T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT BİR YAYA KÖPRÜSÜNÜN DİNAMİK ANALİZİ VE YAYA KÖPRÜ TİTREŞİM ETKİLEŞİMİ

Aliye Ebru TAZE

DANIŞMAN
Doç. Dr. Savaş ERDEM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu çalışma, 23.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Savaş ERDEM(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Özlem Çelik SOLA
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ
İstanbul Gelişim Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince desteğini, bilgi ve birikimini benden esirgemeyen, engin deneyim ve tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Doç. Dr. Savaş ERDEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman desteklerini hissettiğim, benim bugünlere gelmemi sağlayan, emeklerini ödeyemeyeceğim sevgili aileme de ne kadar teşekkür etsem azdır.

Haziran 2020 Aliye Ebru TAZE

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. KÖPRÜ YAPILARI VE DİNAMİK TEPKİSİ..... 3
2.1.1. Yaya Köprülerinin Türleri..... 3
2.1.2. Yaya Köprülerinin Dinamik Davranışını Etkileyen Parametreler..... 6
2.1.2.1. Sönümleme..... 6
2.1.2.2. Rijitliği ve Kütlesi..... 6
2.1.2.3. Mesnet Koşulları..... 6
2.1.2.4. Mod Şekilleri..... 6
2.1.2.5. Doğal Frekans..... 7
2.2. YAYA-KÖPRÜ TİTREŞİM DAVRANIŞI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR.. 7
2.3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY) DEPREM YER HAREKETLERİ..... 9
2.3.1. Harita Spektral İvme Katsayısı..... 11
2.3.2. Tasarım Spektral İvme Katsayısı..... 11
2.3.3. Yerel Zemin Sınıfları ve Yerel Zemin Etki Katsayıları..... 11
2.3.4. Yatay Tasarım İvme Spektrumu..... 13
2.3.5. Düşey Tasarım İvme Spektrumu..... 14
3. MALZEME VE YÖNTEM..... ..16
3.1. KÖPRÜNÜN YAPISAL ÖZELLİKLERİ..... 16
3.2. DİNAMİK ANALİZLER..... 18
3.2.1. Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi..... 18

3.2.2. Deprem İvme Kayıtları..... 20
3.2.3. Synpex Tasarım Metodu..... 22
3.2.3.1. Trafik sınıfı ve yaya yoğunluğu..... 23
3.2.3.2. Konfor seviyeleri..... 25
3.2.3.3. Sönüm oranları..... 26
3.2.3.4. Yaya yükü modeli..... 26
3.2.3.5. Yaya köprü kenetlenme etkisi, "lock-in"..... 27
3.2.4. British National Annex..... 28
3.2.4.1. Düşey doğrultudaki kontrol..... 29
3.2.4.2. Yatay doğrultudaki kontrol..... 31
4. BULGULAR..... **33**
4.1. MODAL ANALİZ..... 33
4.2. ZAMAN TANIM ALANI ANALİZİ..... 35
4.3. SYNPEX TASARIM METODU İLE YAPILAN ANALİZLER..... 39
4.3.1. Harmonik Yaya Yükünün Köprüye Uygulanması..... 39
4.3.2. Düşey Doğrultudaki Maksimum İvme ve Deplasman Değeri..... 39
4.3.3. Farklı Yaya Yükleri İçin Maksimum Deplasman Değerleri..... 40
4.3.4. Farklı Trafik Sınıfları İçin Konfor Değerleri..... 40
4.4. BRITISH NATIONAL ANNEX İLE YAPILAN ANALİZLER..... 40
4.4.1. Yürüme Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri..... 41
4.4.2. Koşma Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri..... 42
4.4.3. Kalabalık Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri..... 43
4.4.4. Limit Durum Kontrolleri..... 44
5. TARTIŞMA VE SONUÇ..... **46**
KAYNAKLAR..... **48**
EKLER..... **51**
ÖZGEÇMİŞ..... **52**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Solferino köprüsü (solda) ve Millenium köprüsü(sağda) (Altememy, 2015)..... 2

Şekil 2.1: Yaya köprüsü türlerine ait örnekler (Hawryszków, 2014)…….. 5

Şekil 2.2: Mesnet koşullarına bağlı olarak mod şekilleri (Reimert, 2014)…….. 7

Şekil 2.3: Warwick Üniversitesi prototip yaya köprüsü (Živanovic, 2012)……..... 9

Şekil 2.4: Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD)…….....10

Şekil 2.5: Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY)……..... 14

Şekil 2.6: Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY)……..... 15

Şekil 3.1: Asi nehri yaya köprüsü 3D Görünüşü…….... 16

Şekil 3.2: Köprü boykesiti (ölçüler: m)……. 17

Şekil 3.3: Köprü üstten görünüş (ölçüler: m)…….17

Şekil 3.4: Çelik taşıyıcı sistem 3D görünüş…….. 18

Şekil 3.5: TDTH interaktif web uygulamasına verilerin girilmesi ……19

Şekil 3.6: Tasarım parametreleri …….……..…… 19

Şekil 3.7: Yatay elastik tasarım spektrumu grafiği…… 20

Şekil 3.8: Kocaeli depremi ivme kaydı (g)…… 21

Şekil 3.9: Kobe depremi ivme kaydı (g)…… 21

Şekil 3.10: Northridge depremi ivme kaydı (g)…..…….…….. 21

Şekil 3.11: Ölçeklendirilmiş Kocaeli depremi ivme kaydı (g)…….. 22

Şekil 3.12: Ölçeklendirilmiş Kobe depremi ivme kaydı (g)……22

Şekil 3.13: Ölçeklendirilmiş Northridge depremi ivme kaydı (g)……..…… 22

Şekil 3.14: SYNPEX yöntemine göre hesap akış şeması…….. 23

Şekil 3.15: SYNPEX yöntemine göre tipik trafik yoğunlukları (Butz ve diğ.,2008)…..…. 25

Şekil 3.16: Harmonik yaya yükünün uygulanması (Altememy, 2015)..…….. 27

Şekil 3.17: Yaya-köprü senkronizasyonun şematik gösterimi (Güneş, 2013)…….. 28

Şekil 3.18: Yürüme ve koşma durumları için kalabalık katsayısı değerleri…….. 31

Şekil 3.19: Yatay kenetlenme stabil sınırlar…….. 32

Şekil 4.1. Köprü modeli 1. mod şekli (yatay doğrultu f=1.86 Hz)…… 34

Şekil 4.2. Köprü modeli 2. mod şekli (düşey doğrultu f=2.06 Hz)……... 34

Şekil 4.3. Köprü modeli 5. mod şekli (burulma f=3.68 Hz)…….. 35

Şekil 4.4. Deprem yüklemesi altında kesit tesirlerinin kontrolü…… 38

Şekil 4.5. Yürüme durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN)……... 41

Şekil 4.6. Yürüme durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi……. 42

Şekil 4.7. Koşma durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN/m^2)……... 42

Şekil 4.8. Koşma durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi……... 43

Şekil 4.9. Kalabalık durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN/m^2)……44

Şekil 4.10. Kalabalık durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi……. 44

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Yerel zemin sınıfları (TBDY)…….. 12

Tablo 2.2: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY)…...……...12

Tablo 2.3: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY)…...……..... 13

Tablo 3.1: Yaya köprülerinin trafik sınıfları…… 24

Tablo 3.2: Yaya köprülerinin konfor seviyeleri……..... 25

Tablo 3.3: Farklı yapı malzemelerine göre sönüm oranları……...26

Tablo 3.4: Yaya yükü parametreleri…….. 27

Tablo 3.5: Titreşim kontrol sınır değerleri……..... 28

Tablo 3.6: British National Annex göre sönüm oranları……29

Tablo 3.7: Yaya köprüsü yük modelleri…….29

Tablo 3.8: Yürüme ve koşma durumları için referans yük ve hız değerleri……...…….. 30

Tablo 4.1: Modal periyot ve frekans değerleri…….. 33

Tablo 4.2: Kocaeli depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri…… 36

Tablo 4.3: Kocaeli depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri…….. 36

Tablo 4.4: Kobe depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri…… 36

Tablo 4.5: Kobe depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri……...37

Tablo 4.6: Northridge depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri……..… 37

Tablo 4.7: Northridge depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri…..……... 37

Tablo 4.8: Farklı yaya yükü yoğunlukları için maksimum deplasman değerleri…….. 40

Tablo 4.9: Farklı yaya yükü yoğunlukları için konfor seviyeleri…….. 40

Tablo 4.10: Limit Kontrolleri…….…….. 45

Tablo 5.1: Kocaeli, Kobe ve Northridge depremlerine ait analiz sonuçları……. 46

Tablo 5.2. Köprüde farklı yaya yüklemeleri altında elde edilen ivme değerleri……47

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A : Köprü yüklenebilir alanı

A_0 : Etkin yer ivme katsayısı

a_{limit} : İvme limit değeri

C : Mesnetlenme koşulları durumunda oluşan doğal frekansların oranı

D : Yaya kütle sönümleme parametresi

d : Yoğunluk

E : Elastisite modülü

F_0 : Referans yük değeri

F_S : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı

F_1 : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı

f : Köprünün doğal titreşim frekansı

f_v : Köprü düşey frekansı

f_{limit} : Yatay frekans limiti

G : Bir yayanın ağırlığı

g : Yer çekimi ivmesi

I : Yapı önem katsayısı

K_n : Modal rijitlik

$k(f_v)$: Kalabalık katsayısı

k_1 : Köprü fonksiyon katsayısı

k_2 : Hat, güzergah katsayısı

k_3 : Köprü yükseklik katsayısı

k_4 : Etki katsayısı

L : Yapının uzunluğu

M_n : Modal kütle

$m_{köprü}$: Köprü kütlesi

m_{yaya} : Yaya kütlesi

N : Yaya adeti

n' : Yüklenebilen yüzeydeki eşdeğer yaya yoğunluğu

n : Yüklenebilen yüzeydeki yaya adeti

P(t) : Harmonik yaya yükü

$\mathbf{R_1}$: Boyuna doğrultuda dönme

$\mathbf{R_2}$: Enine doğrultuda dönme

$\mathbf{R_3}$: Düşey doğrultuda dönme

$\mathbf{S}$: Yüklenebilen yüzey alanı

$\mathbf{S_S}$: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı

$\mathbf{S_{DS}}$: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı

$\mathbf{S_1}$: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı

$\mathbf{S_{D1}}$: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı

$\mathbf{S(T)}$: Spektrum katsayısı

$\mathbf{S_{ae}(T)}$: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi [g]

$\mathbf{S_{aeD}(T)}$: Düşey elastik tasarım spektral ivmesi [g]

$\mathbf{S_{11}}$: Düzlemiçi normal gerilme

$\mathbf{S_{12}}$: Düzlemiçi kayma gerilmesi

$\mathbf{S_{13}}$: Enine kesme gerilmesi

$\mathbf{T}$: Doğal titreşim periyodu

$\mathbf{T_A}$: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu

$\mathbf{T_{AD}}$: Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu

$\mathbf{T_B}$: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu

$\mathbf{T_{BD}}$: Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu

$\mathbf{T_L}$: Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu

$\mathbf{T_{LD}}$: Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu

$\mathbf{t}$: Zaman

$\mathbf{U_1}$: Boyuna doğrultuda deplasman

$\mathbf{U_2}$: Enine doğrultuda deplasman

$\mathbf{U_3}$: Düşey doğrultuda deplasman

$\mathbf{V}$: Hız

$\mathbf{(V_s)_{30}}$: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı

$\boldsymbol{\rho}$: Hacimsel kütle yoğunluğu

$\boldsymbol{\xi}$: Sönüm oranı

$\boldsymbol{\Psi}$: Yayanın yürüme frekansının köprünün titreşim frekansına yakınlığına bağlı azaltma katsayısı

γ : Senkronizasyon katsayısı

$\boldsymbol{\lambda}$: Azaltma katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
CL	: Konfor seviyesi
DD-1	: 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-3	: 50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-4	: 50 yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
PEER	: Pasific Earthquake Engineering Research Center
P	: Yaya
SYNPEX	: Synchronous Pedestrian Excitation
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TC	: Trafik sınıfı
TDTH	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası

ÖZET

KOMPOZİT BİR YAYA KÖPRÜSÜNÜN DİNAMİK ANALİZİ VE YAYA KÖPRÜ TİTREŞİM ETKİLEŞİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aliye Ebru TAZE

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Savaş ERDEM

Günümüzde gelişen inşaat teknolojisine paralel olarak daha uzun açıklıktaki köprüler daha hafif ve daha esnek malzemeler kullanılarak inşa edilebilmektedir. Köprü kütlesindeki bu azalma nedeni ile yaya kaynaklı yüklemeler, köprüde rezonansa ya da konfor seviyesini düşürecek titreşimlere sebep olabilmektedir. Bu nedenle yaya köprülerinde statik yükler yanında dinamik yükler de dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, Hatay ili Antakya ilçesinde bulunan kompozit bir kemer yaya köprüsü sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve model üzerinde SAP2000 programında üç farklı deprem ivme kayıtları ve farklı yaya yük durumları için zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deprem analizleri sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Ardından, yaya ile köprü arasındaki etkileşim Synpex Tasarım Metodu ve British National Annex ile incelenmiş olup sonlu elemanlar programıyla analizler gerçekleştirilmiş ve sınır değerlere göre değerlendirilme yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda Synpex Tasarım Metoduna göre köprünün gerekli konfor seviyesini sağladığı ancak British National Annex yönetmeliğinde limit değerin aşıldığı görülmüştür. Bu nedenle, yaya yüklerinden kaynaklanan köprü titreşimlerini azaltmak için önerilerde bulunulmuştur.

Haziran 2020, 68 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kompozit Yaya Köprüsü, Yaya Yükü, Zaman Tanım Alanında Analiz, Synpex , British National Annex

SUMMARY

DYNAMIC ANALYSIS AND PEDESTRIAN BRIDGE VIBRATION INTERACTION OF A COMPOSITE PEDESTRIAN BRIDGE

M.Sc. THESIS

Aliye Ebru TAZE

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Savaş ERDEM

Nowadays, longer span footbridges can be constructed by using lighter and more flexible materials in line with developing construction technology. Because of this reduction of the bridge mass, loads origined by pedestrians may cause vibrations that reduce the comfort level of bridge, or resonance on the bridge. Accordingly, in addition to static loads, dynamic loads are also taken into account on footbridges. In this study, a composite arch footbridge is analyzed by finite element method in Antakya Borough of Hatay Province. Time history analysis was performed for three different earthquake acceleration records and different pedestrian loads situation by SAP2000. Displacement and stress values obtained as a result of earthquake analysis were compared. The interaction between the pedestrian and the footbridge was examined by Synpex Design Method and The British National Annex, analyzes were carried out by finite element program and subsequently the results were evaluated as per limit values. In consequence of assessments, the required comfort level of bridge was achieved as per Synpex Design Method, nevertheless it has been observed that the

limit values were exceeded as per British National Annex regulation. Therefore, suggestions have been made to reduce the bridge vibrations caused by pedestrian loads.

June 2020, 68 pages.

Keywords: Composite Pedestrian Bridge, Pedestrian Load, Time History Analysis, Synpex, British National Annex

1. GİRİŞ

İnşaat malzemeleri ve teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, son zamanlarda köprü üst yapıları, köprülerin daha uzun açıklıklar geçebilmesine imkan veren daha hafif ve daha esnek elemanlar kullanılarak tasarlanıp üretilmektedir. Bu uygulama ile birlikte, yaya köprülerinde üst yapılar ağırlık olarak daha hafif inşa edilmekte, böylece hareketli yüklerin ölü (zati) yüklere oranında da ciddi bir artış ortaya çıkmaktadır. Ancak ağırlık ve köprü kütlesindeki bu azalma, köprünün dinamik karakterini değiştirerek rezonansa girmesine hatta tamamen çökmesine neden olabilecek ciddi titreşim problemlerini de beraberinde getirmektedir (Lee ve diğ., 2009; Caprani ve Ahmadi, 2016; Racic ve diğ., 2009; Zivanovic ve diğ., 2005; Máca1 ve Štěpánek, 2017). Buna ek olarak, istenmeyen ve rahatsız edici derecedeki bu titreşimlerden dolayı köprüyü kullanan yayaların konfor seviyesi de azalmaktadır.

Özellikle asma ve eğik askılı yaya köprüleri bahsedilen bu aşırı titreşim problemlerine karşı daha hassastırlar. Yakın zamanda Londra'da yer alan “Millennium” ve Paris' de yer alan “Pont du Solferion”, köprülerinde (Şekil 1.1) yaya kaynaklı olarak ortaya çıkan titreşim sorunları sadece yaya konforunu ciddi manada etkilememiş aynı zamanda beraberinde ciddi stabilite problemlerini de getirmiştir. Böylece tasarım mühendislerinin yapım aşamasında statik ve deprem yüklerine ek olarak bu tarz yüklemeleri de dikkate almasının ne denli önemli olduğu da ortaya çıkmıştır.

Yaya köprülerinin tasarımında BS5400 (1978), Eurocode 1 (2003), Eurocode 5 (2004), ISO 10137 (2005) gibi kodlar FIB (2005), SETRA (2006) ve SYNPEX (2008) gibi tasarım yöntemleriyle birlikte kullanılmıştır. Çağdaş kodlarda, yaya yüklerinden kaynaklanan titreşim problemlerini önlemek için dikey ve yatay ivme değerlerine sınırlar getirilmiştir. Köprünün gerekli konfor seviyesini sağlayıp sağlamadığını değerlendirmek için doğal / temel frekans, sönüm oranı, kütle ve yaya yükü yoğunluğu gibi köprüye ait dinamik faktörler kullanılarak dinamik analiz yapılır. İstenilen konfor seviyesi karşılanmazsa, köprüde yapısal değişiklikler yapmak veya sönümleme oranının seviyesini değiştirecek sismik izolatörler kullanmak mümkündür.



