

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**OYULMA ETKİSİ ALTINDAKİ KÖPRÜ KAZIKLARININ
MODELLENMESİ VE ZAMAN TANIM ALANI ANALİZ YÖNTEMİYLE
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

Mohammad Akram ZAKY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

EYLÜL 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**OYULMA ETKİSİ ALTINDAKİ KÖPRÜ KAZIKLARININ
MODELLENMESİ VE ZAMAN TANIM ALANI ANALİZ YÖNTEMİYLE
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

Mohammad Akram ZAKY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

EYLÜL 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

**OYULMA ETKİSİ ALTINDAKİ KÖPRÜ KAZIKLARININ
MODELLENMESİ VE ZAMAN TANIM ALANI ANALİZ YÖNTEMİYLE
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

Mohammad Akram ZAKY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2018-3407 nolu proje ile desteklenmiştir.

EYLÜL 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

OYULMA ETKİSİ ALTINDAKİ KÖPRÜ KAZIKLARININ MODELLENMESİ
VE ZAMAN TANIM ALANI ANALİZ YÖNTEMİYLE DAVRANIŞININ
BELİRLENMESİ

Mohammad Akram ZAKY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

Bu tez 30/09/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

JÜRİ:

Doç. Dr. Okan ÖZCAN



Prof. Dr. Nihat DİPOVA



Doç. Dr. Özgür AVŞAR



ÖZET

OYULMA ETKİSİ ALTINDAKİ KÖPRÜ KAZIKLARININ MODELLENMESİ VE ZAMAN TANIM ALANI ANALİZ YÖNTEMİYLE DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Mohammad Akram ZAKY

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Okan ÖZCAN

Eylül 2019; 70 sayfa

Köprü temellerinde oluşan oyulma, karayolu köprülerinde en sık gözlemlenen göçme nedenlerinden biridir. Bu nedenle, kritik oyulma şartları altında köprülerin güvenliğini tahmin etmek için kazıklı köprü ayakları etrafındaki oyulma mekanizmasının kapsamlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Oyulma mekanizmasının tespiti, kazıklı temel tasarımına ışık tutmakta ve yaşanabilecek oyulma kaynaklı olumsuzlukları önlemeye yardımcı olmaktadır. Oyulma köprü altyapılarında gözlemlenen göçmenin en önemli nedenlerinden biri olduğundan dolayı, bu çalışmada öncelikle kazıklı köprü ayakları ve kenar ayaklar için yerel oyulma davranışı kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Bunun yanında, zaman tanım alanı (ZTA) analiz yöntemi kullanılarak betonarme (BA) kazıklı köprülerin yanal ve düşey yükler altındaki davranışı yeni deprem yönetmeliğine göre (TDY-2018) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizde, kazıklı köprü ayaklarının beklenen oyulma sonrasındaki yük ve yer değiştirme kapasitesi belirlenmiş olup, buna göre köprü yapılarının güvenilirliği kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, oyulma etkisi altındaki mevcut bir BA kazıklı köprünün sismik performansı incelenmiş ve oyulmanın yapı üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Deprem, karayolu köprüleri, köprü göçmesi, köprü kazıkları, oyulma, sismik analiz, yapısal davranış.

JÜRİ: Doç. Dr. Okan ÖZCAN

Prof. Dr. Nihat DİPOVA

Doç. Dr. Özgür AVŞAR

ABSTRACT

MODELLING OF BRIDGE PILES EXPOSED TO SCOUR AND DETERMINATION OF ITS BEHAVIOR BY USING TIME HISTORY ANALYSIS

Mohammad Akram ZAKY

MSc. Thesis in Department Of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Okan ÖZCAN

September 2019; 70 pages

Scour in bridge foundations is one of the most common causes of failure in river crossing highway bridges. Therefore, it is necessary to evaluate the scouring mechanism around piled bridge piers in order to estimate the safety of the bridges under critical scouring conditions. The detection of the scouring mechanism sheds light on the pile foundation design and helps to prevent the unfavorable structural behavior of the highway bridges caused by the scouring. Since this is one of the most common reasons of collapse observed in bridge infrastructures, this study primarily examines the local scouring behavior for piled bridge abutments and pier foundations. In addition, the behavior of reinforced concrete (RC) piled bridge exposed to lateral and vertical loads was investigated in details according to the new Turkish codes (TEC-2018) by using time history analysis (THA) method. In the analyzes, the load and displacement capacity of the piled bridge piers under expected scour was determined and the reliability of the bridge structures was checked. As a result, the seismic performance of an existing reinforced concrete piled bridge exposed to scour was investigated and the effects of the scouring on the structure were determined.

KEYWORDS: Bridge failure, bridge piles, earthquake, highway bridges, scour, seismic analysis, structural behavior.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Okan ÖZCAN

Prof. Dr. Nihat DİPOVA

Assoc. Prof. Dr. Özgür AVŞAR

ÖNSÖZ

Bugünlere gelmemde üzerimde çok büyük emekleri geçen sevgili anne ve babama, tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Okan ÖZCAN'a şükranlarımı sunmak isterim. Ayrıca konu hakkındaki bilgilerini benimle paylaşan arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Oyulma Etkisi Altındaki Köprü Kazıklarının Modellenmesi ve Zaman Tanım Alanı Analizi Yöntemiyle Davranışının Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

30/09/2019

Mohammad Akram ZAKY



İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	iv
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tanım	1
1.2. Amaç ve Kapsam	3
1.3. Tezin Organizasyonu	3
2. KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Giriş	5
2.2. Köprülerde Oyulma	5
2.2.1. Oyulma tanımı	5
2.2.2. Oyulma çeşitleri	5
2.2.3. Daralma oyulması	7
2.2.4. Yerel oyulma	7
2.2.5. Köprü ayaklarında yerel oyulmaya etki eden değişkenler	7
2.2.6. Köprü ayaklarında yerel oyulma bağıntıları	7
2.3. Kazıklı Temelin İncelenmesi	8
2.4. Zeminin Kazıklarının Yanal Yük Etkileri Altında Tepkisi	9
2.4.1. P-y Eğrisinin Karakteristik Özellikleri	10
2.4.2. Su tabakasının üstünde ve altında kumun (Reese) tepkisi	11
2.4.3. Florida kalker (McVay) için p-y direnci	13
2.5. Dinamik Analiz - Zaman Tanım Alanında (ZTA) Analiz	13
2.5.1. ZTA analizin amacı	13
2.5.2. Çözüm yöntemleri	14
2.6. ZTA TDY-2018	15
2.6.1. Tanım	15
2.6.2. Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi	15
2.7. Sap2000 ile ZTA Analiz	15
2.7.1. Genel hususlar	15

2.7.2. Zaman entegrasyon yöntemleri ve değişkenleri.....	16
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Mevcut Köprünün Özellikleri.....	17
3.2. Malzeme Özellikleri	18
3.3. Çalışma Alanı ve Köprü Geometrisi.....	18
3.4. Elastomerik Mesnetler	25
3.5. Genleşme Bağlantıları	26
3.6. Köprünün Analitik Modellemesi	26
3.6.1. Modellemede kullanılan teknikler.....	30
3.7. Üstyapı.....	31
3.7.1. Zati yük hesabı	32
3.7.2. Tabliye.....	32
3.8. Altyapı	33
3.8.1. Temel elemanları.....	33
3.9. Kolon Kesme Kontrolü.....	35
3.9.1. Köprü boyuna yönde kayma donatısı hesabı.....	35
3.9.2. Köprü enine yönde kayma donatısı hesabı.....	36
3.10. Yer Hareketi Kayıtlarının Seçimi	37
3.10.1. Genel hususlar	37
3.10.2. Deprem kayıtlarının Sap2000'e girilmesi	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Sap2000'le Köprü Modelinin Davranış Kontrolü.....	44
4.2. Modal Analiz Sonuçları.....	48
4.3. ZTA Analiz Sonuçları.....	52
4.3.1. Plastik mafsallı davranışı.....	54
4.2.1. Kolonların üst ucu yer değiştirme ve ivmesi	55
4.2.2. Kolon tabanı kesit tesirleri.....	58
4.2.3. Kazık – kazık başlığı birleşimi kesit tesirleri	61
5. SONUÇLAR.....	62
6. KAYNAKLAR	63
7. EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$A_{\text{elastomer}}$	: Elastomer mesnet yüzey alanı
A_v	: Etriye alanı
b	: Akmaya dik yönde kolon genişliği
b_w	: Hesap genişliği
d	: Faydalı yükseklik
d_{bl}	: Boyuna donatı çapı
D	: Kazık çapı
D_{50}	: Yatak malzemesinin medyan çapı, boyutların % 50'si küçük olan çap, mm veya m
$DD-2$	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
f'_c	: Karakteristik beton basınç dayanımı
f_s	: Yüzey sürtünmesi
f_{smax}	: Nihai birim yüzey sürtünmesi
f_{ye}	: Donatı çeliğinin akma dayanımı
G	: Elastomer kayma modülü
h_{rt}	: Çelik levhalar hariç elastomer net yüksekliği
I_e	: Etkin atalet momenti
I_g	: Brüt atalet momenti
$K_{\text{elastomer}}$	: Elastomer yanıl öteleme rijitliği
K_{py}	: Alt temel reaksiyon katsayısı
L	: Kolon boyu
L_p	: Plastik mafsal boyu
m	: metre
p	: Yanal zemin direnci

q_u	: Sınırsız basınç mukavemeti
R_{jb}	: Joyner-Boore uzaklığı
s	: Etriye aralığı
V_c	: Beton kesme dayanımı
V_n	: Kesitte oluşan nominal kesme kuvveti
V_s	: Etriyenin taşıdığı kesme dayanımı
V_s	: Deprem dalga hızı
W	: Ağırlık
y	: Yanal kazık sapması
z	: Zemin altı derinliği
ξ	: Sönüm oranı
ϕ	: Dayanım azaltma faktörü

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AÜ	: Akdeniz Üniversitesi
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research
PGA	: Peak ground acceleration
RSA	: Response spectrum analysis
SAP	: Structural Analysis Program
SRSS	: Square root of sum of squares
TEC	: Turkish Engineering Code
TDY	: Türk Deprem Yönetmeliği
TS	: Türk Standartları
ZTA	: Zaman Tanım Alanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Zonguldak'ın Çaycuma ilçesinde, Nisan ayında taşkın sonrası meydana gelen köprü faciası (Sondevir, 2012)	2
Şekil 1.2. Ordu'nun Ünye ilçesindeki Cevizdere Köprüsü taşkın sonrası (Web, 2018) ...	2
Şekil 1.3. (a) Boğaçay köprüsü 2003 yılında felaket sonucunda hasarlı görünümü (COŞAR, 2010) (b) Kenar ayak erozyonu ve oyulma nedeniyle Galle, Sri Lanka'nın güneyinde göçen Magalle Köprüsü (EEFIT, 2006).....	3
Şekil 2.1 Oyulmanın oluşma şekli (HEC-18, 2011)	5
Şekil 2.2 Taşkın kaynaklı oluşan şematik ve hakiki yerel oyulma örnekleri (NCHRP, 2011a)	6
Şekil 2.3. Oyulmanın toplu etkisi (Lin, 2012)	6
Şekil 2.4. Deneysel çalışmalarda elde edilmiş köprü ayaklarındaki oyulmalar (Yanmaz ve diğ., 2002)	8
Şekil 2.5. Yanal kazık davranışını değerlendirmek için p-y eğrisi yaklaşımının gösterimi (Christensen, 2006)	10
Şekil 2.6. Dış kuvvet ile toprak kama hareket (Reese ve diğ., 2006)	10
Şekil 2.7. Reese Kumu için p-y eğrilerinin görünümü (Reese ve Van Impe, 2001)	11
Şekil 3.1. Boğaçay köprüsünün uydu görüntüsü	18
Şekil 3.2. Köprü genel görünüşü.....	19
Şekil 3.3. Köprü ana elemanlarına ait bir görünüş.....	19
Şekil 3.4. a) Kazık kesiti b) kolon kesiti	20
Şekil 3.5. Köprünün üç boyutlu görünümü.....	21
Şekil 3.6. Köprünün yüksekliği görünümü	22
Şekil 3.7. (a) Köprünün oyulmasız boykesit görünümü (b) Köprünün tam oyulmalı boykesit görünümü (tüm birimler cm cinsinden).....	23
Şekil 3.8. a) Köprü üst yapı kesiti; b) kolon başlık kirişi; c) kolon kesiti; d) kazık kesiti; e) taban kesiti (tüm birimler cm cinsinden).....	24
Şekil 3.9. Elastomerik mesnet boyutları (25cm x 40cm x 7cm) ve detayı	25
Şekil 3.10. Köprü orta ayağı üzerinde yer alan elastomer mesnetlere ait bir görünüm	26
Şekil 3.11. Sap2000 ile köprünün 3B modeli	27
Şekil 3.12. Elastomer ve genleşme derzi model detayı	27
Şekil 3.13. Zemin tipi kum ve çakıl	28
Şekil 3.14. Oyulmasız köprü modelin plastik mafsal yerleri.....	29
Şekil 3.15. Tam oyulmalı köprü modelin plastik mafsal yerleri	30

