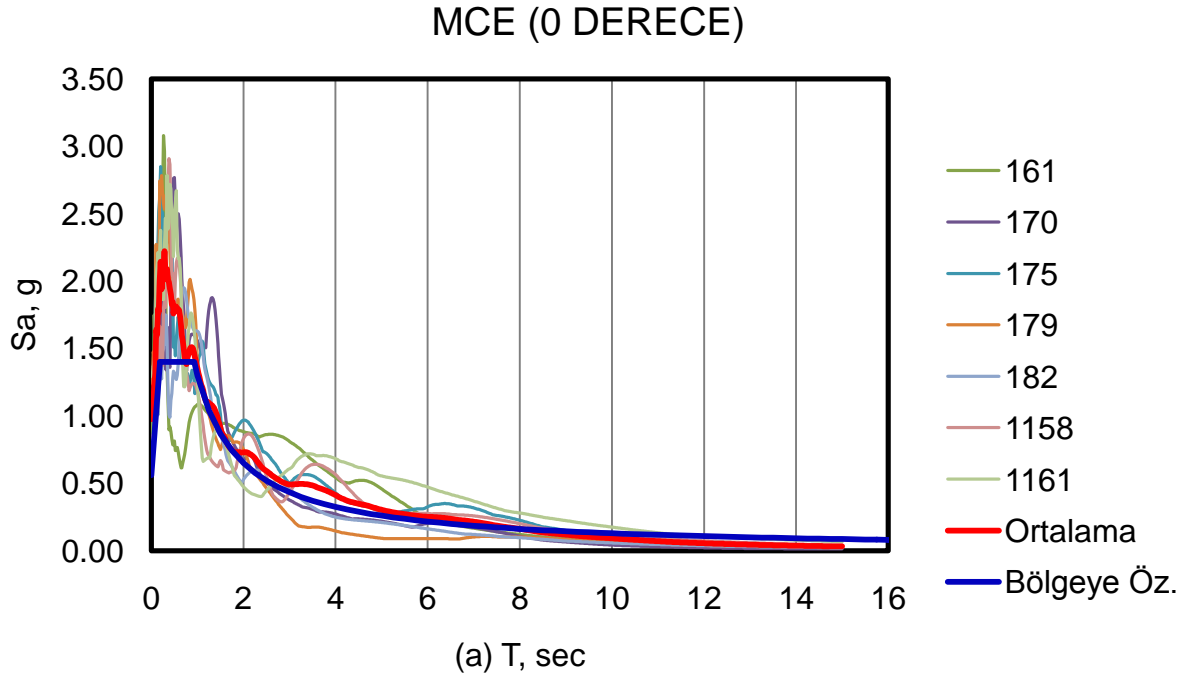
Şekil 4. 9 Tasarım ivme spektrumları

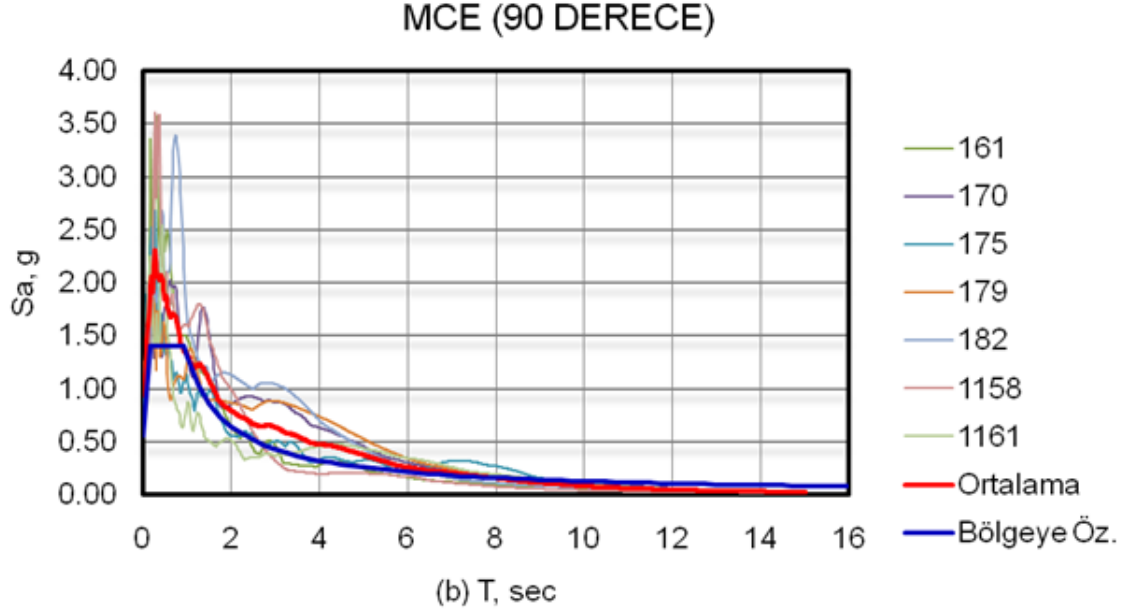
D3 depremi spektrumuna uyumlu yer hareketi kaydı <http://ngawest2.berkeley.edu/> sitesinden kullanıcı spektrumu kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu deprem ivme kayıtları SeismoMatch (<http://www.seismosoft.com/>) programı yardımıyla ayrıca spektruma uyumlu hale getirilmiştir. Elde edilen deprem kaydı isimleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 4. 3 Yer hareketi kayıtlarına dayanarak elde edilen deprem kayıtları

Record Seq. #	MSE	Scale Factor	Tp (s)	D5-75 (s)	D5-95 (s)	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/s)
161	0.1014	2.5426	4.396	5.3	14.9	0.4	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.53	strike slip	8.54	10.42	208.71
170	0.0962	1.825	4.417	4.7	13.2	0.8	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.53	strike slip	7.31	7.31	192.05
175	0.0669	3.5306	-	9.7	19.6	0.4	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #12	6.53	strike slip	17.94	17.94	196.88
179	0.0789	1.282	4.788	3.4	10.3	1.4	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	6.53	strike slip	4.9	7.05	208.91
182	0.1428	1.226	4.375	2.8	6.8	1.7	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6.53	strike slip	0.56	0.56	210.51
1158	0.0752	1.3507	-	6.1	11.8	1.3	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	strike slip	13.6	15.37	281.86
1161	0.103	2.4787	5.992	5.8	8.2	0.5	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.51	strike slip	7.57	10.92	792.0

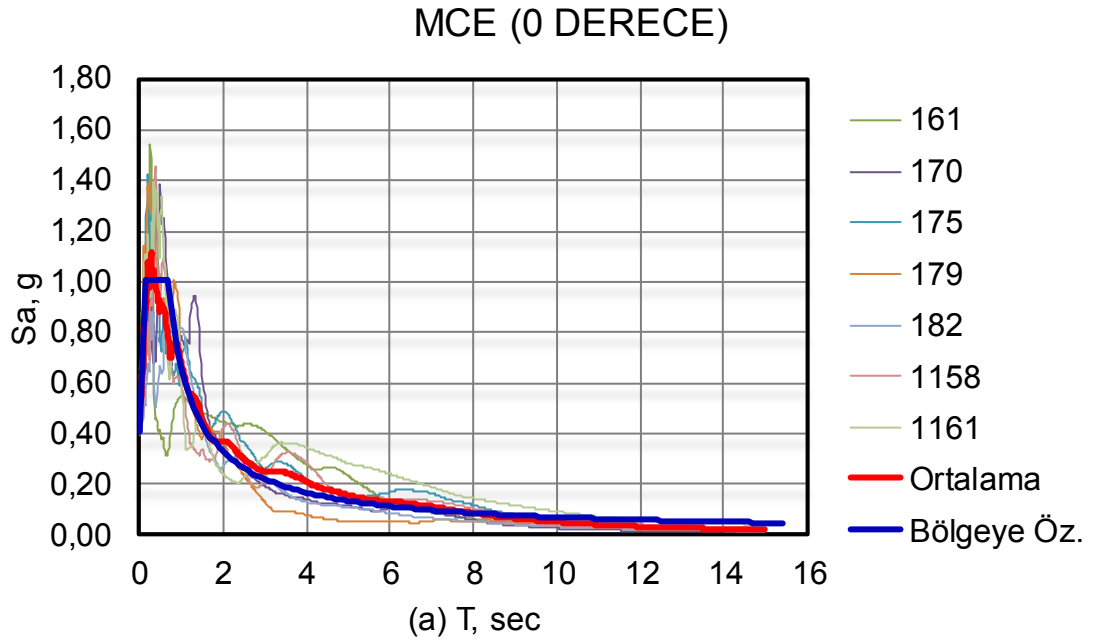
Bu kayıtlar D3 spektrumuna uyumlu hale getirilerek performans analizlerinde kullanılmıştır. Analizlerde bu depremler sıra numaralarıyla isimlendirilmiştir. Bu kayıtlara ait spektrumlar ile D3 spektrumu karşılaştırmalı olarak Şekil 4. 10'da verilmiştir.



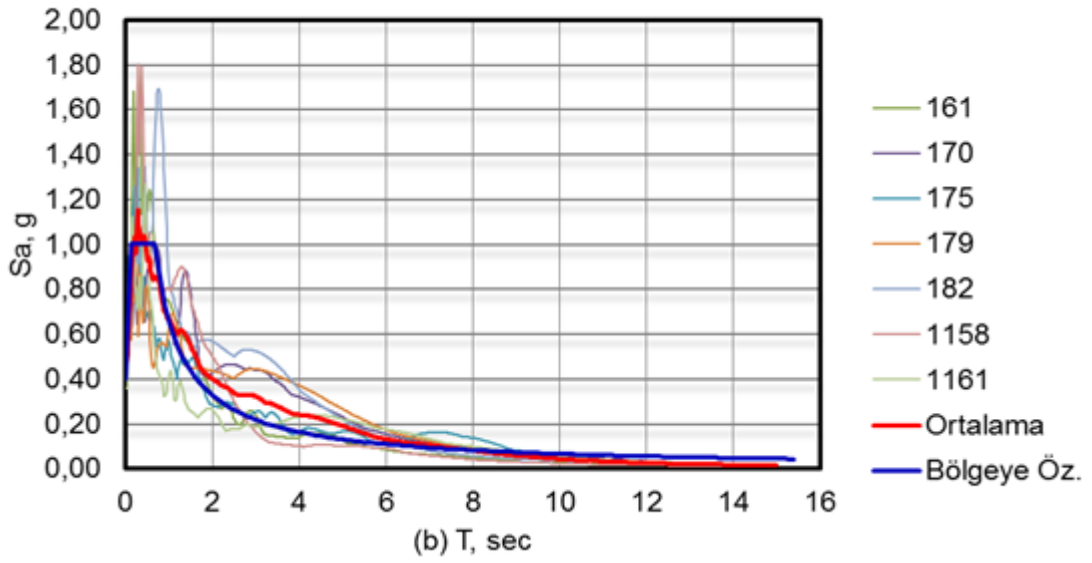


Şekil 4. 10 Karşılaştırmalı D3 Spektrumu; (a) 0 derece; (b) 90 derece

Bu kayıtlar D2 spektrumuna uyumlu hale getirilerek performans analizlerinde kullanılmıştır. Analizlerde bu depremler sıra numaralarıyla isimlendirilmiştir. Bu kayıtlara ait spektrumlar ile D2 spektrumu karşılaştırmalı olarak Şekil 4. 11'de verilmiştir.



MCE (90 DERECE)

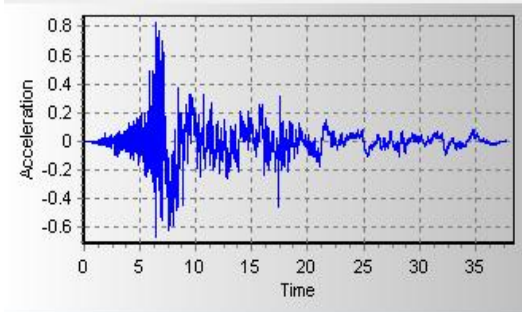


Şekil 4. 11 Karşılaştırmalı D2 Spektrumu; (a) 0 derece; (b) 90 derece.

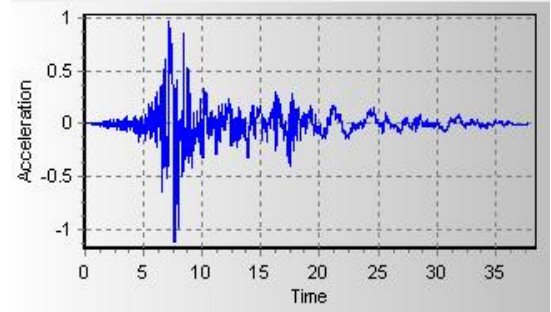
4.4 Deprem İvme Kayıtların Köprü Yapısına Etkileri

D3 spektrumuna uyumlu hale getirilmiş deprem kayıtları Şekil 4.12’de verilmiştir.