Şekil 1.1: Solferino Köprüsü (solda) ve Millenium Köprüsü(sağda) (Altememy, 2015)

Bu tez çalışmasında, Hatay ilimizde yer alan kompozit bir kemer yaya köprüsünde yaya yüklerinden kaynaklanan dinamik etkiler incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle yaya köprüsünün sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve modal özellikleri belirlenmiştir. Ardından, yaya yükleri ile köprü arasındaki dinamik etkileşimler SYNPEX (2008) tasarım metodu ve British National Annex (1991) yönetmeliği kullanılarak incelenmiştir. Son olarak incelenen yaya köprüsünün deprem analizi de gerçekleştirilmiştir. SYNPEX tasarım metodu kapsamında meydana gelen maksimum düşey ve yatay ivme değerleri belirlenmiş ve farklı trafik durumları için konfor seviyeleri tespit edilmiştir. British National Annex yönetmeliği kullanılarak da yürüme, koşma ve kalabalık durumları için yükleme fonksiyonları oluşturularak açıklık ortasındaki maksimum düşey ivme değerleri tespit edilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KÖPRÜ YAPILARI ve DİNAMİK TEPKİSİ

Yaya yüklemesi, yaya köprüsünün taşıyıcı sistem yapısı ile desteklenmelidir. Köprü yapısının insan kaynaklı yükleme altında tepkisinin değerlendirilmesinde yaya köprüsünün taşıyıcı sistem yapısı ve malzeme özellikleri büyük önem arz etmektedir.

2.1.1. Yaya Köprülerinin Türleri

Yaya köprüsü türleri arasındaki ayrım, aşağıda özetlenen farklı karakteristikler dikkate alınarak yapılabilmektedir (Reimert, 2014):

Uzunluk - Bir yaya köprüsünün toplam uzunluğu, yaklaşık 3 m gibi küçük bir açıklıktan, örneğin, 750 m uzunluğa ve 170 m orta alana sahip olan Hollanda'daki en büyük yaya köprüsüne kadar değişebilir.

Taşıyıcı sistem tipi - Bu kapsamda birkaç alt sınıfa ayrılabilir: eğik askılı, kemerli, kiriş, asma ve çerçeve türü taşıyıcı sistemli köprüler. Buna ek olarak; bir yaya köprüsü, bir konsol kirişi olarak başka bir köprüye de bağlanabilir.

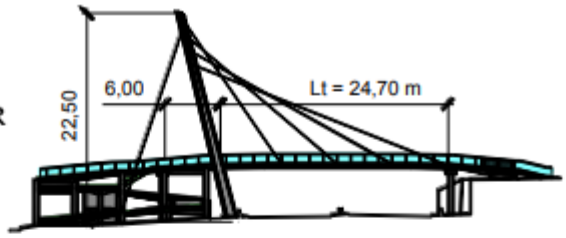
Kullanım amacı - Köprünün amacı, beklenen trafik yoğunluk türünü gösterir.

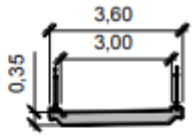
Kullanım ömrü - Köprünün iki ömrü arasında kabaca bir ayrım yapılabilir: kalıcı veya geçici.

Yapısal malzeme - Köprünün malzemesi köprünün titreşim karakteristiği için son derece etkilidir. Yapımında genel olarak kullanılan malzemeler çelik, beton, ahşap, FRP veya bu malzemelerin kombinasyonundan oluşmaktadır.

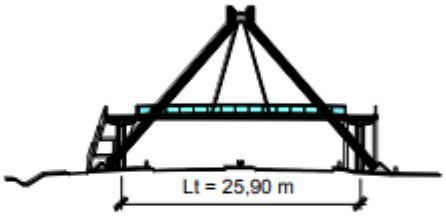
Hawryszków (2014) tarafından da belirtildiği üzere yaya köprüleri pek çok sınıfa ayrılabilir. Şekil 2.1' de bu sınıflandırmaya örnek eden köprülerin yandan görünümleri ve kesitleri gösterilmiştir.

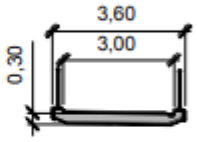
KWR



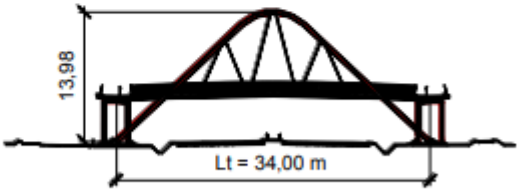


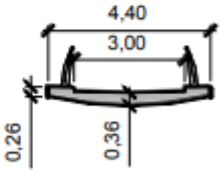
KPS



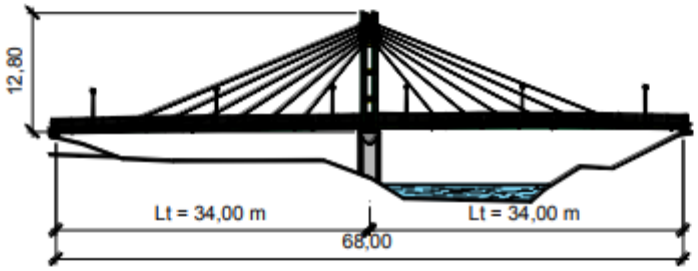


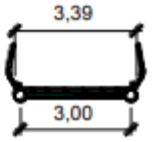
KJD



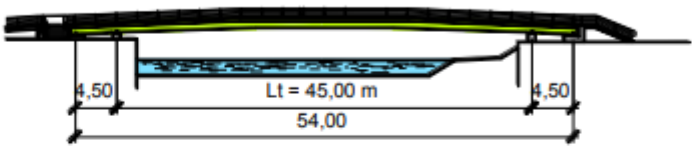


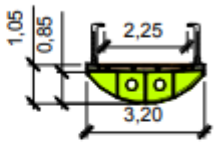
KZL



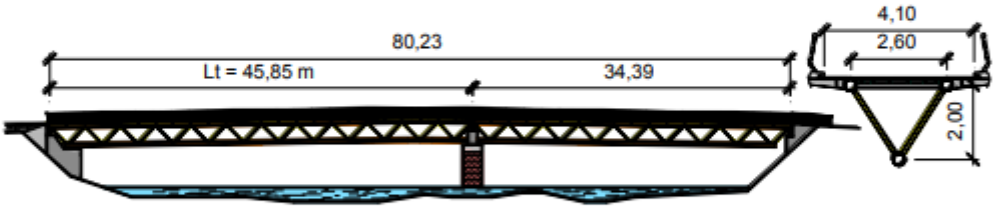


KPI

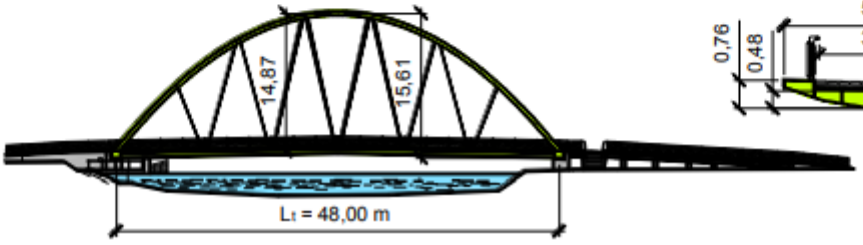


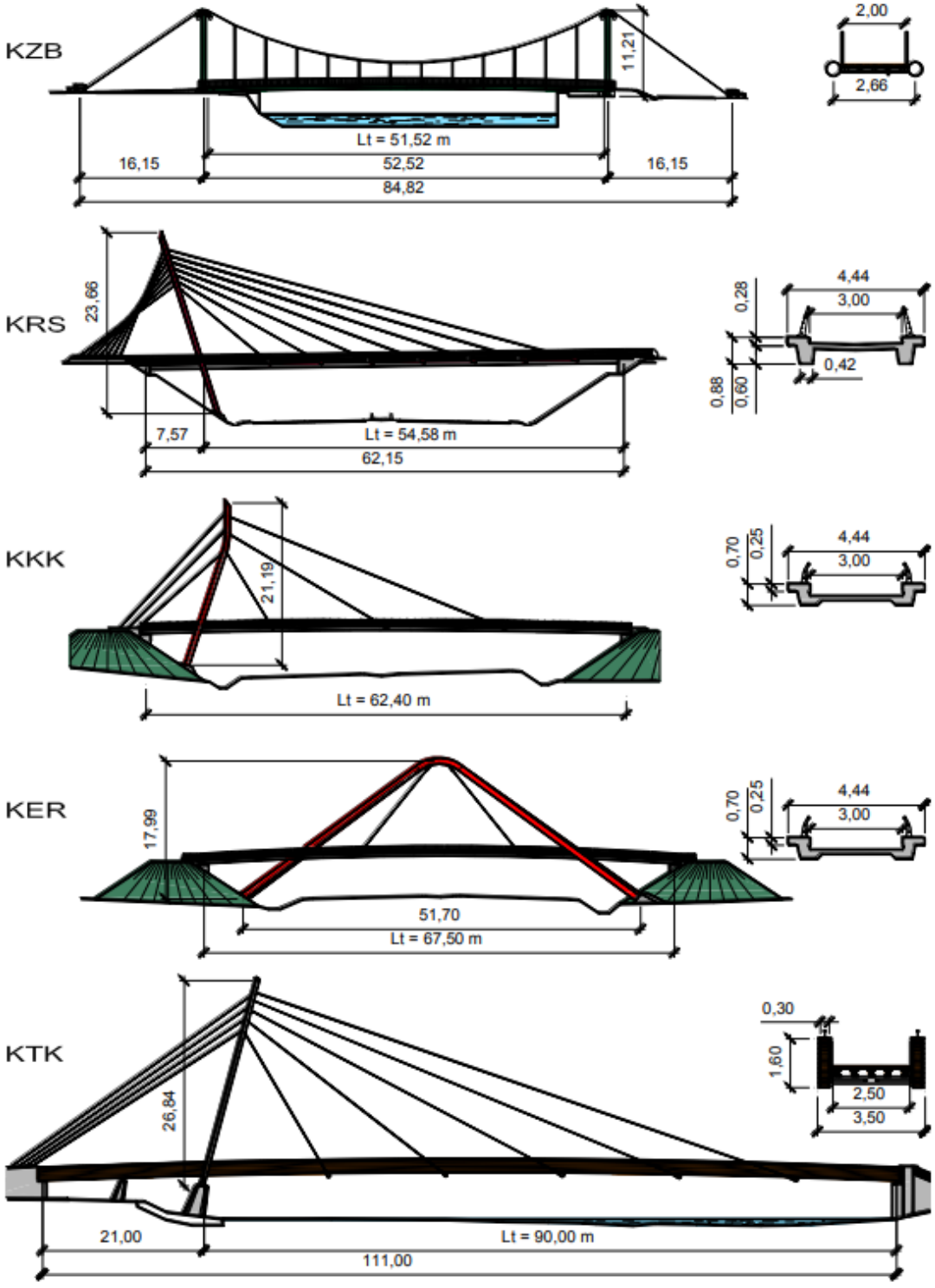


KPD



KSL





Şekil 2.1: Yaya köprüsü türlerine ait örnekler (Hawryszków, 2014)

2.1.2. Yaya Köprülerinin Dinamik Davranışını Etkileyen Parametreler

2.1.2.1. Sönümleme

Sönümleme, titreşimli bir yapıdaki enerji yayılımıdır ve salınan sistemin titreşim genliğini azaltır. Bir yapının genel sönümü (genellikle etkili sönümleme olarak adlandırılır); malzeme ve yapısal sönümleme; ve enerji yayılımı sağlayan özel cihazlar oluşur. Modal sönümleme de olarak adlandırılan bu toplam sönümlemeyi uygulamada doğru olarak tahmin etmek kolay değildir. Genel olarak, hızın bir fonksiyonu olarak modellenen doğrusal sönümlendirme varsayımı altında viskoz bir sönümleme modeli kullanılmaktadır. Yapı sistemlerinin sönüm oranları artışlar ayarlanmış kütle sönümleyiciler kullanılarak artırılabilir ve bu durumda özellikle şiddetli depremler altında yapı güvenliği açısından oldukça olumlu katkılar sunar (Reimert, 2014; Hoang ve diğ., 2008).

2.1.2.2. Rijitliği ve kütlesi

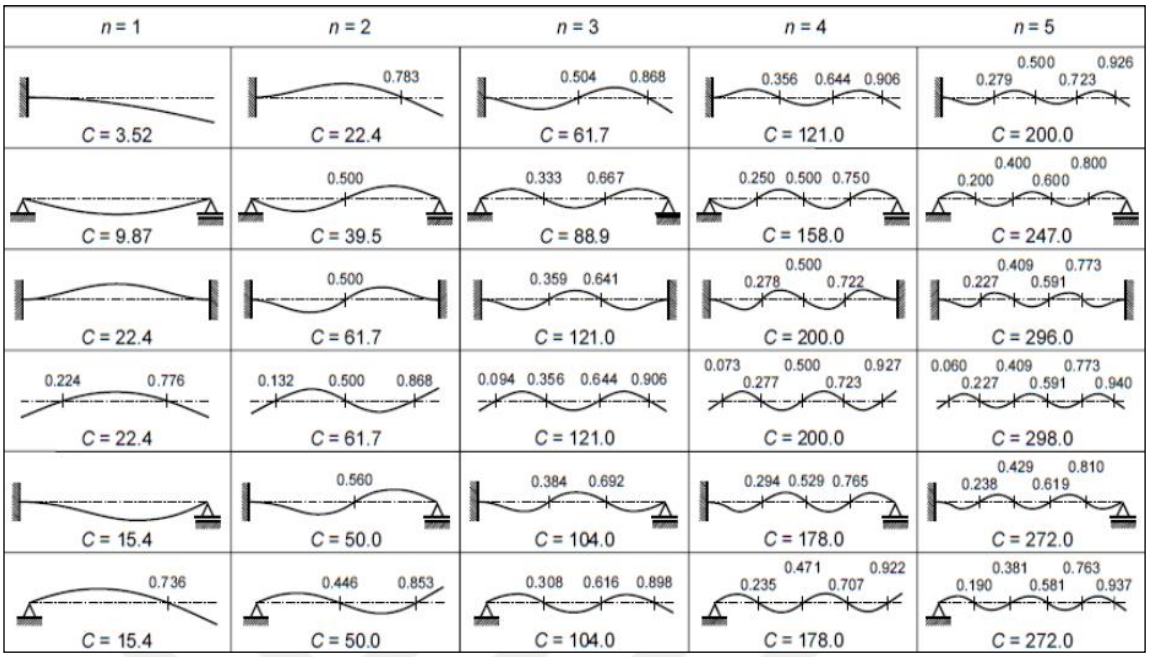
Yaya köprüsünün kütlesi temel olarak kg / m olarak ifade edilir ve yapının uzunluğu (L) boyunca değişebilir. Kütle yapının geometrisine (kesit alanı, A) ve malzeme özelliklerine (hacimsel kütle yoğunluğu, ρ) bağlıdır. Kütleye benzer şekilde, rijitlik de köprü uzunluğu boyunca değişebilir ve köprü yapısının geometrisine (atalet momenti, I) ve malzeme özelliklerine (elastisite modülü, E) bağlıdır (Reimert, 2014).

2.1.2.3. Mesnet koşulları

Yaya yükü altındaki köprü yapısının davranışı köprünün mesnet koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Uygulamada sıklıkla tercih edilen üç temel mesnet koşulu; basit mesnetli, serbest uç ve ankastre uçlardır.

2.1.2.4. Mod şekilleri

Dinamik yüklemeler altında yapının yapabileceği hareket olarak tanımlanabilecek olan mod şekli de köprünün mesnet koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.2' de tipik mod şekilleri gösterilmiş olup her mod şeklinin de kendi doğal frekansına sahip olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 2.2: Mesnet koşullarına bağlı olarak mod şekilleri (Reimert, 2014)

2.1.2.5. Doğal frekans

Yaya köprülerinin doğal frekansları yaya köprüsünün insan kaynaklı titreşimlere duyarlı olup olmayacağını gösterir. Köprünün doğal frekansının yayaların yürüme frekansının kritik aralığında olması durumunda yani frekansların çakışması durumunda köprü yaya yükü nedeniyle rezonansa girebilir. Şekil 2.2'de mesnetlenme koşulları verilen köprü yapılarının doğal frekansları (uzunluk boyunca kütle ve rijitliğin sabit kalması koşuluyla) aşağıda verilen, denklem 2.1 ile hesaplanabilmektedir (Spijkers ve diğ., 2006).

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_n^*}{M_n^*}} = \frac{C}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \tag{2.1}$$

Denklemde K_n^* modal rijitliği, M_n^* modal kütleyi ve C' de Şekil 2.2 de verilen mesnetlenme koşulları durumunda oluşan doğal frekanslarının oranını ifade etmektedir.

2.2. YAYA-KÖPRÜ TİTREŞİM DAVRANIŞI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Günümüzde genellikle insan kaynaklı titreşimin, insan vücudu 0,001 mm' ye kadar olan titreşim yer değiştirme genliklerine karşı çok hassas olduğundan, güvenlik (yani kuvvet ile

ilgili) meselesinden ziyade genellikle bir servis kolaylığı olduğu kabul edilmektedir. Bu yüksek hassasiyet genellikle çevredeki yapının zarar görmesine yol açacak kadar uzaktan bile yeterli olan titreşim seviyesinden çok önce titreşim servis problemine neden olur (Zivanovic ve diğ., 2005).

Bu alandaki öncü çalışmaları (Zivanovic ve diğ., 2006; Zivanovic ve diğ., 2007; Zivanovic ve Aleksandar, 2011) İngiltere Warwick Üniversitesinden Prof. Zivanovic ve ekibinin yaptığı bilinmektedir. Bu kapsamda Üniversite laboratuarlarında inşaa edilen prototip bir yaya köprüsü (Şekil 2.3) üzerinde yaya hareketi kaynaklı köprü tabliyesinde meydana gelen düşey ve yatay titreşimleri detaylıca incelemişlerdir. Son zamanlarda gerçekleştirdikleri bir çalışmada (Zivanovic ve diğ., 2014) ise cam elyaf takviyeli kompozitler ile (FRP) yapılmış yaya köprülerinin nominal olarak aynı dinamik yükler altında çelik ve betonarme köprülere göre bir kat daha büyük titreşim tepkisi gösterebildiklerini bulmuşlardır.