Şekil 3.16. (a) orta ayağın gap elemanı; (b) kenar ayaklarda tanımlanmış gap elemanı.....	31
Şekil 3.17. Tabliye kompozit kesiti	32
Şekil 3.18. Tabliye kesit özellikleri	33
Şekil 3.19. Temel elemanların modellenmesi.....	34
Şekil 3.20. p-y eğrilerinin Mathlock ve Reese formülleriyle excelde hesaplanması.....	34
Şekil 3.21. p-y eğrilerini Sap2000'e nonlinear olarak girilmesi	35
Şekil 3.22. Kordinatına göre elde edilen yatay elastik tasarım spektrumu.....	38
Şekil 3.23. Türkiye sismik bölge haritası (TDY-2018)	39
Şekil 3.24. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu (TDY-2018).....	39
Şekil 3.25. ZTA fonksiyon tanımlanması	40
Şekil 3.26. Deprem kaydının tanımlanması.....	40
Şekil 3.27. Doğrudan integrasyon için yüklemenin tanımlanması	41
Şekil 3.28. %5 sönümlü tasarım spektrumu ve ölçeklenmiş kayıtların bileşke yatay spektrumu	43
Şekil 4.1. 2 ve 3-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri	45
Şekil 4.2. 4 ve 5-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri	46
Şekil 4.3. 6 ve 7-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri	47
Şekil 4.4. Mod şekli 1, T=1.13 s oyulma olmayan durum için (boyuna doğrultuda).....	49
Şekil 4.5. Mod şekli 2, T=0.35 s oyulma olmayan durum için (enine doğrultuda)	49
Şekil 4.6. Mod şekli 3, T=0.30 s oyulma olmayan durum için (burulma).....	50
Şekil 4.7. Mod şekli 1, T=1.29 s tam oyulma durumu (boyuna doğrultuda).....	50
Şekil 4.8. Mod şekli 2, T=0.67 s tam oyulma durumu (enine doğrultuda).....	51
Şekil 4.9. Mod şekli 3, T=0.48 s tam oyulma durumu (burulma)	51
Şekil 4.10. Oyulma derinliğine göre köprü doğal titreşim periyodu değişimi	52
Şekil 4.11. Bolu depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli.....	53
Şekil 4.12. Michoacan De Ocampo depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli	53
Şekil 4.13. El Centro Differential Array depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli	54
Şekil 4.14. Tam oyulmalı durum için Elcentro Array depremi altında M3 yönünde P3 aksı kolonunda plastik mafsall oluşumu	54
Şekil 4.15. Tam oyulmalı durum için Elcentro Array depremi altında M2 yönünde P3 aksı kolonunda plastik mafsall oluşumu	55
Şekil 4.16. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının x-doğrultusunda yer değiştirmesi	56

Şekil 4.17. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının y-doğrultusundaki yer değiştirmesi	57
Şekil 4.18. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının x-doğrultusundaki ivmesi.....	57
Şekil 4.19. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının y-doğrultusundaki ivmesi.....	58
Şekil 4.20. 13 tip oyulma için (a)-(b) 11 adet deprem kayıt ortalamalarının boyuna doğrultuda kolon tabanı kesit tesirleri	58
Şekil 4.21. 13 tip oyulma için (a)-(b) 11 adet deprem kayıt ortalamalarının enine doğrultuda kolon tabanı kesit tesirleri	60
Şekil 4.22. 13 tip oyulma için (a)-(d) 11 adet deprem kayıt ortalamalarının kazık – kazık başlığı birleşimi kesit tesirleri.....	61



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. K_{py} 'nin kum için temsili değeri. (Reese ve diğ. 2006)	12
Çizelge 3.1. İlgili bölümlerin malzeme özellikleri.	18
Çizelge 3.2 Kazık / kolon kesitleri.....	20
Çizelge 3.3. Yer hareketleri, doğrultu atımlı (PEER 2013).....	42
Çizelge 4.1. Farklı açıklıklardaki köprünün etkin periyotları.....	44
Çizelge 4.2. Etkin modlar ve kütle katılım oranları.....	48



1. GİRİŞ

1.1. Tanım

Geçmişte meydana gelen doğal felaketler, otoyol köprülerinin afet sonrasında kurtarma operasyonları için hizmet ağında tutulması gereken ulaşım ağlarının en kritik bileşenlerinden biri olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, oyulmanın köprülerde gözlemlenen göçmenin önde gelen nedenlerinden biri olduğu önceki çalışmalarda ve yönetmeliklerde belirlenmiştir (AASHTO 2010; Maddison 2012). Ülkemizde ve dünyada köprülerde gözlemlenen taşkın sonrası oyulma kaynaklı oluşan göçme ve hasar durumları Şekil 1.1-1.3'te gösterilmiştir. AASHTO (2010) köprü şartnamesi, taşkın eğilimli bölgelerdeki temeller veya derin temel sistemleri etrafında bir taşkın koruma sistemi önermektedir. HEC-18 (2001) oyulmayı üç bileşeni ile tanımlamıştır. Bunlar, köprü ayakları veya suyun normal akışını engelleyebilecek yapısal parçalarda oluşan yerel oyulma, akışın köprü ayakları gibi dış nesneler ile daraltıldığında oluşan daralma oyulması ve suyun sürekli akışı ile zaman içinde oluşan agradasyon/degradasyon oyulması olarak belirtilmiştir.

Geçmişten bu yana, köprü kazıklarında oluşan oyulmanın köprülerin davranışı üzerindeki etkilerinin önemi birçok çalışmada vurgulanmıştır. Wang ve diğ. (2012), oyulma etkilerinin köprü tasarımında dikkate alınması gerektiğini vurgulamış ve bu sırada köprü oyulma ve deprem riskine maruz kalmıştır. Temellerin etrafındaki zeminin taşınması, köprü altyapısının rijitliğinde ve dayanımında azalmaya neden olabilmekte ve bu da köprü'nün deprem yükleri altındaki davranışını değiştirebilmektedir (Banerjee ve Prasad 2011; Song ve diğerleri 2015). Yanmaz ve diğ. (2018) akım doğrultusuna paralel arka arkaya konumlanmış ikili köprü ayakları etrafında, temiz su ve üniform taban malzemesi koşullarında oluşan oyulma çukurunun yüzey özelliklerini incelemek amacıyla deneysel bir araştırma yapmıştır. Deneyler, değişik ayak çapı ve ayaklar arası mesafelerde ikili özdeş silindirik ayaklar kullanılarak değişik akım şiddetleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, maksimum temiz su oyulmasının zamansal değişimini tahmin eden bir denklem üretilmiştir. Deneylerin test aralığında, önerilen denklemin deneysel bulgularla uyum gösterdiği gözlenmiştir (Yanmaz ve diğ. 2018). Köprü temel tasarımında temelin yanal davranışı, köprü'nün nihai davranışını belirlediğinden dolayı modelleme ve analizde büyük önem taşımaktadır. Derin temellerin yanal performansını belirlemek için, basit kiriş-yay modellerinden karmaşık sonlu elemanlar modellerine kadar pek çok analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğu ağırlıklı olarak köprü kolon performansına odaklanmıştır. Ancak, oyulma, taşkın ve deprem çoklu etkileri altında kazık temelli köprü sisteminin performansı ve göçme mekanizmaları konularında araştırmalar güncelliğini korumaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada taşkın nedenli oyulma ve deprem çoklu afet etkileri altında köprülerin performansı zaman tanım alanı esaslı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 1.1. Zonguldak'ın Çaycuma ilçesinde, Nisan ayında taşkın sonrası meydana gelen köprü faciası (Sondevir, 2012)



Şekil 1.2. Ordu'nun Ünye ilçesindeki Cevizdere Köprüsü taşkın sonrası (Web, 2018)



(a)



(b)

Şekil 1.3. (a) Boğaçay köprüsü 2003 yılında felaket sonucunda hasarlı görünümü (COŞAR, 2010) (b) Kenar ayak erozyonu ve oyulma nedeniyle Galle, Sri Lanka'nın güneyinde göçen Magalle Köprüsü (EEFIT, 2006)

1.2. Amaç ve Kapsam

Yapılan çalışmada, yerel oyulma etkisindeki kazıklı temele sahip betonarme (BA) köprülerin sismik performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Antalya'da bulunan Boğaçay üzerinde inşa edilmiş BA köprü, taşkın kaynaklı oyulmanın köprü sismik performansına etkilerini araştırmak için seçilmiştir. Bunun için zaman tanım alanı (ZTA) esaslı performans analiz yöntemi kullanılmıştır. Ayrıntılı analizlerde, köprünün yanal davranışında meydana gelen değişim, uygun bakım yapılmaksızın yıllar içinde köprü ayaklarında oluşabilecek oyulma derinliğinin kademeli olarak arttırılmasıyla kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Burada, oyulmanın tüm köprü ayaklarında yoğunlaştığı düşünülerek bu durumun köprü performansına olan etkileri karşılaştırmalı olarak saptanmıştır. Zaman tanım alanında (ZTA) performans analizleri kapsamında, köprü konumuna ve zemin koşullarına uygun olarak, on bir adet yer hareketi seçilmiş, yönetmeliklerle uyumlu olarak ölçeklendirilmiş (TBDY, 2018) ve köprünün sismik tepkisi için analiz sonuçlarının ortalaması dikkate alınmıştır. Oyulma etkisininin değişken oyulma derinlikleri düşünülerek karşılaştırılmasında; üstyapı yer değiştirmesi, ivmesi, kolon ve kazık iç kuvvetleri (kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri) mühendislik talep değişkenleri olarak seçilmiştir. SAP2000 (2012) programında oluşturulmuş köprü modeli ZTA esaslı dinamik analizlerde kullanılmış olup elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Organizasyonu

Bu tez, aşağıda verilen kısa içerikli beş ana bölümden oluşmaktadır:

Bölüm 1: Giriş bölümünde kısaca problemin ne olduğu açıklanmış; projeyi kapsayan hususlar ve amaçlar belirtilmiştir.

Bölüm 2: Oyulma etkileri altındaki köprü kazıkların davranışı üzerine kaynak taraması yapılmış, ZTA’da yapılmış analiz yöntemleriyle ilgili bilgi verilmiştir.

Bölüm 3: BA köprü üstyapısı, altyapısı ve bileşenleri için detaylı analitik modeller kullanılarak seçilen örnek BA köprüünün üç boyutlu (3B) doğrusal olmayan analitik modeli oluşturulmuştur.