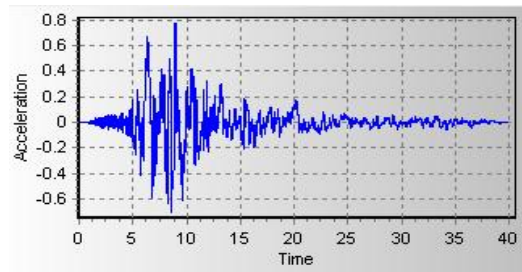
RSN161-225



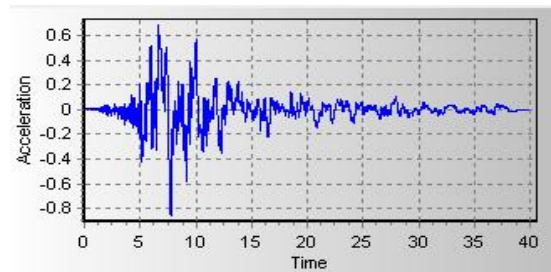
RSN161-315



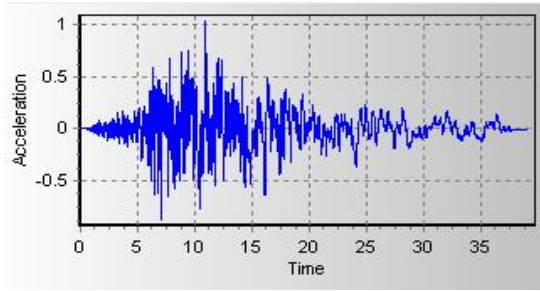
RSN170-002



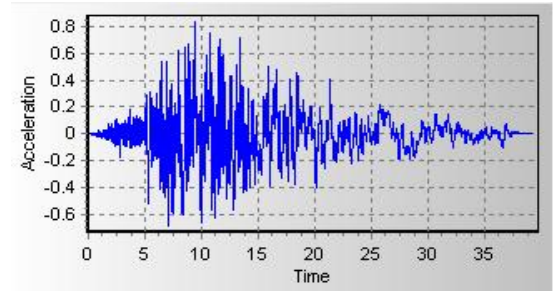
RSN170-092



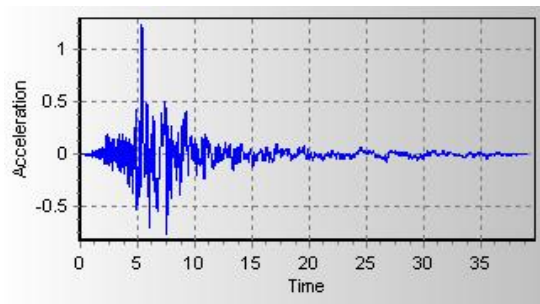
RSN175-140



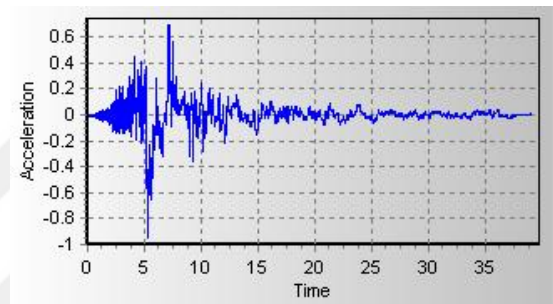
RSN175-230



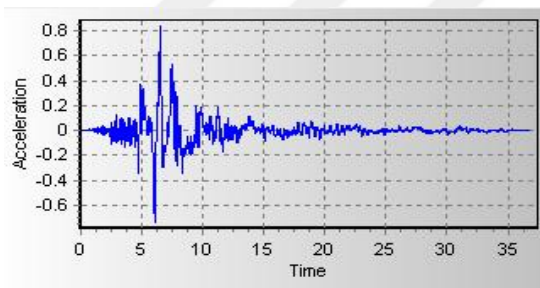
RSN179-140



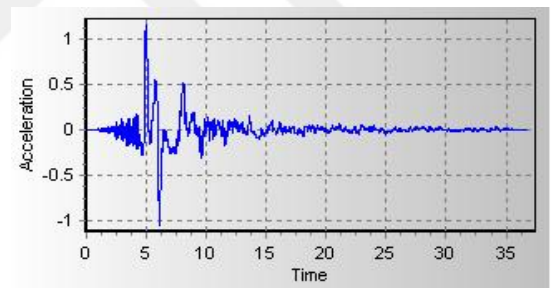
RSN179-230



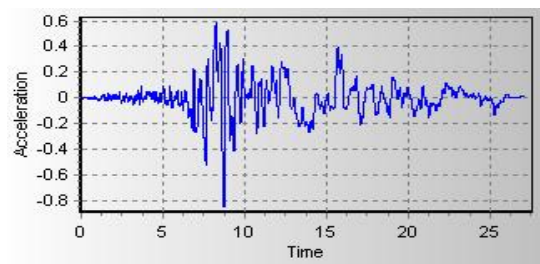
RSN182-140



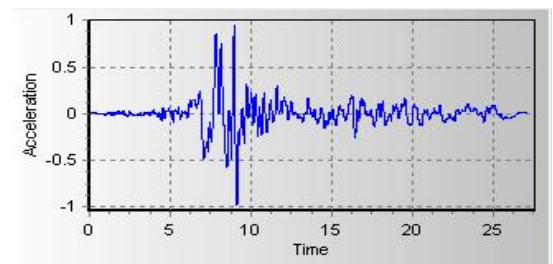
RSN182-230



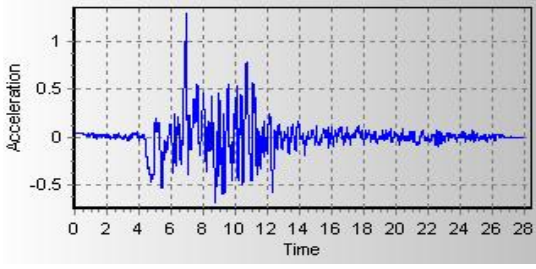
RSN1158-KOCALI DZC180



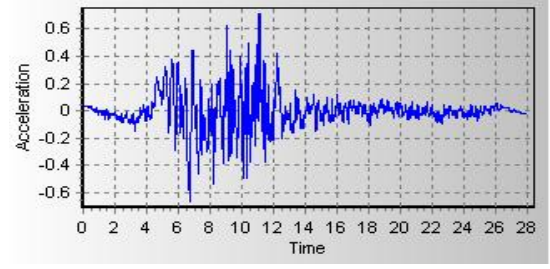
RSN1158-KOCALI DZC270



RSN1161-KOCALI GBZ000

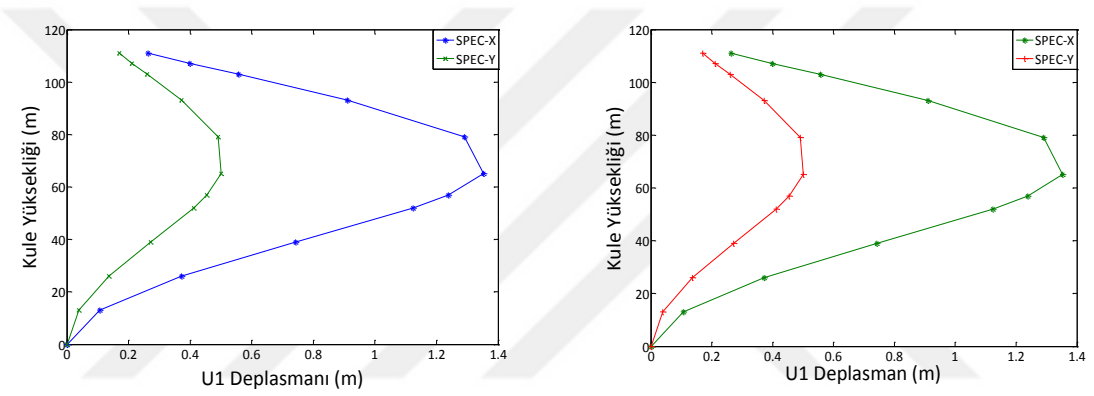


RSN1161-KOCALI GBZ270

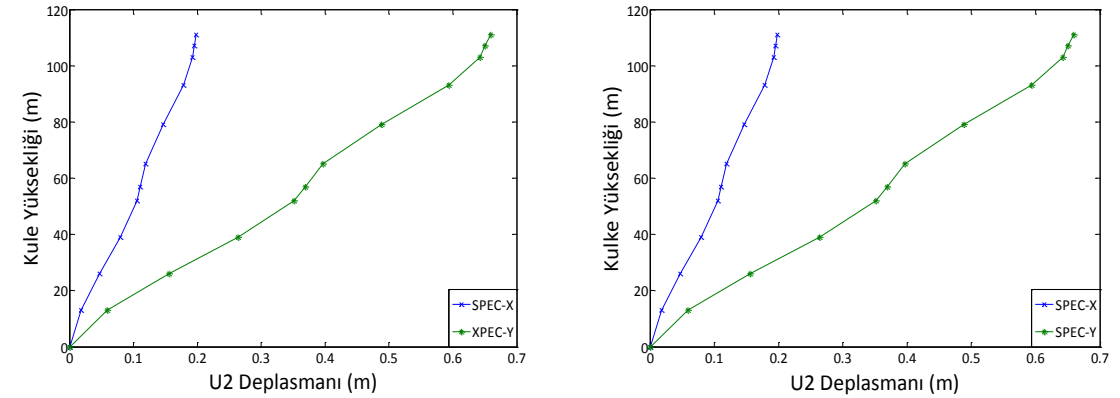


Şekil 4. 12 D3 Spektrumuna uyumlu hale getirilmiş deprem kayıtları

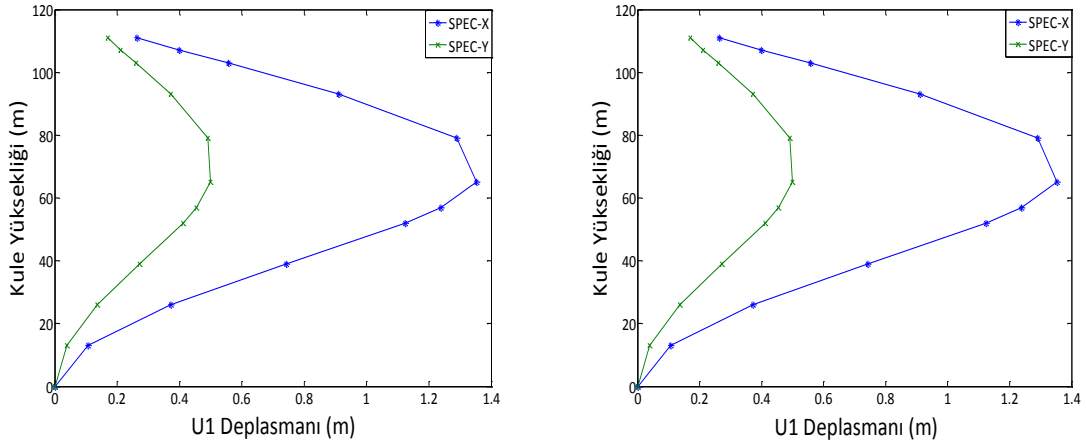
D3 Spektrumuna uyumlu hale getirilmiş deprem kayıtların etkisinde kulelerde oluşan en büyük deplasman etkileri kule bağlantı kirişlerin yakınlarında görülmektedir.



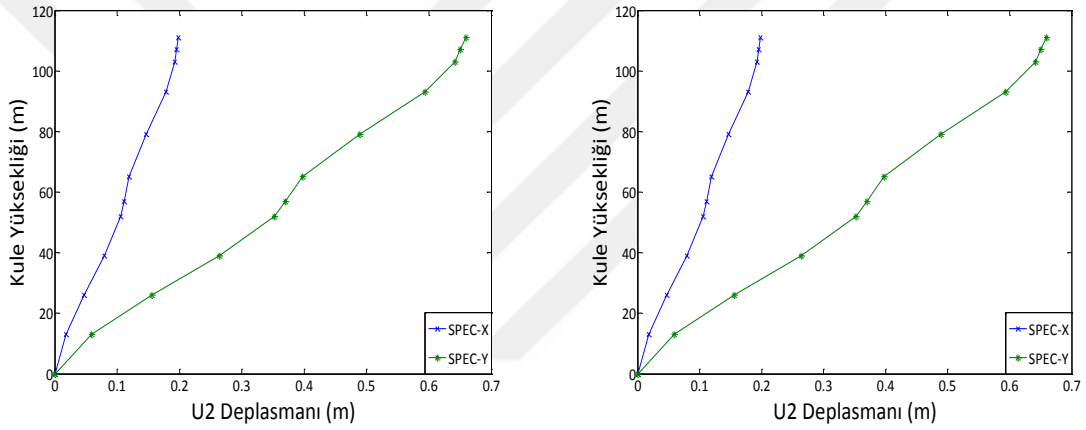
Şekil 4. 13 Avrupa yakası Güney-Kuzey kule U1 yerdeğiştirmeleri



Şekil 4. 14 Avrupa yakası Güney-Kuzey kule U2 yerdeğiştirmeleri



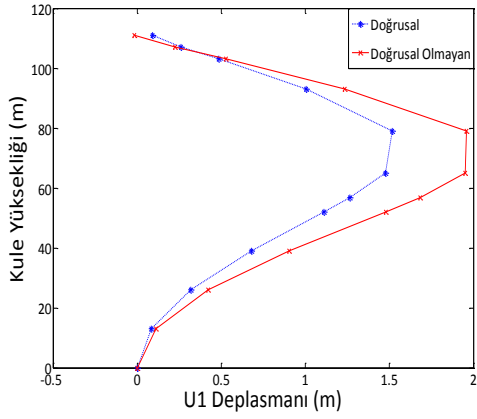
Şekil 4. 15 Asya yakası Güney-Kuzey kule U1 yerdeğiştirmeleri



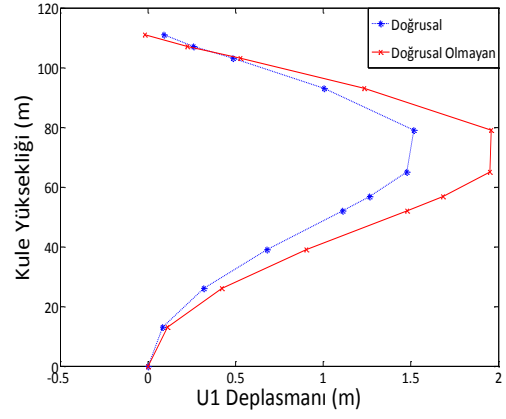
Şekil 4. 16 Asya yakası Güney-Kuzey kule U2 yerdeğiştirmeleri

4.4.1 Boyuna Doğrultudaki İvme Kayıtlara Göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sismik Tepkisi

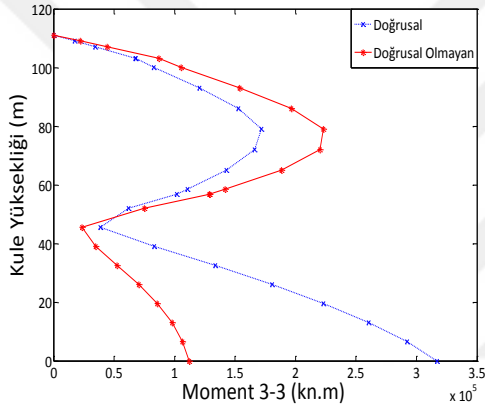
Fatih Sultan Mehmet Köprüsü boyuna doğrultudaki deprem ivme kayıtlara göre yapılan zaman tanımı altındaki analizlerde, titreşim düşey düzlemde ağırlıklı olarak oluşmuştur. Köprü tabliye kirişinin boyuna doğrultusundaki yer değiştirmeler özellikle ötelemelidir. En büyük Kule portre yer değiştirmelerin kule orta bağlantı kirişlerin yakınlarında oluşur. Kule boyuna eğilme momenti, eksensel kuvvet, kesme kuvvetlerin maksimum değeri kule taban kısımlarında oluşmuştur (Şekil 4. 17-24).



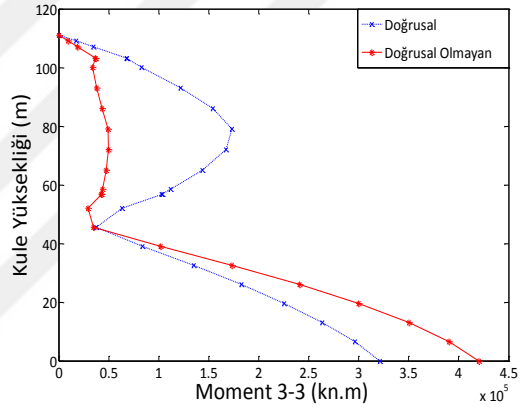
Şekil 4. 17 Avrupa yakası kule yatay yerdeğiştirmeleri



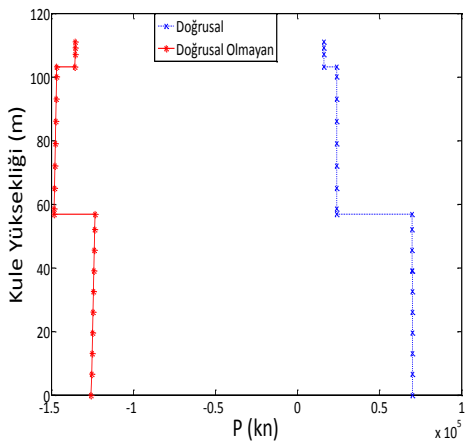
Şekil 4. 18 Asya yakası kule yatay yerdeğiştirmeleri



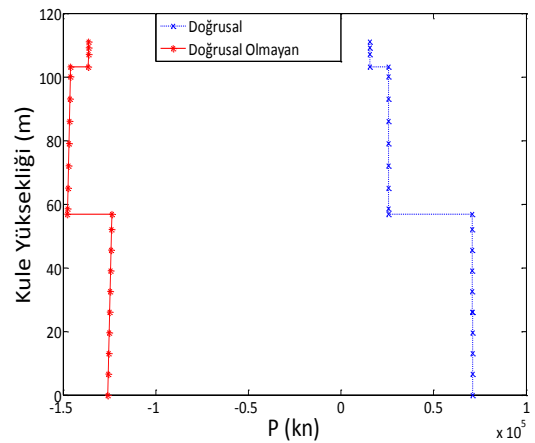
Şekil 4. 19 Avrupa yakası kule eğilme momentleri (3-3)



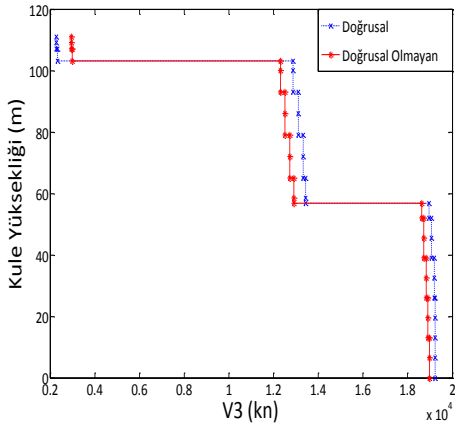
Şekil 4. 20 Asya yakası kule eğilme momentleri (3-3)



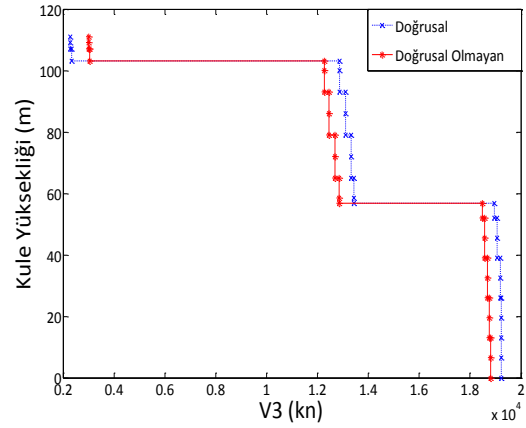
Şekil 4. 21 Avrupa yakası kule normal kuvvetleri (P)



Şekil 4. 22 Asya yakası kule normal kuvvetleri (P)

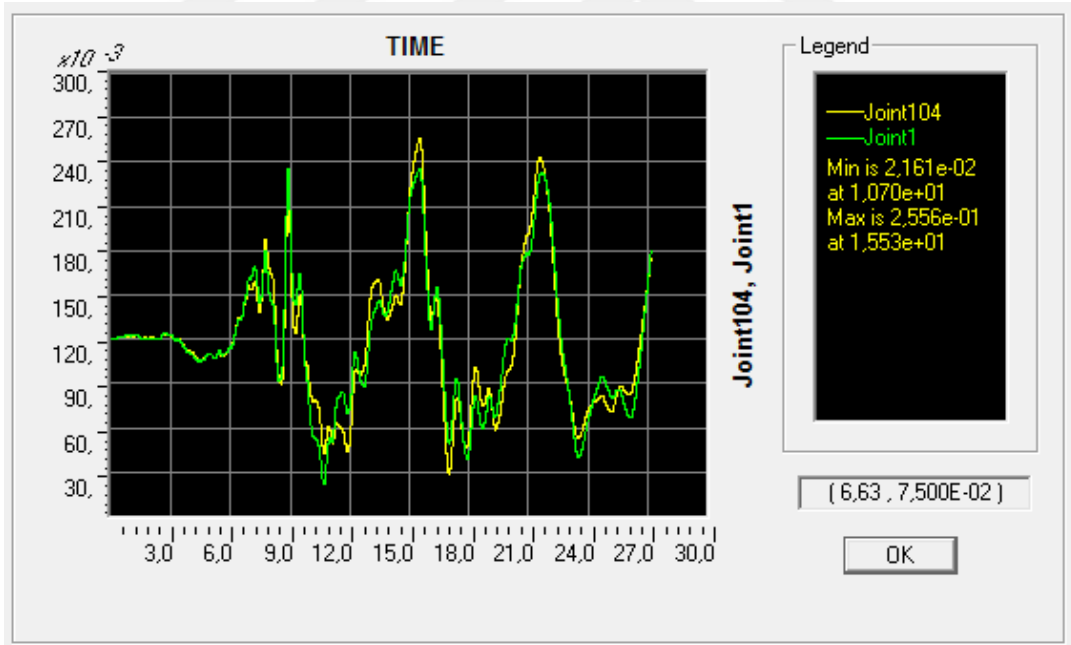


Şekil 4. 23 Avrupa yakası kule kesme kuvvetleri (V3)

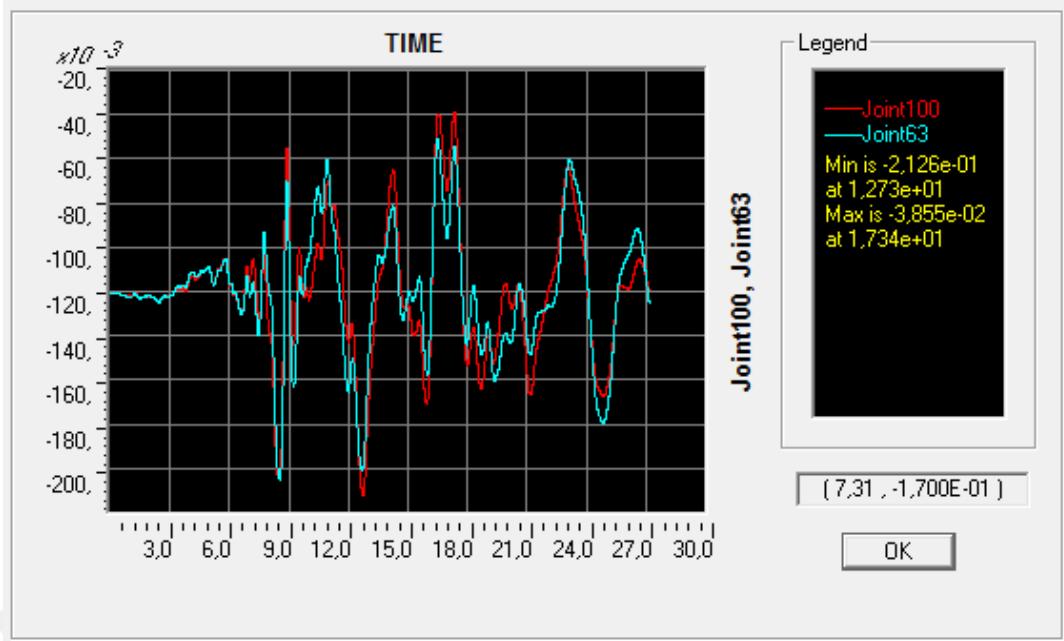


Şekil 4. 24 Asya yakası kule kesme kuvvetleri (V3)

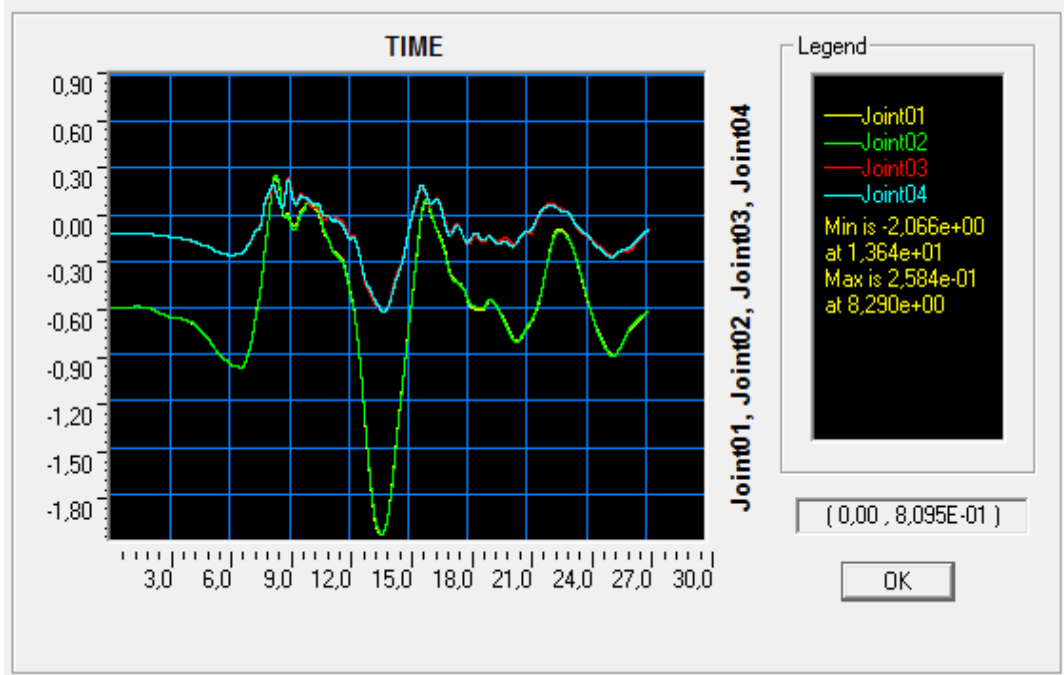
D3 Spektrumuna uyumlu hale getirilmiş Çizelge 4. 3'te listelenen Kocaeli Düzce (1158) ve Kocaeli Gebze (1161) depremlerinin ivme kayıtlarına dayanarak zaman süreci yöntemiyle hesaplanan kule tepe noktası ve kule bağlantı kiriş noktalarının boyuna doğrultadaki yerdeğiştirmeleri (Şekil 4. 25-32) sunulmuştur.