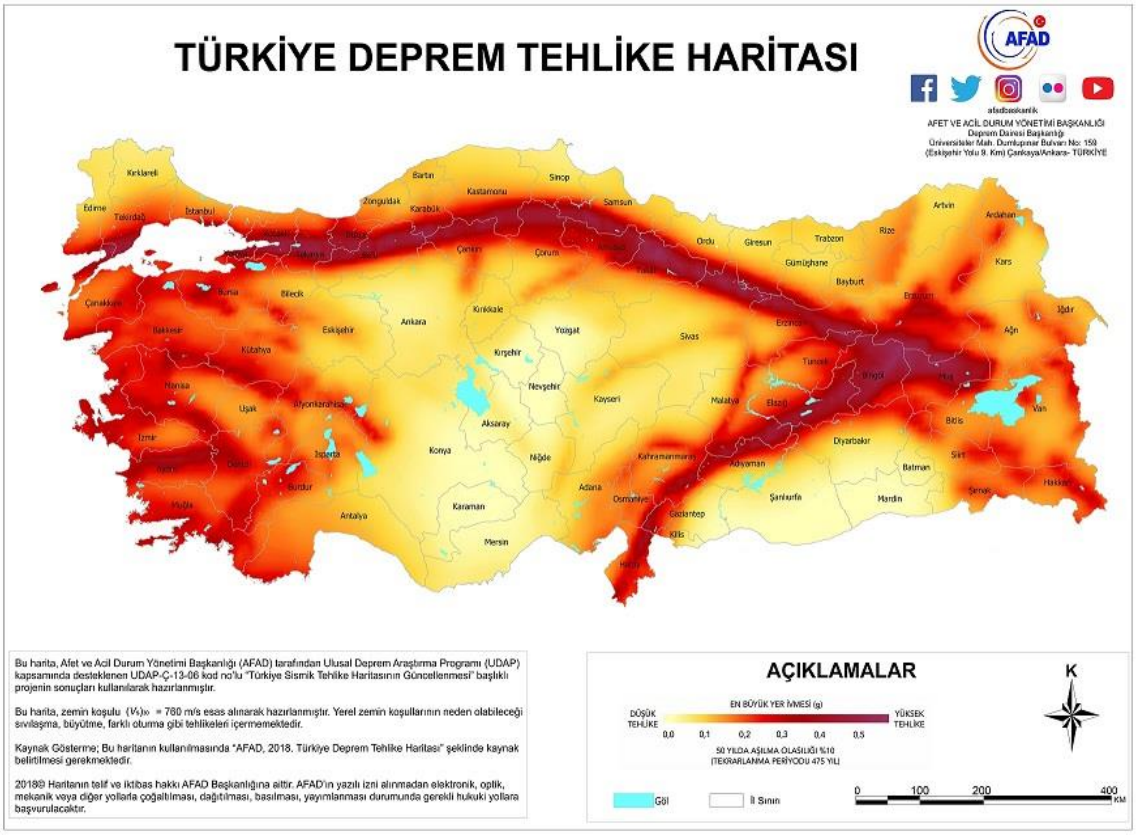
Nimmen ve diğ., (2014) bir yaya köprüsü inşa edildikten sonra, titreşim servisinin tekrar değerlendirilebilmesi ve yayaların beklenen titreşim konforunun daha güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi için yerinde modal parametrelerin tanımlanması gerektiğini gösterdi. Bununla birlikte, her ikisini de içeren bir çalışma sonlu elemanlar modeline dayanır ve HiVoSS kılavuzuna göre bir çelik asma yaya köprüsünün hizmet verilebilirliğinin deneysel olarak değerlendirilmesi, sayısal modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir (Lai, 2017). Diğer çalışmalarda (Zivanovic, 2012), sert yüzeyler üzerinde yürümek için geliştirilen bir kuvvet modelinin, köprü hareketinin karşısına girerek titreşimleri durdurabilecek yayaların varlığı nedeniyle, hareketli yaya köprüsü üzerindeki titreşimleri değerlendirmek için uygun olmadığı vurgulanmıştır. Bu da beklenen titreşim seviyelerinin altında sonuçlanır. Boş yapının sönümlemesine kıyasla, köprüdeki insan işgalcileri nedeniyle artan sönümleme oranına eşittir. Sönümleme oranındaki artış ve dikey insan-yapı etkileşimi nedeniyle yapısal cevabın azalması, başka bir çalışmada kalabalık model kullanılarak kanıtlanmıştır (Nimmen ve diğ., 2014). Yayalar ve titreşimli yaya köprüsü arasındaki etkileşimi göz önüne almadığı için, yakın tarihli bir çalışmada analitik ve sayısal olarak eşdeğer bir hareketli kuvvet modeli geliştirilmiştir (Ahmadi ve diğ., 2017).



Şekil 2.3: Warwick Üniversitesi prototip yaya köprüsü (Živanovic, 2012)

2.3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY) DEPREM YER HAREKETLERİ

TBDY'de deprem yer hareketleri deprem tehlike haritaları ile tanımlanmaktadır. 1996 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası,1 Ocak 2019 tarihi itibariyle yenilenmiştir. Yenilenen deprem haritasında, deprem bölgeleri ve tek deprem parametresi olarak göz önüne alınan etkin yer ivmesinin yerine her bir lokasyonda ayrı ayrı tanımlanabilecek spektral ivme değerleri yer almaktadır. Şekil 2.4'te AFAD tarafından hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (TDTH) yer verilmiştir (https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml).



Şekil 2.4: Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD)

TDTH'de dört farklı düzeyde deprem yer hareketi tanımlanmaktadır : DD-1, DD-2, DD-3, DD-4. DD-1 çok seyrek gerçekleşen ve gözönüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da bilinen, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir. DD-2 seyrek gerçekleşen ve standart tasarım deprem yer hareketi olarak da bilinen, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir. DD-3 sık gerçekleşen spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir. DD-4 ise çok sık gerçekleşen ve servis deprem yer hareketi olarak da bilinen, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir.

Deprem ivme kayıtları, depremin büyüklüğü, süresi, fay yapıları, kayıt istasyonlarının bulunduğu yerel zemin türü, depremin merkez üssüne olan uzaklıkları gibi birçok parametre

ile doğrudan ilişkilidir. Seçilen deprem ivme kayıtları yapının sismik etkiler altındaki davranışını büyük oranda etkilemektedir. Yapının sismik tasarım ve değerlendirmesinde, gerçek deprem ivme kayıtlarının tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmesi daha gerçekçi sonuçlar elde etmek adına önemlidir (Kayhan,2012; Iervolino ve diğ., 2010). TBDY'de, zaman tanım alanı analizinde kullanılmak üzere gerçek ivme kayıtlarından yapay ivme kayıtları, tasarım ivme spektrumuna spektral uyum sağlayacak şekilde dönüştürülerek elde edilebilmektedir.

2.3.1. Harita Spektral İvme Katsayısı

TBDY'de, birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen harita spektral ivme katsayıları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu [$(V_S)_{30}$ =760 m/s] esas alınarak %5 sönüm oranı için harita spektral ivmelerinin yerçekimi ivmesine bölünmesi ile boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır. Kısa periyot için S_S ve 1.0 periyot için S_1 harita spektral katsayıları dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için TDTH'de tanımlanmaktadır.

2.3.2. Tasarım Spektral İvme Katsayısı

Kısa periyot için S_{DS} ve 1.0 saniye periyot için S_{D1} tasarım spektral ivme katsayıları, TDTH'den elde edilen harita spektral ivme katsayıları ile farklı zemin koşulları için tanımlanan yerel zemin etki katsayılarının çarpımı ile elde edilirler;

$$S_{DS} = S_S \times F_S \tag{2.2}$$

$$S_{D1} = S_1 \times F_1 \tag{2.3}$$

2.3.3. Yerel Zemin Sınıfları ve Yerel Zemin Etki Katsayıları

ZB yerel zemin sınıfın zemin ortamının en üst 30 metresindeki ortalama kayma dalgası hızı ($(V_S)_{30}$) değeri 760 m/s'den başlamaktadır. ZC yerel zemin sınıfında ise $(V_S)_{30}$ değerinin maksimum değeri 760 m/s'dir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Yerel zemin sınıfları (TBDY)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_S)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \%\ 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası $(c_u < 25$ kPa$)$ içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI >50) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

TDTH'den elde edilen $(V_S)_{30}$ = 760 m/s esas alınarak hesaplanan harita spektral ivme katsayıları, ZB ile ZC zemin sınıfları arasındaki geçiş sınırına göre ayarlanmış değerlerdir. Yapının bu sınır zemin sınıfından farklı bir zemin sınıfında bulunduğu durumda, S_S ve S_1 değerlerini tasarım spektrumunda kullanabilmek için yerel zemin etki katsayıları ile çarparak değiştirmek gerekmektedir. Bu yerel zemin etki katsayıları kısa periyot ve 1.0 saniye periyot için farlılıklar göstermekte olup Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.2. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY)

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_S					
	$S_S \le 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \ge 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

Tablo 2.3. 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY)

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

2.3.4. Yatay Tasarım İvme Spektrumu

TBDY'de, deprem analizlerinde kullanılmak üzere yatay tasarım ivme spektrumlarını oluşturabilmek için yerçekimi cinsinden belirtilen, yapının yatay titreşim periyoduna göre değişiklik gösteren tasarım spektral ivmesi;

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6\frac{T}{T_A})S_{DS} \qquad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad (T_A \leq T \leq T_B)$$

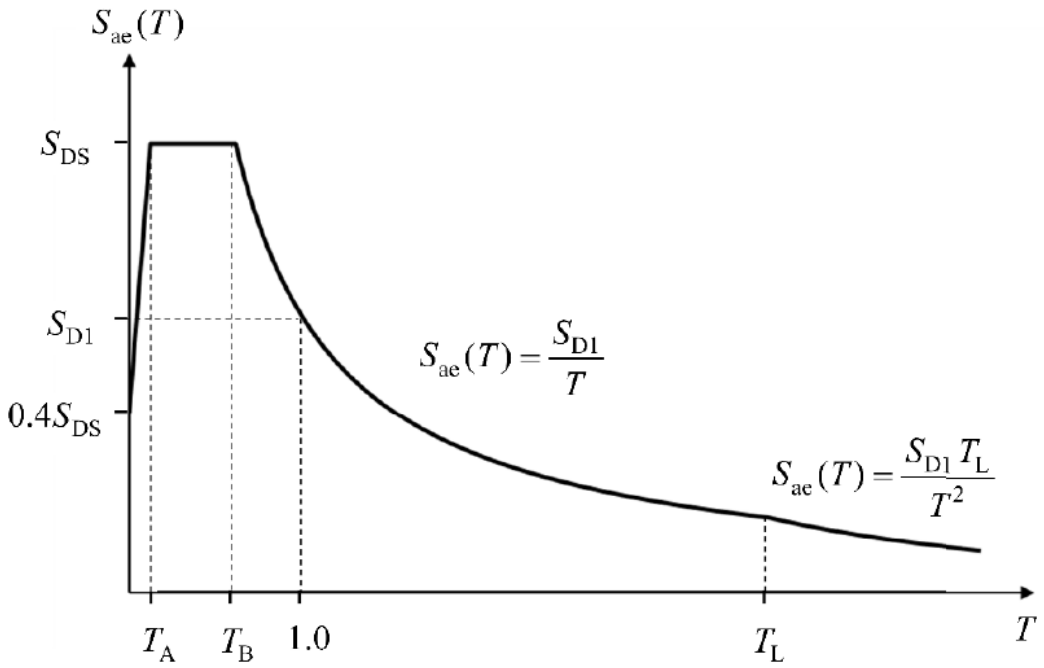
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad (T_B \leq T \leq T_L)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \qquad (T_L \leq T) \qquad (2.4)$$

şeklinde herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için hesaplanmaktadır. Denklem 2.4'te yer alan köşe periyotları T_A ve T_B tasarım spektral ivme katsayılarına bağlı olarak denklem 2.5'te tanımlanmaktadır.

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \qquad (2.5)$$

Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu T_L = 6s olarak belirtilmektedir. Yatay elastik tasarım spektrumu elde edilen tasarım spektral ivme ve periyot değerleri ile Şekil 2.5'teki gibi oluşturulmaktadır.



Şekil 2.5: Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY)

2.3.5. Düşey Tasarım İvme Spektrumu

TBDY'de, yatay deprem yer hareketi için tanımlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına ve doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi cinsinden tanımlanan düşey elastik tasarım spektral ivmeleri;

$$S_{aeD}(T) = (0.32 + 0.48\frac{T}{T_{AD}})S_{DS} \qquad (0 \le T \le T_{AD})$$

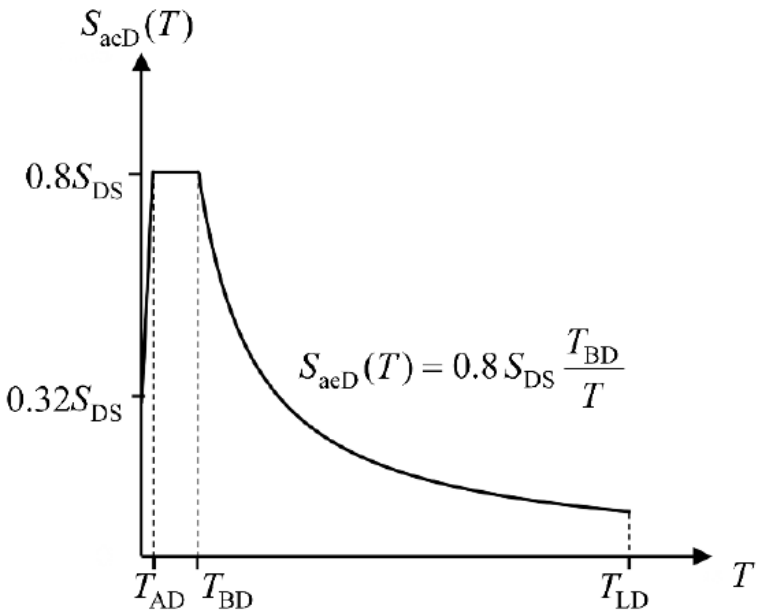
$$S_{aeD}(T) = 0.8\ S_{DS} \qquad (T_{AD} \le T \le T_{BD})$$

$$S_{ae}(T) = 0.8\ S_{DS}\frac{T_{BD}}{T} \qquad (T_{BD} \le T \le T_{LD}) \qquad (2.6)$$

denklem 2.6'daki gibi hesaplanmaktadır. Düşey elastik tasarım spektrumu köşe periyotları T_{AD} ve T_{BD} yatay elastik tasarım spektrumu köşe periyotlarına, düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu T_{LD} ise T_L periyoduna bağlı olarak denklem 2.7'de tanımlanmaktadır.

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{2} \qquad (2.7)$$

Elde edilen düşey elastik tasarım spektral ivmeleri, köşe periyotları ve sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu ile düşey elastik tasarım spektrumu Şekil 2.6'daki gibi oluşturulmaktadır.



Şekil 2.6: Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY)

3. MALZEME VE YÖNTEM

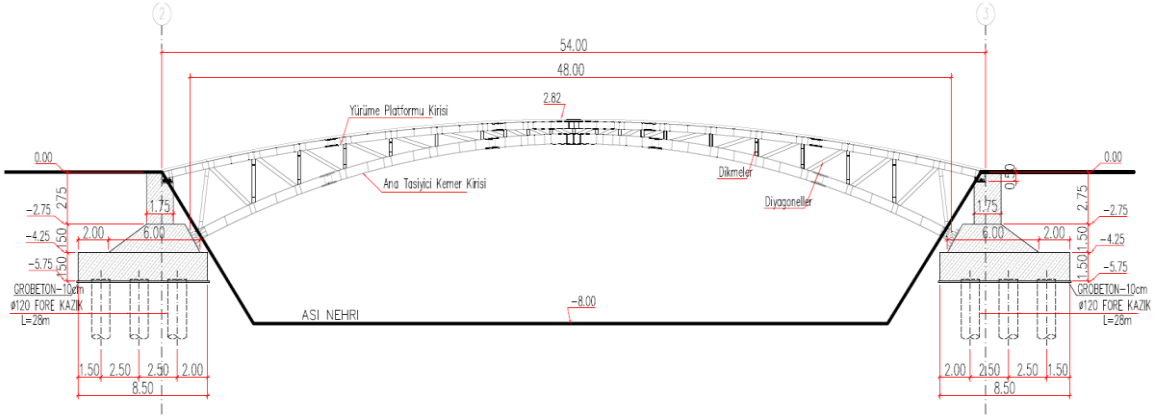
3.1. KÖPRÜNÜN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada Hatay İli Antakya İlçesinde Asi Nehri üzerinde mevcut olan yaya köprüsü incelenmiştir. Köprü çelik kemer taşıyıcı sisteme sahip olup, kompozit bir yapıya sahiptir (Şekil 3.1). Köprü yapımında 2862 ton beton, 86 ton çelik profil ve levhalar yer almaktadır.