Bölüm 4: Analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Bölüm 5: Sonuçlar yorumlanmış olup, köprü ayaklarında oluşan oyulmanın köprü sismik performansı üzerine etkileri değerlendirilmiştir.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Giriş

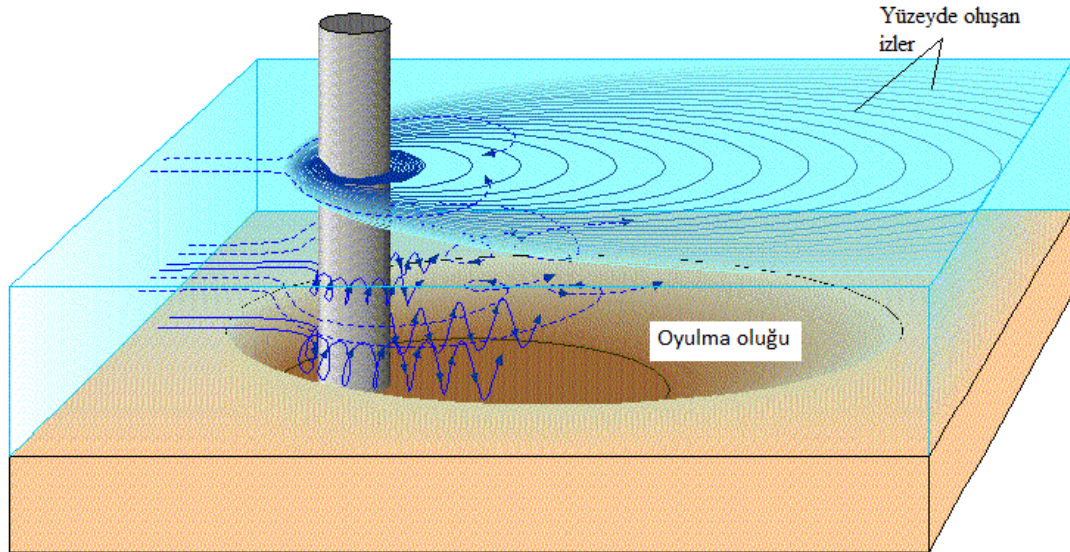
Köprü ayaklarında oluşan akış veya taşkın kaynaklı oyulma, köprü alt yapısının rijitliği ve dayanımında azalmaya neden olarak köprünün deprem yükleri altındaki davranışını etkilemektedir. Bu nedenle, oyulmadan dolayı köprülerin yapısal davranışlarında meydana gelen değişiklik, tasarım ve performans analizi süreçlerinde dikkate alınmalıdır.

2.2. Köprülerde Oyulma

Kazıklı köprü ayaklarında meydana gelen oyulma, oyulma tanımı ve çeşitleri aşağıda belirtilerek kısaca özetlenmiştir.

2.2.1. Oyulma tanımı

Kazıklı köprü ayaklarının oyulması, dere yataklarından akan suyun aşındırıcı etkisi ile kazık çevresinde bulunan kum ve çakıl gibi malzemelerin köprü ayaklarından veya kazıklarından uzaklaşmasıdır (Şekil 2.1). Hızla akışa geçen suyun neden olduğu oyulma, bir yapının bütünlüğünü tehlikeye atan oyulma deliklerini oluşturabilmektedir. (Richardson ve Davis, 2001).



Şekil 2.1. Oyulmanın oluşma şekli (HEC-18, 2011)

2.2.2. Oyulma çeşitleri

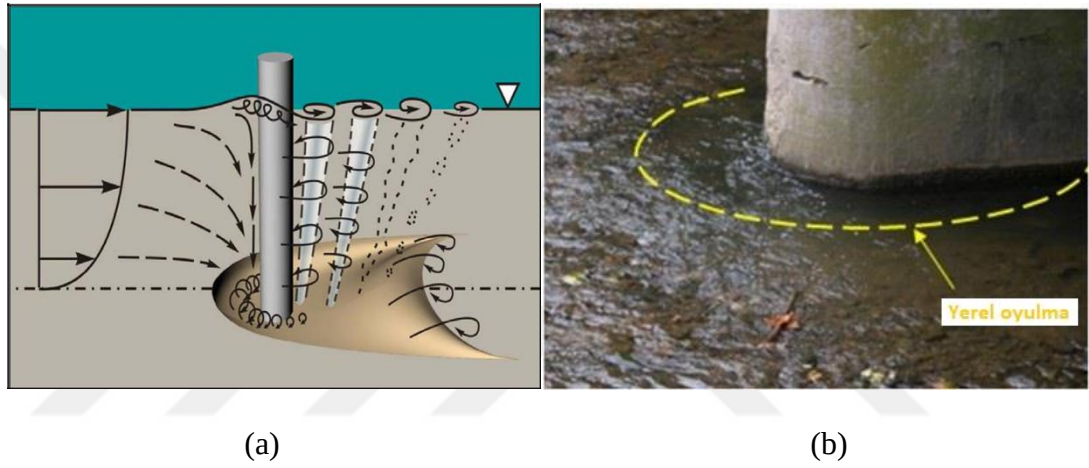
Oyulma tipleri üç kategoride sınıflandırılabilir:

1. Uzun zamanlı agradasyon/degradasyon, doğal veya insan kaynaklı olarak köprünün yer aldığı bölgede oluşan aşınma veya birikmelerdir.

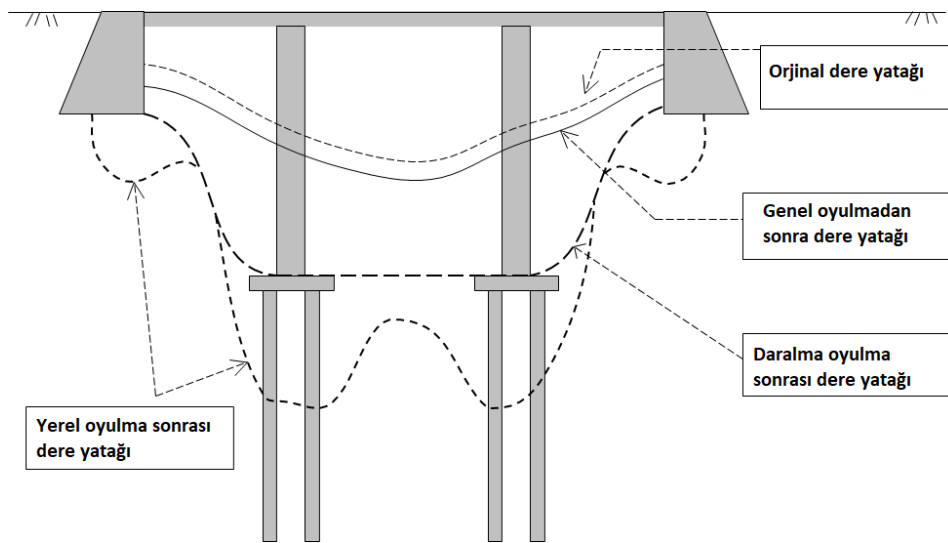
2. Daralma oyulması, nehir akış alanının daralmasıyla, debinin artmasıyla veya her iki durumun da aynı anda oluşmasıyla köprü ayakları arasında bulunan zeminin uzaklaştırılmasıdır.

3. Yerel oyulma, zeminin köprü ayakları veya kenar ayaklarından uzaklaştırılmasıdır. Bu oyulma tipi, akışı engelleyen nehir içindeki yapılardan dolayı oluşan girdaplardan kaynaklanmaktadır (HEC-18, 2011).

Taşkın gibi yüksek yerel hızlar ve akış bozuklukları (Şekil 2.2) yerel oyulmaya neden olmakta ve genel olarak, her üç oyulma bileşeninin de köprü ayaklarında etkili olduğu görülmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.2 Taşkın kaynaklı oluşan şematik ve hakiki yerel oyulma örnekleri (NCHRP, 2011a)



Şekil 2.3. Oyulmanın toplu etkisi (Lin, 2012)

2.2.3. Daralma oyulması

Bu tip oyulma, akarsu yatağının alçaltılması ve akış alanının daralmasıyla oluşmaktadır. Daralma, akarsu yatağı ortalama akış hızı ve kayma gerilmesinde artışa neden olur.

2.2.4. Yerel oyulma

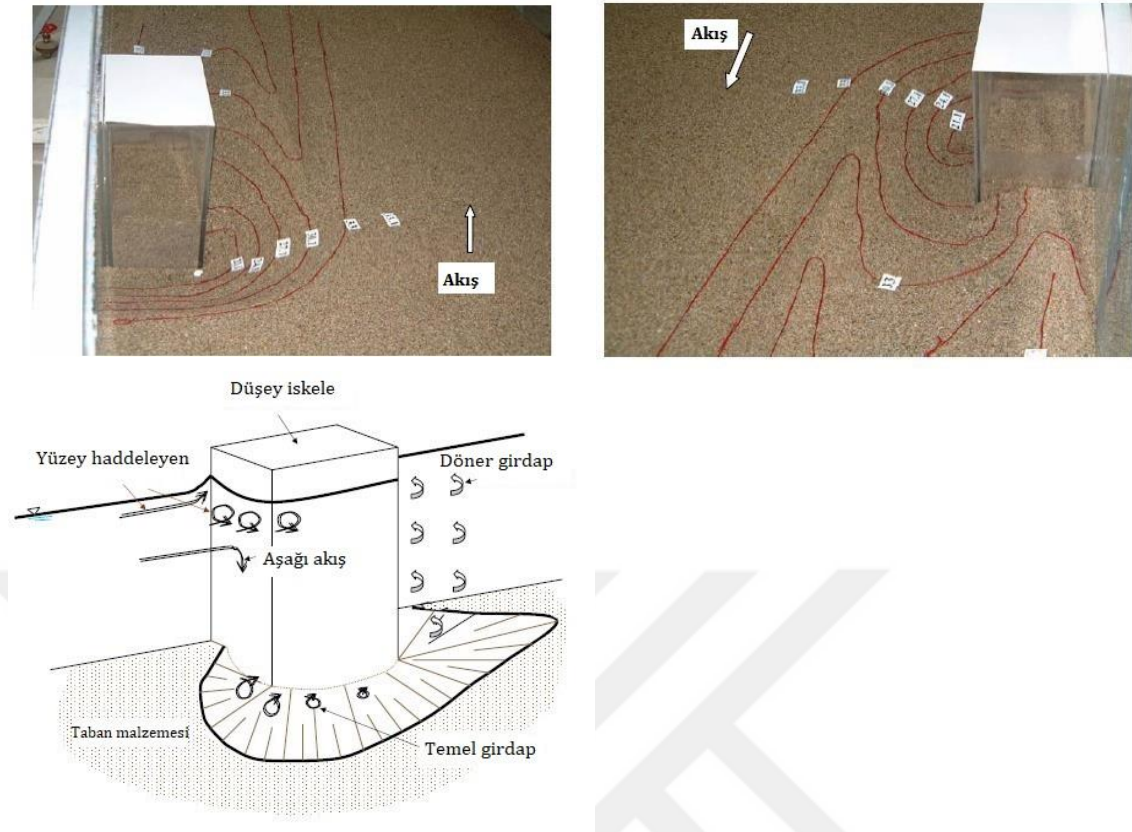
Yerel oyulma, köprü ayakları ve kenar ayakları etrafındaki malzemelerin aşınmasını içerir. Akışın engellenmesiyle artan ivme ve meydana gelen girdaplardan kaynaklanır. Bu durumda oyulma delikleri oluşur.

2.2.5. Köprü ayaklarında yerel oyulmaya etki eden değişkenler

- i. Yaklaşım akım derinliği: Yaklaşım derinliği azaldıkça oyulma artmaktadır. Oyulma miktarı derinlik arttıkça azalmakta ve derinlikten bağımsız hale gelmektedir.
- ii. Yaklaşım hızı: Yaklaşım hızı ile tabanda hareket eden malzeme de davranış değiştirmektedir. Temiz su akımlarında hız kritik taban hızına ulaşana kadar oyulma artmakta, ancak daha sonra tabanın harekete geçmesiyle tabanda yeniden şekillenmeler meydana gelmektedir.
- iii. Taban malzemesi dağılımı: Tane dağılımının geometrik sapması arttıkça kaba daneler ince daneleri kaplamakta ve oyulma azalmaktadır.
- iv. Ayak ve tane büyüklüğü etkisi: b/d_{50} göreli ayak büyüklüğünün değeri 50'den küçük olduğunda oyulma azalmaktadır.
- v. Zaman etkisi: Temiz su oyulmalarında, oyulma miktarının dengeye ulaşma süresi oldukça uzundur ve oyulma derinliği zamana bağlı olarak azalmaktadır.
- vi. Ayak şekli ve yaklaşım açısı: Ayaklar akım alanına dik kesiti minimum olacak şekilde yerleştirilmelidir. Yukarıya doğru genişleyen ayaklar at nalı çevrintilerinin yok olmasını önlediği için ayak etrafında oyulmanın artmasına neden olmaktadır (HEC-18, 2011).