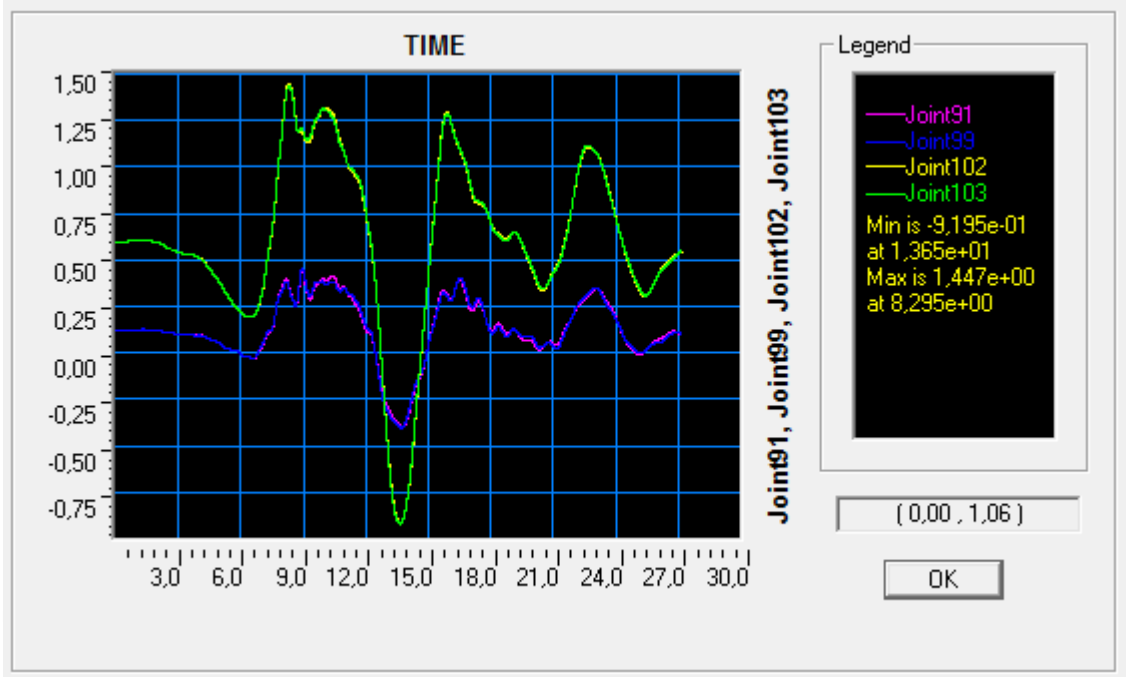
Şekil 4. 25 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



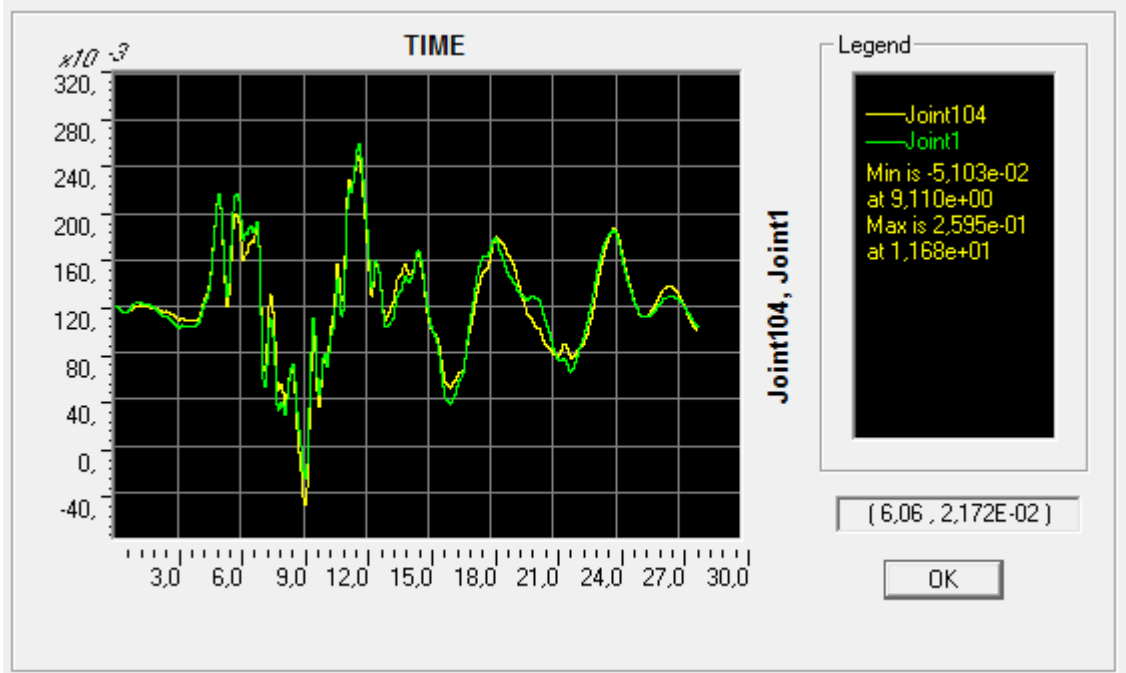
Şekil 4. 26 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



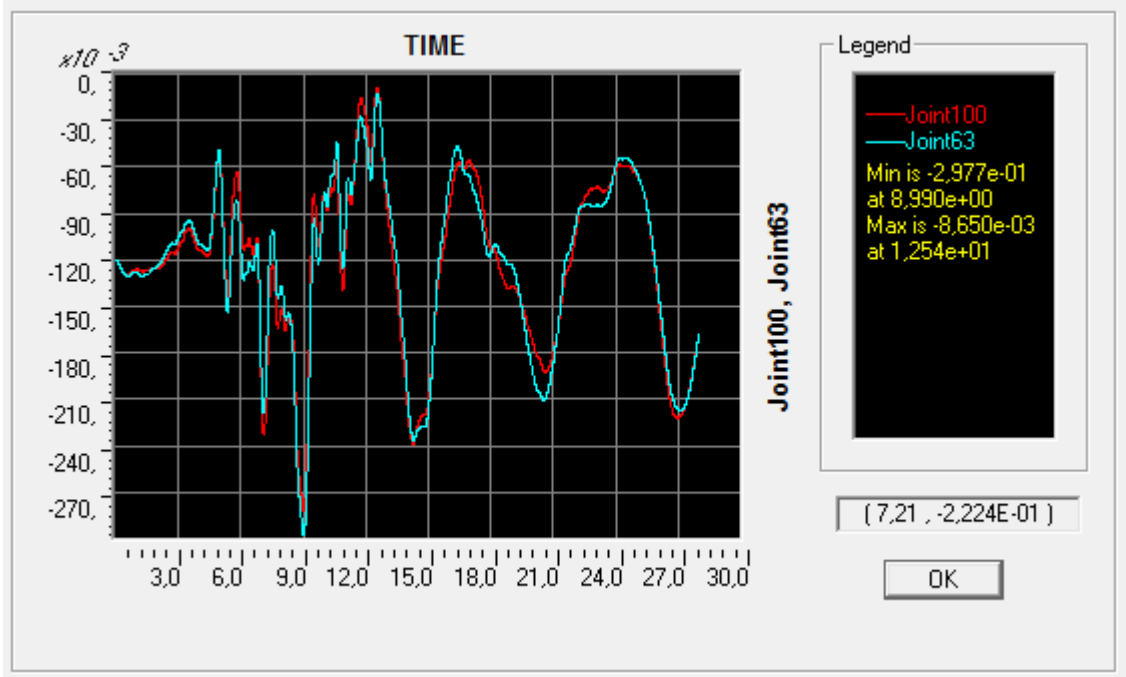
Şekil 4. 27 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



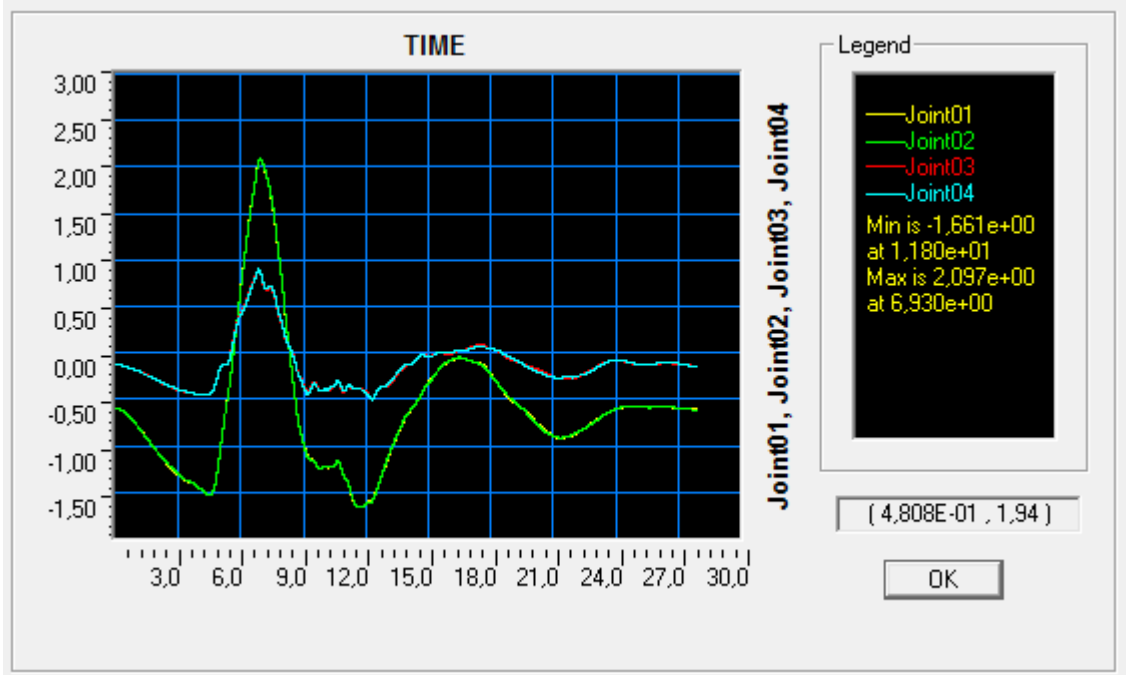
Şekil 4. 28 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



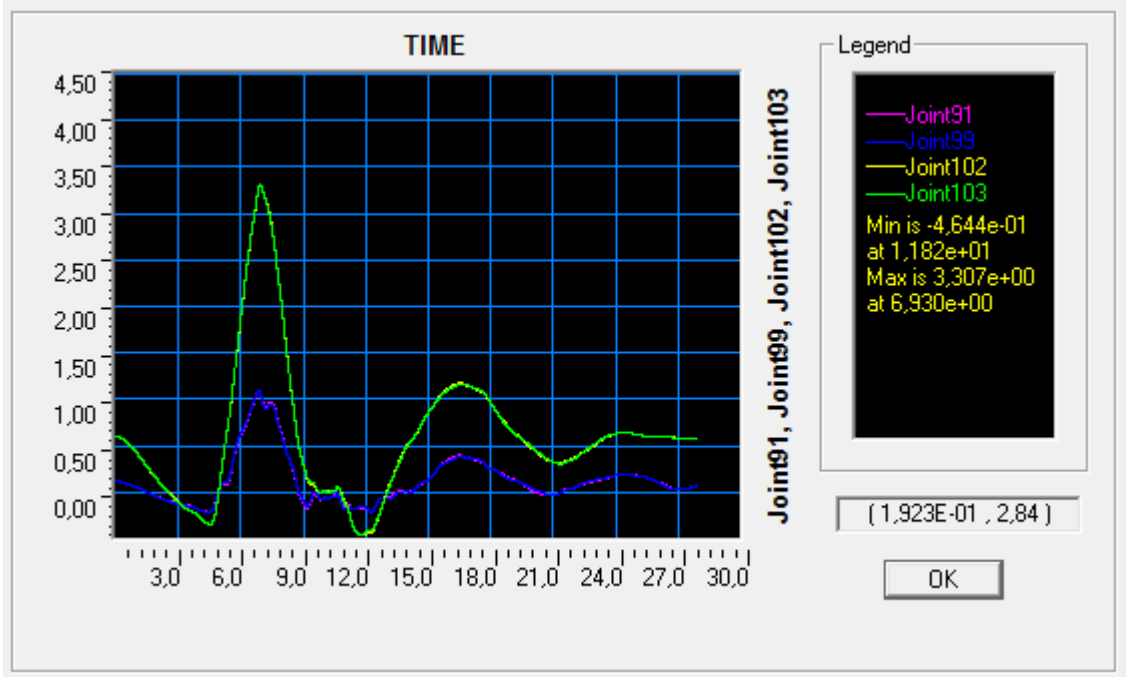
Şekil 4. 29 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



Şekil 4. 30 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



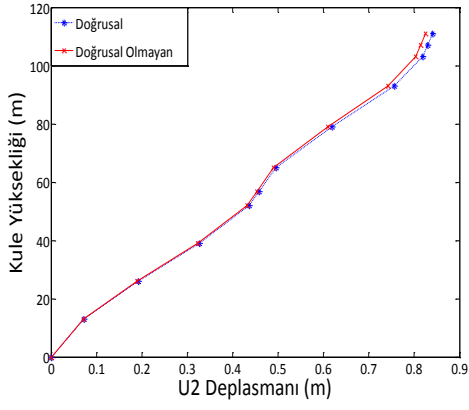
Şekil 4. 31 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi



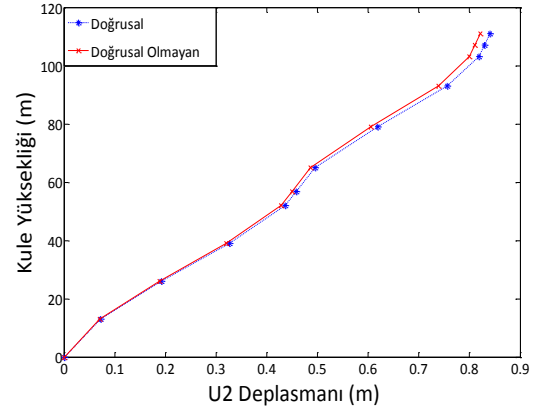
Şekil 4. 32 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U1 yerdeğiştirmesi

4.4.2 Enine Doğrultudaki İvme Kayıtlara Göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün Sismik Tepkisi

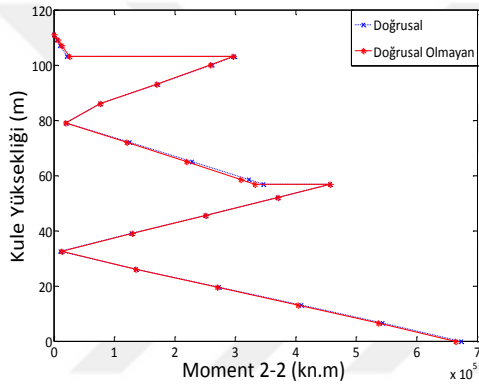
Fatih Sultan Mehmet köprüsü enine doğrultudaki deprem ivme kayıtlara göre yapılan zaman tanımı altındaki analizlerde, Köprü tabliye kiriş i ve kulelerin boyuna, enine ve düşey doğrultularındaki titreşimlerin çok küçük olduğu, en büyük tabliye boyuna doğrultusundaki yerdeğiştirmelerin köprü orta açıklıkta, en büyük kule yanal yerdeğiştirmelerin kule tepe noktasında oluştuğunu anlaşılmıştır. Kulelerin en büyük moment, eksensel kuvvet ve kesme kuvvetleri, kule taban kısımları ve kule orta bağlantı kirişine yakın kısımlarda oluştuğu ablaşılmaktadır (Şekil 4. 33-40).



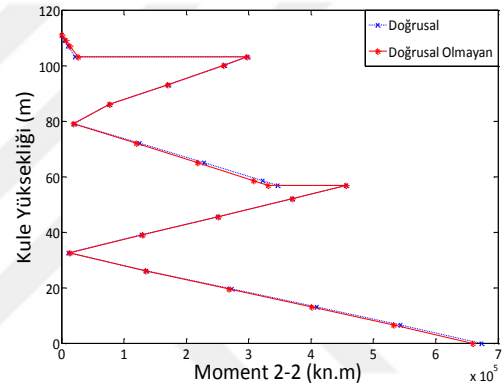
Şekil 4. 33 Avrupa yakası kule U2 yerdeğiştirmeleri



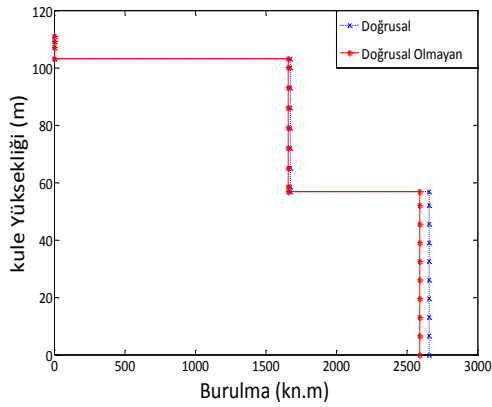
Şekil 4. 34 Asya yakası kule U2 yerdeğiştirmeleri



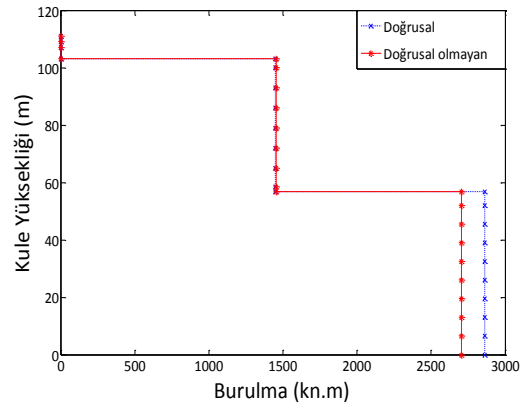
Şekil 4. 35 Avrupa yakası kule eğilme momentleri (2-2)



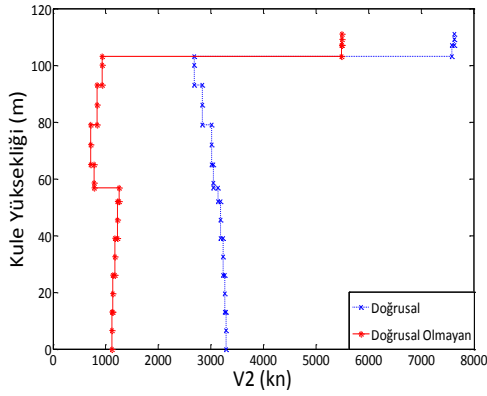
Şekil 4. 36 Asya yakası kule eğilme momentleri (2-2)



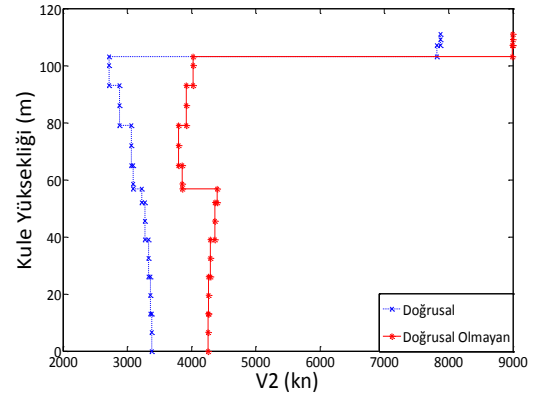
Şekil 4. 37 Avrupa yakası kule burulma momentleri



Şekil 4. 38 Asya yakası kule burulma momentleri

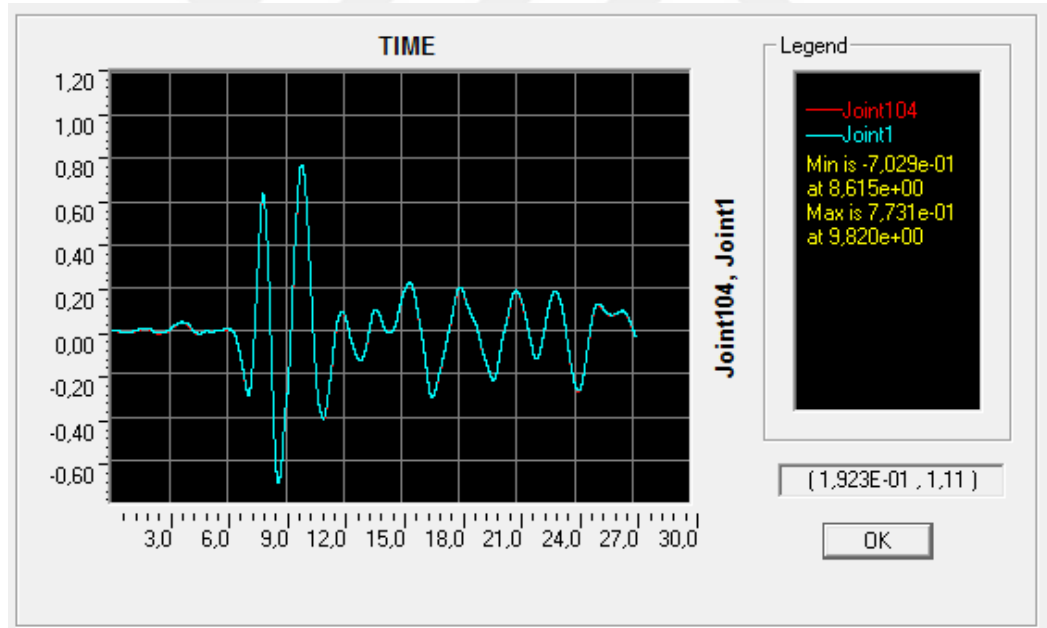


Şekil 4. 39 Avrupa yakası kule kesme kuvvetleri (V2)