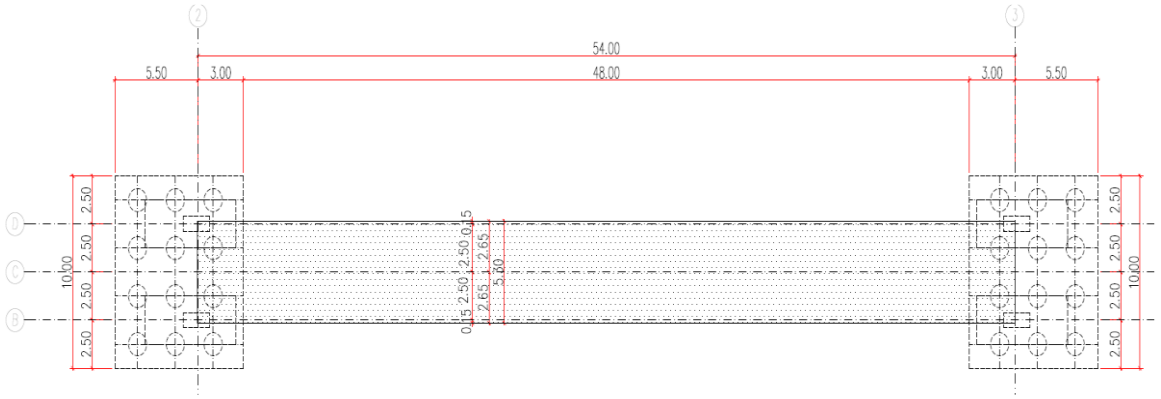
Şekil 3.1: Asi Nehri yaya köprüsü 3D görünüşü

Ana taşıyıcı ve yürüme platformu çelik kemer kiriş açıklıkları sırasıyla 48m ve 54m uzunluğundadır. Köprü tabliyesi çelik profillerden oluşmaktadır ve maksimum yüksekliği 2.82m'dir. Köprünün kenar ayakları betonarme olup perde kolon, başlık kirişi ve kazık temel olarak inşa edilmiştir (Şekil 3.2).



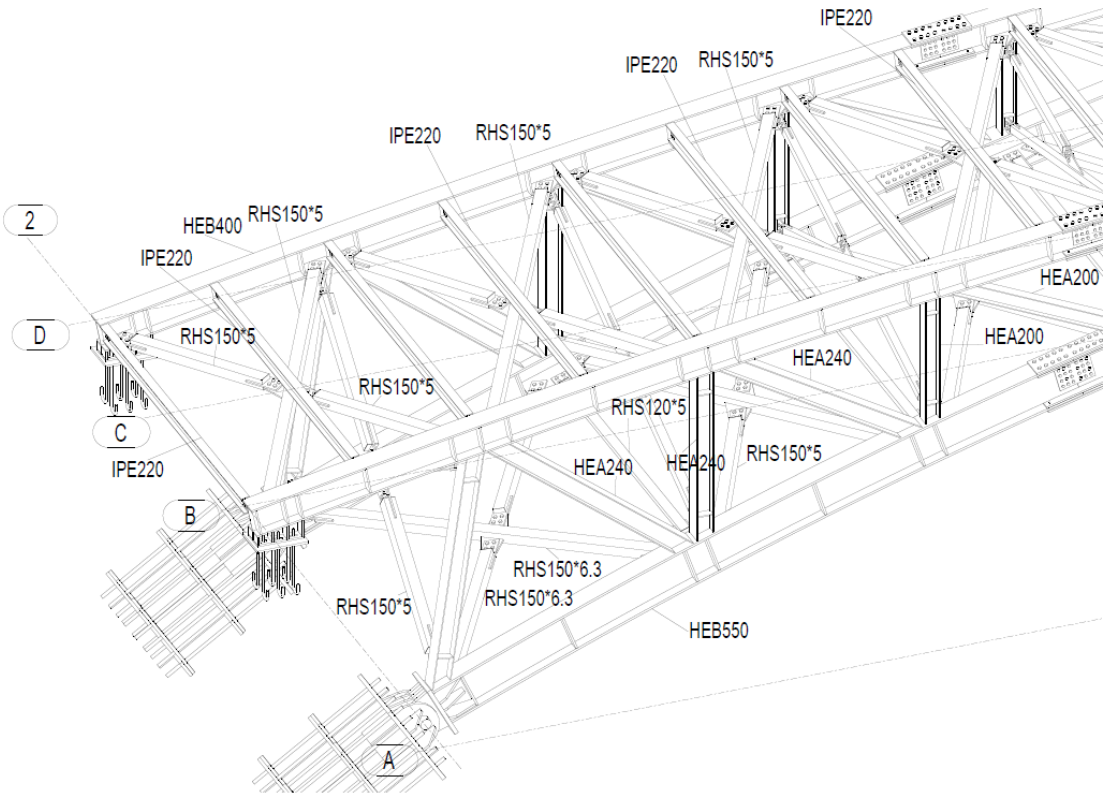
Şekil 3.2: Köprü boykesiti (ölçüler: m)

Kenar ayakların temelinde toplam 24 adet ø120'lik 28m uzunluğunda fore kazıklar kullanılmıştır. Köprü tabliyesi 120mm kalınlığında ve 500cm genişliğinde betonarme olarak yapılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Köprü üstten görünüş (ölçüler: m)

Betonarme betonu ve grobeton için sırasıyla BS25, BS14 ,çelik profiller için ise S235JR ve S275JR dayanım sınıflarına sahip malzemeler kullanılmıştır. Çelik profil birleşimlerinde çelik levhalar ve DIN6914, DIN7968 yüksek dayanımlı bulonlar bulunmaktadır. Köprü tabliyesinde ana taşıyıcı kemer kiriş için HEB550, yürüme platformu kemer kiriş için HEB400, çapraz dikmeler için IPE220, HEA200, HEA240, yatay çapraz için ise RHS100*5, RHS120*5, RHS150*5, RHS150*6,3 çelik profiller seçilmiştir. Köprü tabliyesi, ana taşıyıcı kiriş ile sabit mesnet, yürüme platformu kirişi ile de ankastre mesnet olarak betonarme kenar ayaklara oturmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Çelik taşıyıcı sistem 3D görünüş

Zati yükler elemanların kendi ağırlıklarıdır. Bu durumda betonarme birim hacim ağırlığı 2.50 t/m³, çelik birim hacim ağırlığı 7.85 t/m³ alınmıştır. Köprü üstünde ilave zati yük (kaplama) 0.15 t/m^2, köprü yan taraflarında ilave zati yük (kaplama) 0.5 t/m^2, hareketli yük 0.5 t/m^2'dir. Yaya köprüsünün yatay ve düşey doğrultudaki doğal titreşim frekansları SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek sırasıyla 1.86 Hz ve 2.06 Hz olarak hesaplanmıştır.

3.2. DİNAMİK ANALİZLER

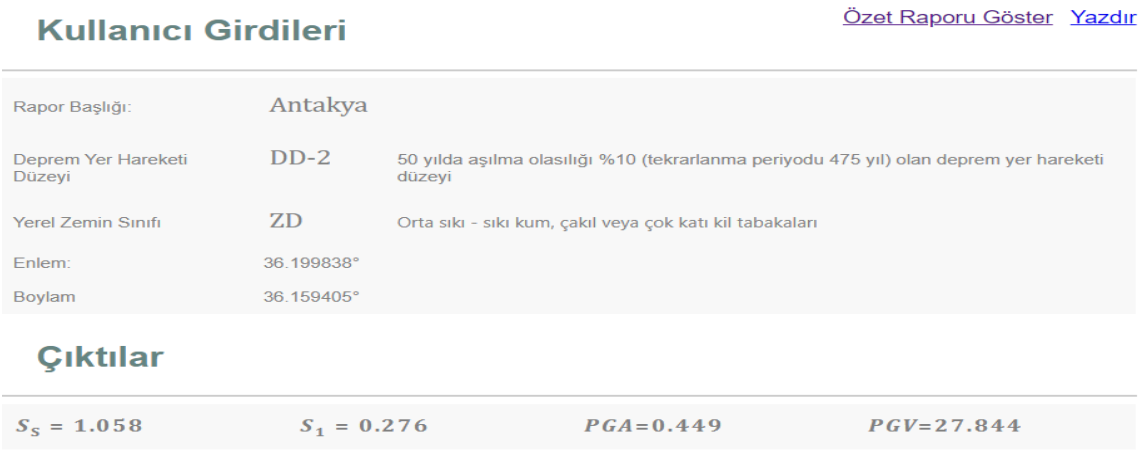
3.2.1. Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Hatay ili Antakya ilçesinde deprem yer hareketi düzeyi DD-2 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) ve yerel zemin sınıfı ZD olan bölgede bulunan köprünün tasarım parametrelerini elde etmek için, TDTH interaktif web uygulamasında veriler girilmiştir (Şekil 3.5) (https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml).



Şekil 3.5: TDTH interaktif web uygulamasına verilerin girilmesi

TDTH interaktif web uygulamasında verilerin girilmesiyle tasarım parametreleri değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.6).



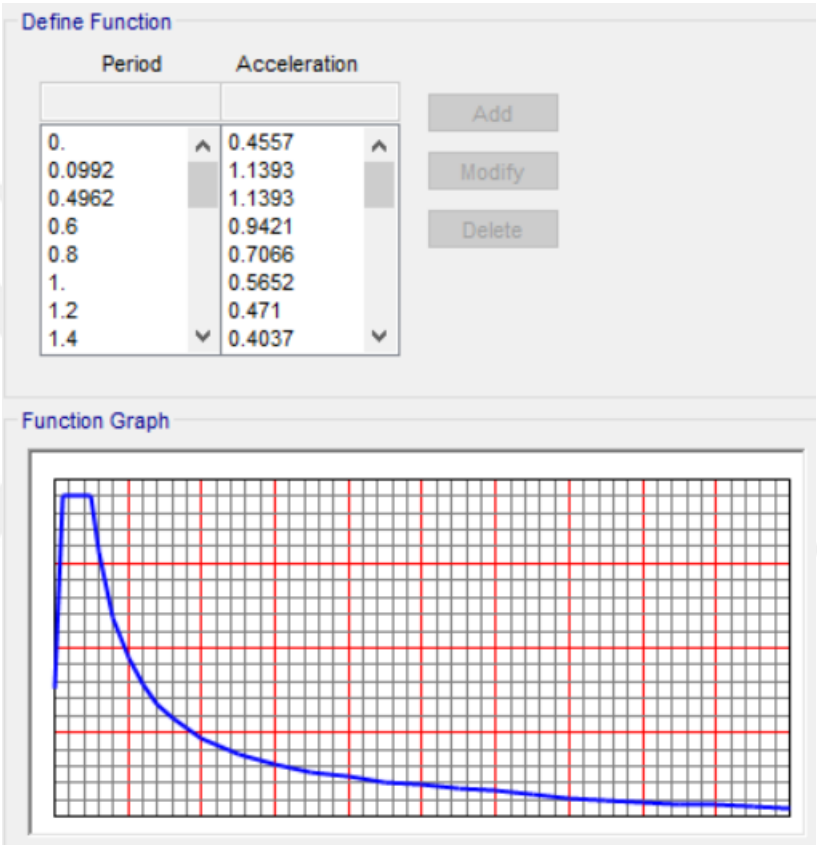
Şekil 3.6: Tasarım parametreleri

S_S ve S_1 harita spektral ivme katsayıları ile ZD olan yerel zemin sınıfı göz önünde bulundurulduğunda kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı F_S ve 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı F_1 değerleri sırasıyla 1.077 ve 2.048 olarak elde edilmiştir. Tasarım spektral ivme katsayıları ise denklem (3.1)-(3.2)'de hesaplanmıştır.

$$S_{DS} = 1.058 \text{ x } 1.077 = 1.139 \quad (3.1)$$

$$S_{D1} = 0.276 \text{ x } 2.048 = 0.565 \quad (3.2)$$

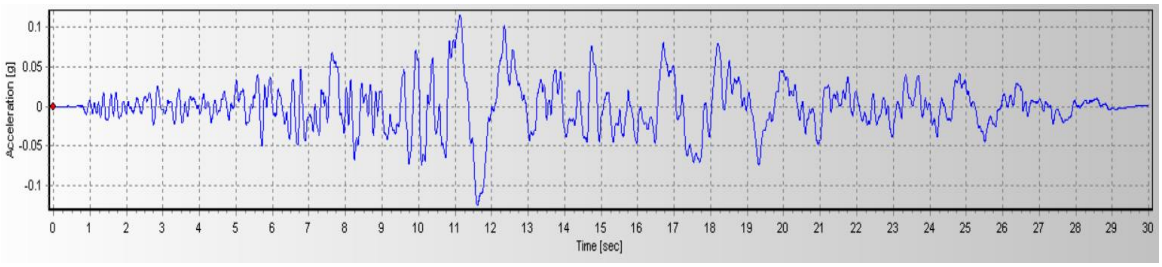
Yapılan dinamik analizlerde kullanılacak olan tasarım spektrumunu belirlemek için, AFAD'tan alınan kısa periyot için harita spektral ivme katsayısı S_S 1.058, 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S_1 0.276 ve yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu T_L 6s olan değerler kullanılmıştır. SAP2000 programında, belirlenen tasarım spektrumu katsayıları ve ZD zemin sınıfı girdileri ile elde edilen yatay elastik tasarım spektrumu grafiği Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



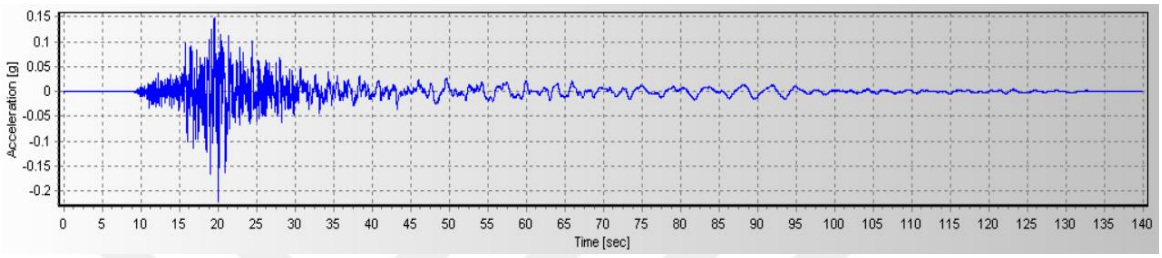
Şekil 3.7: Yatay elastik tasarım spektrumu grafiği

3.2.2. Deprem İvme Kayıtları

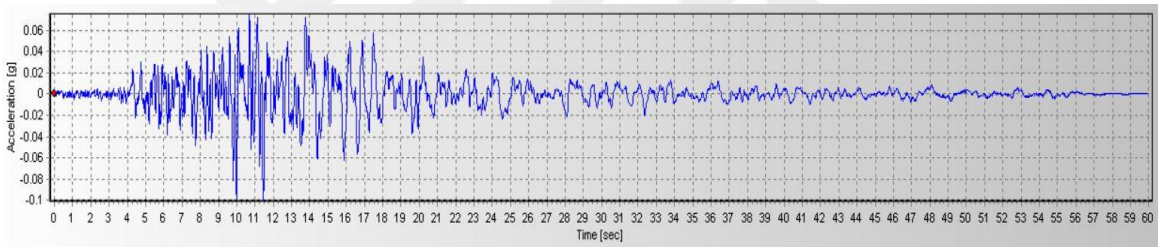
Zaman tanım alanında yapılacak analizlerde kullanılmak üzere, PEER deprem data bankasından Kocaeli'de İznik, Kobe'de Abeno ve Northridge için Alhambra istasyonlarında kaydedilmiş olan üç adet deprem ivme kaydı temin edilmiştir (http://ngawest2.berkeley.edu). 30 sn süren ve maksimum ivme değeri 0.124g olan Kocaeli depremi, 140 sn süren ve maksimum ivme değeri 0.221g olan Kobe depremi ile 60 sn süren ve maksimum ivme değeri 0.101g olan Northridge depreminin, zamana bağlı ivme grafikleri SeismoSignal programında oluşturulmuş ve sırasıyla Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Kocaeli depremi ivme kaydı (g)

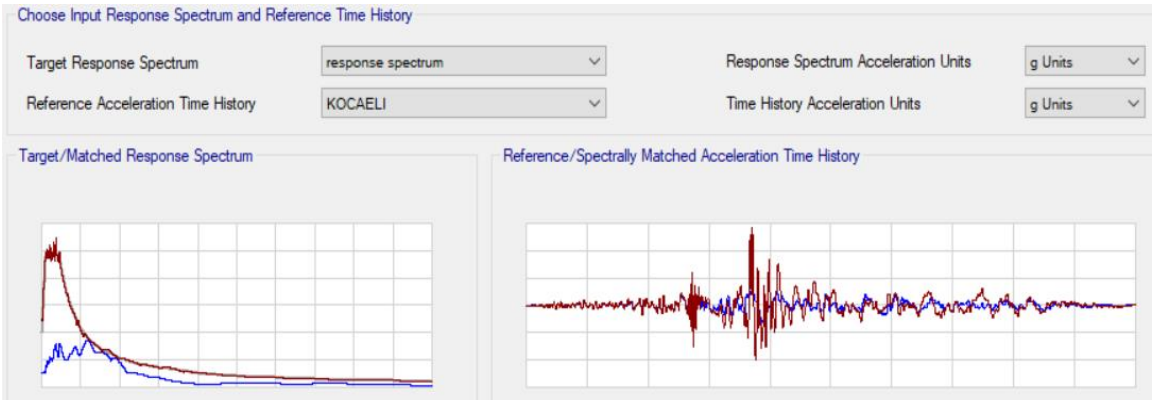


Şekil 3.9: Kobe depremi ivme kaydı (g)

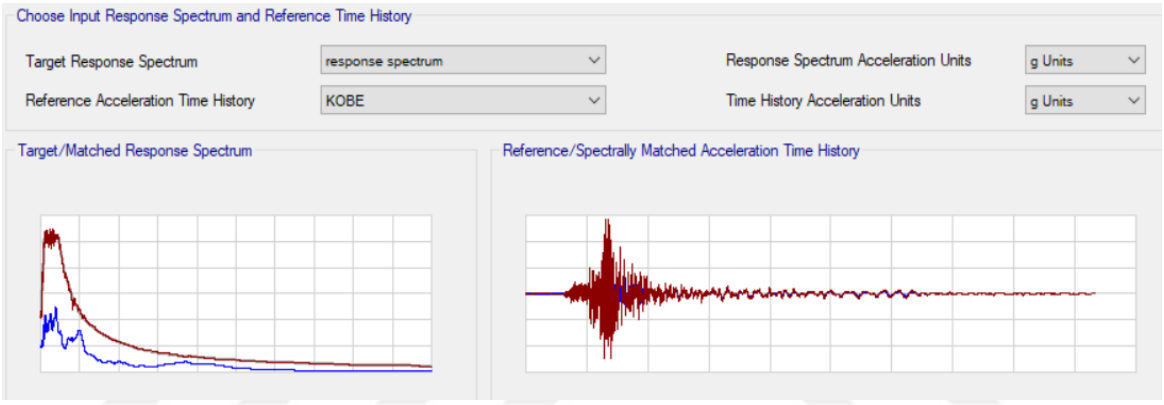


Şekil 3.10: Northridge depremi ivme kaydı (g)