2.2.6. Köprü ayaklarında yerel oyulma bağıntıları

1950'li yıllardan bu yana yoğun olarak çalışılan problemin çözümüne ilişkin genel bir bağıntı geliştirilememiştir. Ancak, literatürde bir çok farklı durum için geliştirilmiş bağıntılar bulunmaktadır. Hesaplamaların yapılmasında kullanılacak olan bağıntının geliştirilme koşulları ile problemin koşullarının mümkün olduğunca örtüşmesini sağlamakta yarar vardır. Köprü ayaklarında oluşan oyulmalara ilişkin bağıntıların bazıları ve elde edildikleri deney koşullarına ait bilgiler Yanmaz ve diğ.' de (2002) bulunabilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Deneysel çalışmalarda elde edilmiş köprü ayaklarındaki oyulmalar (Yanmaz ve diğ., 2002)

2.3. Kazıklı Temelin İncelenmesi

Bir çeşit derin temel olan kazıklı temeller yapıyı desteklemek ve yükü uç veya yüzey sürtünmesi ile istenen derinliğe aktarmak için kullanılan beton veya çelik gibi malzemelerden yapılmış genelde ince ve uzun silindirik elemanlardır. Tipik olarak çelik veya BA veya bazen ahşaptan yapılmaktadırlar. Temeller derinliğinin üç katından fazla olduğu zaman bir temel kazıklı olarak tanımlanır (Atkinson, 2007). Kazıklı temeller genellikle büyük yapılar için ve sığ derinlikteki zeminin aşırı oturmasına veya yükselmesine karşı koyamama gibi uygun olmayan durumlarda kullanılır. Ayrıca, yeraltı suyu tablası yüksek olduğunda, üstyapıdan gelen ağır ve üniform olmayan yükler uygulandığında, diğer temel çeşitlerinin mümkün olmadığı veya ekonomik olmadığı durumlarda, sığ derinlikteki zemin sıkıştırılabilir olduğunda, nehir yatağı veya deniz kıyısına yakınlık nedeniyle oyulma olasılığı olduğunda, yapının yakınında bir kanal veya derin drenaj sistemleri olduğunda, zayıf zemin durumuna bağlı olarak zemin kazısının istenilen derinliğe kadar mümkün olmadığındaki kullanılır.

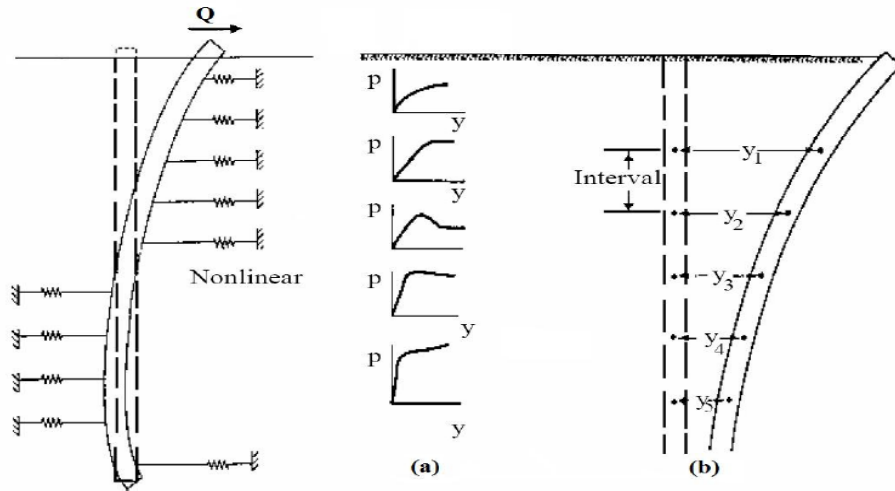
BA kazıkların, sismik etkilerden kaynaklanan kazık hasarlarının, masraflı bir şekilde onarımını ortadan kaldırmak için, esasen elastik aralıkta iç kuvvetlere yapısal olarak direnç gösterebildiği kabul edilebilir. Kazıklardaki yanal hareket kazık başlığı ile sabit bir derinlik arasında gelişir. Mevcut mühendislik pratiğine bağlı olarak kazık

kesitlerine standart tasarımda etkili bir rijitlik atanır. Yüksekol (2007) bir kazık kesitinin etkin atalet momentini (I_e) belirlemek için yinelemeli bir yöntemi karşılaştırmıştır. Sabit derinlik ve kazık uzunluğu arasındaki ilişki açısından etkin atalet momentin brüt atalet momentinin (I_g) yarısı olarak kabul etmiştir. Genel olarak, $I_e = 0.5 I_g$ varsayımının çok fazla hata getirmediğini saptamıştır. Bu nedenle, tüm analiz türlerinde, kazık kesitlerinin etkili atalet momenti, brüt atalet momentinin yarısı olarak alınabilir. Sabitlik derinliği beş ile sekiz kazık çapı arasında değişebilir.

Yanal yüklü kazıklar için kazık grup etkisi üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Yüksekol, 2007; AASHTO, 2012). Kazık grup zemin katkısı dahil, bir gruptaki kazık sayısı ile çarpılan tek kazık tepkisinden daha az olabilir. Böylelikle, bir kazık grubunda taban modülü azaltılabilir. Kazık yerleşim aralığı çapın üç katından az olduğu durumlarda; birinci, ikinci ve takip eden kazıklar için yanal zemin kapasitesinin sırasıyla 0.7, 0.5 ve 0.35 katı kullanılır (AASHTO, 2012). Kazık başlığı tarafından sağlanan yanal direnç, uygulamada genellikle yapıldığı gibi ihmal edilir.

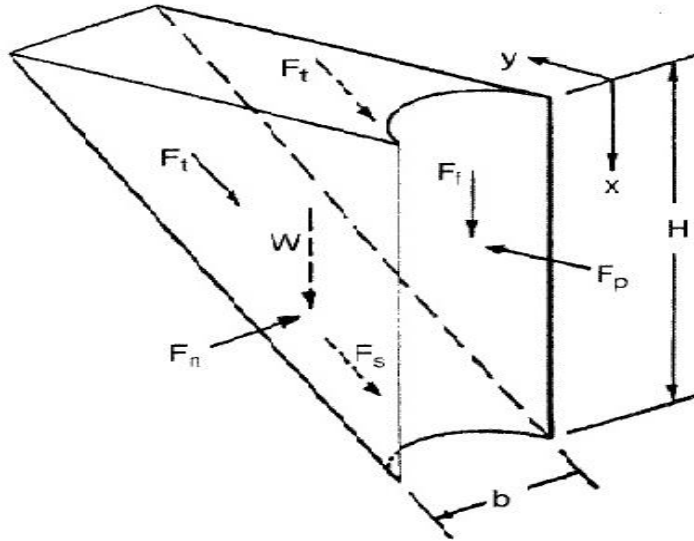
2.4. Zeminin Kazıklarının Yanal Yük Etkileri Altında Tepkisi

Alt temel reaksiyon yaklaşımının doğrusal olmayan zemin özelliklerini hesaba katması, McClelland ve Focht (1958) tarafından geliştirilen p-y yöntemini ortaya çıkarmıştır. Zeminin direnci ile kazığın yanal yer değiştirmesi arasındaki ilişki p-y eğrileri ile modellenmiştir. Bu ilişki, p-y eğrisinde grafiksel olarak da gösterildiği gibi y, kazık yanal yer değişikliğini temsil etmekte ve p, zemin direncini temsil etmektedir. Zemin dayanımına bağlı kalarak kazıkların geçtiği her zemin tabakası, farklı bir direnç miktarına sahiptir, bu da farklı bir p-y eğrisine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.5'te gösterildiği üzere çeşitli p-y eğrileri, kazık boyunca doğrusal olmayan ve çeşitli zemin katmanlarını temsil eden yaylar olarak modellenmiştir. Son otuz sene içerisinde, çeşitli zemin türleri ve yükleme şartları (statik ve çevrimsel) için çeşitli eğri tipleri öne sürülmüştür. Reese ve Van Impe (2001) p-y yönteminin geliştirilmesi ve pratik uygulamasını özetlemiştir. Elasto-plastik p-y eğrileri, kazık performansının tahmininde statik ve çevrimsel yanal yük esnasında makul derecede iyi sonuçlar vermiştir. Yanal yük altındaki kazık temellerin analizi ve tasarımı için en kullanışlı prosedür p-y yöntemidir. Burada, daha basit bir analiz imkanı sağlanarak; derinlik, doğrusal olmayan davranış ile zemin rijitliğinin değişimi ve zemin profilinin katmanlanması dikkate alınmaktadır. Kazık yanal olarak yer değiştirdiğinde, zeminin bir kama gibi zemin yüzeyinde aşağı ve yukarı hareket ettiği belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Yanal kazık davranışını değerlendirmek için p-y eğrisi yaklaşımının gösterimi (Christensen, 2006)

Şekil 2.6'da bir zemin kamasının dış kuvvetlerle yukarı doğru hareket ettiği görülmektedir. Kamanın yukarı doğru hareket etmesiyle kazık yüzeyinin pasif tarafında bir F_f sürtünme yüzeyi oluşur ve bu yüzey kazık ekseninde kuvvetler oluşturmaktadır.



Şekil 2.6. Dış kuvvet ile toprak kama hareket (Reese ve diğ., 2006)

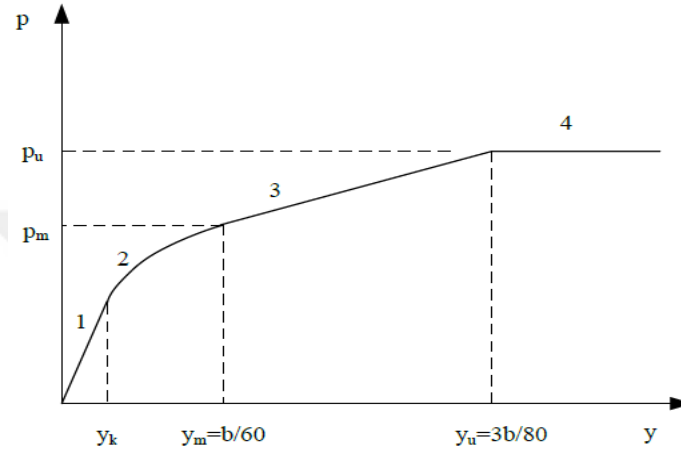
2.4.1. P-y eğrisinin karakteristik özellikleri

Zemin tabakası tepkilerini modellemek için kullanılan p-y eğrilerinin elde edilmesinde; p, kazık birim uzunluğu başına etkiyen yanıl yükü ve y, kazık yanıl yer değıştirme miktarını temsil etmektedir (Matlock, 1970). Statik yükleme koşulları altındaki zemin hakkında aşğıdaki bölümlerde, kum için doğrusal olmayan p-y eğrileri sunulmuştur. Kullanılan modelleme yöntemi değışik zemin tipleri üzerinde yapılan tam ölçekli deneylere dayanmaktadır. Ayrıca, normal konsolide kilin sürekli yük altındaki

kazıklar için saha testleri yapılması önerilmektedir. p-y eğrilerinin belirli bir zemin tipi için tahmininde suyun rolüne özellikle atıf yapılmıştır.

2.4.2. Su tabakasının üstünde ve altında kumun (Reese) tepkisi

Kısa bir süre statik yükleme altında su tabakasının üstünde veya altında olan Reese kumu için aşağıdaki aşamalarla bir p-y eğrisi oluşturulmuş ve Şekil 2.7'de açıklandığı gibi dört bölümden oluşmaktadır.



Şekil 2.7. Reese Kumu için p-y eğrilerinin görünümü (Reese ve Van Impe, 2001)

Birinci bölge yukarıda verilen p-y eğrisinin doğrusal kısmı (Denklem 2.1):

$$p = (K_{py}z)y \quad (2.1)$$

Burada:

p : Yanal zemin direnci

K_{py} : Zemin yatak katsayısı

z : Zemin altı derinliği,

y : Yanal kazık yer değiştirmesi

Çizelge 2.1'den uygun K_{py} değeri seçilmelidir.