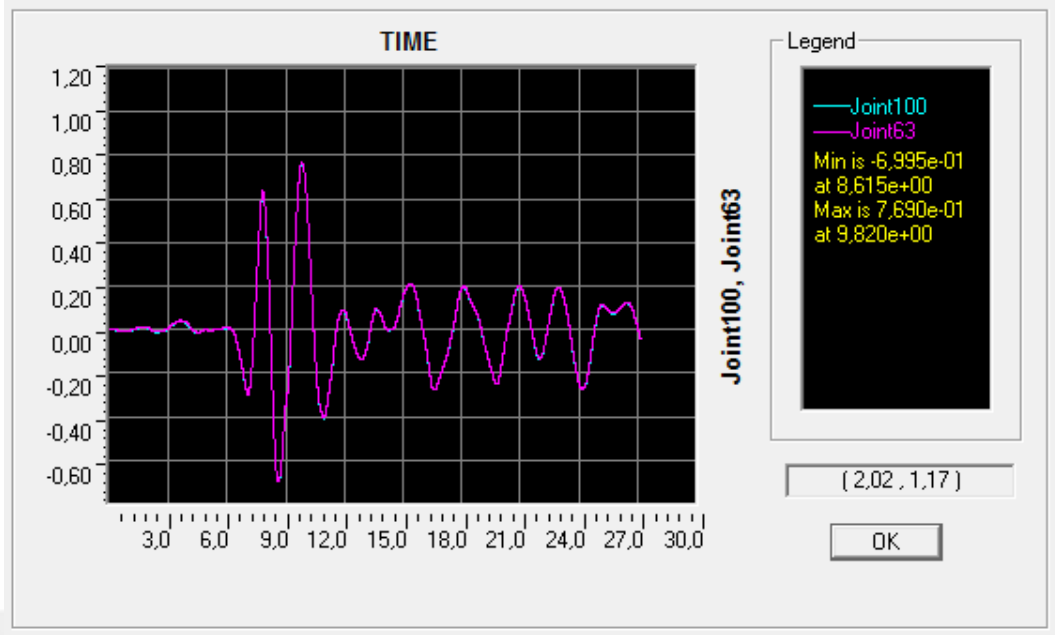


Şekil 4. 40 Asya yakası kule kesme kuvvetleri (V2)

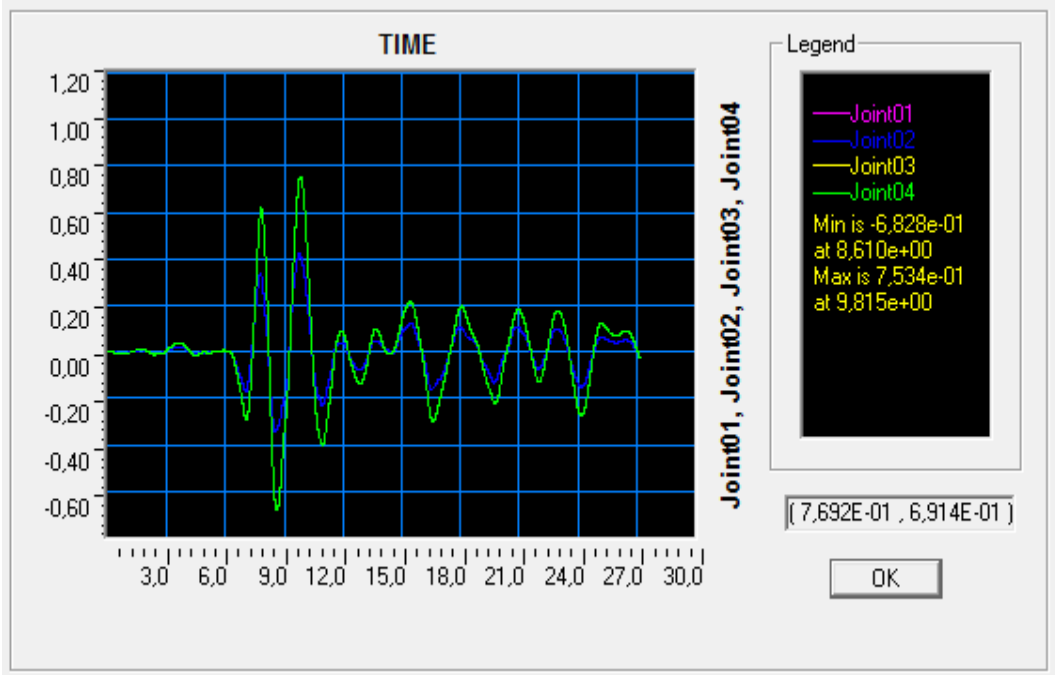
D3 Spektrumuna uyumlu hale getirilmiş Çizelge 4. 3'te listelenen Kocaeli Düzce (1158) ve Kocaeli Gebze (1161) depremlerinin ivme kayıtlarına dayanarak zaman süreci yöntemiyle hesaplanan kule tepe noktası ve kule bağlantı kiriş noktalarının Enine doğrultadaki yerdeğiştirmeleri (Şekil 4. 41- 48) sunulmuştur.



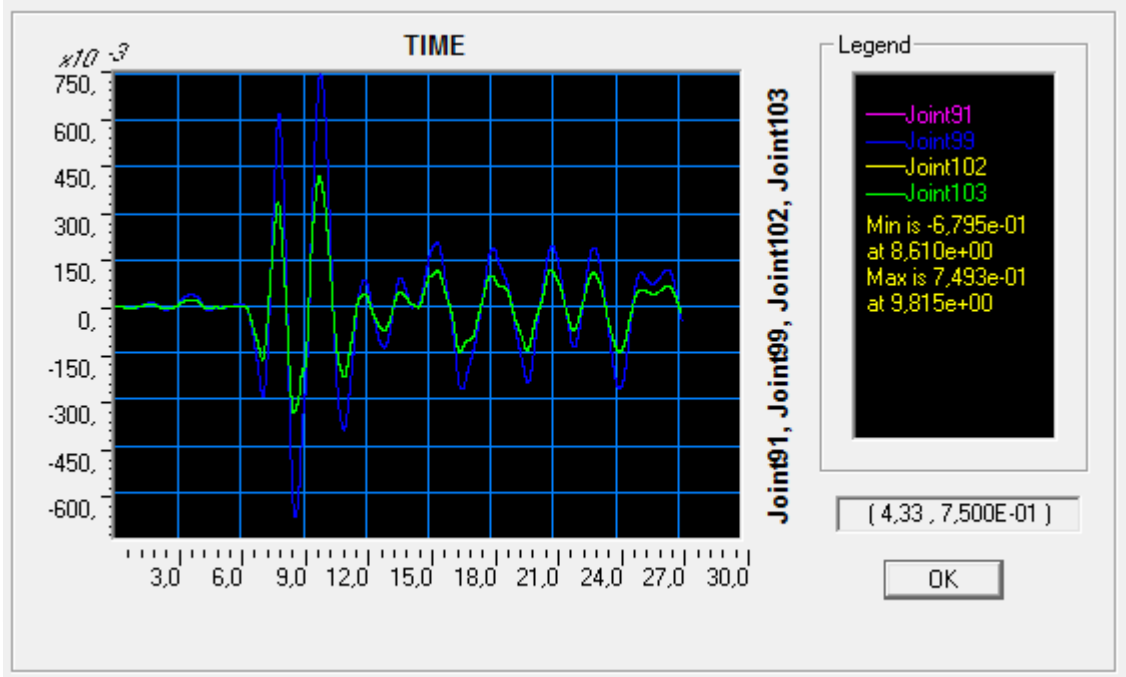
Şekil 4. 41 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



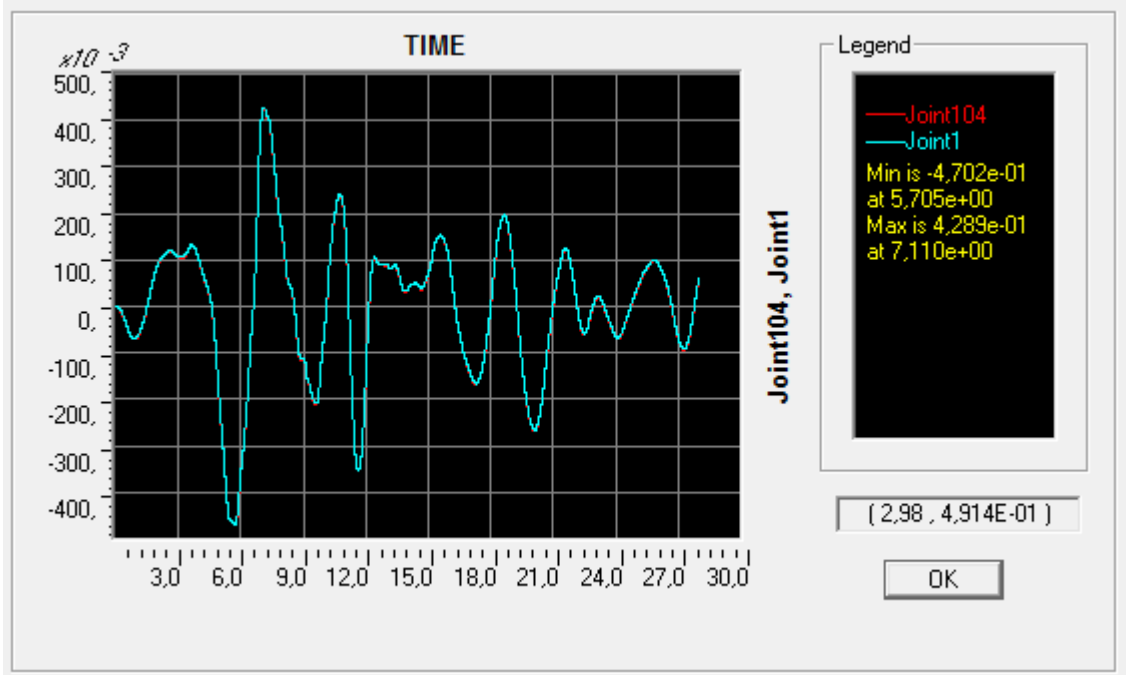
Şekil 4. 42 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



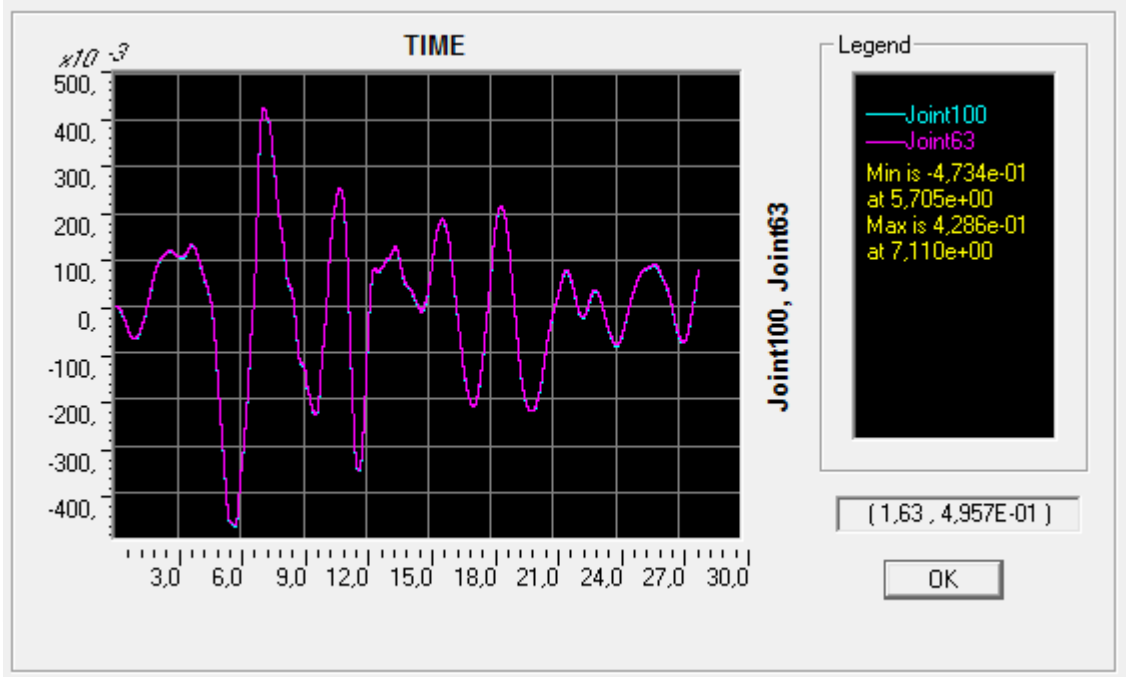
Şekil 4. 43 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



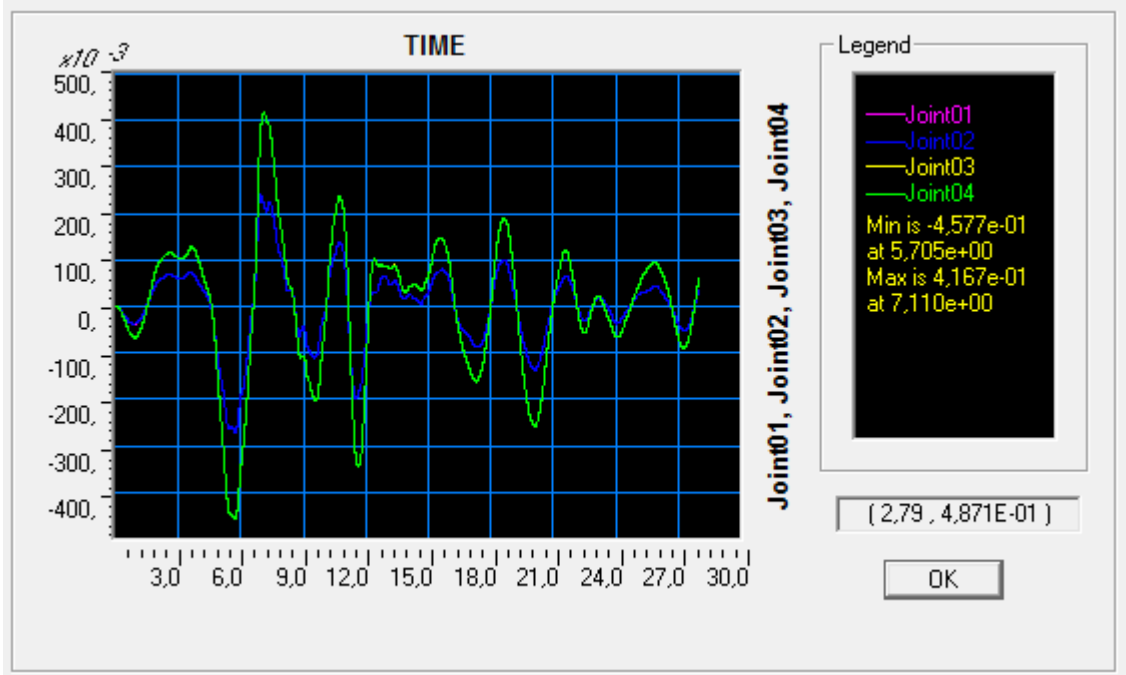
Şekil 4. 44 Kocaeli Düzce 1158 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



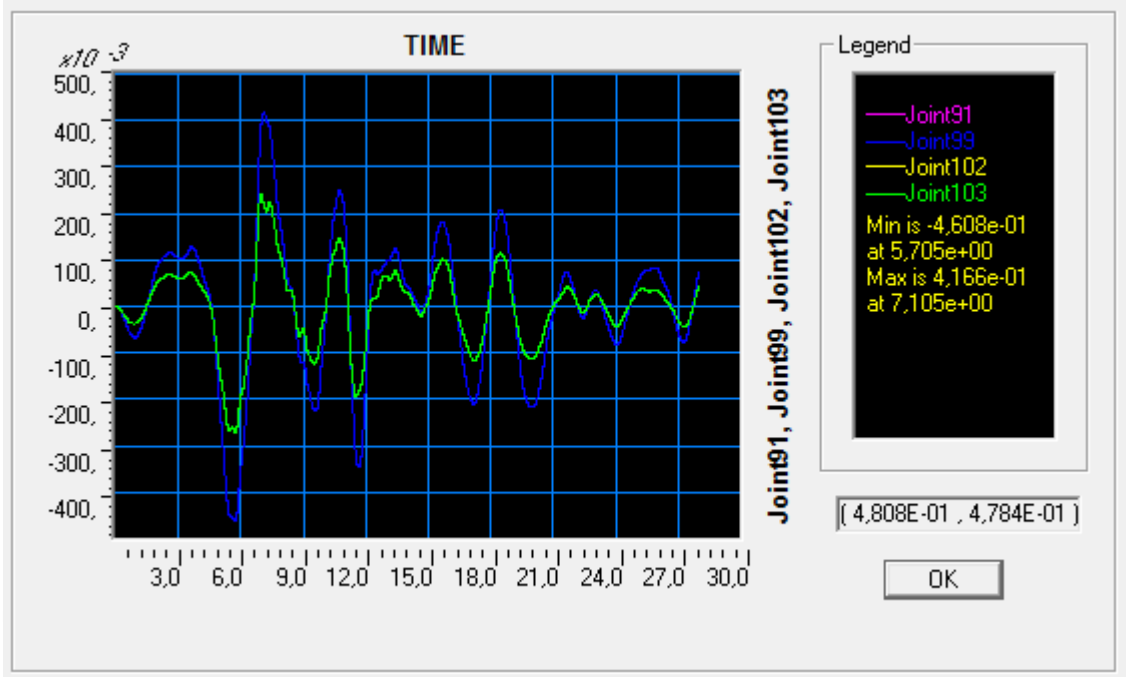
Şekil 4. 45 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



Şekil 4. 46 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule tepe noktasının Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



Şekil 4. 47 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Avrupa yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi



Şekil 4. 48 Kocaeli Gebze 1161 depremi için FSM Köprüsü Asya yakası kule bağlantı kirişinin Zaman Süreci yöntemiyle hesaplanan U2 yerdeğiştirmesi

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜNÜN TAŞIT YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

5.1 Giriş

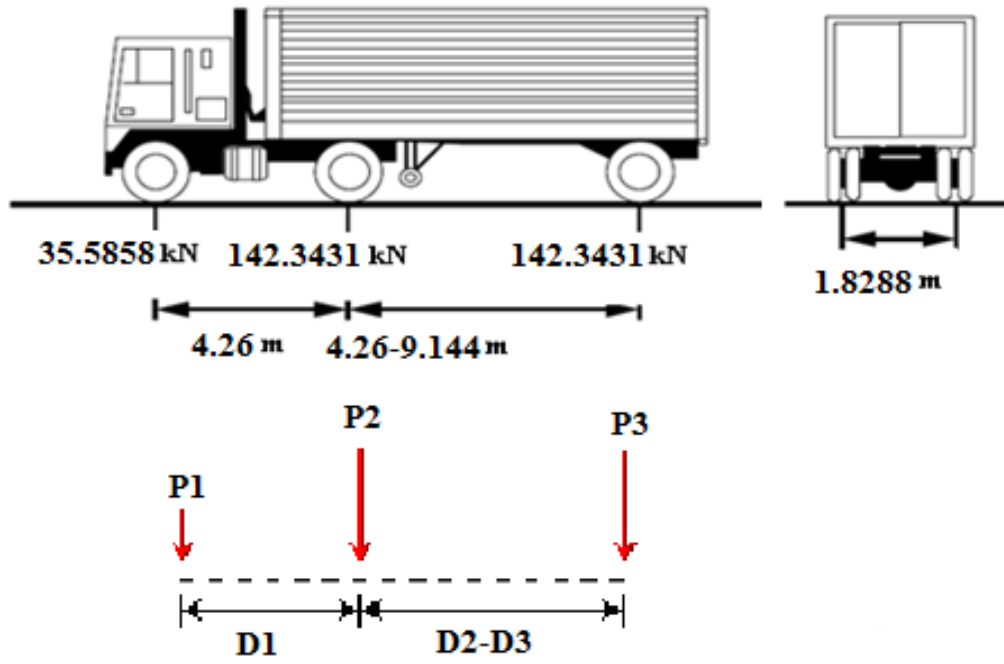
Köprü üzerinden geçen taşıtlar, köprü tabliyesi ile etkileşim halinde olduğundan, köprü üzerinde titreşim oluştururlar. Bu titreşimler köprü yapısında azımsanmayacak şekilde iç kuvvet ve deformasyona sebep olurlar. Araç yükleri titreşim oluşturdukları için statikten ziyade köprüde dinamik bir etki meydana getirirler. Dolayısıyla, araç ve köprü yapısı arasındaki titreşim problemleri araştırmacıların çok dikkatini çekmektedir. Bir taraftan aşırı yükleme veya yüksek hızda sürülen araçlar geçtiği köprü yapısına dinamik darbe etkisi verir ve doğrudan köprünün çalışma koşullarına ve kullanım süresine etki eder. Diğer taraftan ise, köprü yapısının titreşimi köprü üzerinde hareket eden aracın güvenli şekilde geçmesine izin vermelidir ki yapısal titreşim tasarım parametrelerinin makul bir değerde olmasını gerektirir. Dolayısıyla araç ve köprü yapısı arasındaki dinamik etkileşim sistemine göre kapsamlı bir çalışmanın yapılması, köprü yapısı titreşim özellikleri ve üzerinde hareket eden araçların güvenli bir şekilde geçmesi ve çeşitli etkileşim durumlarındaki güvenirliliğin belirlenmesi ve makul gerçekçi demiryolları, karayolları, kentsel hafif raylı vb. köprü yapı tasarımının ihtiyacıdır.