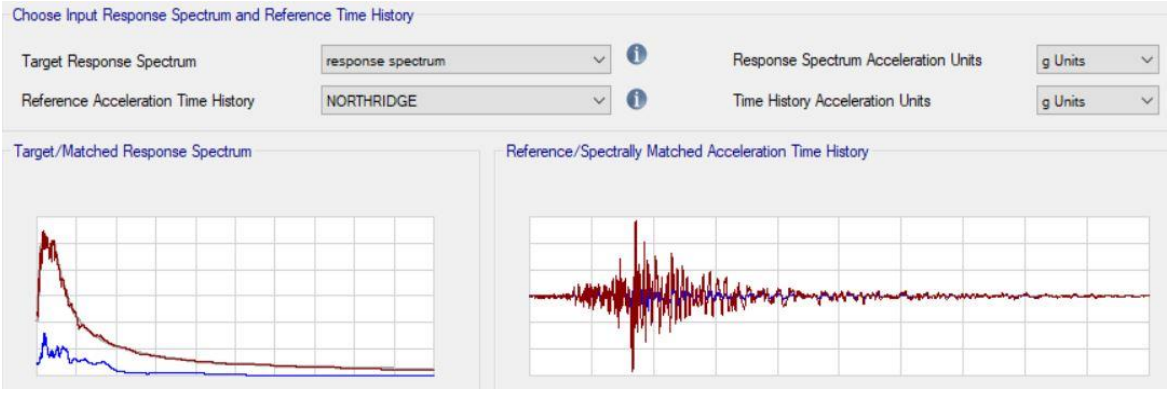
Kullanılan deprem kayıtları yerel kayıt olmadığından hesapların daha doğru sonuç vermesi açısından tasarım spektrumu ön planda tutularak gerçek deprem kayıtlarında SAP2000 programı ile zaman tanım alanında ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kocaeli, Kobe ve Northridge bölgelerine ait deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiş zamana bağlı ivme grafikleri sırasıyla Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Ölçeklendirilmiş Kocaeli depremi ivme kaydı (g)



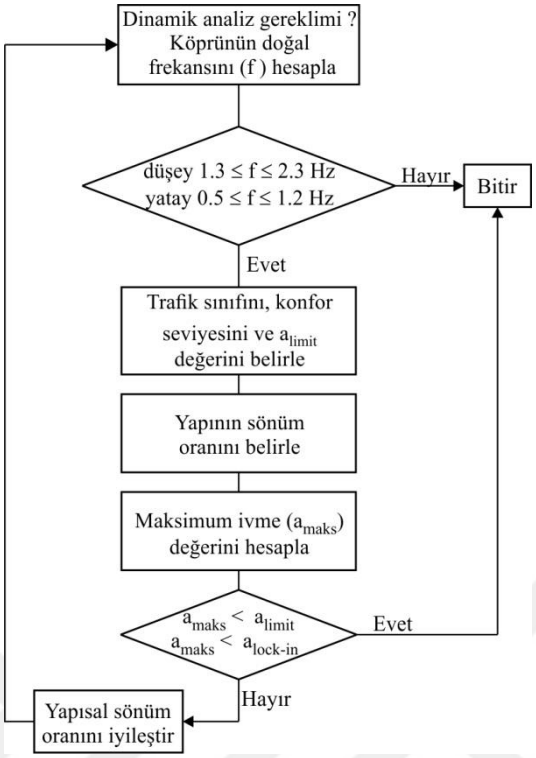
Şekil 3.12: Ölçeklendirilmiş Kobe depremi ivme kaydı (g)



Şekil 3.13: Ölçeklendirilmiş Northridge depremi ivme kaydı (g)

3.2.3. Synpex Tasarım Metodu

SYNPEX (2008) tasarım metodu yaya yüklerinin dinamik etkilerinin hesabında kullanılan en geniş ve kapsamlı hesap yöntemlerinden biridir. Şekil 3.14'te bu yöntemde kullanılan tasarımın akış şeması sistematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14: SYNPEX yöntemine göre hesap akış şeması (Güneş,2013)

Bu yöntemde öncelikle köprüde dinamik analizin gerekli olup olmadığının saptanması gerekmektedir. Bu da köprünün düşey ve yatay doğrultudaki doğal titreşim frekanslarının hesaplanmasıyla olmaktadır. Elde edilen düşey yöndeki doğal titreşim frekansı 1.3~2.3 Hz ya da yatay yöndeki doğal titreşim frekansı 0.5~1.2 arasında bulunmuş ise köprüde dinamik analizin yapılması gerekmektedir. Bunu takiben, köprünün yaya yükü yoğunluğu, trafik sınıfı, ve konfor seviyesi talebinin belirlenmesi işlemleri yapılır. Konfor seviyesinin belirlenmesinden sonra buna bağlı olarak düşey ve yatay yöndeki ivmelenmelerin limit değeri bulunur. Bir sonraki aşamada, belirtilen yönteme uygun olarak hesaplanan yaya yükleri köprüye uygulanır ve oluşan maksimum ivmeler hesaplanır. Her iki doğrultuda oluşan maksimum ivme değerleri, konfor seviyesine bağlı olarak belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılarak köprünün gereken konfor seviyesini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Gereken koşulların sağlanamaması durumunda köprünün doğal titreşim frekansını değiştirecek yapısal değişiklikler veya sönümleyiciler kullanmak gibi çözümler bulunmaktadır (Güneş ,2013).

3.2.3.1. Trafik sınıfı ve yaya yoğunluğu

SYNPEX (2008) tasarım metodunda yaya köprüleri, köprünün yerine ve yayaların yoğunluğuna bağlı olarak beş farklı trafik sınıfına ayrılmıştır. Bunlar Tablo 3.1'de gösterildiği

üzere, köprü üzerinde 15 kişiden oluşan bir yaya grubunun bulunduğu çok zayıf trafik ile metrekarede 1.5 yayanın bulunduğu olağandışı yoğun trafik olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 3.1: Yaya köprülerinin trafik sınıfları

Trafik Sınıfı	**Yoğunluk d (P=Yaya)**	**Tanım**
TC1	15P yaya grubu d=15 P/S (S=Alan)	Çok zayıf trafik
TC2	d=0.2 P /m^2	Zayıf trafik
TC3	d=0.5 P /m^2	Yoğun trafik
TC4	d=1.0 P /m^2	Çok yoğun trafik
TC5	d=1.5 P /m^2	Olağandışı yoğun trafik

SYNPEX (2008) tasarım metoduna göre oluşabilecek trafik sınıflarının bazılarına ait görsel de ayrıca Şekil 3.15' te gösterilmiştir.





Şekil 3.15: SYNPEX yöntemine göre tipik trafik yoğunlukları (Butz ve diğ.,2008)

3.2.3.2. Konfor seviyeleri

SYNPEX (2008) tasarım metodunda bir diğer sınıflandırma yaya köprülerinin yatay ve düşey doğrultudaki ivme sınır değerlerini dikkate alarak yapılmış olan dört farklı konfor seviyesidir. Bunlar Tablo 3.2'de verildiği üzere, maksimum konfor seviyesi olan CL1 ile konforsuz olarak nitelendirilen CL4 arasında değişkenlik göstermektedir.

Tablo 3.2: Yaya köprülerinin konfor seviyeleri

Konfor Sınıfı	Konfor Seviyesi	Düşey İvme	Yatay İvme
CL1	Maks.	< 0.50 m/s^2	< 0.10 m/s^2
CL2	Ort.	0.50 – 1.00 m/s^2	0.10 – 0.30 m/s^2
CL3	Min.	1.00 – 2.50 m/s^2	0.30 – 0.80 m/s^2
CL4	Konforsuz	> 2.50 m/s^2	> 0.80 m/s^2

3.2.3.3. Sönüm oranları

Yaya yüklerinden kaynaklı titreşimlerin genliğinin değerlendirilmesinde mevcut yapının sönüm miktarı çok önemlidir. Tablo 3.3'de farklı yapısal malzemelerle üretilmiş sistemler için SYNPEX (2008), SETRA (2006) ve Bachmann ve Amman (1987) tarafından önerilen yapısal sönüm oranları özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Farklı yapı malzemelerine göre sönüm oranları

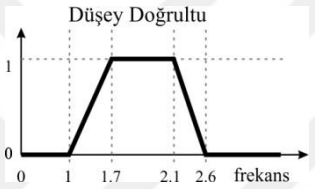
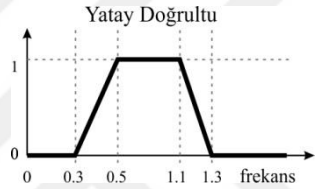
Yapı tipi	Minimum ξ	Ortalama ξ
Betonarme	0.80%	1.30%
Öngermeli betonarme	0.50%	1.00%
Çelik-betonarme komp.	0.30%	0.60%
Çelik	0.20%	0.40%
Ahşap	1.50%	3.00%
Gerilmiş şerit	0.70%	1.00%

3.2.3.4. Yaya yükü modeli

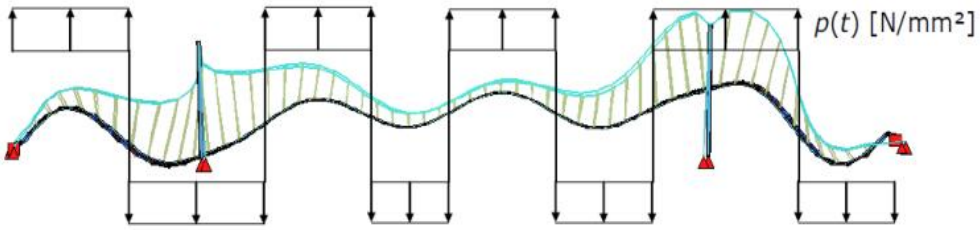
SYNPEX (2008) tasarım metodunda yaya yüklerinden kaynaklanan düşey ve yatay dinamik etkilerin hesabı için denklem (1)'de gösterilen harmonik yük fonksiyonu dikkate alınmaktadır. Bu tekrarlı harmonik yükün değeri, köprü üzerinde bulunan yayaların yoğunluğu ve yürüme davranışlarına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; yaya yoğunluğu 1.0 P/m^2 değerinin altında ise insanlar serbest olarak yürümekte ve birbiri ile etkileşime geçmemektedir. Ancak bu değerin üzerine çıkıldığında ise insanların serbest yürüyüşü kısıtlanmaktadır ve birbirleri ile etkileşiminin söz konusu olduğu kabul edilmektedir (Caprani ve Ahmadi, 2016). Bahsedilen bu nedenlerden dolayı da yük hesaplarında yayaların yoğunluğuna bağlı olarak trafik sınıfları iki gruba ayrılmıştır. Tablo 3.4'te harmonik yaya yükü modeli parametrelerinin değerleri verilmiştir.

$$P(t) = G \cdot cos(2\pi\ ft) \cdot n' \cdot \psi \tag{3.1}$$

Tablo 3.4: Yaya yükü parametreleri

G [N]		
Düşey	Boyuna	Yatay
280	140	35
$n'\,[1/m^2]$		
TC1, TC2 ve TC3		TC4 ve TC5
$n' = \frac{10.8\sqrt{\xi \cdot n}}{S}$		$n' = \frac{1.0 \cdot 1.85\sqrt{n}}{S}$
Azaltma katsayısı ψ		
		

Denklem (3.1) ile hesaplanan harmonik yaya yükü, sistemin farklı doğrultulardaki doğal titreşim frekansındaki yerdeğiştirme moduna göre, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi uygulanır.

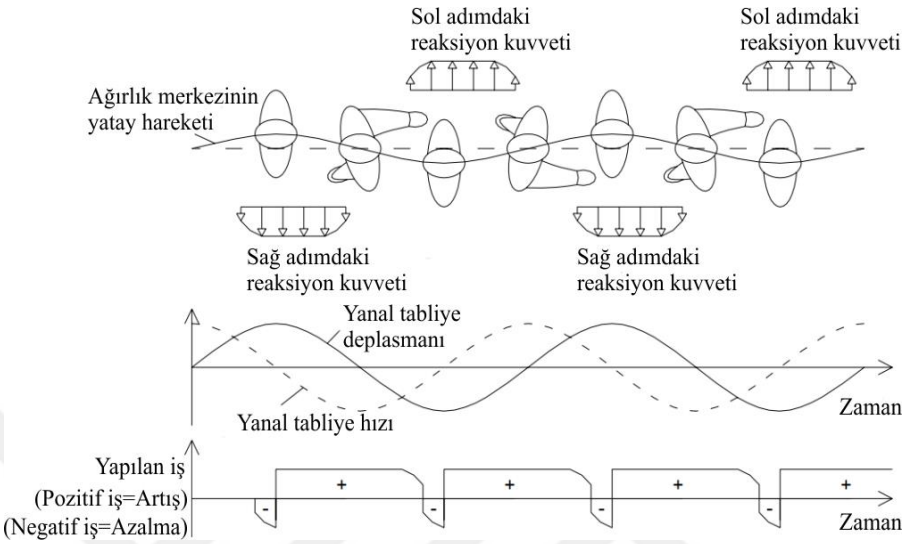


Şekil 3.16: Harmonik yaya yükünün uygulanması (Altememy, 2015)

3.2.3.5. Yaya köprü kenetlenme etkisi, "lock-in"

İnsanlar hissedilebilir seviyede titreşimin olduğu bir köprü tabliyesi üzerinde yürürken bu titreşimlere adapte olup dengelerini korumaya çalışırlar. Düşey doğrultudaki titreşimler genelde insanların bacakları ve eklemleri ile sönümlenip absorbe edilebildiği için bu doğrultuda bir etkileşim fazla olmaz. Yatay doğrultu ise bunun zıttı olarak çok daha hassastır. Yayalar doğal titreşim frekansında yatayda hareket eden bir tabliye üzerinde yürürken dengelerini sağlamak amacıyla kendi yatay frekanslarını, tabliyenin frekansına kısmi olarak

adapte ettikleri için köprüye bu sırada yatayda bir kuvvet uygularlar. Şekil 3.17'de gösterilen köprü ile yaya arasındaki bu senkronizasyon literatürde "Lock-in" etkisi olarak tanımlanan bir kenetlenme etkisi ortaya çıkarır (Güneş, 2013).



Şekil 3.17: Yaya-köprü senkronizasyonun şematik gösterimi (Güneş, 2013)

3.2.4. British National Annex

Yaya-köprü dinamik etkileşiminin analizinde SYNPEX metodu kadar bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir metot da British National Annex for Eurocode 1 of EN 1991-2 şartnamesidir.

Bu yöntemde öncelikle yaya köprüleri için Tablo 3.5' te verilen düşey ve yatay doğal titreşim frekansı sınır değerleri kontrol edilir. Köprünün düşey ve yatay titreşim frekansı değerleri bu değerlerden küçük ise titreşim analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Tablo 3.5: Titreşim kontrol sınır değerleri

Düşey titreşimler	< 5 Hz
Yatay ve burulma titreşimleri	< 2.5 Hz

SYNPEX tasarım metoduna benzer şekilde bu yönetmelikte de yaya-köprü dinamik etkileşim analizlerinde köprü üst yapısının türüne göre sönüm değerleri belirtilmiştir. Bu sönüm değerleri Tablo 3.6' da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: British National Annex göre sönüm oranları

Yapı tipi	ξ
Betonarme	0.05
Aluminyum alaşım	0.02
Çelik-betonarme komp.	0.04
Çelik	0.03
Ahşap	0.06-0.12
Lif takviyeli kompozitler	0.04-0.08

3.2.4.1. Düşey doğrultudaki kontrol

UK National Annex to EN1991-2'de yaya köprüsü yük modeli olarak 4 farklı sınıf mevcuttur. Bu yük modelleri Tablo 3.7' de özetlenmiştir. Bu tabloda ayrıca yaya köprü yük durumu olarak da 3 farklı durum mevcuttur.