Çizelge 2.1. K_{py} 'nin kum için temsili değeri (Reese ve diğ. 2006)

Relatif yoğunluk	Gevşek	Normal	Yoğun	
Batmamış	6.8	24.4	61	MN/m ³
Batık	5.4	16.4	34	MN/m ³

İkinci bölüm yukarıda verilen p-y eğrisinin parbole benzeyen kısmı aşağıdaki şekilde tanımlanır (Denklem 2.2-2.5).

$$p = Cy^{1/n} \quad (2.2)$$

Burada C ve n Denklem 2.3, 2.4, ve 2.5'de belirlenmiştir. Üçüncü Bölüm yukarıda verilen p-y eğrisinin ikinci doğrusal kısmı:

$$C = \frac{p_m}{y_m^{1/n}} \quad (2.3)$$

$$n = \frac{p_m}{my_m} \quad (2.4)$$

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (2.5)$$

Burada $p_u = A_{sps}$; $y_m = x = \frac{b}{60}$; $p_m = B_{sps}$; $y_u = \frac{3b}{60}$; p_s 2.6 ve 2.7 denklemlerinde hesaplanan küçük değerler seçilerek belirlenenen nihai zemin direncidir; A_s ve B_s ise grafik kullanılarak belirlenebilir (Reese ve diğ. 2006).

$$p_{st} = y'z \left[\frac{K_0 z \tan \varphi' \sin \beta}{\tan(\beta - \varphi') \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \varphi')} (b + z \tan \beta \tan \alpha) + K_0 z \tan \beta (\tan \varphi' \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \right] \quad (2.6)$$

$$p_{sd} = K_a b y' z (\tan^s \beta - 1) + K_0 b y z \tan \varphi' \tan^4 \beta \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{\varphi'}{2}; \beta = 45 + \frac{\varphi'}{2}; K_0 = 0.4; K_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi'}{2})$$

Dördüncü bölge başlangıç doğrusal kısmının, Denklem 2.8 ile belirlenebildiği ve parabolik bölümün kesiştiği yer değiştirme:

$$y_k = \left(\frac{C}{k_{py}Z} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (2.8)$$

2.4.3. Florida kalkerı (McVay) için p-y direnci

Aşağıda sunulan kalker için p-y eğrilerinin elde edilme yöntemi McVay ve diğ.'ne (2004) dayanmaktadır. Rapor, tam ölçekli alan testlerinin kullanılmasıyla sunulan eğrilerin etkinliğini göstermektedir. Burada, yapılmış olan yanal yük testleriyle, birden çok p-y eğrisi elde edilmiş ve bu sonuçlar kullanılarak zemin için örnek eğriler elde edilmiştir. p-y eğrileri birime bağlıdır. Metrik sistem için, kayaçların kaya yanal direnci p, serbest basınç dayanımları (q_u) ve kazık çapı için kullanılan birimler sırasıyla kN/m, kN/m² ve m'dir. Aşağıdaki denklemlerle normalize edilmiş eğriler elde edilebilir.

$$p = 13750 D^{0.85} q_u^{0.15} \left[\frac{y}{D} \right] \quad 0 < \frac{y}{D} < 0.004 \quad (2.9)$$

$$p = D^{0.85} q_u^{0.15} \left[1083 \left[\frac{y}{D} \right] + 51 \right] \quad 0 < \frac{y}{D} < 0.004 \quad (2.10)$$

Burada:

D: Kazık çapı

q_u : Zemin basınç dayanımı

y: Kazık yanal yer değiştirmesi

2.5. Dinamik Analiz - Zaman Tanım Alanında (ZTA) Analiz

2.5.1. ZTA analizinin amacı

Doğrusal olmayan ZTA analiz yönteminde; köprünün farklı elemanlarının doğrusal davranıştan çıkarak kaybettiği dayanımının yanı sıra, yer hareketinin özellikleri, köprü yanal yük dağılımındaki değişim, doğrusal olmayan dinamik analiz sırasında kullanılan özellikler göz önünde bulundurulur. Burada, yükleme yapının düğüm noktalarına veya elemanlarına doğrudan uygulanan harici yükler olmayıp, temel yer değiştirmesi veya yer hareketi ivmesidir. Tasarım yer değiştirmeleri, hedef yer değiştirmeyi kullanarak kurulmak yerine, yer hareketi kayıtlarının takımları kullanılarak doğrudan dinamik analiz yoluyla belirlenir. Yapı, yer hareketi nedeniyle aniden yer değiştirdiğinde, yapı elemanlarında atalet kuvveti meydana gelir ve sonuç olarak yapı elemanlarında iç kuvvetler oluşur. Her köprü taşıyıcı sistemi, yer hareketi özelliklerine ve büyüklüğüne göre uyarılan farklı baskın mod şekillerine ve frekanslarına sahiptir (Aviram ve diğ., 2008).

Verev köprüler gibi karmaşık 3B yapılar için, belirli bir elemanda veya belirli bir noktada, maksimum gerilmeyi üreten deprem yönü belirgin değildir. Bu nedenle, tüm köprü tipleri için; tüm baskın modların uyarıldığından, kritik deprem yönünün

yakalandığından, en yüksek tepkinin üretildiğinden ve yapıdaki sismik talebin doğru bir şekilde tahmin edildiğinden emin olmak için çeşitli girdi açılarındaki birkaç farklı deprem hareketi kullanılarak ZTA analizi yapılabilir. Bir başka yaklaşım da, bir girdi açısında üç bileşenin daha büyük bir deprem yer hareketi kayıtları grubunun kullanılmasıdır. Sismik hareketler yapının daha yüksek frekanslarını uyarabildiğinden, köprü sisteminin daha yüksek modlarını ihmal etmek, dinamik analiz sonuçlarında önemli hatalara neden olabilir.

ZTA analiz yönteminin temel dezavantajı, gereğinden fazla analitik çözüm, yüksek miktarda hesap ve bilgi üretmesidir. Analiz sırasında, ana köprü bileşenlerinin talepleri, elemanlar ve malzemeler için belirlenen doğrusal olmayan davranışlara dayanarak zamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. Bu değerlendirme, farklı açılarda uygulanan birkaç girdi yer hareketi için gerçekleştirilir ve yapının tepkisi her adımda kaydedilir. Bu zorluklara rağmen, ZTA analiz yöntemini kullanarak talebin değerlendirilmesi, yapı içindeki iç kuvvetlerin yeniden dağıtılmasına izin verdiği için daha gerçek sonuçlar vermektedir. Bu nedenle her bir eleman, davranış spektrum yönteminin gerektirdiği şekilde maksimum tepe değerleri için değil, yapı içerisinde dinamik uyarım sırasında üretilen gerçek kuvvetler için tasarlanmıştır. Ek olarak, sismik talep, yapıda beklenen en büyük talebi belirlemek için düğüm noktası deformasyonlarının ve eleman kuvvetlerinin ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak istatistiksel yaklaşımlarla tahmin edilebilir (Aviram ve diğ., 2008).

2.5.2. Çözüm yöntemleri

Yapısal sistemlerin dinamik davranışın çözümü için en genel yaklaşım, dinamik denge denklemlerinin zaman içinde belirli bir noktada doğrudan sayısal entegrasyonudur. Bu analiz, yapı statik durumundayken başlatılır ve belirli bir uyarım altında tam yapısal davranışını ZTA'da elde etmek için yer hareketi girdisi süresince eşit zaman artışlarıyla tekrarlanır. Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için geliştirilen çok sayıda doğru, yüksek dereceli, çok adımlı yöntemler bulunmaktadır (Aviram ve diğ. 2008). Bununla birlikte, gerçek köprü sistemlerinde yer değiştirme, hız ve ivmeyi içeren hareketin diferansiyel denklemleri; çoğu yapısal malzemenin doğrusal olmayan davranışı, temas yüzeyleri arasında geliştirilen sürtünme kuvvetleri ve elemanların burkulması nedeniyle sonuç vermeyebilir. Bu nedenle, köprü yapılarının hareket denklemlerinin çözümü için sadece tek adımlı yöntemler önerilmektedir (Aviram ve diğ. 2008).

Adım adım çözüm yöntemleri, ayrı zaman adımlarında dinamik dengeyi sağlamaya çalışır. Özellikle yapıda doğrusal olmayan davranışın oluşumuyla, tüm yapısal sistemin rijitliği ve dayanımı, kuvvetlerin yeniden dağıtılması nedeniyle yeniden hesaplanmalıdır. Çok sayıda sayısal teknikler daha önce yapılmış çalışmalarla önerilmiş ve bunlar genellikle açık veya kapalı entegrasyon yöntemleri olarak sınıflandırılmıştır (Aviram ve diğ. 2008). Doğrudan açık entegrasyon yöntemlerinde her zaman dilimi için iterasyon gerekmediğinden dolayı, yüksek hızlara ulaşılabilir. Modelde her türlü sönümleme ve doğrusal ötesi davranışa izin verilmekte; fakat, kararlı sonuçlar elde etmek için çok küçük zaman dilimlerine ihtiyaç duyulmakta ve bu nedenle daha büyük ve gereksiz çıktı verileri üretilmektedir. Ayrıca, entegrasyon yöntemleri arasında Newmark yöntemi ve köprü ZTA analizi için Hilber-Hughes önerilmektedir (Aviram ve diğ., 2008).

2.6. ZTA TDY-2018

2.6.1. Tanım

ZTA'da doğrusal olmayan hesap, deprem yer hareketinin etkisi altında taşıyıcı sistemin hareket denklemlerini ifade eden differansiyel denklem takımının zaman artımları ile adım adım doğrudan integrasyonuna karşı gelir. Bu işlem sırasında, doğrusal olmayan davranış nedeni ile sistem rijitlik matrisinin zamanla değişimi gözönüne alınır.

2.6.2. Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi

ZTA'da yapılacak doğrusal olmayan hesaplamalarda, en az 11 deprem yer hareketi takımı kullanılacak olup, aynı depremden seçilecek kayıt sayısı üçü geçmeyecektir (TBDY 2018). Sünek elemanlarda şekildeğiştirme talepleri, sünek davranışa sahip olmayan elemanlarda iç kuvvet talepleri, yapılan analizlerin (en az $2 \times 11 = 22$ analiz) her birinden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanacaktır.

TBDY'e (2018) göre, yapı taşıyıcı sistemlerinin ZTA'da deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır. Yapının bulunduğu bölgeye ait geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır. Sahaya özel depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için deprem tehlikesi ayırttırma işleminden yararlanılabilir. Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, yapının bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir.

Ayrıca, 3B hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü (SSRS) alınarak bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Her iki yatay bileşen aynı ölçek katsayıları ile ölçeklendirilir. T_p köprünün en yüksek modal kütle katılım oranına sahip moduna ait doğal titreşim periyodudur.

2.7. Sap2000 ile ZTA Analiz

2.7.1. Genel hususlar

Diferansiyel hareket denklemlerinin çözümü için doğrudan integrasyon doğrusal ve doğrusal olmayan ZTA analizi SAP2000'de (2012) mevcuttur. Doğrusal analiz için modal süperpozisyon, doğrudan integrasyon yönteminden daha yüksek verimlilikle kullanılabilir. Doğrusal olmayan geçici analiz için doğrudan integrasyon kullanıldığında, algorithmadaki tüm doğrusal olmayan türler (malzeme, geometrik) dikkate alınır. Doğrusal

olmayan bir doğrudan integrasyon ZTA analizi sıfır başlangıç koşullarından (yüklenmemiş yapı) başlatılabilir, doğrusal olmayan bir statik analizden (itme) veya başka bir doğrudan integrasyonlu ZTA analizinden devam edilebilir.