5.2 Trafik Yüklemeleeri

Taşıtların dinamik yüklemesi, zaman tanım alanında lineer analiz olarak gerçekleştirilebilir. Zaman tanım alanında dinamik analiz gerçekleştirilirken genellikle doğrudan

entegrasyon yöntemi tercih edilir. Taşıt dinamik yüklemesi analizi, köprü zati yüklemesi ardından başlatılarak köprünün zati yükler altında yapmış olduğu deformasyonlar sonucu değişen rijitliği de dikkate alır.

Bu tez çalışmasında AASHTO' DA [69] tanımlı en ağır kamyon yüklemesi olan HS 20-44 kamyonu seçilerek, kasma köprü sisteminde taşıt kaynaklı titreşim etkilerinin incelenebilmesi için elverişsiz bir yükleme durumu oluşturulmuştur. HS 20-44 kamyonunun genel görünümü Şekil 5. 1'de verilmiştir.



Şekil 5. 1 HS20-44 kamyonu

Hareketli Yük titreşim katsayısı (AASHTO 3.8.2.1),

$$\varphi = 1 + \frac{15}{L+37} \leq 1.3 \quad (5.1)$$

İfadesi ile elde edilebilir. Burada, L köprü açıklığını ifade eder.

AASHTO'da belirtilen Hareketeli yük azaltama katsayısı Çizelge 5. 1 'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Hareketli yük azaltma kat sayısı (AASHTO-LRFD 3.6.1.1.2-1)

Trafik Şerit sayısı	Azaltma kat sayısı
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

Çalışmada dikkate alınan taşıt kütlesinin köprü kütlesine oranının düşük olması ve sadece köprü dinamik davranışının incelenmesi nedeniyle, trafik yüklerinin köprü sistemine uygulanabilmesi için daha önce belirtilen yöntemlerden hareketli yük modeli seçilmiştir.

5.3 Hareketli Yük Modeli

Zaman tanım alanında analiz (Time history analysis) dinamik yüklere maruz bir yapının bir takım dinamik denklemlere dayanarak çözümlenmesi işlemi olup, yapının kendi yapısal özellikleri ve üzerine gelen yüklere göre herhangi bir zaman içinde oluşan deformasyon, iç kuvvetleri vb. etkileri zamana bağlı olarak belirlenmesidir. Dolayısıyla bu analiz ile yapının zamana bağlı yer değiştirme, gerilme, iç kuvvetleri elde edilebilir. Zaman tanım alanındaki analiz Doğrudan entegrasyon yöntemi(direct Integration) ve Mod süper pozisyon yöntemi(modal superposition) olarak ikiye ayrılabilir. Zaman tanımındaki dinamik analiz çözümlerinde elde edilen dinamik denge denklemi aşağıdaki gibidir:

$$[M]\ddot{U}(t) + [C]\dot{U}(t) + [K]U(t) = P(t) \quad (5. 2)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$, $[K]$ ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini $U(t)$, $\dot{U}(t)$, $\ddot{U}(t)$ ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. $P(t)$ ise ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

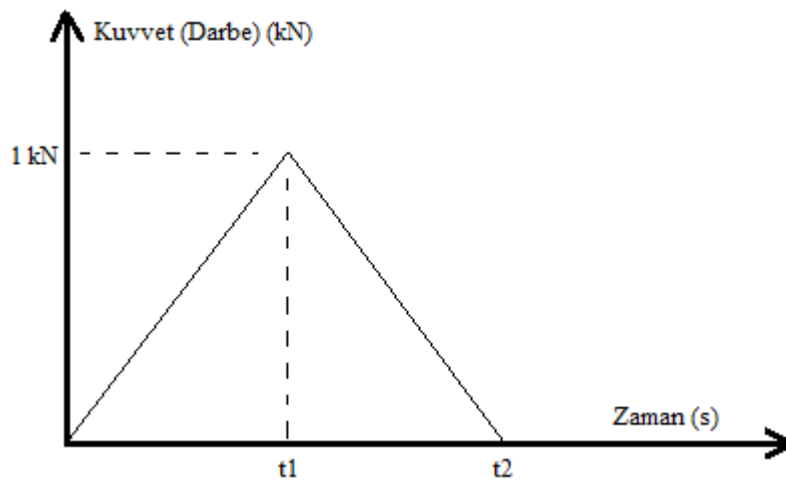
Zaman tanım alanındaki analizlerde, yapının yer değiştirmesi denklem (5. 2)'ye dayanarak benzer şekilde titreşim modlarını ve tek serbestlik denklem çözümlerinin çapımı ile ifade edilir, yer değiştirme sonucunun doğruluğu seçilen mod sayılarına bağlıdır. Bu yöntem yapı analiz programlarında yaygın kullanılan bir yöntem olup, büyük yapıların lineer dinamik analizlerinde çok etkili bir yöntemdir.

Zaman tanım alanındaki analizde, araç yükü köprü tabliyesi üzerindeki noktalara ani etkileyip kaybolan bir darbe yükü olduğundan, yakılışım olarak 1 KN değerindeki üçgen yük etkisi (araştırmada hangi tür araç kullanılmışsa, o aracın aks ağırlığını veya nokta dinamik yük etkisi tanıtımındaki büyütme katsayısı da girilebilir) uygulanabilir (şekil 5. 2). şekil 5. 2'de zaman t_1 ve t_2 arasındaki süreç aracın azami hızı ve modellenen iki nokta arasındaki mesafesi ile belirtilir.

Araç hızı 40 km/h için: $t_1 = \text{Tabliye giriş uzunluğu/hız} = 17.92 \text{ m}/(40 \text{ km/h}) = 1.6128$ (saniye) $t_2 = t_1 * 2 = 3.2256$ (saniye) formülü ile çözümlür.

Çizelge 5. 2 Farklı hızlardaki zaman tanımı

km/h	0	t_1	t_2
40	0	1,6128	3,2256
60	0	1,0752	2,1504
80	0	0,8064	1,6128
100	0	0,64512	1,29024
120	0	0,5376	1,0752



şekil 5. 2 Taşıt yükünün üçgen yük simülasyonu

Çalışmada analiz süresi en düşük hızla (40km/h) hareket eden taşıtın köprüye girişi ile köprüden ayrılışı arasındaki süreye bağlı olarak belirlenmiştir. Köprünün toplam uzunluğunun (1090 m), en düşük taşıt hızına (40 km/h=11.11 m/s) bölünmesiyle elde edilen süreye yakın bir değer olan 150 sn analiz süresi olarak tespit edilmiştir.

5.4 Asma Köprülerin Taşıt Yükleri Altında Dinamik Analizi

5.4.1 Asma Köprülerin Yapısal Hesabı

Asma köprülerin hesabında ana kablonun kendi ağırlığından oluşan sehim etkisi ve iç kuvvetleri dikkate alınmaktadır [77].

Dönüşüm elastik modülü kullanılarak sarkma etkisini dikkate alınmaktadır.

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(\gamma l)^2}{12\sigma^2} E} \quad (5.3)$$

Denklemden, E_{eq} kablunun dönüşmüş elastik modülü ; E malzemenin elastik modülü; γ kablo kütle yoğunluğu; l kablo akor uzunluğunun yatay yöndeki izdüşüm uzunluğu; σ Kablo gerilimidir.

Büyük deformasyon etkisini göz önüne alındığında, birim matris ve yük vektörü modifiye edilmiş Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilir:

$$[\bar{K}_i] \Delta u_i \approx \{F^{app}\} - \{F_i^{nr}\} \quad (5.4)$$

burada, hedef matris $[\bar{K}_i] \approx [K_i] + [S_i]; [K_i]$ Genel rijitlik matrisi, $[K_i] = \int [B_i]^T [D_i] [B_i] d(vol)$ $[B_i]$ ise geometrik vektör $\{x_n\}$ göre elde edilen deformasyon dönüşüm matrisi; $[S_i]$ ise geometrik rijitlik katkısıdır. $[S_i] = \int [G_i]^T [\tau_i] [G_i] d(vol)$; $[G_i]$ geometrik şekilden oluşan matris, Kartezyen koordinat Sistemindeki Cauchy gerilimden oluşan matris; Newton - Simpson geri kuvveti $[F_i^{nr}] = \int [B_i] \{\sigma_i\} d(vol)$; $\{F^{app}\}$ ise görünür yük vektörüdür[78].

Ölü yükler altında, kabloda ilk gerilimler var olup geometrik şeklini korumaktadır. İlave yükler altında ise kablo şekil değiştirme yapabiliyor ama kablodaki ilk gerilim kuvvetleri ilave yükler altındaki şekil değiştirmelere dayanıklı tepki gösteriyor. Nihai durumdaki denge denklemlerin kurulmasında, ilk denge durumundaki gerilim kuvvet ve yükleri hesaba katarak yapının yeni şekil değiştirme durumdaki denge denklemi bulunmalıdır ve bu denklemle yapının gerçek gerilim kuvvetleri hem de şekil değiştirmeleri elde ederiz. Kablo ilk gerilim iç kuvvetlerin bu etkisi aşağıdaki gerilim rijitlik matris denklemleri ile çözülür,

$$[S_i] = \int [G_i]^T [\tau_i] [G_i] d(vol) \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \text{veya} \quad \varepsilon_x = \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \text{Gerilme -}$$

Deformasyon ilişkisi. Denklemden, ε_x ise toplam deformasyonu ; $\frac{\partial \mu}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial \omega}{\partial x}$ ayrı-ayrı olarak yapının üç eksen yönündeki deformasyonların x eksenine göre türevidir.

Çubuk eleman göre, gerilme rijitlik matrisi:

$$[S_i] = \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

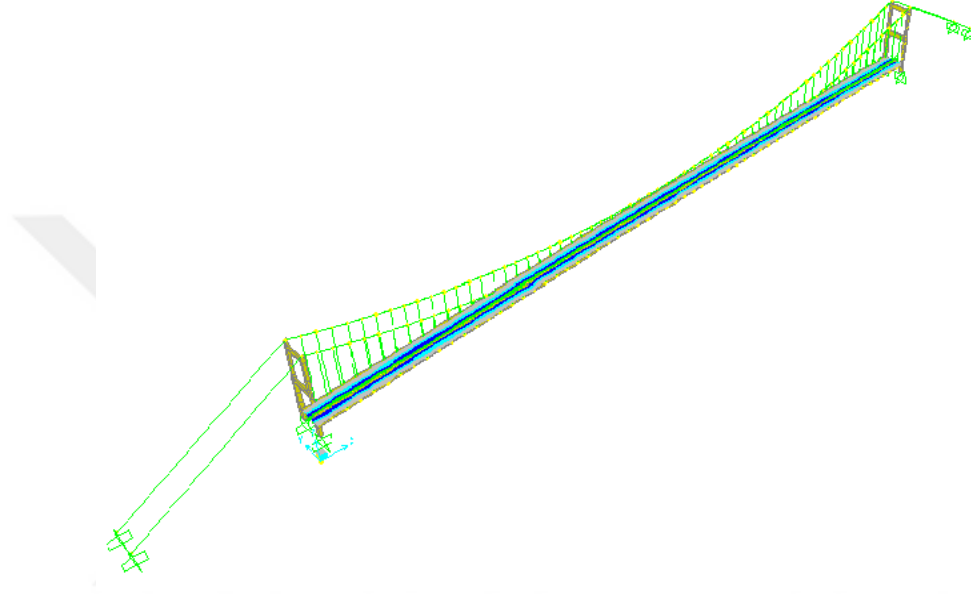
İki boyutlu çubuk elemanı hatta burulma burkulması dikkate alınmayan üç boyutlu çubuk elemanlar göre gerilme rijitlik matrisi:

$$[S_i] = \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & \frac{1}{10}L & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{1}{10}L \\ 0 & \frac{1}{10}L & \frac{2}{15}L^2 & 0 & -\frac{1}{10}L & -\frac{1}{30}L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{1}{10}L & 0 & \frac{6}{5} & -\frac{1}{10}L \\ 0 & \frac{1}{10}L & -\frac{1}{30}L^2 & 0 & -\frac{1}{10}L & \frac{2}{15}L^2 \end{bmatrix}$$

Burada, F eleman yükü; L ise Eleman uzunluğudur[79].

5.4.2 Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modeli

Tez çalışmasının bu kısmında Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün hareketli araç yükleri altındaki dinamik davranışı araştırılmıştır. Sap 2000 program ile modellenen köprü'nün kule ve tabliyeleri kiriş olarak, tabliye kirişi ile askı halatlar rijit link olarak bağlanmıştır. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli ve tabliyesinin plon görünüşü sırasıyla Şekil 5. 3 ve Şekil 5. 4'te verilmektedir.



Şekil 5. 3 Fatih Sultan Mehmet köprüsü sonlu eleman modeli

5.4.3 Hareketli Yükler Altındaki Dinamik Tepki Hesabı

Hareketli trafik yükleri altındaki büyük açıklıklı köprülerin genel dinamik tepki analizlerinde, genel olarak hareketli araç yük modeli, hareketli kütle ve hareketli kütle yaylı sönüm sistemi kullanılmaktadır. FSM köprüsü'nün kendi kütlesi araç kütlesinden çok büyük olduğu için araç kütlesi ve titreşimin köprü yapısına etkisi çok küçüktür, dolayısıyla bu analizde hareketli yük modeli kullanılmıştır. Araç –köprü yapısı birleşme titreşim analizinde, sönüm ise çok önemli bir faktördür. Bu çalışmada, Rayleigh sönümlenme formu kullanılmıştır.

Rayleigh sönümlenme formülü:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_n\omega_m}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ 1 & 1 \\ -\omega_n & \omega_m \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad (5.7)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerde, α ise kütle sönüm katsayısı; β ise rijitlik sönüm katsayısı; ω_n, ω_m ise Herhangi verilen iki doğal frekansları; ξ_m, ξ_n ise uyumlu modal sönüm oranı, m,n altsimgeleri ise titreşim mod katmanları ifade etmektedir.

5.5 Taşıt Yükleme Koşulları

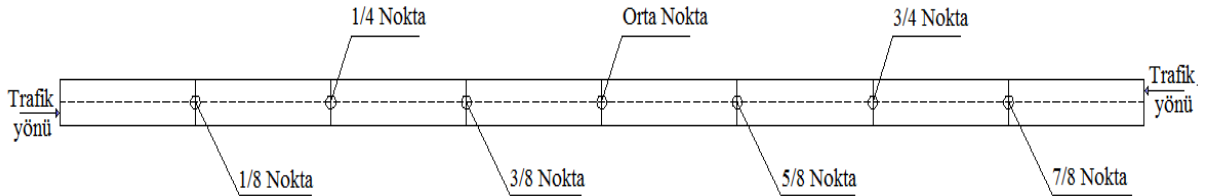
Çeşitli hareketli araç yükleri altındaki büyük açıklık asma köprülerin dinamik tepki analizleri için çeşitli koşullardaki hareketli araç yükleri seçilmiştir. Bu koşullara göre, araç hızı ve araç kütlelerinin köprü yapısına etkileri ve farklı tepki durumları karşılaştırılmıştır. Hesaplardaki yapısal dinamik denklemlerin çözümlerinde, tam matris doğrudan entegrasyon yöntemi kullanılmıştır, üsteki teorik esaslara dayanarak asma köprü yapısının çeşitli doğrusal olmayan faktörleri dikkate alınmıştır, köprü yapısının farklı pozisyonlarındaki maksimum dikey deplasmanları hesaplanmıştır.

5.5.1 Çeşitli Koşullarda Yapılan Analizler ve Sonuçlar

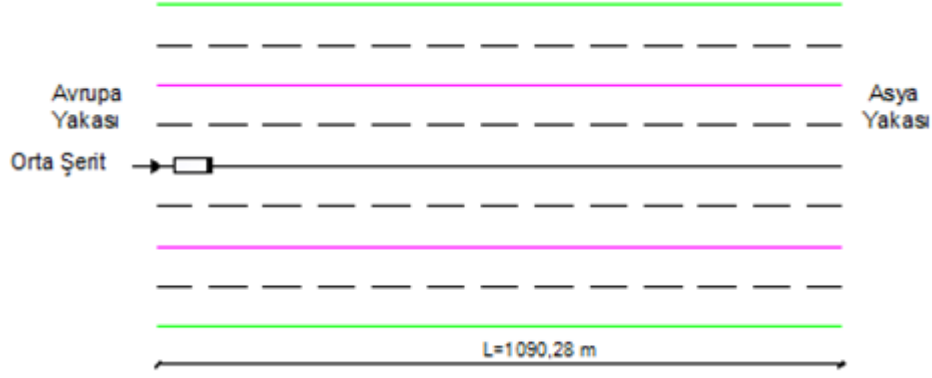
5.5.1.1 Çalışma Koşulu 1: Tek Aracın Köprü Orta Şerit Geçişi

Araç kütlesi P=50 ve P=150 ton olan tek araç'ın köprü doğrultusu boyunca tek yönlü geçiş simülasyonu yapılarak (Şekil 5. 5), farklı araç hızları altındaki yapısal dinamik tepki hesap sonuçlarına göre elde edilen düşey yer değiştirmeler, P=50 ton için Çizelge 5. 3'te, P=150 ton için Çizelge 5. 4'te verilmiştir. Çizelge 5. 3' ve Çizelge 5. 4'te listelenen köprü tabliyesinin her bölümünün plan görünümü Şekil 5. 4'te verilmiştir.

Elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişimi 50 ton ve 150 tonluk araç yükü için sırasıyla Şekil 5. 6 ve Şekil 5. 7'de verilmektedir.