- Yürüme Durumu (walking)
- Koşma Durumu (jogging)
- Kalabalık Durumu (crowded)

Örneğin; C sınıfı bir köprü için yürüme durumu yaya adeti N=8, koşma durumu yaya adeti N=2, kalabalık durum yaya adeti 0.8 kişi/m² olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.7: Yaya köprüsü yük modelleri

Köprü Sınıfı	**Köprü kullanımı**	**Yürüme**	**Koşma**	**Kalabalık Yoğunluğu, ρ (pers./m²)**
A	Kırsal bölgelerde ve seyrek nüfuslu alanlarda	N = 2	N = 0	0

Tablo 3.7 (devam):				
B	Yaya yükü yoğunluğundaki değişimin az olduğu şehir çevresindeki yerler (banliyöler)	N = 4	N = 1	0.4
C	Günlük yoğunlukta önemli değişimlerin olduğu şehir içerisindeki yerler	N = 8	N = 2	0.8
D	Spor stadyumu ya da ana toplu taşıma duraklarına bağlantıyı sağlayan yerlerde	N = 16	N = 4	1.5

Yürüme ve koşma durumu için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$F = F_0 k(f_v)\sqrt{1+\gamma(N-1)}\sin(2\pi f_v t) \tag{3.2}$$

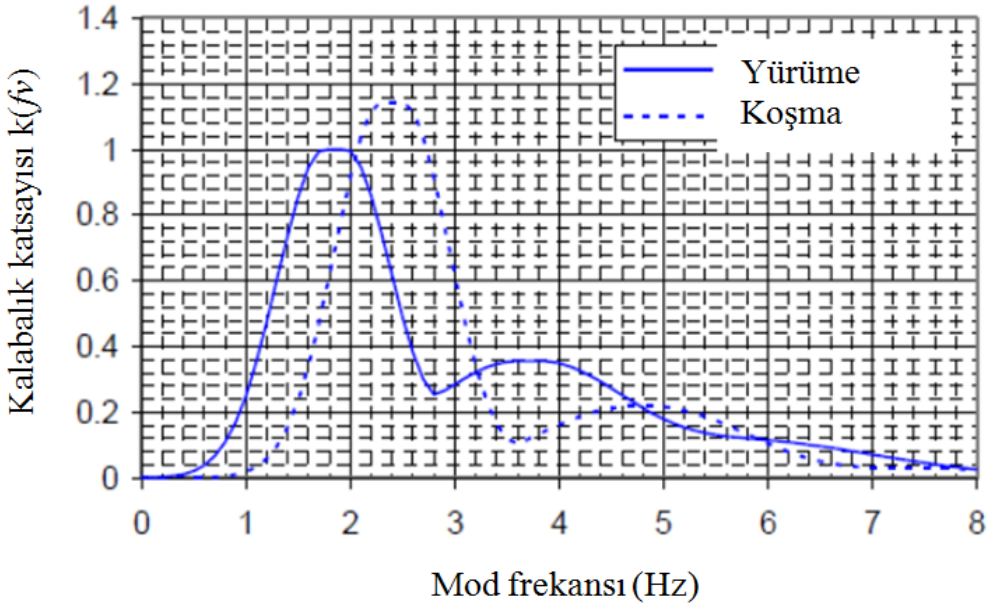
Kalabalık durumu için ise aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$w = 1.8\left(\frac{F_0}{A}\right)k(f_v)\sqrt{\frac{\gamma N}{\lambda}}\sin(2\pi f_v t) \tag{3.3}$$

Bu denklemlerde bahsedilen yürüme ve koşma durumları için referans yük ve hız değerleri Tablo 3.8'de gösterilmiştir. Benzer şekilde yürüme ve koşma durumları için kalabalık katsayısı değerleri de Şekil 3.18' den elde edilebilmektedir.

Tablo 3.8: Yürüme ve koşma durumları için referans yük ve hız değerleri

Yük Parametresi	**Yürüme**	**Koşma**
Referans yükü, F (N)	280	910
Yaya geçme hızı, V (m/sn)	1.7	3



Şekil 3.18: Yürüme ve koşma durumları için kalabalık katsayısı değerleri

Son olarak ilgili yönetmelikte maksimum düşey tasarım ivmelenme değeri için bir sınır değeri tanımlanmıştır.

$$\alpha_{limit} = 1.0 \times k1 \times k2 \times k3 \times k4 \ (m/sn^2) \quad ve \quad 0.5 \ m/sn^2 < \alpha_{limit} < 1.0 \ m/sn^2 \tag{3.4}$$

3.2.4.2. Yatay doğrultudaki kontrol

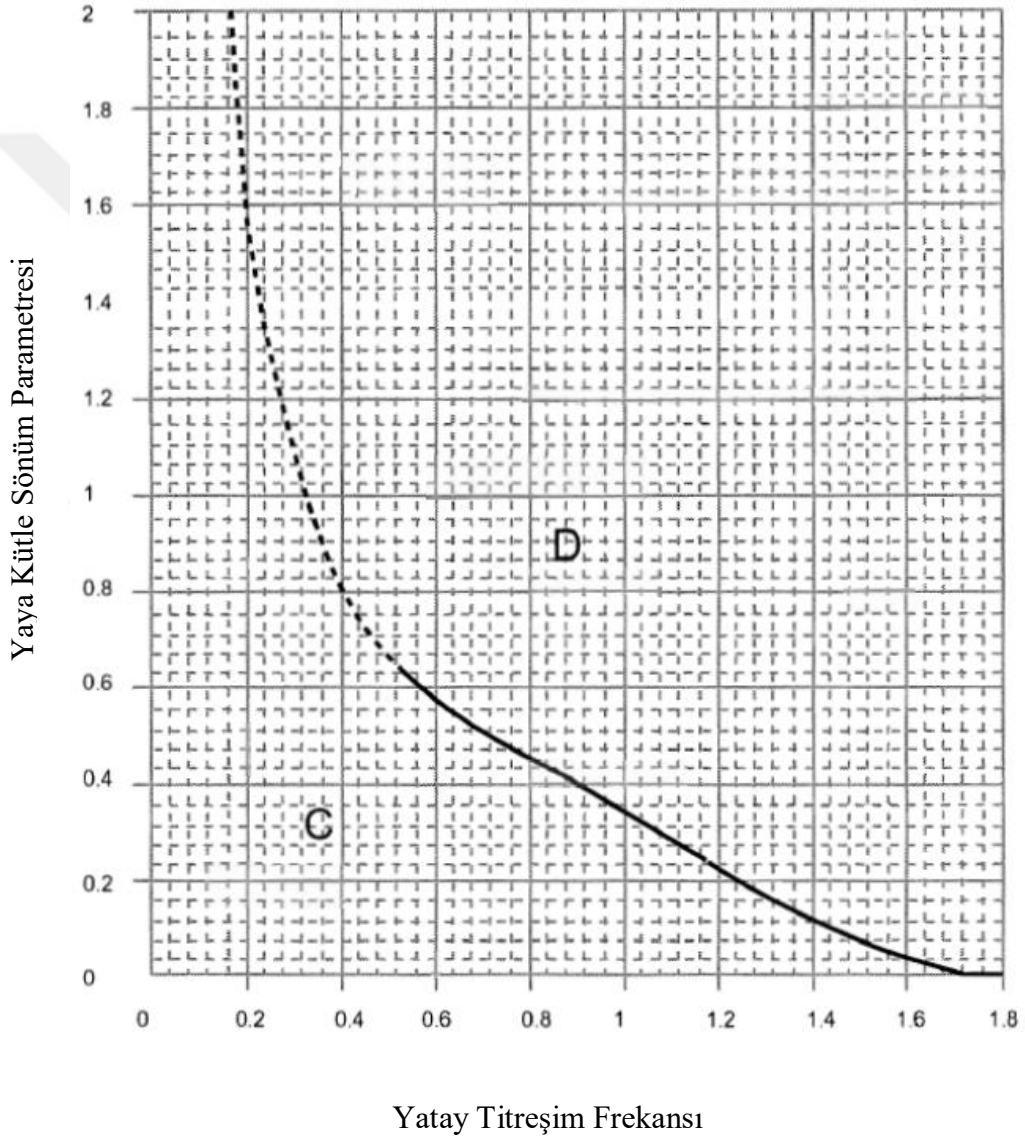
Köprünün yatay titreşim frekans değerinin 2.5Hz sınırının altında kaldığı durumlarda, bu yönetmelikte yer alan köprüde meydana gelebilecek yanal titreşimlerden kaçınılması için yatay frekans limit değerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu limit değer;

$$f_{limit} = 1.5 \ Hz \tag{3.5}$$

olarak belirtilmiştir. Köprünün yatay titreşim frekans değerlerinden en az birinin bu limit değerin altında kalması durumunda, kalabalık yürüme koşulunda stabil olmayan yanal ötelenmeler meydana gelebilmektedir. Limit değerin altında kalmadığı durumda ise yapıda yanal ötelenme olmayacağı varsayılabilir. Bu limit değerin altında kaldığı tüm durumlarda, yatay ötelenmenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine karar verilmesi gerekmektedir. Yönetmelikte, bu durumu değerlendirmek üzere yaya kütle sönümleme parametresi yer almaktadır. Bu parametre, köprü kütlesi, yayaların kütlesi ve yapısal sönümlemeye bağlıdır. Bu yaya kütle sönümleme parametresi;

$$D = \frac{m_{köprü} * \xi}{m_{yaya}} \tag{3.6}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada yer alan yaya kütlesinin değeri 700 N/m'dir. Yanal ötelenme gözlenen köprünün, stabil kabul edilip edilmeyeceği Şekil 3.19'a göre karar verilir. Yapının yatay titreşim frekansı ve yaya kütle sönüm parametresi değerleri stabil sınır eğrisinin altında kalıyorsa (C bölgesi), bu durum yapının stabil olmadığını göstermektedir.



Şekil 3.19: Yatay kenetlenme stabil sınırlar

4. BULGULAR

4.1. MODAL ANALİZ

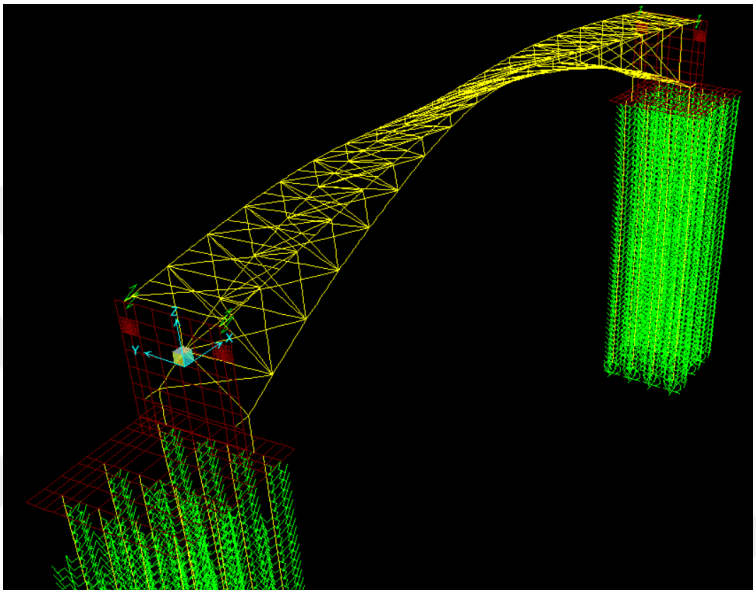
1. deprem bölgesinde, ZD türü zeminde kompozit bir yaya köprüsü olarak tasarlanan 48m açıklığa sahip ve maksimum yüksekliği 2.82m olan köprünün modal analizi SAP2000 programında gerçekleştirilmiş olup, eigen vektörleri ile yapılan analizde 36 adet mod etkisi dikkate alınmıştır. Tüm modlara ait periyot ve frekanslar Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1: Modal periyot ve frekans değerleri

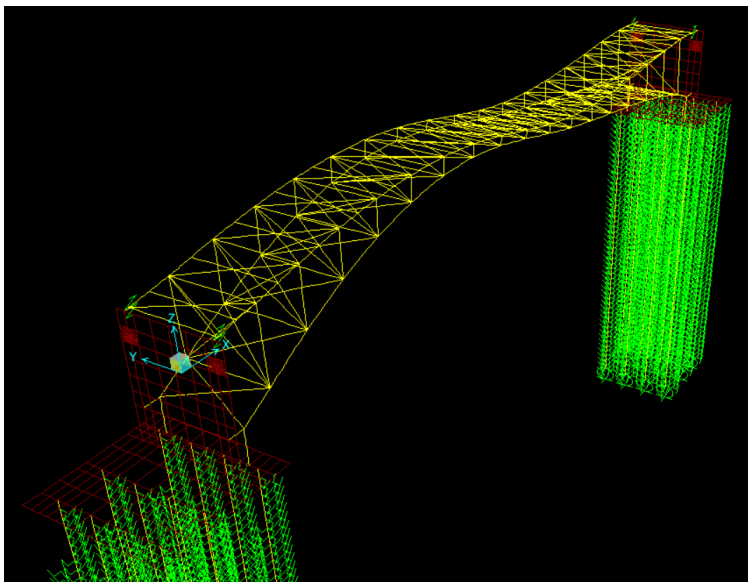
Mod	Periyot (sn)	Frekans (Hz)
1	0.53714	1.861713579
2	0.485481	2.059812553
3	0.45608	2.192596128
4	0.283234	3.530651056
5	0.27185	3.678494687
6	0.256578	3.897449616
7	0.227195	4.401513558
8	0.213172	4.691054301
9	0.208599	4.793887217
10	0.173644	5.758909045
11	0.153594	6.510658098
12	0.148445	6.736488862
13	0.138852	7.201919436
14	0.135345	7.388509368
15	0.12549	7.968771544
16	0.119317	8.381047007
17	0.11114	8.997641101
18	0.109852	9.103171482
19	0.095517	10.46935756
20	0.087677	11.40551692
21	0.087503	11.42819402
22	0.087473	11.43204225
23	0.087466	11.43299077
24	0.087408	11.44063493
25	0.087399	11.44174834
26	0.087397	11.44202659
27	0.087397	11.44208602
28	0.087396	11.44220056
29	0.087395	11.44228857
30	0.087394	11.44236864
31	0.087394	11.44240616
32	0.087393	11.44251354

Tablo 4.1 (devam) :		
33	0.087393	11.44256052
34	0.087393	11.44257036
35	0.087393	11.44260385
36	0.087389	11.44303552

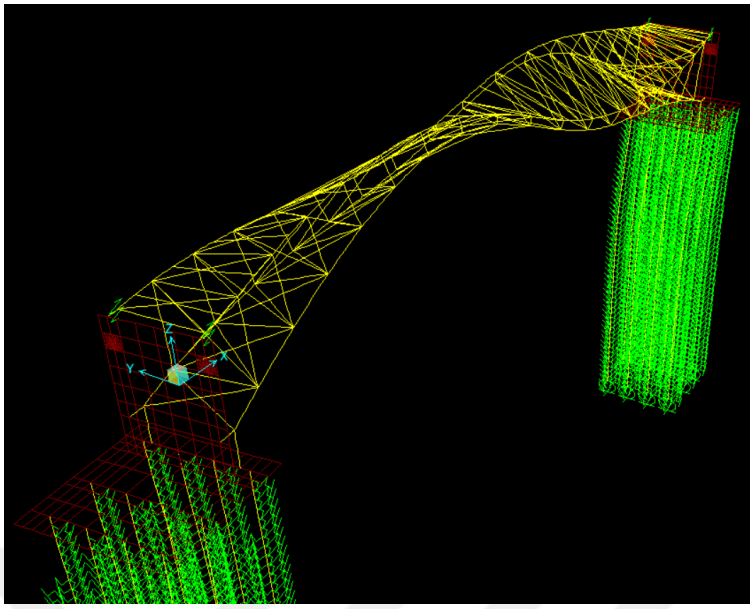
Köprünün 1. modda yatay doğrultuda, 2. modda düşey doğrultuda hareket ettiği sırasıyla Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de, 5. modda ise burulma gözlemlendiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Köprü modeli 1. mod şekli (yatay doğrultu f=1.86 Hz)



Şekil 4.2. Köprü modeli 2. mod şekli (düşey doğrultu f=2.06 Hz)



Şekil 4.3. Köprü modeli 5. mod şekli (burulma f=3.68 Hz)

4.2. ZAMAN TANIM ALANI ANALİZİ

Bu çalışmada, yapılan doğrusal zaman tanım alanı analizinde tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiş olan Kocaeli, Kobe ve Northridge depremi ivme kayıtları kullanılmış olup, bu analizlerde kullanılan ölçek faktörü hesabında ise taşıyıcı sistem davranış katsayısı x yönünde R=1, y yönünde R=2 ve yapı önem katsayısı I=1 olarak alınmıştır. Gerçek deprem dataları, etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) ve spektrum katsayısı (S(T)) içerdiğinden ölçek faktörü SAP2000 programında x ve y yönünde olacak şekilde denklem 4.1'e göre belirtilmiştir.

$$\text{Ölçek Faktörü} = \frac{I * g}{R} \tag{4.1}$$

Analizler üç ayrı deprem için gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen Kocaeli depremine ait maksimum yer değiştirme ve gerilme değerleri, sırasıyla Tablo 4.2'de ve Tablo 4.3'te verilmiş, Kobe depremine ait maksimum değerler sırasıyla Tablo 4.4'te ve Tablo 4.5'te verilmiş olup, Northridge depremine ait maksimum değerler ise sırasıyla Tablo 4.6'da ve Tablo 4.7'de verilmiştir. Kocaeli depreminde maksimum yer değiştirmenin düşey doğrultuda 0.130513 m ve maksimum gerilme değerinin 283967.48 kN/m^2 olduğu, Kobe depreminde bu

değerlerin sırasıyla 0.118013 m ve 280192.33 kN/m^2 olduğu, Northridge depreminde ise bu değerlerin sırasıyla 0.100155 m ve 239371.93 kN/m^2 olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2: Kocaeli depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Analiz		U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	R1 (radyan)	R2 (radyan)	R3 (radyan)
182	TH_KOCAELI	Max	0.027861	0.008715	0.001556	0.000218	0.000594	0.001811
182	TH_KOCAELI	Min	**-0.03276**	-0.00867	-0.00114	-0.000207	-0.000644	-0.001633
336	TH_KOCAELI	Max	**0.032142**	0.031512	0.038141	0.002213	0.001549	0.001793
336	TH_KOCAELI	Min	-0.03123	-0.03212	-0.03931	-0.00234	-0.001733	-0.001518
355	TH_KOCAELI	Max	0.026799	**0.056559**	0.106938	0.019347	0.007416	0.000067
355	TH_KOCAELI	Min	-0.02803	**-0.05299**	-0.08453	-0.020134	-0.009355	-0.000085
1456	TH_KOCAELI	Max	0.025498	0.052687	**0.130513**	0.0131	0.005451	0.000608
1456	TH_KOCAELI	Min	-0.02661	-0.05054	**-0.10109**	-0.012426	-0.004829	-0.000761