2.7.2. Zaman entegrasyon yöntemleri ve değişkenleri

Doğrusal ve doğrusal olmayan ZTA analizleri için aynı zaman integrasyon değişkenleri ve hususları kullanılabilir. Doğrudan integrasyon sonuçları zaman dilimine boyutuna son derece hassastır ve bu nedenle analiz, yakınsamaya kadar zaman dilimi azaltılarak tekrarlanmalıdır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, taşkın kaynaklı oyulmaya maruz kalan köprü kazıklarının sayısal analizleri SAP2000 (2012) programı ile yapılmıştır. Örnek durum çalışması olarak, Antalya Boğaçay üzerinde bulunan oyulmaya karşı hassas olan kazıklı temellere sahip Boğaçay Köprüsü kullanılmıştır. Köprünün 3B modeli zemin yapı etkileşimini (ZYE) göz önünde bulundurmak için, çubuk elemanları ve doğrusal olmayan yaylar kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm orta ve kenar ayaklarda kazık alt uçları sabit mesnet ile mesnetlenmiştir. Köprü ayaklarına etkiyen zemin tepkisini modellemek için, zemin katmanlarına göre değişen bağlantı elemanları köprü enine doğrultusunda kullanılmıştır. ZYE'ni göz önüne almak için, doğrusal olmayan yaylar, zeminle çevrelenmiş tüm yapı elemanlarının çevresinde düzenli aralıklarla kullanılmıştır.

Ayrıca, oyulma derinliğinin köprü performansı üzerindeki etkisi tüm ayakların eş zamanlı oyulması ve çeşitli oyulma derinlik senaryoları düşünülerek araştırılmıştır. SAP2000 yazılımı kullanılarak köprülerin doğrusal olmayan davranışını saptamak için, sismik yükler altında plastik mafsalların oluşması olası en yüksek moment bölgelerinde yığılı bir plastisite modeli kullanılmıştır. (Dong ve diğ., 2013). Bunun nedeni kolonların kesme kapasitesinin eğilme kapasitesinden daha büyük olmasıdır (Bölüm 4.3.1).

3.1. Mevcut Köprünün Özellikleri

Açıklık sayısı	: 7
Köprü genişliği	: 14.75 m
Taşıt yolu genişliği	: 11.00 m
Trafik hesap şerit sayısı	: 2 şerit
Sol yaya kaldırımı genişliği	: 3.00 m
Sağ yaya kaldırımı genişliği	: 3.00 m
Ayak eksenleri arası açıklıklar	: Kenar 22.30 m, orta 22.60 m açıklıklarda
Köprü toplam boyu	: 157.6 m
Üst yapı tipi	: T kesitli kiriş
Hareketli yük sınıfı	: H30 S24
Orta ve kenar ayak tipi	: BA kenarları yarı dairesel kesitli kolon
Temeller	: Kazık temel

3.2. Malzeme Özellikleri

Mevcut köprüde kullanılan beton sınıfı, öngerilmeli kirişler için C40, temeller için C20, grobeton için C14 ve diğer üst yapı elemanları için C25 olarak doğrudan projeden alınmıştır. Mevcut köprüde, tüm elemanlarda kullanılan donatı çeliği S420, fret olarak da S220 donatı çeliği alınmıştır. TS 500'e göre tasarım malzeme özellikleri Çizelge 3.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. İlgili bölümlerin malzeme özellikleri

	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
Tabliye	25	30000
Öngerilmeli kirişler	40	34000
Başlık kirişleri	25	30000
Kolonlar	25	30000
Kazıklar	20	28000

3.3. Çalışma Alanı ve Köprü Geometrisi

Boğaçay Köprüsü 36.856831 enlem ve 30.631023 boylamda Antalya ili içinde yer almaktadır. Semt/Mahalle olarak Gürsu Mh. ve Konyaaltı ilçesine bağlıdır. Rakımı 2 metredir. Köprü'nün yapım yılı 2004'tür. Boğaçayı 2 Köprüsü uydu görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Boğaçay köprüsünün uydu görüntüsü



Şekil 3.2. Köprü genel görünüşü

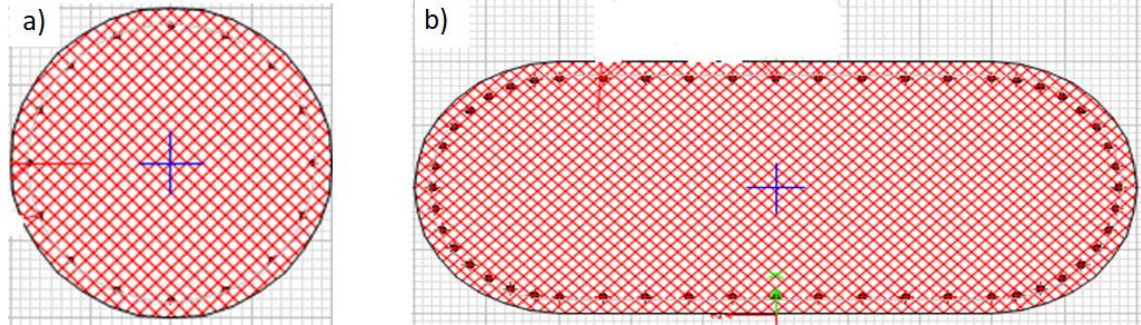


Şekil 3.3. Köprü ana elemanlarına ait bir görünüş

7 açıklıklı olan köprü 157.6 m uzunluğuna sahiptir. Trafiğe iki yönden açıktır. Üst yapı, 22 cm kalınlıkta yerinde dökme BA tabliyeli merkez arasında 1.65 m mesafeye sahip dokuz adet basit mesnetlenmiş asimetrik I öngerilmeli beton kirişlerden oluşmaktadır. Deprem esnasında köprü kirişleri genellikle elastik kaldığından dolayı, köprülerin sismik performans analizi için detaylı modelleme gerektirmemektedir. I-kirişler, ayak başlığında yer alan 40 cm x 25 cm x 7 cm ebatlarındaki köprü ayağı oturma yerlerinde lamine elastomerik pedler üzerine oturmaktadır. I-kirişlerin enine doğrultudaki hareketi deprem takozları ile engellenmiştir. Her köprü ayağında, köprü tabliyesi monolitik olmayan bir yapıdadır. Burada, kauçuk genişleme derzleri, her köprü ayağında ortalama 10 cm genişliğinde bulunmaktadır. Boğaçay Köprüsü, sekiz adet BA köprü ayağına sahiptir. Üst yapının merkezi ve üst yapının temeli arasındaki düşey uzaklık 7.8 m olup 2.5 m x 1 m kesite sahiptir. Kolonlar 1.2 x 1.1 m kesite sahip başlık kirişi ile bağlanmıştır. Kolonların zayıf doğrultusu köprü boyuna eksenine ile üst üste gelmektedir.

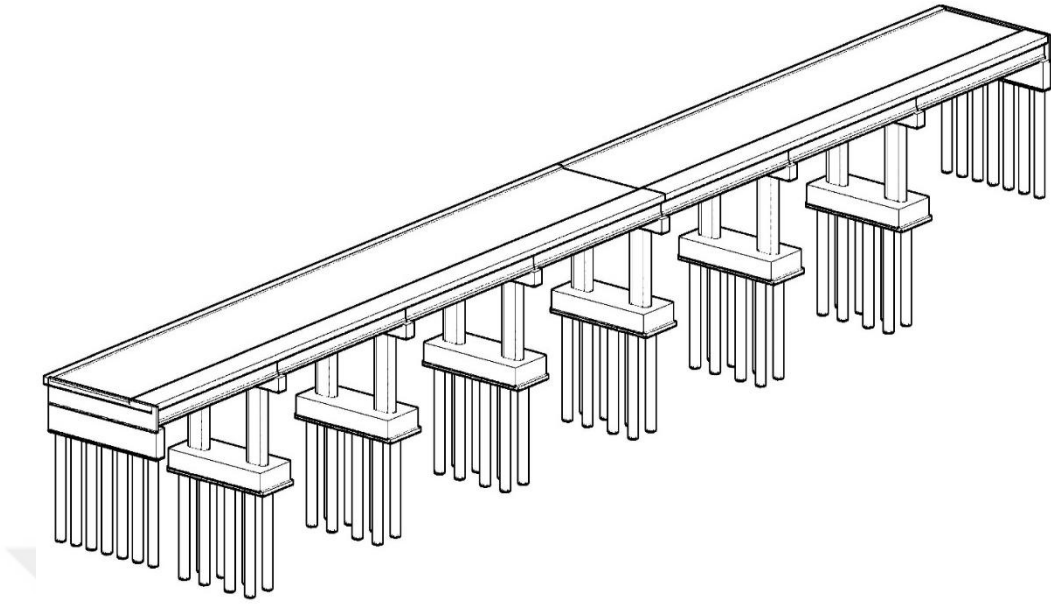
Çizelge 3.2 Kazık / kolon kesitleri

Kolon		Kazık	
Takviye	Iskele kesiti	Takviye	Kazık kesiti
C25, S420	(2x1m)	C20, S420	(1m diameter)
Boylamasına	44 Ø 26	Boylamasına	16 Ø 26
Enine	Ø16 aralıklı (10-15cm)	Enine	Ø12helezonik aralıklı (10-15cm)