Şekil 5. 4 Köprü tabliyesinin her bölümünün plan görünümü



Şekil 5. 5 50 Tonluk tek aracın orta şerit geçişi

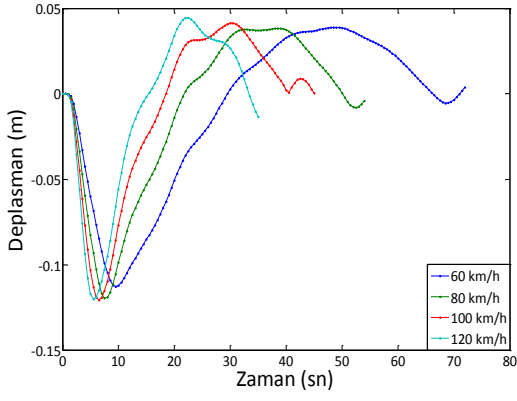
Çizelge 5. 3 Çalışma koşulu 1'deki P=50 tonluk aracın düşey yerdeğiştirmeleri

Araç hızı (km/h)	Köprü boyuna doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	1/2 Nokta	5/8 Nokta	3/4 Nokta	7/8 Nokta
60	-0,11291	-0,14024	-0,12915	-0,11955	-0,12722	-0,13723	-0,11279
80	-0,11951	-0,13127	-0,12918	-0,121	-0,13081	-0,01373	-0,11321
100	-0,12079	-0,13811	-0,13467	-0,12229	-0,12805	-0,14455	-0,11388
120	-0,12027	-0,15288	-0,12345	-0,12506	-0,13958	-0,13843	-0,11923

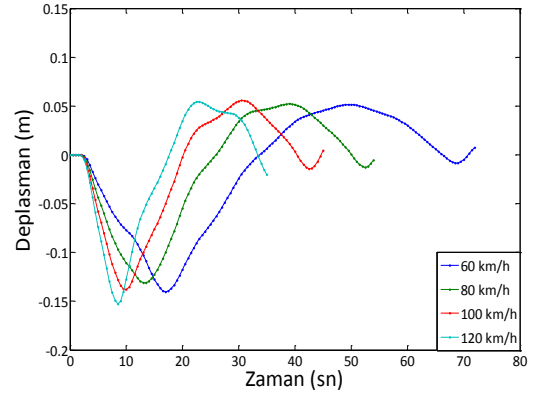
Çizelge 5. 4 Çalışma koşulu 1'deki P=150 tonluk aracın düşey yerdeğiştirmeleri

Araç hızı (km/h)	Köprü boyuna doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	Orta Nokta	5/8 Nokta	3/4 Nokta	7/8 Nokta
60	-0,30508	-0,37902	-0,34908	-0,32314	-0,34385	-0,37093	-0,3049
80	-0,32294	-0,3549	-0,34919	-0,32708	-0,35357	-0,371	-0,30601
100	-0,32656	-0,37337	-0,36374	-0,33053	-0,34615	-0,39075	-0,30784
120	-0,32515	-0,41331	-0,33374	-0,33809	-0,37731	-0,37427	-0,32225

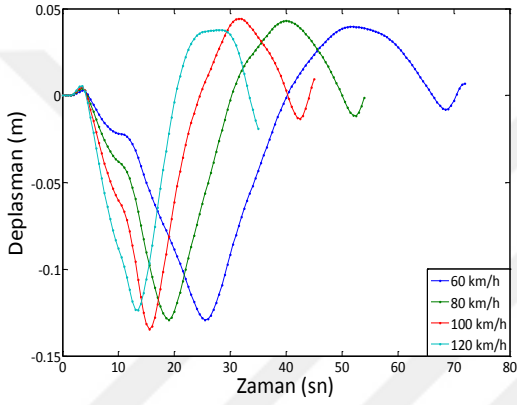
Çizelge 5. 3 ve Çizelge 5. 4'te görüldüğü gibi, tek aracın köprü geçişinde, maksimum düşey yerdeğiştirme tepkisinin köprü uzunluğu boyunca 1/4 noktasında oluştuğunu açıkça görebiliyoruz. Araç ağırlıkları artınca yerdeğiştirmelerin de araç ağırlığı ile doğru orantılı olarak büyüdüğünü açıkça görebiliyoruz.



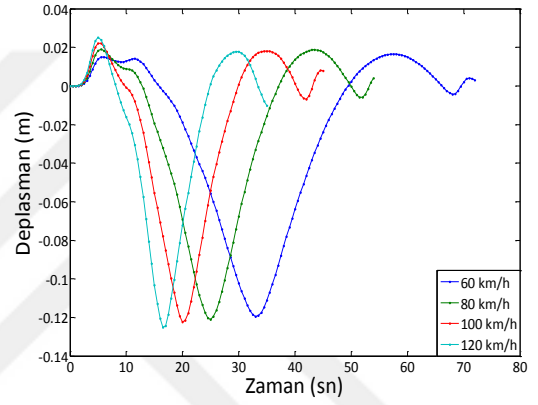
a. 1/8 Nokta



b. 1/4 Nokta

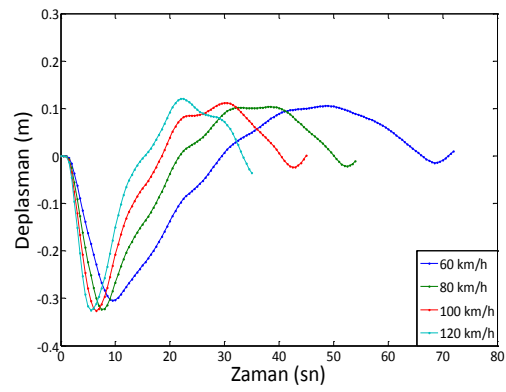


c. 3/8 Nokta

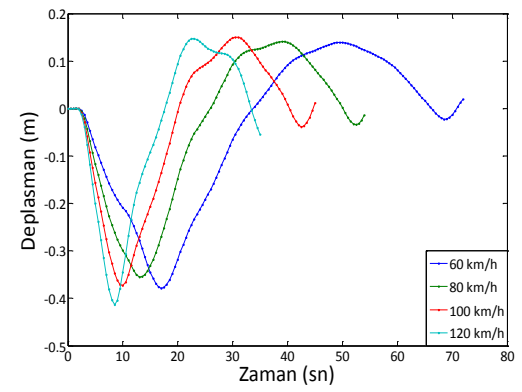


d. 1/2 Nokta

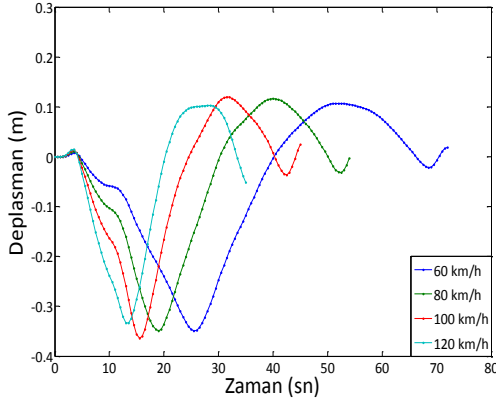
Şekil 5. 6 Çalışma koşulu 1'deki P=50 tonluk aracın yerdeğiştirmeleri



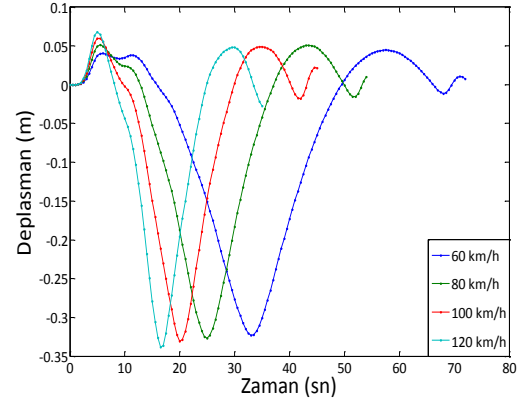
a. 1/8 Nokta



b. 1/4 Nokta



c. 3/8 Nokta

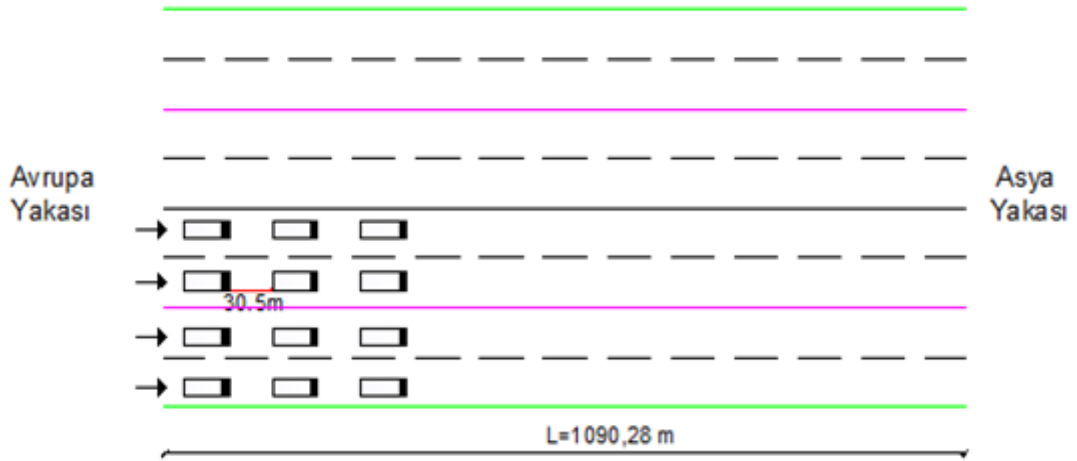


d. 1/2 Nokta

Şekil 5. 7 Çalışma koşulu 1'deki P=150 tonluk aracın yerdeğiştirmeleri

5.5.1.2 Çalışma Koşulu 2: Bir Grup Konvoyun Tek Yönlü (Avrupa-Asya Gidiş Yönü) Geçişi

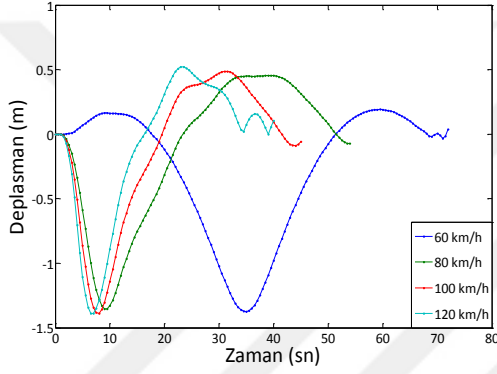
Araç ağırlığı P=50t, köprüden geçiş Aralıkları 30.5m olan 12 aracın Avrupa-Asya geçiş yönünde farklı hızlarda geçiş yaptığında (Şekil 5. 8) hesaplanılan dinamik tepki sonuçları Çizelge 5. 5'te verilmiştir. Çizelge 5. 5'ten görüldüğü gibi, Bir grup konvoyların tek yönlü (Avrupa-Asya gidiş yönü) geçişinde, maksimum düşey yerdeğiştirme tepkisinin köprü uzunluğu boyunca 1/4 - 3/8 nokta aralıklarında olduğunu Şekil 5. 9'dan açıkça görebiliyoruz.



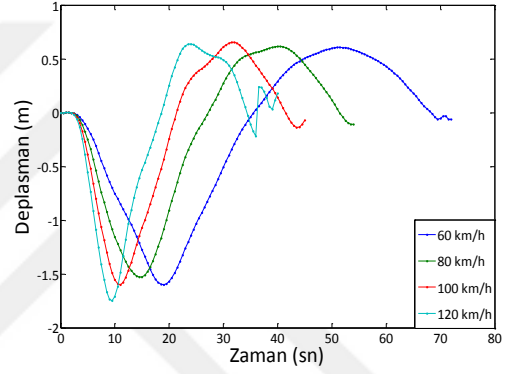
Şekil 5. 8 50 Tonluk 12 aracın 30.5 m aralıklı Avrupa-Asya yönü geçişleri

Çizelge 5. 5 Çalışma koşulu 2'deki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

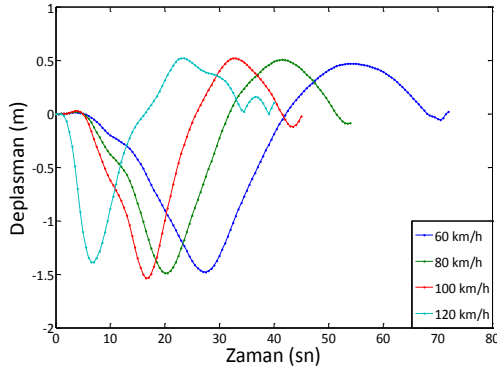
Araç hızı (km/h)	Köprü boyunca doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	Orta Nokta	5/8 Nokta	3/4 Nokta	7/8 Nokta
60	-1,28585	-1,59978	-1,47954	-1,37341	-1,46031	-1,57708	-1,2927
80	-1,35245	-1,52876	-1,48765	-1,39281	-1,50073	-1,57989	-1,30275
100	-1,38701	-1,59918	-1,53512	-1,40391	-1,48008	-1,66068	-1,314
120	-1,38872	-1,74944	-1,42988	-1,43924	-1,6031	-1,60951	-1,35811



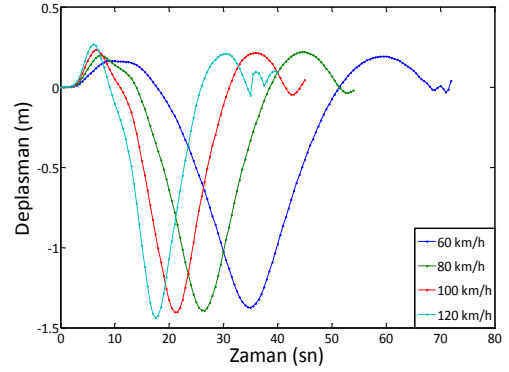
a. 1/8 Nokta



b. 1/4 Nokta



c. 3/8 Nokta

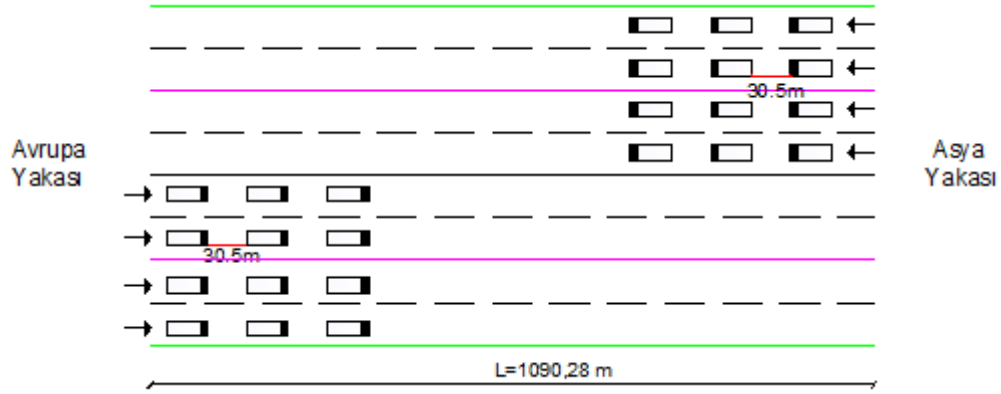


d. 1/2 Nokta

Şekil 5. 9 Çalışma koşulu 2'deki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

5.5.1.3 Çalışma Koşulu 3: İki Grup Konvoyun (Avrupa-Asya Geçiş Yönü) (Asya-Avrupa Geçiş Yönü) Karşılıklı Olarak Köprü Geçişleri

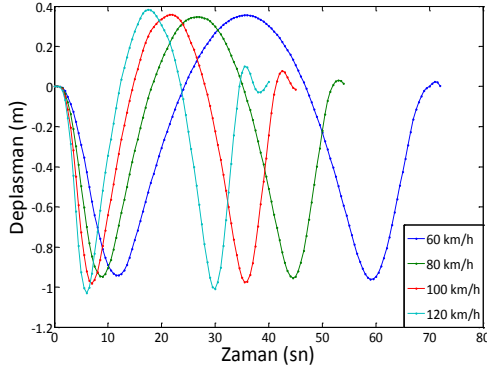
Araç ağırlığı P=50t, köprüden geçiş Aralıkları 30.5m olan 12 aracın Avrupa-Asya geçiş yönü ve Asya-Avrupa geçiş yönünde karşılıklı olarak farklı hızlarda geçiş yaptığında (Şekil 5. 10) hesaplanılan dinamik tepki sonuçları Çizelge 5. 6'da verilmiştir.



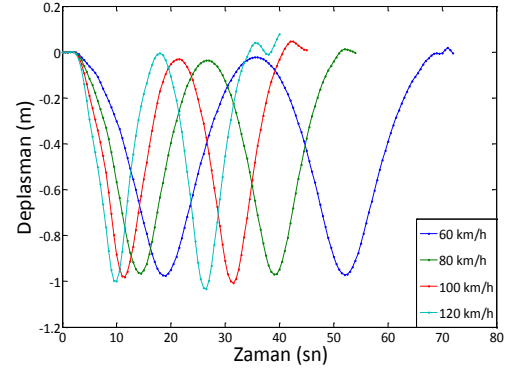
Şekil 5. 10 İki grup konvoyların Avrupa-Asya ve Asya-Avrupa yönü geçişleri

Çizelge 5. 6 Çalışma koşulu 3'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

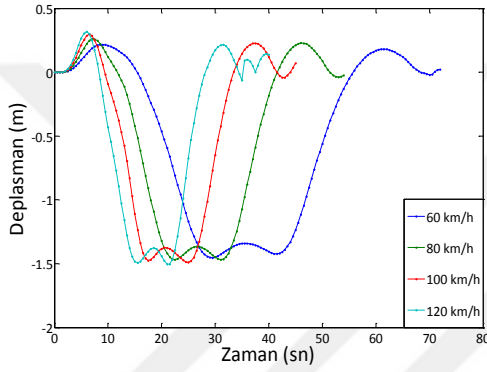
Araç hızı (km/h)	Köprü boyuna doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	Orta Nokta	5/8 Nokta	3/4 Nokta	7/8 Nokta
60	-0,96136	-0,9748	-1,45372	-2,73526	-1,45374	-0,97474	-0,9613
80	-0,95509	-0,97037	-1,46825	-2,77187	-1,46828	-0,97032	-0,95499
100	-0,98101	-1,00771	-1,49078	-2,4183	-1,4908	-1,00766	-0,9809
120	-1,03044	-1,03212	-1,50289	-2,84345	-1,50292	-1,03204	-1,03034



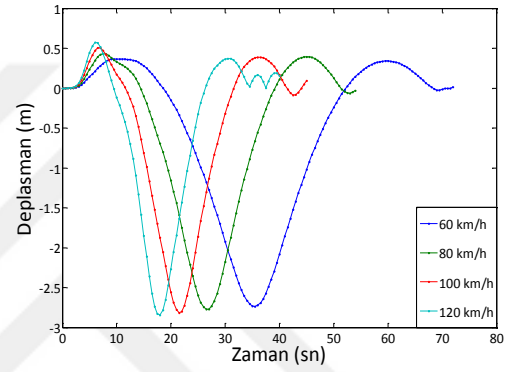
a. 1/8 Nokta



b. 1/4 Nokta



c. 3/8 Nokta



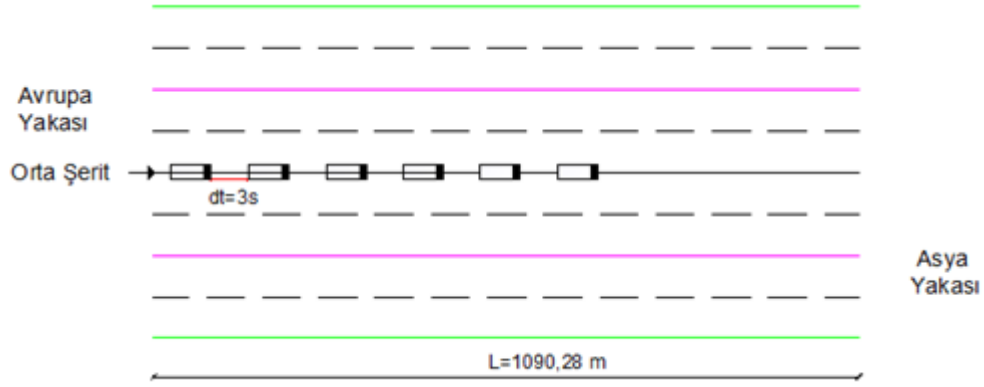
d. 1/2 Nokta

Şekil 5. 11 Çalışma koşulu 3'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

Çizelge 5. 6'dan görüldüğü gibi, Avrupa-Asya geçiş yönü ve Asya-Avrupa geçiş yönünde karşılıklı olarak farklı hızlarda geçiş yaptığında, maksimum düşey yerdeğiştirmelerin köprü'nün orta noktasında oluştuğunu Şekil 5. 10'dan açıkça görebiliyoruz.

5.5.1.4 Çalışma Koşulu 4: 2014 Yılı Gişelerden Geçiş Yapan Gerçek Araç (Hsn-44-1 Araç Tipi) Sayısına Göre, Farklı Hızlardaki Köprü Orta Şerit Geçiş

Bu çalışma koşulunda Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'nün 2013-2014 Yılı itibariyle araç sınıflarına göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünden geçen araç sayısı ve oranlara dayalı olarak farklı hızlarda 3 sn aralıklı köprü orta şerit geçiş simülasyonu yapılmıştır (Şekil 5. 12). Farklı hızlarda oluşan yerdeğiştirme değerleri Çizelge 5. 7'de verilmiştir. yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 3. 13'te verilmiştir.