Tablo 4.3: Kocaeli depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri

Çelik Eleman Numarası	Analiz		X2 (m)	X3 (m)	S11 (kN/m²)	S12 (kN/m²)	S13 (kN/m²)
255	TH_KOCAELI	Max	0	0	3948.62	**254884.47**	0
255	TH_KOCAELI	Min	0	0	-4338.9	**-224135.37**	0
255	TH_KOCAELI	Max	-0.2	0	150741.13	0	**64161.19**
255	TH_KOCAELI	Min	-0.2	0	-133911.03	0	**-57881.48**
265	TH_KOCAELI	Max	-0.216	-0.1535	**283967.48**	0	409.5
265	TH_KOCAELI	Min	-0.216	-0.1535	**-253669.12**	0	-313.99

Tablo 4.4: Kobe depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Analiz		U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	R1 (radyan)	R2 (radyan)	R3 (radyan)
82	TH_KOBE	Max	0.036346	**0.05302**	0.07364	0.020728	0.009803	0.000048
82	TH_KOBE	Min	-0.02993	**-0.04953**	-0.0719	-0.023691	-0.009274	-0.000064
166	TH_KOBE	Max	**0.039299**	0.029568	0.052325	0.001542	0.006277	0.002237
166	TH_KOBE	Min	-0.03249	-0.02768	-0.04783	-0.00134	-0.005977	-0.002313
336	TH_KOBE	Max	0.036799	0.033114	0.049266	0.002395	0.00161	0.001398
336	TH_KOBE	Min	**-0.03525**	-0.0308	-0.03861	-0.002417	-0.00164	-0.001416
399	TH_KOBE	Max	0.034704	0.049248	**0.118013**	0.009721	0.00516	0.000848
399	TH_KOBE	Min	-0.02899	-0.04571	-0.11466	-0.009959	-0.004941	-0.00078

Tablo 4.4 (devam) :								
1456	TH_KOBE	Max	0.034533	0.050376	0.117056	0.01263	0.006112	0.000601
1456	TH_KOBE	Min	-0.02854	-0.04693	**-0.1156**	-0.014444	-0.006683	-0.0006

Tablo 4.5: Kobe depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri

Çelik Eleman Numarası	Analiz		X2 (m)	X3 (m)	S11 (kN/m²)	S12 (kN/m²)	S13 (kN/m²)
206	TH_KOBE	Max	0.216	0.1535	224384.60	0	302.40
206	TH_KOBE	Min	0.216	0.1535	**-269098.46**	0	-280.41
265	TH_KOBE	Max	-0.216	-0.1535	**280192.33**	0	257.97
265	TH_KOBE	Min	-0.216	-0.1535	-256002.22	0	-265.45
255	TH_KOBE	Max	0	0	3346.21	**228001.35**	0
255	TH_KOBE	Min	0	0	-4045.44	**-262175.31**	0
255	TH_KOBE	Max	-0.2	0	134660.65	0	**57552.49**
255	TH_KOBE	Min	-0.2	0	-155587.84	0	**-66835.04**

Tablo 4.6: Northridge depremi maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri

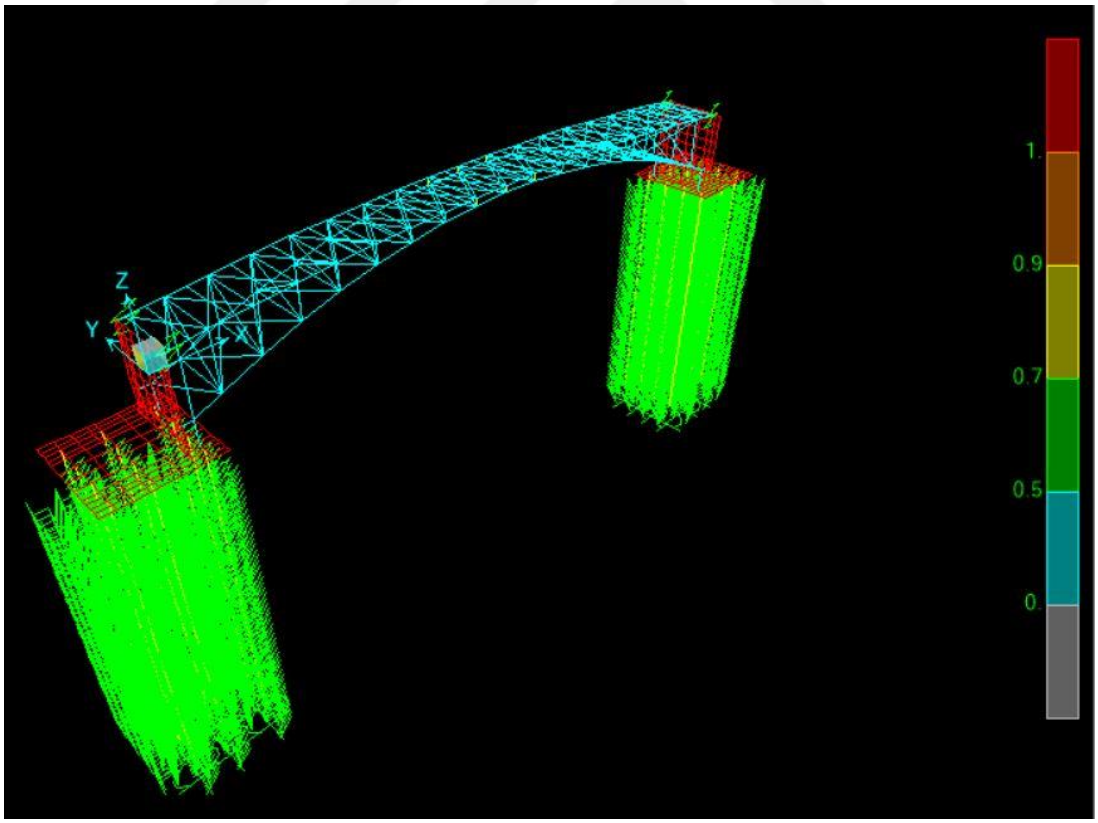
Düğüm Noktası	Analiz		U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	R1 (radyan)	R2 (radyan)	R3 (radyan)
185	TH_N	Max	0.027600	0.007562	0.000731	0.000236	0.000522	0.001666
185	TH_N	Min	**-0.033408**	-0.009385	-0.000804	-0.000178	-0.000692	-0.001616
336	TH_N	Max	**0.030281**	0.032805	0.034229	0.002048	0.001637	0.001519
336	TH_N	Min	-0.031502	-0.032206	-0.034492	-0.002395	-0.002087	-0.001503
355	TH_N	Max	0.025564	**0.053505**	0.083510	0.022872	0.008287	0.000085
355	TH_N	Min	-0.027754	**-0.053159**	-0.094491	-0.020012	-0.008544	-0.000066
399	TH_N	Max	0.025163	0.050781	**0.100155**	0.011347	0.004332	0.000829
399	TH_N	Min	-0.026876	-0.047907	-0.102096	-0.010876	-0.004815	-0.000827
1456	TH_N	Max	0.024494	0.052015	0.097889	0.015174	0.004708	0.000632
1456	TH_N	Min	-0.026419	-0.048943	**-0.104598**	-0.013528	-0.004363	-0.000606

Tablo 4.7: Northridge depremi maksimum ve minimum gerilme değerleri

Çelik Eleman Numarası	Analiz		X2 (m)	X3 (m)	S11 (kN/m²)	S12 (kN/m²)	S13 (kN/m²)
111	TH_N	Max	0.216	-0.1535	**239371.93**	0	274.38
111	TH_N	Min	0.216	-0.1535	-182981.04	0	-308.3
254	TH_N	Max	0	0	5734.24	**207016.85**	0

Tablo 4.7 (devam) :							
254	TH_N	Min	0	0	-6349.57	**-231129.14**	0
254	TH_N	Max	-0.2	0	159776.16	0	**55913.22**
254	TH_N	Min	-0.2	0	-178129.32	0	**-61545.2**
265	TH_N	Max	-0.216	-0.1535	236967.28	0	271.31
265	TH_N	Min	-0.216	-0.1535	**-254930.92**	0	-390.38

Türk deprem şartnamesinde standart binaya ilişkin 3 m yükseklik için 2 cm deplasmana izin verilmektedir. Buna benzer bir yaklaşımla 54 m açıklıklı bir köprüde 36 cm deplasmana izin verileceği düşünülebilir. Bu yaklaşımla her üç deprem analizi sonucunda elde edilen deplasman değerlerine baktığımızda, bu değerlerin yönetmelikte belirtilen sınır değerin altında kaldığı görülmüştür. Her üç deprem yüklemesi altında eleman kesitlerinde oluşan gerilme değerlerine bakıldığında ise eleman kesitlerinin yeterli olduğu Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. Deprem yüklemesi altında kesit tesirlerinin kontrolü

4.3. SYNPEX TASARIM METODU İLE YAPILAN ANALİZLER

SYNPEX tasarım metodunda ilk olarak köprünün doğal frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tasarım metodunda kullanılmak üzere sonlu elemanlar analizi ile elde ettiğimiz köprü doğal titreşim frekanslarının, synpex tasarım metodu sınırları içerisinde olup olmadığı kontrol edilmelidir. Köprünün düşey ya da yatay doğal frekanslarının en az biri sınır içerisinde kalıyorsa synpex metodu ile analizin yapılması gerekmektedir. Analizi yapılan köprünün 2.06 Hz olan düşey doğal frekansının bu sınırlar içerisinde olduğu, 1.86 Hz olan yatay doğal frekansının ise bu sınırlar dışında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle, yapılan analizler düşey doğrultuda olup yatay doğrultuda analiz yapılmamıştır.

4.3.1. Harmonik Yaya Yükünün Köprüye Uygulanması

Synpex tasarım metodunda düşey doğrultudaki dinamik etkilerin hesabı için harmonik yaya yükünün hesaplanması gerekmektedir. Bu yük, köprüde bulunan yayaların yoğunluğuna ve adım hızlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Analizi yapılan köprünün yaya yoğunluğu 0.5 P/m^2'dir. Bu yaya yükü yoğunluğuna bağlı olarak trafik sınıfı TC3 (yoğun trafik), sönüm oranı ise 0.60 % olarak belirlenmiştir. Eşdeğer yaya yükünü belirlemek üzere tabliye yüzey alanı S=270 m^2 ve yaya adeti n=135 olarak hesaplanmıştır. TC3 yoğun trafik sınıfına bağlı olarak eşdeğer yaya yükü değeri;

$$n' = \frac{10.8*\sqrt{0.006*135}}{270} = 0.036\ (1/m^2) \tag{4.2}$$

olmaktadır. Senkronizasyon katsayısı köprünün düşey doğrultudaki frekansına bağlı olarak 1 olarak belirlenmiştir. Bu değerler doğrultusunda düşey yönde etki eden tekrarlı harmonik yaya yükü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P(t) = 0.28*\cos(2\pi*2.06*t)*0.036*1\ (kN/m^2) \tag{4.3}$$

4.3.2. Düşey Doğrultudaki Maksimum İvme ve Deplasman Değeri

Yaya yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanan düşey harmonik yaya yükü fonksiyonu, SAP2000 programında zaman tanım alanında tanımlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda köprüde oluşan düşey doğrultudaki ivme değerleri elde edilmiş olup köprünün maksimum ivme değeri 0.11 m/s^2 ve maksimum deplasman değeri 0.000683 m'dir. Bu durumda, analizi yapılan köprünün maksimum konfor seviyesinde olduğu görülmektedir.

4.3.3. Farklı Yaya Yükleri İçin Maksimum Deplasman Değerleri

TC3 yoğun trafik sınıfı için yapılan tüm hesaplar TC2 (0.2 P/m^2) , TC4 (1.0 P/m^2) ve TC5 (1.5 P/m^2) trafik sınıfları için gerçekleştirilmiş olup elde edilen düşey doğrultudaki maksimum deplasman değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.8: Farklı yaya yükü yoğunlukları için maksimum deplasman değerleri

Trafik Sınıfı	Yaya Yükü (P/m^2)	Deplasman (m)
TC2	0.2	0.000432
TC4	1.0	0.002615
TC5	1.5	0.003203

4.3.4. Farklı Trafik Sınıfları İçin Konfor Değerleri

Farklı trafik sınıfları için düşey doğrultudaki maksimum ivme değerlerine bağlı olarak konfor seviyeleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Bu grafikte, TC2 zayıf yaya yoğunluğunda köprünün maksimum konfor seviyesinde, TC4 çok yoğun yaya yoğunluğunda köprünün maksimum konfor seviyesinde ve TC5 olağandışı yaya yoğunluğunda ise köprünün orta konfor seviyesinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9: Farklı yaya yükü yoğunlukları için konfor seviyeleri

Trafik Sınıfı	Yaya Yükü (P/m^2)	Düşey İvme (m/s^2)	Konfor Seviyesi
TC2	0.2	0.07234	CL1
TC4	1.0	0.43809	CL1
TC5	1.5	0.53655	CL2

4.4. BRITISH NATIONAL ANNEX İLE YAPILAN ANALİZLER

Bu yöntemde öncelikle köprünün düşey, yatay ve burulma titreşim frekans değerlerinin sınırların üzerinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. Sınır değerlerin altında kalması durumunda analizin yapılması gerekmektedir. Köprüye ait düşey frekans değerinin 5Hz limit değerinin altında kalması nedeniyle düşey doğrultuda titreşim analizi yapılması gerekmektedir. Ancak köprünün yatay frekans değerinin, şartnamede yer alan 1.5Hz olan yatay frekans limit

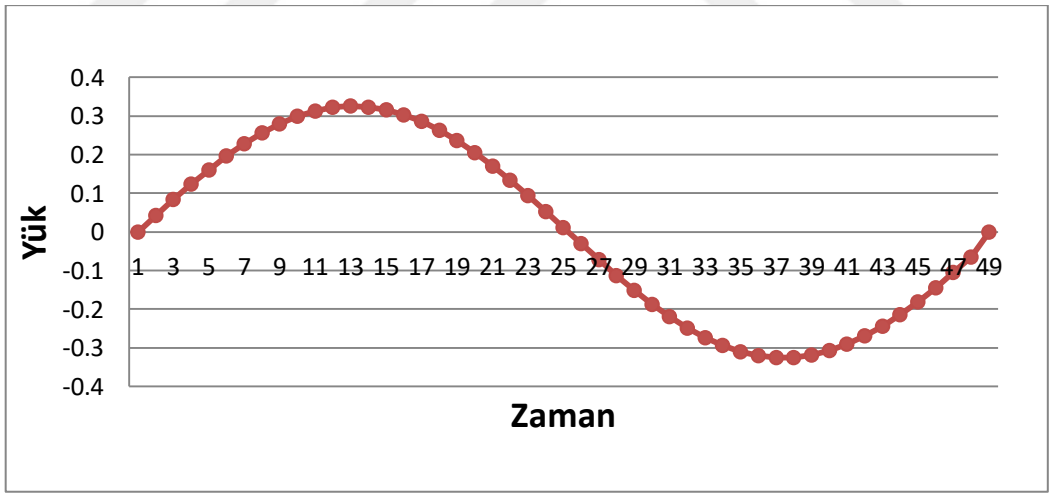
değerinin üzerinde kalması nedeniyle, köprüde yatay doğrultuda ötelenme gerçekleşmeyeceği varsayılarak yatay doğrultuda titreşim analizi yapılmamıştır.

4.4.1. Yürüme Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri

Analizi yapılan köprü, çelik ve betonarme kompozit bir köprü olduğu için sönüm oranı 0.04 olarak alınmıştır. Söz konusu köprü, günlük yoğunlukta önemli değişimlerin olduğu şehir içerisindeki bir köprü olduğu için köprü sınıfı C olarak belirlenmiştir. Bu durumda köprü üzerindeki yaya adeti N=8 olarak kabul edilmiştir. Referans yük değeri 280 N, düşey doğrultu frekansına karşılık kalabalık katsayısı 1, yapısal sönüm oranına karşılık senkronizasyon katsayısı 0.05 olarak alınmıştır. Bu değerler doğrultusunda yürüme durumu için harmonik yük değeri;

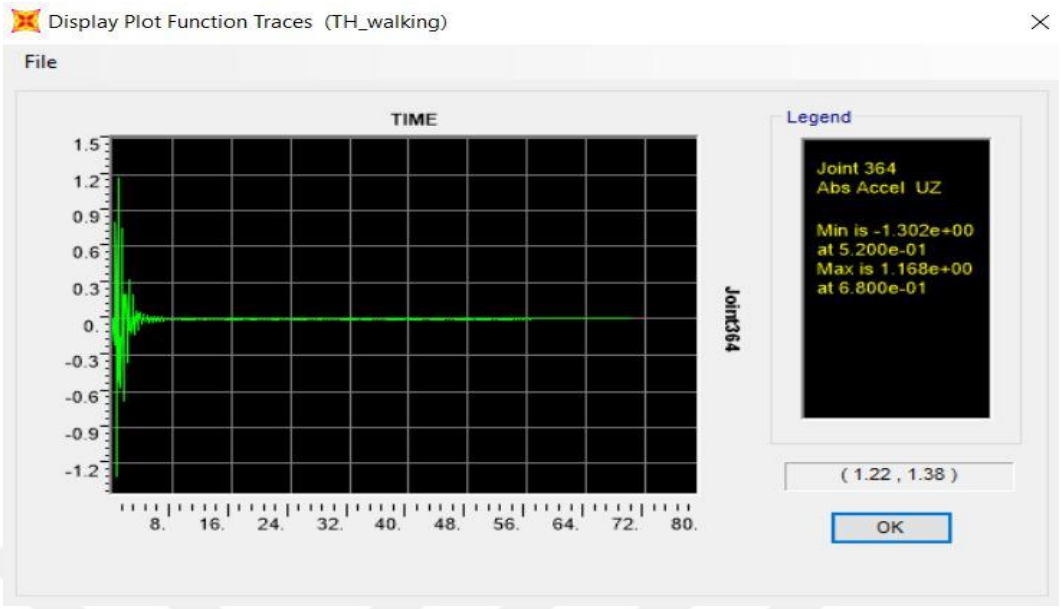
$$P(t) = 0.28*1*\sqrt{1 + 0.05 * (8 - 1)}*\sin(2\pi*2.06*t) \ \ (kN) \qquad (4.4)$$

olarak hesaplanmıştır. Yükleme durumu için harmonik yaya yükünün zamana göre değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yürüme durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN)

Yürüme durumu için belirlenen harmonik yük fonksiyonu SAP2000 programında zaman tanım alanında tanımlanmış olup analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda maksimum ivme 1.513 m/s^2 olarak bulunmuştur. Köprü açıklık ortasındaki düşey doğrultudaki ivme değişimi Şekil 4.5'da gösterilmiştir.