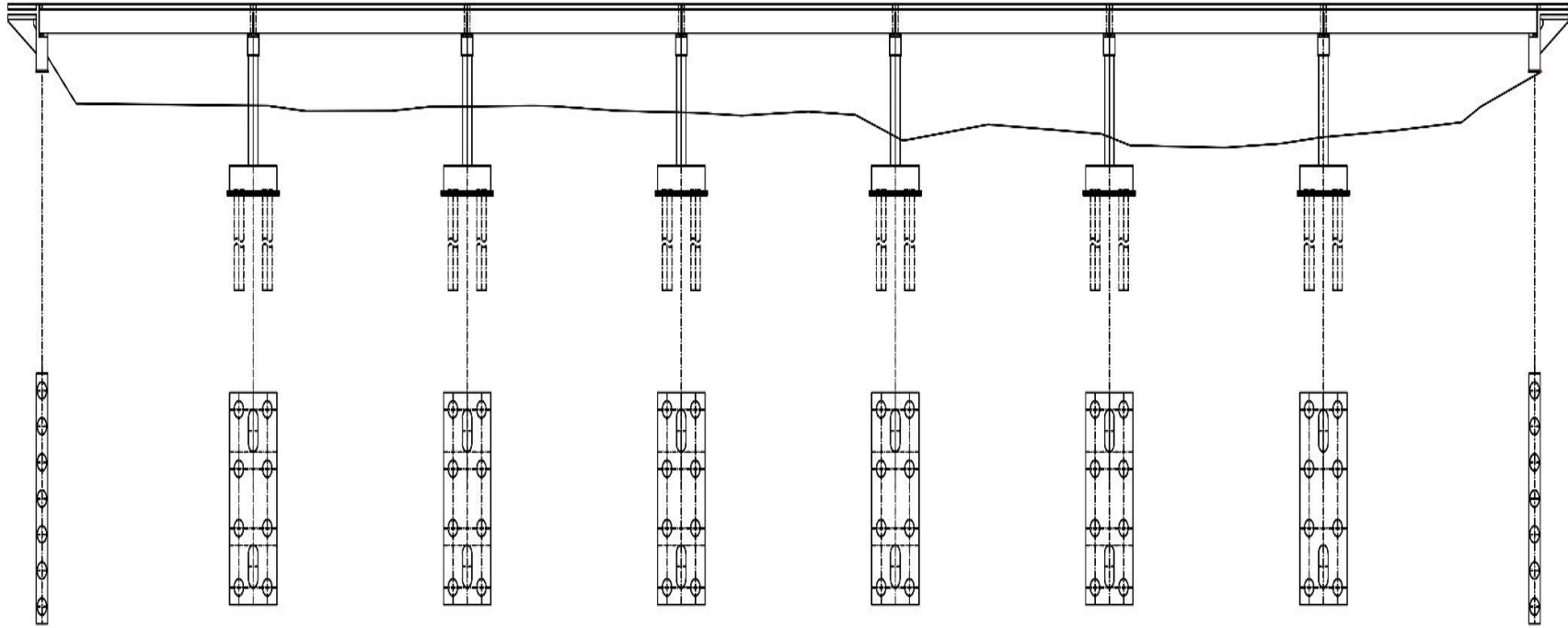


Şekil 3.4. a) Kazık kesiti b) kolon kesiti

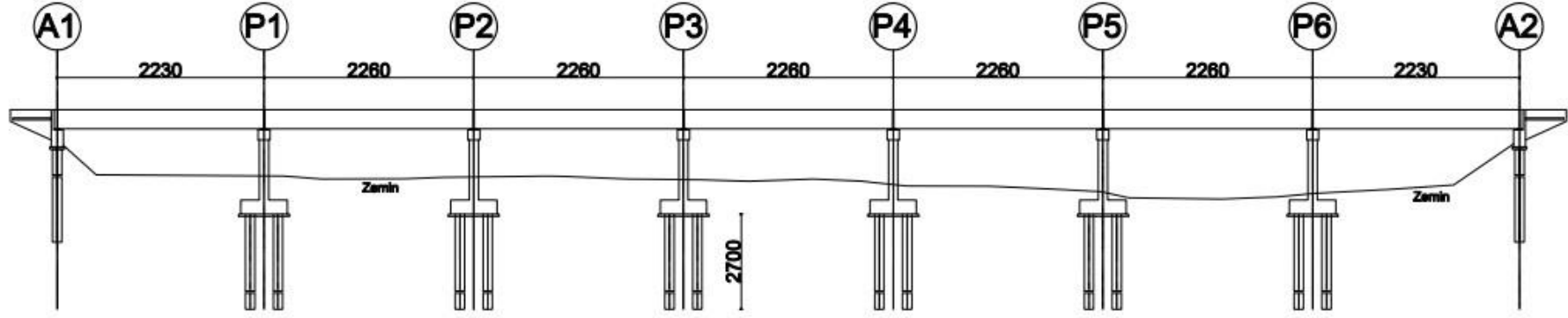
Köprü ayağı ve başlık kirişleri monolitik olarak dökülmüştür ve her ayak Şekil 3.3'de gösterildiği gibi uzunluğu 27 m olan sekiz kazıklı kazık grubu ile desteklenmektedir. Her bir köprü ayağı, her kolonda 44 Ø 26 nervürlü (S420) boyuna donatıya sahiptir. Enine donatıyı, 10-15 cm aralıklarla yerleştirilmiş Ø16 nervürlü çubuklar (S420) oluşturmaktadır. Kazık başlığının kalınlığı 1.5 m, uzunluk ve genişliği 15 x 5 m'dir. Her kazığın çapı 100 cm'dir. Her bir kazıkta boyuna donatı olarak 16 Ø 26 kullanılmıştır. Enine donatı, merkezde 10-15 cm'lik aralıklarla Ø 12 fret ile sağlanmıştır. Şekil 3.3. köprü boykesitini ve altyapı detaylarını göstermektedir. Üstyapı ve kolon detayları Şekil 3.7'de verilmiştir.



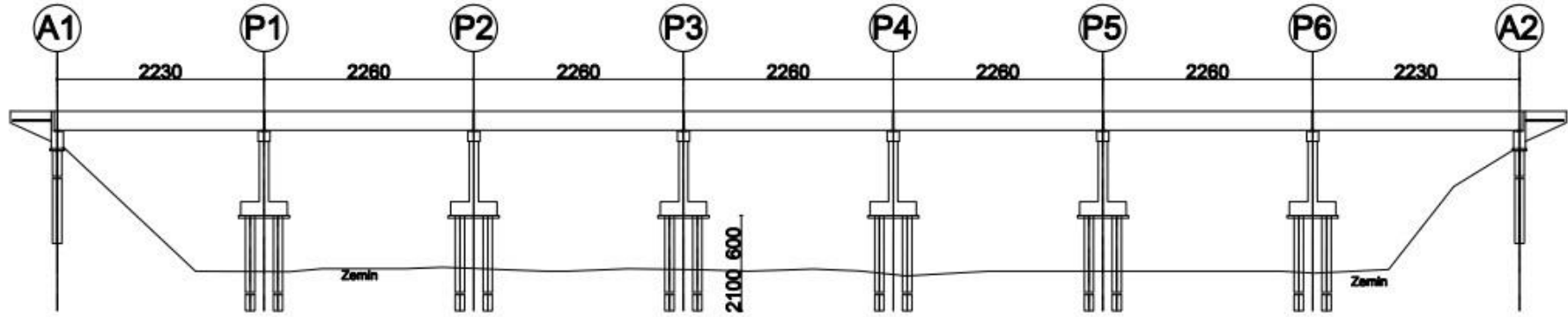
Şekil 3.5. Köprünün üç boyutlu görünümü



Şekil 3.6. Köprünün yüksekliği görünümü

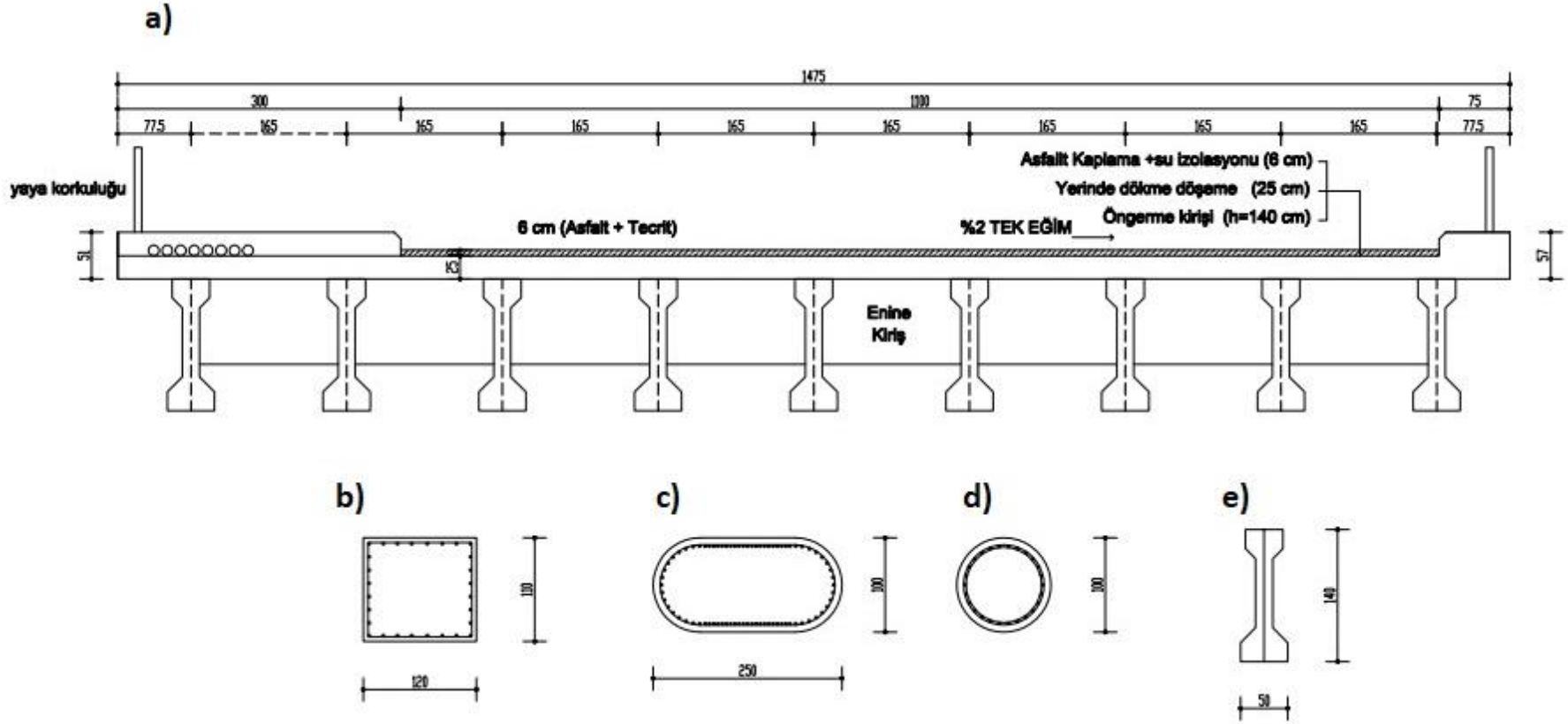


(a)



(b)

Şekil 3.7. (a) Köprünün oyulmasız boykesit görünümü (b) Köprünün tam oyulmalı boykesit görünümü (tüm birimler cm cinsinden)



Şekil 3.8. a) Köprü üst yapı kesiti; b) kolon başlık kirişi; c) kolon kesiti; d) kazık kesiti; e) taban kesiti (tüm birimler cm cinsinden)

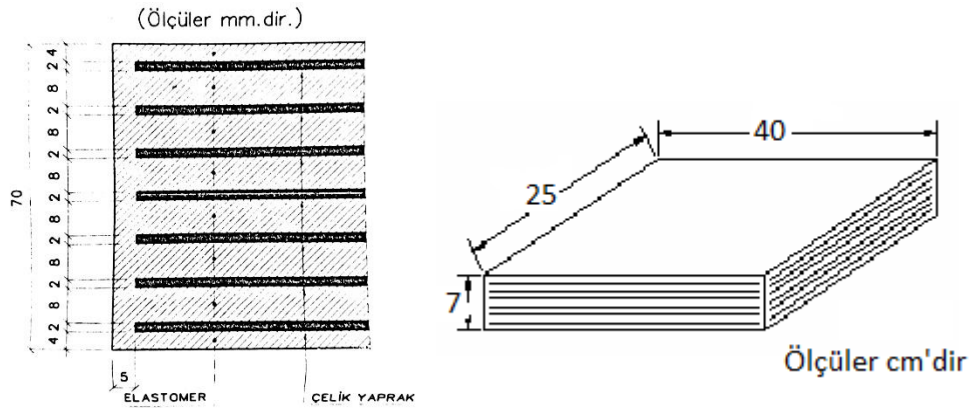
3.4. Elastomerik Mesnetler

Elastomerik mesnet pedlerinin yanal kesme kapasitesi, elastomerik ped ve mesnet yatağı arasındaki dinamik sürtünme kapasitesi ya da yastığın kesme gerilme kapasitesi ile kontrol edilir. Sürtünme kuvveti kapasitesi geçerliyse, uygulanan yanal kuvvet sürtünme kuvveti kapasitesini aşınca kayma deformasyonları nedeniyle elastomerik ped doğrusal davranış gösterir. Aşıldığında, ped kayar ve rijitlik neredeyse sıfıra iner. Kauçuğun kesme gerilme kapasitesi geçerliyse, ped göçene kadar doğrusal olarak çalışır. Elastomerik pedler elastik olarak modellenmiş olup mesnet rijitliği Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır. Şekil 3.9 kullanılan tipik elastomerik mesnet boyutlarını göstermektedir.

$$K_{elastomer} = \frac{G \times A}{h_{rt}} = \frac{1430 \times (0.25 \times 0.40)}{0.056} = 2553.6 \text{ kN/m} \quad (3.1)$$

Burada G , elastomer kesme modülü, A , elastomer kesit alanı ve h_{rt} , toplam elastomer yüksekliğidir. Köprü kiriş yataklarındaki elastomerler için kesme modülü değerleri rijitliklerine bağlı olarak 1.10 – 1.65 MPa arasında değişmektedir. Bu çalışmada kayma modülü 1.43 MPa AASHTO (2002)'dan alınmıştır. Bu, yeni kauçuk için tipik olandan biraz daha yüksek bir değer olabilmekte, ancak bu tip elemanların büyük bir kısmının 20 - 30 yaş arasında olduğu ve rijitleştiği kabul edilmiştir.

Elastomerik pedlerin düşey eksen yönündeki rijitliklerinin çok yüksek olmasından ve düşey yer değiştirmenin çelik plakalar nedeniyle ihmal edilebilecek kadar düşük seviyelerde olmasından dolayı, mesnet boyutlarından bağımsız olarak mesnet eksenel rijitliği 100000 kN/m alınmıştır. Ayrıca, mesnetlerin dönme rijitlikleri ihmal edilmiştir.