Şekil 5. 12 3 Sn aralıklı araçların orta şerit geçişleri

Çizelge 5. 7 Çalışma koşulu 4'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

Araç hızı (km/h)	Köprü boyuna doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)						
	1/8	1/4	3/8	Orta	5/8	3/4	7/8
	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta
60	-0,53161	-0,71775	-0,69012	-0,56389	-0,68963	-0,71647	-0,5321
80	-0,53188	-0,72017	-0,69572	-0,56962	-0,69924	-0,71897	-0,53559
100	-0,53738	-0,72947	-0,69419	-0,57384	-0,69304	-0,736	-0,53532
120	-0,53216	-0,73098	-0,70284	-0,57403	-0,69274	-0,73669	-0,55148

Çizelge 5. 8 2013-2014 Yılı itibariyle araç sınıflarına göre Fatih Sultan Mehmet Köprüsünden geçen araç sayısı ve oranları (Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü)

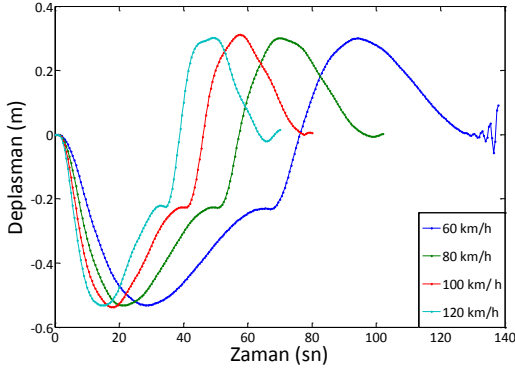
YILLAR	ARAÇ SINIFI						ORTALAMA		TOPLAM
	1.SINIF	2.SINIF	3.SINIF	4.SINIF	5.SINIF	6.SINIF	GÜNLÜK	AYLIK	
	AKS ARALIĞI 3,20 m' DEN KÜÇÜK 2 AKSLI ARAÇLAR, OTOMOBİL, MOTOR SİKLET, KAMYON ET VE MİNİBÜSLER DAHİL	AKS ARALIĞI 3,20 m' DEN BÜYÜK 2 AKSLI ARAÇLAR, KAMYON, KAMYONET, AMBULANS, BELEDİYE/ BALK VE YOLCU OTOBÜSLERİ	3 AKSLI HER TÜRLÜ ARAÇLAR OTOBÜS, KAMYON VE TREYLER 1 İLAVE AKSLI 1 VE 2.SINIFLAR	4 VE 5 AKSLI HER TÜRLÜ ARAÇLAR OTOBÜS, KAMYON TREYLER	6 VE YUKARI AKSLI HER TÜRLÜ ARAÇLAR RÖMORKLU KAMYON VE TREYLER	14/04/2006 dan itibaren KGS MOTOR SİKLET			
	ADET	ADET	ADET	ADET	ORAN	ADET			
2013	66.096.580	11.280.664	2.330.846	3.392.828	64.194	2.218	227.856	6.930.611	83.167.330
2014	21.933.882	4.198.034	786.318	1.229.726	36.616		234.871	7.046.144	28.184.576

2014 yılı nisan ayı itibariyle

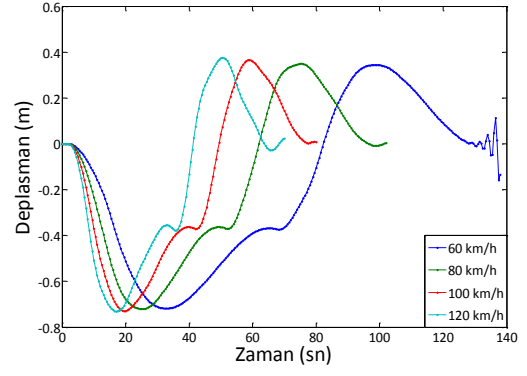
Çizelge 5. 9 2014 Yılı Fatih Sultan Mehmet köprüsü saatlik araç geçişleri(OGS)

FATİH SULTAN MEHMET KOPRUSU SAATLİK ARAÇ GEÇİŞLERİ (OGS) 2014

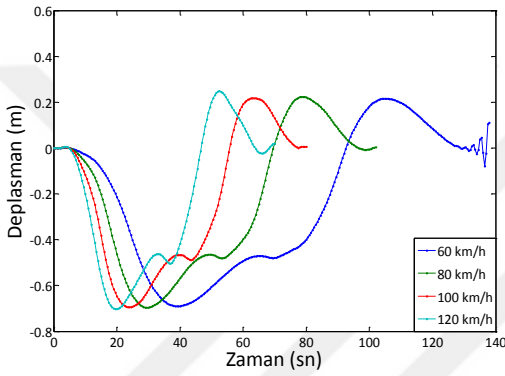
SAAT	1.6	2.6	3.6	4.6	5.6	6.6	7.6	8.6	9.6	10.6	11.6	12.6	13.6	14.6	15.6	16.6	17.6	18.6	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6	24.6	25.6	26.6	27.6	28.6	29.6	30.6	ORT.
00-01	1908	1046	814	1055	935	1048	1912	2269	1756	882	1082	1180	1103	1845	1981	1547	879	1173	1558	1291	2092	2122	1498	1136	1785	1790	1900	1792	1741	1364	1482
01-02	1005	493	441	604	453	481	776	1513	619	461	616	584	657	1514	1350	888	470	605	639	613	1202	1317	928	602	880	953	942	1101	1312	641	822
02-03	448	286	279	291	322	312	456	645	264	320	353	332	356	666	614	383	316	315	355	349	599	525	418	347	362	382	473	502	633	321	407
03-04	293	199	202	250	255	256	332	318	196	226	261	293	259	423	392	264	279	243	271	275	390	330	278	269	293	288	290	353	329	284	285
04-05	262	278	253	307	310	304	383	301	281	326	330	340	331	461	366	356	309	314	298	317	426	297	309	352	356	342	361	454	392	384	332
05-06	333	652	696	717	711	736	649	376	589	734	775	756	803	890	478	773	755	766	770	783	739	404	643	774	772	778	809	543	303	516	665
06-07	461	1629	1539	1459	1529	1510	889	508	1718	1631	1580	1544	1558	1121	660	1649	1506	1449	1466	1516	990	528	1298	1416	1412	1487	1452	675	308	1329	1260
07-08	638	3321	3060	2975	3093	2838	1355	651	3260	3190	3061	3140	3066	1572	799	3164	3046	2534	2978	2980	1414	755	2953	2968	2390	2435	2911	1121	392	2991	2367
08-09	974	2327	2630	2708	2839	2943	1856	1016	2913	2988	2901	2877	2766	1947	1259	2675	2880	2638	2691	2770	1865	1030	2740	2750	2485	1953	2831	1531	602	2827	2310
09-10	1487	2729	2420	3177	3332	3104	2487	1407	2405	3001	3101	2866	2709	2590	1888	2582	2921	3039	2982	2860	2564	1456	2786	2759	3224	2612	2708	2027	789	2566	2546
10-11	1793	2847	2960	2973	3264	3264	2963	1970	2872	2932	3322	2934	3016	2955	2209	3068	3048	3191	3026	2834	2808	1820	2646	2972	3019	2747	3104	2141	1100	2678	2749
11-12	2025	3003	3024	3161	2980	2618	3656	2214	2807	1927	2984	3093	2752	2809	2299	2981	2702	3045	2886	3011	2711	1996	2607	2837	2615	2825	3004	1995	1269	2454	2660
12-13	2478	3065	2966	2876	2837	2607	3000	2943	2786	2900	2507	2896	2886	2096	2516	2739	2774	2807	2779	3031	2889	2295	2695	2788	2747	2494	2737	2713	1473	2795	2729
13-14	2755	2906	2950	2906	2916	2525	3332	2745	2747	3073	2902	2818	2683	3157	2776	2679	2836	2591	2936	2642	2659	3404	2840	2822	2487	2574	2487	2702	1568	2495	2730
14-15	2741	2976	3063	3005	2974	3053	3080	2570	3107	2721	2596	3006	2761	2805	2667	2456	2771	2789	2716	2740	2446	2503	3037	2378	2997	2213	2755	2780	1719	2733	2758
15-16	2774	2979	3303	3225	3438	3226	2968	2531	3339	2698	2549	3065	3097	2712	1742	2932	2733	2756	2612	2991	2371	2393	3114	2754	2930	2439	2877	2845	1877	2804	2802
16-17	2588	3490	3655	3770	3629	3427	2951	2574	3747	3509	2879	3794	3332	2684	2465	3516	2990	3486	3606	3225	2595	3482	2980	3293	3229	2964	3163	2839	1898	3347	3130
17-18	2704	3528	3201	4363	4202	3759	3072	2120	4327	4123	3665	3620	2907	3093	2728	3768	3882	3624	3560	3217	2183	2335	3696	3851	3486	3615	3572	2696	1634	4225	3365
18-19	2227	2865	4070	3952	3980	3886	2425	2334	3886	3830	3996	3955	3808	2988	2248	3376	3424	3628	3361	3563	2788	1640	3553	3685	3642	3573	3577	2317	1602	3755	3263
19-20	2515	3241	4070	3940	4149	3642	2964	2614	4089	3926	4014	3838	3489	2891	2495	3708	3753	3699	3482	3656	2665	2178	3591	3732	3626	3148	3639	1589	1413	4013	3322
20-21	1940	2998	3657	3046	3199	3286	2493	3008	3725	3695	3338	3127	2535	2132	3390	3652	3335	3300	3254	2027	2053	3355	3300	3482	3168	3543	1099	944	2379	2892	
21-22	1933	2251	2402	2329	2769	2741	2261	1410	2205	2437	2422	2500	2755	2138	1993	2066	2462	1959	2489	1880	1870	2182	2546	2265	2683	2564	991	889	1454	2183	
22-23	2160	1926	2031	1902	2055	2524	1959	1774	1852	2197	2085	1986	2512	2262	2152	1947	2088	2312	2145	2160	1952	1928	1785	2047	1945	2446	2217	1322	1512	1610	2019
23-24	1854	1284	1956	1512	1682	2255	2276	2033	1415	1802	1814	1710	1760	2096	2129	1430	1597	1692	1790	1783	2120	1825	1619	1972	1853	2205	2199	1450	1693	1264	1802
TOPLAM	40336	52319	56222	56483	57333	56287	49885	41333	58186	55559	55090	56019	54285	58859	42273	54117	54043	53969	54846	54339	46135	38494	53851	54839	54882	52114	58117	39578	27582	51349	50863



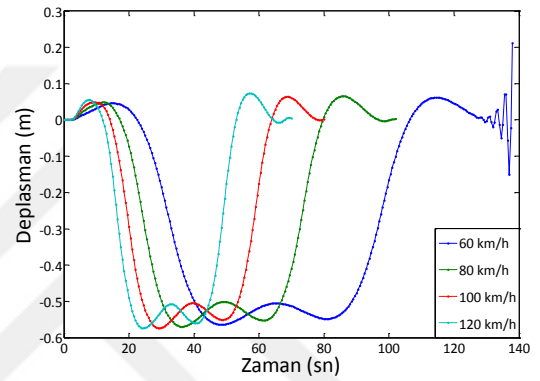
a. 1/8 Nokta



b. 1/4 Nokta



c. 3/8 Nokta



d. 1/2 Nokta

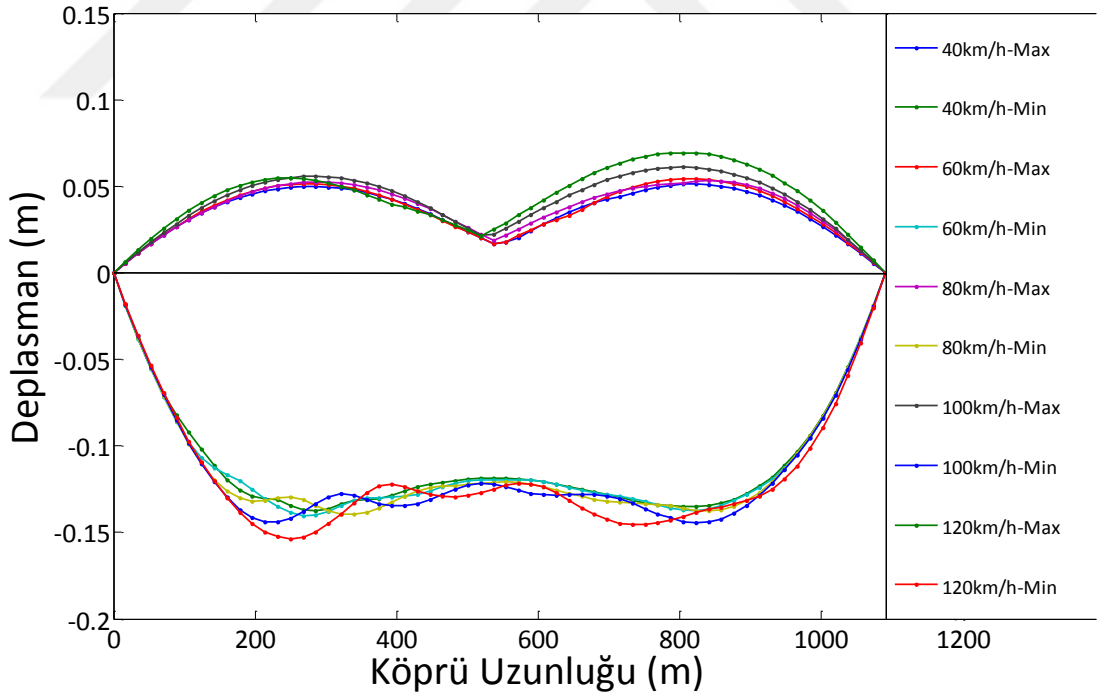
Şekil 5. 13 Çalışma koşulu 4'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

5.5.1.5 Çalışma Koşulu 5: 50 Ton'luk Aracın Farklı Hızlarda Köprü Orta Şerit Geçiş

Bu çalışma koşulunda, 50 ton'luk aracın en düşük azamı hızı 40 km/h başlayarak 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h ve en yüksek azamı hızı 120 km/h olarak köprü tabliyesin orta şeritinden Avrupa-Asya yönü olarak geçirilmiştir. Köprü boyunca uzunluğu boyunca taşıt etkileşim sonuçları Çizelge 5. 10'da, deplasman şekilleri Şekil 5. 14'te verilmiştir.

Çizelge 5. 10 Çalışma koşulu 5'teki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

Araç hızı (km/h)	Köprü boyuna doğru tudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)							
	1/8	1/4	3/8	Orta Nokta	5/8	3/4	7/8	
	Nokta	Nokta	Nokta		Nokta	Nokta	Nokta	
40	Max	0,03809	0,04983	0,03980	0,01678	0,04034	0,05126	0,03893
	Min	-0,11142	-0,13698	-0,12619	-0,11856	-0,12657	-0,13486	-0,11150
60	Max	0,03897	0,05147	0,03660	0,01655	0,04049	0,05449	0,04095
	Min	-0,11291	-0,14024	-0,12794	-0,11955	-0,12722	-0,13723	-0,11279
80	Max	0,03826	0,05217	0,04305	0,01895	0,04344	0,05302	0,04285
	Min	-0,11951	-0,13127	-0,12918	-0,12100	-0,13081	-0,13725	-0,11321
100	Max	0,04131	0,05565	0,04434	0,02213	0,05088	0,06080	0,04539
	Min	-0,12079	-0,13811	-0,13457	-0,12229	-0,12805	-0,14455	-0,11388
120	Max	0,04451	0,05436	0,03785	0,02519	0,05775	0,06925	0,05196
	Min	-0,12027	-0,15288	-0,12345	-0,12506	-0,13958	-0,13843	-0,11923



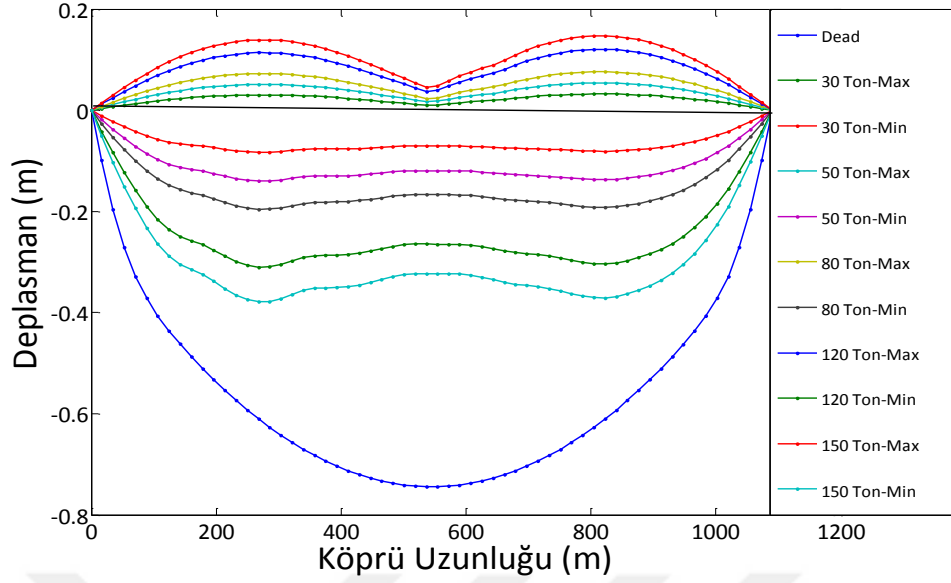
Şekil 5. 14 50 Tonluk aracın farklı hızlarda oluşturduğu yerdeğiştirmeleri

5.5.1.6 Çalışma Koşulu 6: 60 Km/h Hızında Farklı Ağırlıklardaki Araç Geçişleri

Bu çalışma koşulunda, 60 km/h sabit hızda 30 ton, 50 ton, 80 ton, 120 ton ve 150 ton'luk taşıt yükleri Avrupa-Asya yönü olarak tabliye orta şeritinden geçirilmiştir. Köprü boyuna uzunluğu boyunca farklı tonajlardaki taşıt etkileşim sonuçları Çizelge 5. 11'de, deplamsan şekiller Şakil 5. 15'te verilmiştir.

Çizelge 5. 11 Çalışma koşulu 6'daki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

Araç Ağırlığı (Ton)	Köprü boyuna doğrultudaki maksimum düşey yerdeğiştirmeler (m)							
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	Orta Nokta	5/8 Nokta	3/4 Nokta	7/8 Nokta	
Dead	Min	-0,46233	-0,61020	-0,71278	-0,74436	-0,71275	-0,61015	-0,46286
	Max	0,02301	0,03039	0,02340	0,00977	0,02391	0,03221	0,02421
30	Min	-0,06671	-0,08284	-0,07630	-0,07063	-0,07517	-0,08108	-0,06664
	Max	0,03897	0,05147	0,03964	0,01655	0,04049	0,05449	0,04095
50	Min	-0,11291	-0,14024	-0,12915	-0,11955	-0,12722	-0,13723	-0,11279
	Max	0,05490	0,07242	0,05583	0,02318	0,05683	0,07623	0,05732
80	Min	-0,15721	-0,19555	-0,18023	-0,16693	-0,17779	-0,19184	-0,15755
	Max	0,08620	0,11385	0,08764	0,03659	0,08960	0,12065	0,09068
120	Min	-0,24966	-0,31014	-0,28568	-0,26445	-0,28152	-0,30368	-0,24961
	Max	0,10540	0,13919	0,10720	0,04474	0,10948	0,14727	0,11066
150	Min	-0,30508	-0,37902	-0,34908	-0,32314	-0,34385	-0,37093	-0,30490



Şekil 5. 15 Farklı tonajlardaki araçların 60 km/h hızda oluşturduğu yerdeğiştirme

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Köprü açıklığının büyüklüğü ve köprü ağırlığının araç ağırlığından daha büyük olması özelliklerine göre, hareketli üçgen yük yöntemi kullanılarak araç simülasyonu yapılmıştır. Bu yöntem, basit, doğru ve güvenilir yapı özelliklerine sahiptir.
- Sabit hızdaki hareketli yükler altında, tek açıklı asma köprü tabliye kirişlerin dikey eğilme titreşimleri çokta belirgin değildir. Eğilme momentin maksimum değeri köprü doğrultunun 1/4 noktası civarında oluşmaktadır.
- Köprü ortasının en büyük yer değiştirme şekli araç hızı ile lineer artımsal değildir.
- Farklı ağırlıktaki araçlar köprüden geçtiğinde, araç ağırlığı artıka genlikte artar. Tabliye kirişin genliği araç ağırlığı ile lineer doğru orantılıdır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışı, kendi ağırlığı, deprem yükleri ve taşıt yükleri altında belirlenmesi incelenmiştir. Ana kablo, askı halat ve kule elemanlarının ilk gerilme kuvvetleri ayarlanarak, Sonlu Elemanlar Programı SAP 2000 ile üç boyutlu modeli oluşturulmuştur ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, farklı sayıda deprem kaydı altında ve bu kayıtların ortalaması dikkate alınarak yapılmıştır. Hareketli taşıt yükleri her şerite farklı sayı ve hızda araçların geçirilmesiyle temsil edilmiş ve zaman bağılı dinamik analizler yapılmıştır. Çalışmada, Hem depremim hem de taşıt yüklerinin etkisinde, köprü temel elemanlarında elde edilen kesit etkileri ve yerdeğiştirmeleri grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Farklı deprem ivme kayıtlarının ve farklı taşıt hızlarının köprünün dinamik davranışını önemli ölçüde etkilediği anlaşılmıştır. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün modal analizinde ilk yirmi mod şekli ve doğal periyodu elde edilmiş olup, Periyot değerleri 13.93-2.04 s arasında elde edilmiştir. Mode şekilleri yatay ve düşey yönlerde simetrik ve antisimetrik eğilme modları ve burulma modu olarak elde edilmiştir.
2. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü boyuna doğrultudaki deprem ivme kayıtlara göre yapılan zaman tanımı altındaki analizlerde, titreşim düşey düzlemde ağırlıklı olarak oluşmuştur. En büyük Kule yer değiştirmelerin kule orta bağlantı kirişlerin

yakınlarında oluşmuştur. Kule boyuna eğilme momenti, eksensel kuvvet, kesme kuvvetlerin maksimum değeri kule taban kısımlarında oluşmuştur.

3. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü enine doğrultudaki deprem ivme kayıtlara göre yapılan zaman tanımı altındaki analizlerde, köprü tabliye kirişi ve kulelerin boyuna, enine ve düşey doğrultularındaki titreşimlerin çok küçük olduğu, en büyük tabliye boyuna doğrultusundaki yerdeğiştirmelerin köprü orta açıklıkta, en büyük kule yanal yerdeğiştirmelerin kule tepe noktasında oluşmuştur. Kulelerin en büyük moment, eksensel kuvvet ve kesme kuvvetleri, kule taban kısımları ve kule orta bağlantı kirişine yakın kısımlarda oluşmuştur.
4. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün sayısal modelinde kullanılan hareketli taşıt yüklerinin ağırlığı köprü zati yük ağırlığından çok küçük olduğu, analizlerin basit ve sonuçların doğruluk açısından hareketli üçgen yük yöntemi kullanılarak taşıt yük simülasyonu yapılmıştır. Hareketli taşıt yükleri altında, köprü doğrultusundaki en büyük eğilme momentin köprü açıklığının 1/4 ve 3/4 açıklıklarında oluştuğunu, en büyük yer değiştirmelerin köprü orta noktasında oluştuğunu, köprü açıklığının 1/4 noktasındaki moment zaman eğrisi ile köprü orta noktasındaki moment zaman eğrisinin antisimetrik olduğu görülmüştür.
5. Çalışmada taşıt-köprü etkileşiminde önemli parametrelerden biri olan taşıt hızının ve hızda meydana gelen değişimlerin köprü davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde en büyük tepki kuvvetlerinin genellikle düşük hızlarda meydana geldiği görülmüştür. Ancak, taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra açıklık ortasında en büyük tepki kuvvetleri yüksek hızlar altında meydana gelmeye başlanmıştır. Kablo eksensel kuvvetlerinde hıza ve zamana bağılı büyük artış ve azalışların olması istenmeyen bir durumdur. Çalışmada dikkate alınan yük gurupları için kulelerde uzun süreli sayılabilecek deformasyonlar gözlenmiştir. Bu durum kabloların eksensel kuvvetlerinde ve yük taşıma kapasitelerinde düşüğe neden olabilecektir. Taşıt yüklerinin daha da artışının yer değiştirmeleri de arttıracığı dikkate alındığında, tasarımda bu durum üzerinde önemle durulmalıdır. Bu bakımdan kule elemanlarının trafik yükleri de dikkate

alınarak yeterli rijitlikte tasarlanması, kablo eksensel kuvvetlerindeki azalmayı aşırı düzeye indirecektir.

6. Çalışmada taşıt yükleri farklı hızlarda analize edilmiş olup, köprü açıklığında oluşan en büyük yer değiştirmelerin taşıt hızına bağlı olarak doğrusal bir artış göstermemektedir. Taşıt yükü hızları aynı olup, taşıt ağırlıkları arttıkça köprüde meydana gelen yerdeğiştirmelerin büyüdüğü anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Asma köprülerin dinamik davranışını birçok faktör etkilemekte olup, önemli olarak yapının rijitliği, yük ağırlıkları, dikey açıklık oranı, sabit açıklık oranı vb. ana unsurları içermektedir. Bu çalışmada ağırlıklı olarak deprem yükleri ve hareketli taşıt yükleri altındaki dinamik özellik etkileri araştırılmış olup, diğer etki faktörlerinin de araştırılması gerekmektedir.
2. Asma köprülerin deprem davranışı, yapısal parametrelere, zemin koşullarına ve zamanın ihtiyaçlarına göre yeniden ele alınmalı ve ileri dinamik analizler gerçekleştirilmelidir.
3. Bu tez çalışmasında, taşıt yük analizleri için hareketli üçgen yük simülasyonu yapılmıştır, gerçek taşıtların köprü tabliyesinden geçişinde bazı toleranslar olacaktır. Dolayısıyla doğru sonuçların elde edilmesi için daha gerçekçi bir hareketli taşıt yük simülasyonların araştırılması gerekmektedir.
4. Bu çalışmada sadece deprem yükleri ve hareketli taşıt yükleri altında analizler gerçekleştirilmiş olup, asma köprülerin dinamik davranışının belirlenmesinde, sıcaklık, rüzgâr ve patlama yükleri gibi yükleri altında da davranışın belirlenmesinde fayda vardır. Dolayısıyla bu etkilerin daha derin araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Konishi, I. ve Yamada, Y.,(小西一郎, 山田善一) (1960). "Earthquake Responses of a Long Span Suspension Bridge", Proc. 2nd WCEE, Japan.
- [2] Baron, F., Arikian, M., ve Hamati R.F., (1976). "The Effects of Disturbances On The Golden Gate Bridge", University of California, EERC Report No. 76-31, Californiya.
- [3] Abdel-Ghaffar, A.M. ve Housner, G.W., (1977). "An Analysis of The Dynamic Characteristics of A Suspension Bridge By Ambient Vibration Measurements", EERL-7701.
- [4] Fleming, J.F. ve Egeseli, E.A., (1982). "Dynamic Behavior of A Cable Stayed Bridge", Earthquake Engineering Structure Dynamic[J].
- [5] Dumanoğlu, A.A. ve Adanur, S., (2000). "Asma Köprülerin Antisinkronize Dinamik Analizi", İMO Teknik Dergi, 152: 2179-2197.
- [6] Lei, X., ve Noda, N.A., (2002). "Analysis of Dynamic Response of Vehicle and Track Coupling System With Random Irregularity of Track Vertical Profile", Journal of Sound and Vibration, 258 : 147-165.
- [7] Pan, Y.R., Du, G.H., ve Fan, L. Ch., (2000). "A Fine Calculation of The Geometry and Internal Force of Suspension bridge Under Dead Load", China Journal of Highway and Transport, Vol. 13, No.4, China.
- [8] Song, X., Jia, L.J., Xiao, R.Ch., ve Xiang, H.F., (2001). "Research of The Dynamic Behavior of Long Span Suspension Bridges Under Static Wind Load", Chinese Journal of Computational Mechanics, Vol. 18, No. 2, China.
- [9] Apaydın, N., (2002). Seismic Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Boğaziçi University İstanbul.
- [10] Adanur, S., Dumanoğlu, A.A., ve Bayraktar, B., (1997). "Asma Köprülerin Lineer Olmayan Dinamik Davranışının İncelenmesi", 4. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 269-276, Ankara.

- [11] Jiao, Ch.K., Li, A.Q., ve Wang, H., (2010). "Analysis on Parametres of Dynamic Property of Triple-Pylon Suspension Bridge", Journal of Highway and Transportation Research and Development, Vol.27, No.4, China.
- [12] Grigorjeva, T., Juozapaitis, A., ve Kamaitis, Z., (2010). "Static Analysis and Simplified Design of Suspension Bridges Having Various Rijidity of Cables", Journal of Civil Engineering and Management, 16(3): 363-371.
- [13] Günaydin, M., Adanur, S., Altunişik, A. C., ve Sevim, B., (2012). "Construction Stage Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 42, No.4, 489-505.
- [14] Günaydin, M., Adanur, S., Altunisik, A. C., Sevim, B., ve Turker, E., (2014). "Determination of structural behavior of Bosphorus suspension bridge considering construction stages and different soil conditions", Steel and Composite Structures, 17(4), 405-429.
- [15] Cengiz, A., Soyluk, A., ve Avanoğlu Sıcacık, E., (2011). "Kablolu köprülerde Trafik Yüklerinin Neden Olduğu Dinamik Etkiler", Gazi Üniv. Mih. Fak. Der.Cilt 26, No 1, Ankara.
- [16] Apaydın Memişoğlu, N., ve Erdik, M, Ö., (2011). "Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü Serbest Titreşim Analizi ve Tam Ölçekli Çevrel Titreşim Deneyi, İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 5, 3-13, İstanbul.
- [17] Pan, H., Shao, G.J., ve Hu, F., (2012). "Research on The Depth of Caisson Foundation South Anchorage of Tai Zhaou Bridge", Journal of China Engineering Science, Vol. 14, No.5, China.
- [18] Kartal, H., ve Soyluk, K., (2013). "Kablo Destekli Köprülerin Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması", Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, MKÜ, HATAY.
- [19] Apaydın, N., ve Bas, S., (2014). "Response of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge Under Site-Specific Multi-Point Earthquake Excitations", p. 25-29.
- [20] Jiang, D., Fei, Q.G., Han, X.L, Chen, H.L., ve Miao, CH.Q., (2013). "Dynamic Response of Large Suspension Bridge to Stochastic Traffic Loads", China Science Paper, Vol.8, No.11, China.
- [21] Liu, B.T., (1996). "A Nonlinear Analysis of Inclined Boom Cable Suspension Bridge", Journal of Chengdu University of Science and Technology, SUM No.92, No. 4, China.
- [22] Apaydın, N., (2001). "Asma köprüleride GPS Kullanarak Deplasman Ölçüleri", İstanbul.
- [23] Song, X., Jia, L.J., Xiao, R.Ch., ve Xiang, H.F., (2001). "Research of The Dynamic Behavior of Long Span Suspension Bridges Under Static Wind Load", China Journal of Computational Mechanics, Vol. 18, No. 2, China.
- [24] Cheng, j., Jiang, J.J., Xiao, R.Ch., ve Xiang, H.F., (2002). "An Aerostatic Stability Method for Long-Span Bridges Considering Geometrical, Material and Static

- Wind Load Nonlinearities”, Chinese Journal of Applied Mechanics, Vol. 19, No. 4, China.
- [25] Xiao, H.B., Yu, Y.A., ve Shen, Y., (2003). “Accurate Analysis on Bridging Shape of Main Cable in Suspension Bridge”, China Municipal Engineering, Vol. 104, No. 4, China.
- [26] Guo, W.W., Xia, h., ve Xu, Y.L., (2006). “Dynamic Response of Long Span Suspension Bridge and Running Safety of Train under Wind Action”, Journal of China Engineering Mechanics, Vol.23, No. 2, China.
- [27] Zhang, Zh.T., ve Ge, Y.J., (2006). “Aerostatic Instability Analysis of Long-Span Bridges Including Buffeting Effect”, Journal of China Engineering Mechanics, Vol. 23, No. 8, China.
- [28] Pedro, G.A., ve Segundinho, (2008). Dynamic Investigation of A Suspension Timber Footbridge, Proceedings of The 51 St International Convention of Society of Wood Science and Technology, CHILE.
- [29] Xu, J.W., ve Li, Ch.X., (1989). “Vibration Analysis of Vehicle-Bridge System for Self-Anchored Suspension Bridge of Pingsheng Bridge in Foshan City”, Journal of Haghway, No. 8, China.
- [30] Çavdar, Ö., Bayrakdar, A., Adanur, S., ve Başağa, B. H., (2010). “Stochastic Finite Eleman Analysis of Long-Span Bridge With CFRP Cables Under Earthquake Ground Motion”, Sadhana Vol. 35, Part 3, pp. 341-354.
- [31] Long, X.H., Li, Li., ve Hu, L., (2010). “Time Domain Analysis of Buffeting Responses of Sidu River Suspension Bridge”, Journal of China Engineering Mechanics, Vol. 27 Sup. I, China.
- [32] Li, X.Zh., Liu, D.J., ve Jin, Zh.B., (2010). “Analysis of Train- Track- Bridge Coupled Vibration of A Railway Long-Span Suspension Bridge”, China Journal of Steel Construction, Vol. 25, No. 140, China.
- [33] Zhao, X.L., ve Li, G.P., (2010). “Suspension Bridge Dynamic Characteristics Analysis”, China Journal of Science and Technology Information, Vol. 17, China.
- [34] Altın, S., Kaptan, K., ve Tezcan, S., (2012). “Dynamic Analysis of Suspension Bridge and Full Scale Testing”, Open Journal of Civil Engineering, 2: 58-67.
- [35] Çavdar, Ö., (2012). “Probabilistic Sensitivity Analysis of two Suspension Bridges in İstanbul, Turkey to near and Far-Fault Ground Motion”, Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 12, pp. 459-473.
- [36] Soyluk, K., Kartal, H., ve Adanur, S., (2013). Comparison of Dynamic Behaviour of Long-Span Cable-Supported Bridge, Vienna Cong ress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, VEESD.
- [37] Günaydın, M., Altunışık, A.C, Adanur, S., ve Sevim, B., (2011). “Fatih Sultan Mehmet köprüsü Yapısal Davranışının Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Belirlenmesi, 2. Köprüler ve Viyedükler Sempozyumu, 28-30 Eylül, 1-11, Eskişehir.

- [38] Sarker, J., ve Manzur, T., (2013). "Optimum Dimensions of Suspension Bridges Considering Natural Period", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 6, İss. 4, pp. 67-76.
- [39] Peng, Y.H., Zhou, L.M., ve Tang, B.G., (2013). "A Suspension Bridge Dynamic Characteristics and Seismic Response Parameter Analysis", China Overseas Highway, Vol. 23, No. 2, China.
- [40] Zhou, M.B., Liu, L.M., ve Wang, B.M., (2003). Suspension Bridge Manual, China Communications Press, China.
- [41] Menai Asma Köprüsü, <http://www.images.walesdirectory.co.uk/images/223/780/223.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [42] Clifton Asma Köprüsü, <http://www.hotelroomsearch.net/im/2015/04/bristol-uk-3.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [43] Forth Köprüsü, <http://archineeringtalk.com/wp-content/uploads/2015/07/forthbridge1.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [44] Severn Asma Köprüsü, <https://coastwalk.files.wordpress.com/2011/09/first-severn-bridge.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [45] Jacobs Creek Köprüsü, <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Jacobs-creek-bridge-1.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [46] Celasun, H.S., (1981). Asma Köprüler, İ.D.M.M. Akademisi Yayın Müd. Basımevi, İstanbul.
- [47] New York Esat Nehri Üzerindeki Brooklyn Köprüsü, http://a.abcnews.com/images/US/GTY_brooklyn_bridge_mar_19990101_11_23x15_1600.jpg, 22 Aralık 2015.
- [48] New York George Washington Köprüsü, <http://media.web.britannica.com/eb-media/87/887-050-04408E86.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [49] Golden Gate Asma Köprüsü, https://pixabay.com/static/uploads/photo/2010/12/17/10/51/golden-gate-bridge-3738_960_720.jpg, 22 Aralık 2015.
- [50] Lei, J.Q., Zheng, M.Zh., ve Xu, G.Y., (2001). Suspension Bridge Design, China Communications Press, China.
- [51] Kojima-Sakaide Güzergâhındaki Bisan Seto Köprüsü, <http://images.fineartamerica.com/images-medium-large/kojima-sakaide-bridge-aldo-cervato.jpg>, 22 Aralık 2015.
- [52] İnnoshima Asma Köprüsü, <http://files1.structurae.de/files/photos/2521/image416.jpg>, 23 Aralık 2015.
- [53] Shimotusi Asma Köprüsü, <http://www.shimz.co.jp/tw/works/11tra/images/5.jpg>, 23 Aralık 2015.
- [54] Akashi Boğazı Asma Köprüsü, http://old.worldsteel.org/files/Image/Bridges/22_Akashi.gif, 23 Aralık 2015.
- [55] Boğaziçi Asma Köprüsü, http://i.radikal.com.tr/480x325/2013/12/03/fft64_mf1825361.Jpeg, 23 Aralık 2015.

- [56] Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü, <http://www.turkmenhabargullugy.com/images/haber/1692.jpg>, 23 Aralık 2015.
- [57] Yavuz Sultan Selim Asma Köprüsü, <http://www.akradyo.net/admin/NewsImages/ef2a4808-8c22-4441-a95a-99031e475992.jpg>, 23 Aralık 2015.
- [58] İzmit Körfez Asma Köprüsü, http://i.ensonhaber.com/resimler/diger/korfez-koprusu_6943.jpeg, 24 Aralık 2015.
- [59] Merritt, F.S., Standard Handbook for Civil Engineers, Third Edition, McGraw-Hill. New York, 1983.
- [60] Pugsley, S.A., (1968). The Theory of Suspension Bridges, Second Edition, Edward Arnold. London.
- [61] Harazaki, I., Suzuki, S., ve Okukawa, A., (2000). Suspension Bridges, Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan, Boca Raton: CRC Press.
- [62] Erdoğan H., (2006). Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Jeodezik Ölçmelerle Belirlenmesi. YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- [63] Michaltsos, G. T., (2002). "Dynamic Behaviour of A Single-Span Beam Subjected to Loads Moving With Variable Speede", Journal of Sound and Vibration, Vol. 258(2), p. 359-372.
- [64] Henchi, K., ve Fafard, M., (1997). "Dynamic Behaviour of Multi-Span Beams Under Moving Loads. Journal of Sound and Vibration", Vol. 199(1), p. 33-55.
- [65] TCK 207, (1973). Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, TCK Yay., No: 207, Ankara.
- [66] Arsoy, S., (1999). Experimental and Analytical Investigations of Piles and Abutments of Integral Bridge. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [67] O'Connor, C., ve Shaw, P., (2000). Bridge Loads. Spon Press, London, p.350.
- [68] Ochshorn, J., (1981). Building Code, Wind Loads. Department of Architecture, Cornell University, New York.
- [69] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2005.
- [70] Soyluk, K., (1997). Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [71] Adanur, S., (1997). Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analjisi ile Dinamik Analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Yüksek Mühendisi Tezi, Trabzon.
- [72] Der Kiureghian, A., ve Nakamura, Y., (1993). "CQC Modal Combination Rule for High-Frequency Modes", Earthquake Engineering and Struvtural Dynamics, Vol.22, (1993) 943-956.
- [73] Bathe, K.J., (1996). Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

- [74] Chopra, A.K., (2006). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- [75] Consulting Engineers; Freeman, Fox and Partners SW.1 Second Bosphorus Bridge as Constructed Drawings, Westminster, London, 1998.
- [76] TDY 2007, (2006). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007, TMMOB, 2. Baskı, Ankara.
- [77] Xu, ZH.F., ve Xu, L., (1989). "Various Forms of Suspension Bridge Cables Deflection Theory Analysis", [J] Abroad Bridge, 4: 1–17, China.
- [78] Chen, H.L., Fei, Q.G., Liao, Zh.Q., ve Han, Sh.L., (2011). "Nonlinear Dynamic Response Analysis of Long Span Suspension Bridge Under Traffic Load", Journal of Special Structures, Vol.28, No.5, China.
- [79] SAP 2000 Advanced Version 14.0.0, Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc.
- [80] MATLAB, Commercial Integrating Technical Computing Program.
- [81] SeismoSpect Version 2.1.0, Earthquake Engineering Software Solutions Program.
- [82] Midas Civil 2013 Version 2.1, Civil Structure Design System, MIDAS Information Technology Co., Ltd.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Apaer MUBULİ
Doğum Tarihi ve Yeri :12.06.1985 Xin Jiang Uyghur Özerik Bölgesi, Çin
Yabancı Dili :Çince, Türkçe, İngilizce
E-posta :İdikut_Yildiz@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Ulaştırma Mühendisliği	NANJING TECH UNIVERSITY	2010
Lise	Yurt dışı		

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	MTM ULUSLARARASI MAKİNE TEKNOLOJİLERİ MERKEZİ SAN.VE TİC.LTD.STİ	GENEL MÜDÜR ASİSTANI