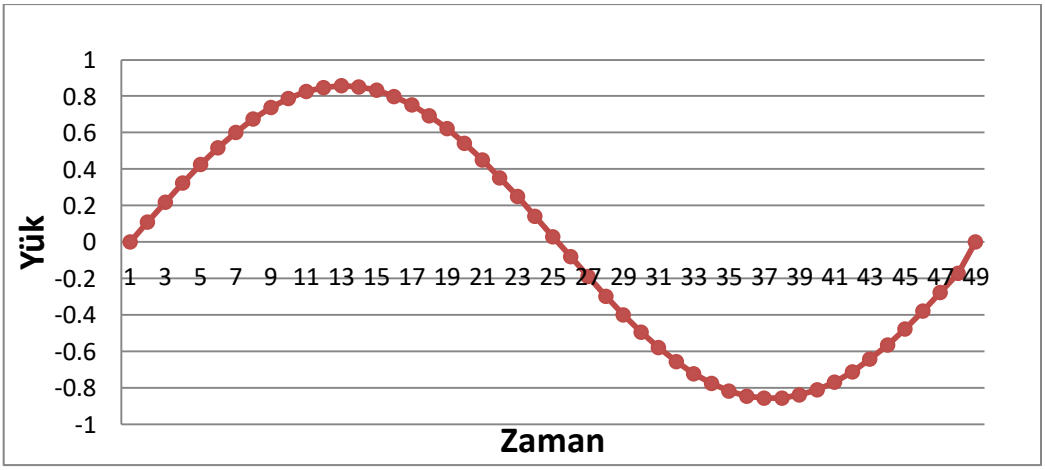
Şekil 4.6. Yürüme durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi

4.4.2. Koşma Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri

Koşma durumunda yaya yükü adeti N=2 olarak kabul edilmiştir. Referans yük değeri 910 N, kalabalık katsayısı 0.92, senkronizasyon katsayısı 0.05 olarak alınmıştır. Bu değerler doğrultusunda koşma durumu için harmonik yük değeri;

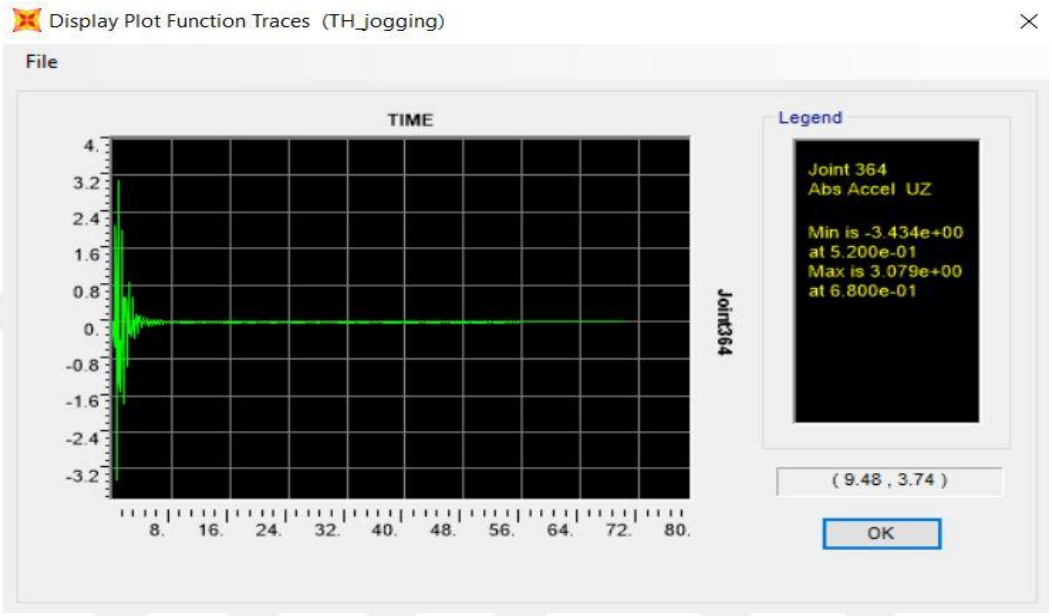
$$P(t) = 0.91*0.92*\sqrt{1 + 0.05 * (2 - 1)}*\sin(2\pi*2.06*t) \ \text{(kN)} \qquad (4.5)$$

olarak hesaplanmıştır. Koşma durumu için harmonik yaya yükünün zamana göre değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Koşma durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN)

Koşma durumu için belirlenen harmonik yük fonksiyonu, yürüme durumunda olduğu gibi SAP2000 programında tanımlanmış ve analiz sonucunda maksimum ivme 3.99 m/s^2 olarak bulunmuştur. Köprü açıklık ortasındaki düşey doğrultudaki ivme değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



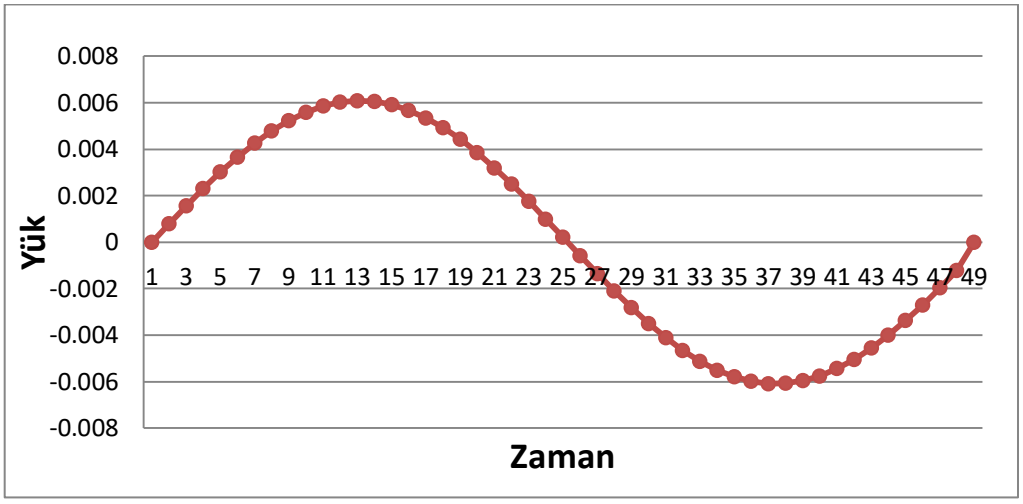
Şekil 4.8. Koşma durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi

4.4.3. Kalabalık Durumu İçin Yükleme Durumu Ve İvme Değerleri

Kalabalık durumu için harmonik yük fonksiyonun belirlenmesinde, referans yük değeri 280N, Köprü yürünebilir alanı 270 m^2, yaya adedi 135, kalabalık katsayısı 1, senkronizasyon katsayısı 0.05, azaltma katsayısı 0.634 değerleri kullanılmıştır. Bu değerler doğrultusunda kalabalık durumu için harmonik yük değeri;

$$F(t) = 1.8*\frac{0.28}{270}*1*\sqrt{\frac{0.05*135}{0.634}}*\sin(2\pi*2.06*t) \ \ (kN/m^2) \qquad (4.6)$$

olarak hesaplanmıştır. Kalabalık durumu için harmonik yaya yükünün zamana göre değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kalabalık durumu için harmonik yük fonksiyonu (kN/m^2)

Kalabalık durumu için de yürüme ve koşma durumunda olduğu gibi SAP2000 programında analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda maksimum ivme 0.028 m/s^2 olarak bulunmuştur. Köprü açıklık ortasındaki düşey doğrultudaki ivme değişimi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kalabalık durumu için açıklık ortasındaki düşey ivme değişimi

4.4.4. Limit Durum Kontrolleri

Köprü büyükşehir merkezinde bulunduğu için köprü fonksiyon katsayısı 1.0, köprünün kullanımında alternatif yol bulunduğu için hat,güzergah katsayısı 1.3, köprü yüksekliğinin 4

m'den az olması nedeniyle köprü yüksekliği katsayısı 1.1, köprü etki katsayısı ise 1.0 olarak alınmıştır. Bu durumda düşey tasarım ivme limiti;

$$a_{limit} = 1.0*1.0*1.3*1.1*1.0 = 1.43\ m/s^2 \quad (4.7)$$

olarak bulunmuştur. Yürüme, koşma ve kalabalık durumlar için yapılan olan maksimum ivme değerleri Tablo 4.8'de sunulmuştur.

Tablo 4.10: Limit Kontrolleri

Limit İvme Değeri (m/s^2)	Yürüme Durumu (m/s^2)	Koşma Durumu (m/s^2)	Kalabalık Durumu (m/s^2)
1.43	1.513	3.99	0.028

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada Hatay İli Antakya ilçesinde bulunan kompozit bir yaya köprüsünün zaman tanım alanında deprem ve yaya yükü dikkate alınarak dinamik analizleri sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir.

Asi nehri üzerinde bulunan yaya köprüsünün deprem analizinde, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için oluşturulan hedef tasarım ivme spektrumuna spektral uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilen 7.51 Mw büyüklüğündeki Kocaeli depremi, 6.9 Mw büyüklüğündeki Kobe depremi ve 6.69 Mw büyüklüğündeki Northridge depremine ait deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Analiz sonucunda yapının her üç deprem için yerdeğiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiş olup Tablo 5.1'de sunulmuştur. Her üç depremde de maksimum yerdeğiştirmenin ve gerilmenin düşey doğrultuda olduğu ve birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bu değerler deprem yönetmeliğinde yer alan gerekli kriterleri sağlamıştır.

Tablo 5.1. Kocaeli, Kobe ve Northridge depremlerine ait analiz sonuçları

Kullanılan Deprem İvme Kaydı	**Analiz Sonuçları**	
	Maksimum Deplasman (m)	**Maksimum Gerilme (kN/m^2)**
Kocaeli	0.130513	283967.48
Kobe	0.118013	280192.33
Northridge	0.100155	239371.93

Yaya köprü arasındaki titreşim analizlerinde ise ilk olarak Synpex tasarım metodu kullanılmıştır. Modal analiz sonucunda elde edilen, köprünün 2.06 Hz düşey frekansı ile 1.86 Hz yatay frekansı sınır değerlerine göre kontrol edilmiş ve yalnızca düşey frekansın sınır değerleri sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle analizler düşey doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Yoğun yaya trafiğinin bulunduğu bölgede olan yaya köprüsü, bu yük altında gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum konfor seviyesini sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında farklı trafik sınıfları için de analizler gerçekleştirilmiş ve köprü maksimum ve orta konfor seviyelerinde kalmıştır.

Yaya köprü arasındaki titreşim analizinde kullanılan bir diğer yöntem ise British National Annex şartnamesidir. Bu yöntemde, köprünün yatay ve düşey frekans değerlerinin sınır değerlerin altında kalması nedeniyle farklı yaya yüklemeleri için köprüde oluşan titreşimler yatay ve düşey doğrultuda incelenmiştir. Köprünün yatay frekansının, yatay doğrultudaki titreşim hesabında yer alan yatay frekans limit değerinin üzerinde kalması nedeniyle köprüde yatay doğrultuda ötelenme gerçekleşmeyeceği varsayımı yapılmıştır. Düşey doğrultuda yapılan analizler sonucunda ise yürüme ve koşma durumları için elde edilen ivme değerlerinin, düşey doğrultu titreşimleri hesabında 1.43 m/s^2 olarak hesaplanan limit değerini aşması nedeniyle yayaların konfor seviyesini düşüreceği görülmektedir. Yayaların konfor seviyesini düşüren bu titreşimler, köprüde yapısal değişiklikler yapılarak rijitliğin arttırılması ile ya da izolatörler veya viskoz damperler gibi sönümleyiciler kullanılarak istenilen seviyelere getirilebilir.

Synpex tasarım metodu ve British National Annex ile yapılan analizler sonucunda, köprüde yürüme ve koşma durumu dikkate alındığında diğer yükleme koşullarına göre köprüde meydana gelen ivme değerlerinin çok daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 5.2).

Tablo 5.2. Köprüde farklı yaya yüklemeleri altında elde edilen ivme değerleri

Analiz Metodu	**Synpex Tasarım Metodu**				**British National Annex**		
Yükleme Durumu	0.2 P/m^2	0.5 P/m^2	1.0 P/m^2	1.5 P/m^2	Yürüme durumu	Koşma durumu	Kalabalık durumu
İvme değerleri (m/s^2)	0.072	0.110	0.438	0.536	1.513	3.99	0.028

KAYNAKLAR

Ahmadi E., Caprani C.C., Heidarpour A., An equivalent moving force model for consideration of human-structure interaction, Applied Mathematical Modelling 51, 526–545, 2017.

Altememy, O.A.N., Vibration behaviour of slender footbridges due to synchronized pedestrian loading, Yüksek Lisans Tezi, Eindoheven University of Technology, 2015.

Butz E.C., Feldmann M., Heinemeyer C.H., Sedlacek G., Chabrolin B., Lemaire A., Lukic M., Martin P.O., Caetano E., Cunha A., Goldack A., Keil A. ve Schlaich, M., Advanced load models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimized Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX), RFCS-Research Project RFSR-CT-2003-00019, 2008.

Caprani C.C., ve Ahmadi E. Formulation of Human–Structure Interaction System Models for Vertical Vibration, Journal of Sound and Vibration 377, 2016, p.346–367.

Eurocode 1, General Actions Traffic loads on bridges. EN1991-2: 2003. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium 2003.

Eurocode 5, Design of Timber Structures Part 2: Bridges, EN1995-2, 2004.

Fédération Internationale du Béton (FIB), Guidelines for the design of footbridges. fib bulletin 32, November 2005.

Güneş B., "Dynamic Analysis Of Cable-Stayed Steel Footbridge Under The Pedestrian Loads And Its Application", 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), Türkiye, 1-6, 30 October-1 November 2013.

Hawryszków, P., Analysis of human induced vibrations on footbridges, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014.

Hoang, N., Fujino, Y., ve Warnitchai, P., Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas, Engineering Structures, 30, 707-715, 2008.

Iervolino, I., De Luca, F., Cosenza, E., " Spectral shape-based assessment of SDOF nonlinear response to real, adjusted and artificial accelerograms", Engineering Structures ,32, 2776–2792, 2010.

International Standardization Organization (ISO), Bases for design of structures Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration, ISO/CD 10137, Geneva, Switzerland, 2005.

Kayhan, A.H., "Armoni Araştırması ile İvme Kaydı Seçimi ve Ölçeklendirme", İMO Teknik Dergi, 5751-5775, Yazı 368, 2012.

Lai E., Gentile C., Mulas M.G. Experimental and numerical serviceability assessment of a steel suspension footbridge, Journal of Constructional Steel Research 132 , 2017, p.16–28.

Lee Y. S., Kim S.H ve Skibniewski M. Analytical and Experimental Approach for Assessing Vibration Serviceability of Highway Bridges Due to Heavy Vehicle Traffic, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Vol. 4, Issue 3, 2009, p.123-133.

Mácal J., Štěpánek J. Pedestrian load models of footbridges, MATEC Web of Conferences, Vol. 107, Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND'2017, 2017.

Nimmen V.K., Lombaert G., De Roeck G., Van den Broeck P., Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice, Engineering Structures, 59, 448–461 , 2014.

Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. *PEER Ground Motion Database*, http://ngawest2.berkeley.edu, (2020).

Racic V., Pavic A., ve Brownjohn J.M.V. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review, Journal of Sound and Vibration 326, 2009, p.1–49.

Reimert, Z., Human-Induced Vibrations On Footbridges A Probability-Based Approach Of The Vibration Serviceability Of Footbridges Under Vertical Pedestrian Loading, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, 2014.

SAP2000 (Version 21.2.0)-Finite Element Methods Program. Berkeley, California:Computers and Structures Inc.

Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Footbridges: Assessment of Vibration Behaviour of Footbridges Under Pedestrian Loading, Technical Guide, Service d'Etudes Technique des Routes et Autoroutes, Paris, 2006.

Spijkers, J., Vrouwenvelder, A., ve Klaver, E., Dynamics of structures: Part 1 - Vibration of structures , TU Delft, 2006.

Steel, Concrete and Composite Bridges—Part 2: Specification for Loads; Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges, BS 5400. UK: British Standards Association, London, 1978.

TBDY-Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2018.

Türkiye Deprem Tehlike Haritası, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Deprem Dairesi Başkanlığı, https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml, 2019.

Živanović S., Aleksandar, P., Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges, Shock and Vibration, 18 (4), 563-577, 2011.

Živanović S. Benchmark Footbridge for Vibration Serviceability Assessment under Vertical Component of Pedestrian Load, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 138 (10), 1193-1202., 2012.

Živanović S., Feltrin G., Mottram J.T., Brownjohn J.M.W., Vibration Performance of Bridges Made of Fibre Reinforced Polymer, In: Catbas F. (eds) Dynamics of Civil Structures, Volume 4. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham, 2014.

Živanović, S., Pavic, A., ve Reynolds, P., Finite element modelling and updating of a lively footbridge: The complete process, Journal of Sound and Vibration, 301 (1-2), 2007.

Živanović, S., Pavic, A., ve Reynolds, P., Modal testing and FE model tuning of a lively footbridge structure, Engineering Structures, 28 (6), 857-868, 2006.

Živanović S., Pavic A., ve Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review, Journal of Sound and Vibration 279, 2005, p.1–74.

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Aliye Ebru TAZE
Doğum Yeri	İskenderun / HATAY
Doğum Tarihi	01.11.1990
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	aliyebrutaze@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Gaziantep Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2014

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği

Makale ve Bildiriler