Şekil 3.9. Elastomerik mesnet boyutları (25cm x 40cm x 7cm) ve detayı



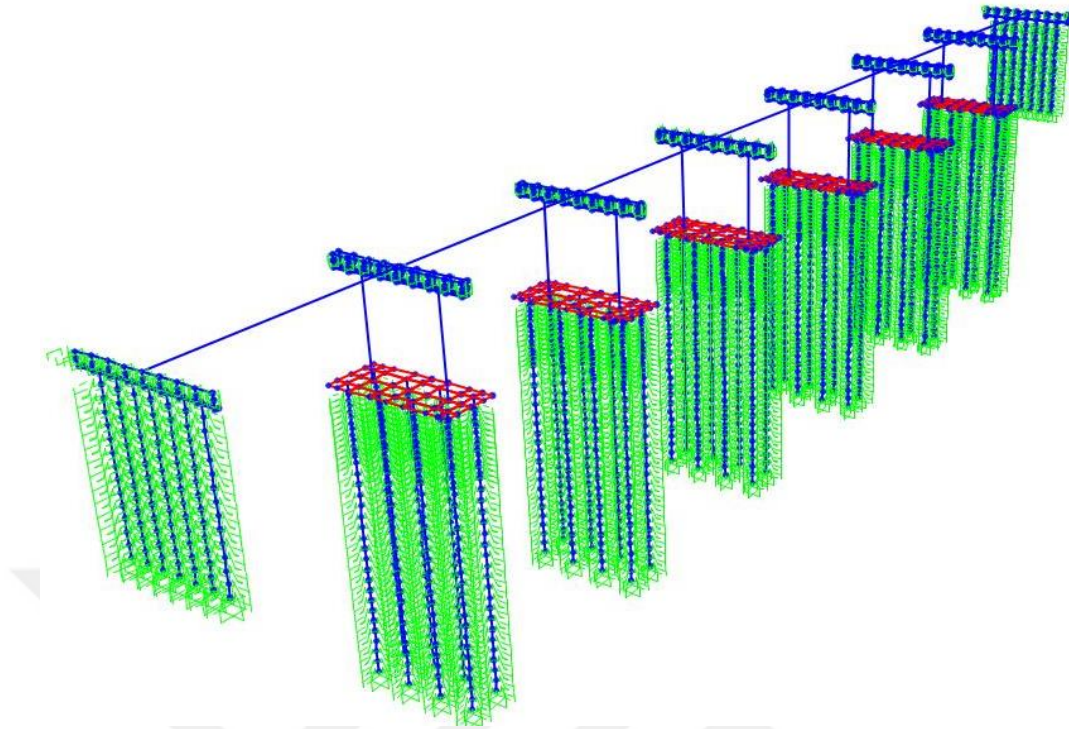
Şekil 3.10. Köprü orta ayağı üzerinde yer alan elastomer mesnetlere ait bir görünüm

3.5. Genleşme Bağlantıları

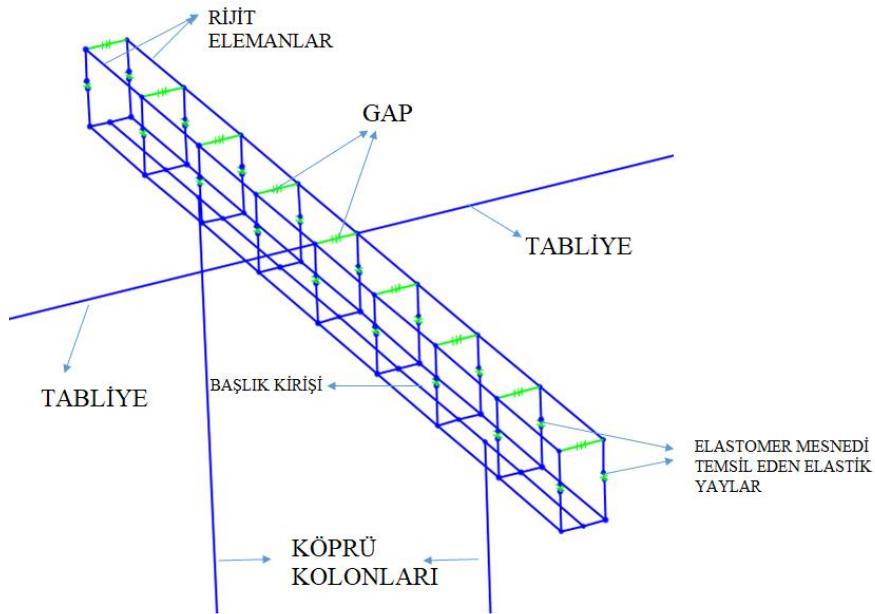
SAP2000’de (2012) tanımlanan boşluk elemanı, boyuna yer değiştirmeler açıklıkların arasındaki boşlukların yanı sıra dayanaklar arasındaki boşlukları kapattığında, kirişlerin birbirine boyuna doğrultuda çarpma olasılığını hesaba katmak için kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, köprü kirişlerinin boyuna yönde ve kenar ayaklarında proje verileri doğrultusunda, 10 cm boyuna yer değiştirme yapılmasına izin verilecek şekilde boşluk (gap) elemanı tanımlanmıştır. Bu eleman, sadece basınç etkileri altında davranış göstermekte olup, tabliyede derz konumlarında kullanılmıştır.

3.6. Köprünün Analitik Modellemesi

Köprü sisteminin doğrusal olmayan ZTA analizini yapmak için SAP2000 (2012) yazılımı kullanılarak çubuk elemanlardan oluşan 3B modeli, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Köprünün kolon, başlık kirişi, döşeme, tabliye gibi üstyapı elemanları 3B çubuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Elemanların düğüm noktaları, altı serbestlik derecesine sahip olup, bunlardan üçü dönme diğer üçü de ötelenmedir. Genleşme derzi bulunan ayaklarda döşeme elemanları kaldırılmış ve üstyapı süreksizliğe uğratılmıştır (Şekil 3.12).

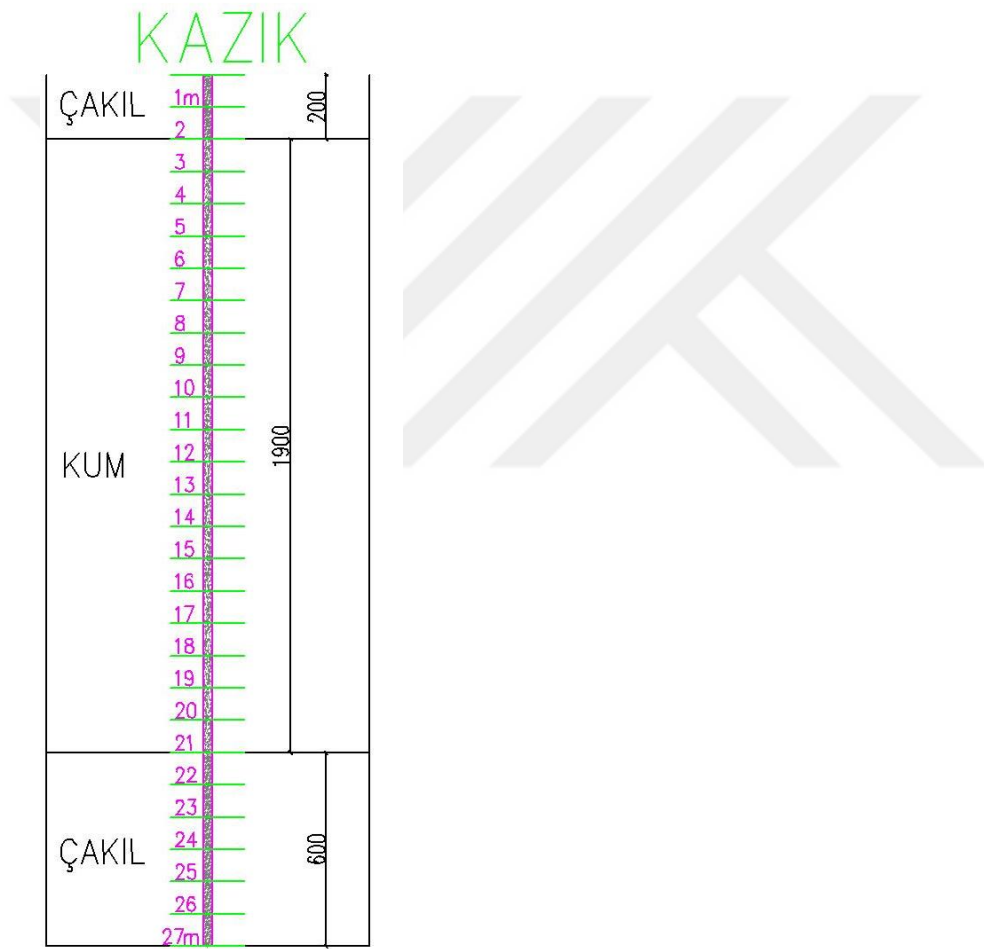


Şekil 3.11. Sap2000 ile köprünün 3B modeli



Şekil 3.12. Elastomer ve genişleme derzi model detayı

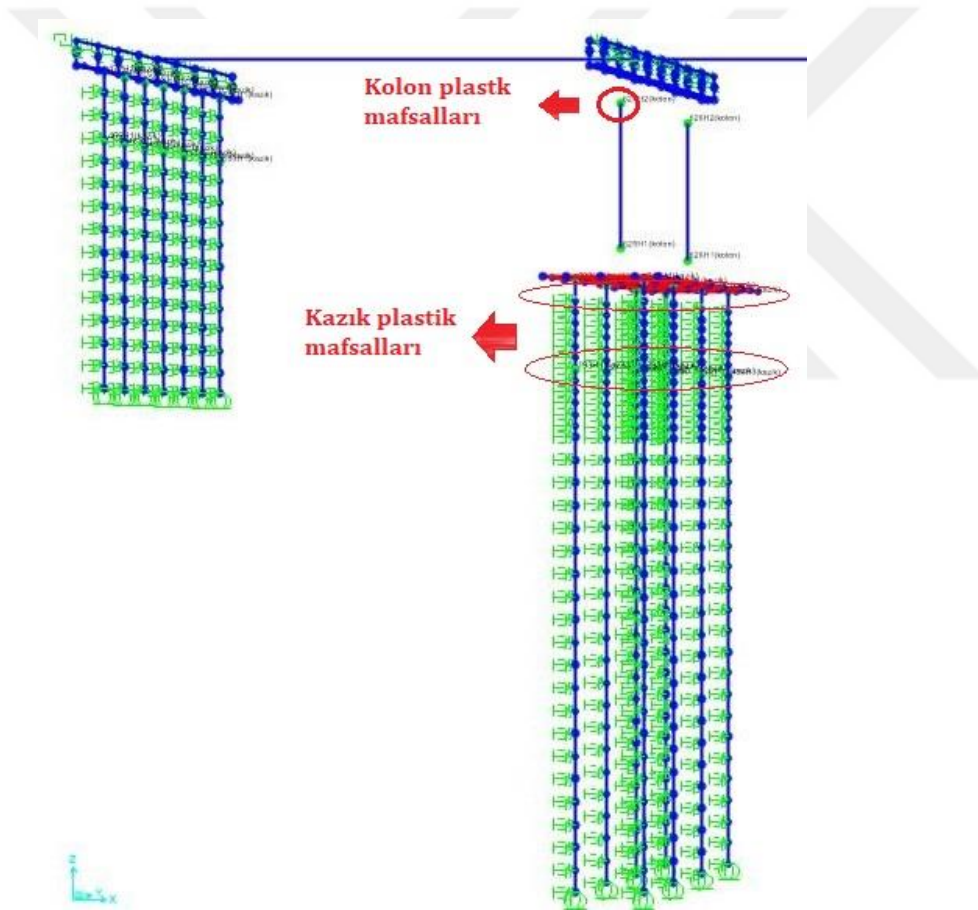
Üst yapı ve başlık kirişleri elastik elemanlar olarak modellenmiş olup elastik bölgede kalması beklenmiştir (Caltrans, 2013). Köprü kazıklarını çevreleyen zemini modellemek için Caltrans (2013) düzenlemelerine göre, köprüde enine doğrultularda etkiyen çoklu doğrusal kuvvet – yer değiştirme özelliklerine sahip bağlantı elemanları kullanılmıştır. Burada, zemin-yapı etkileşimini göz önünde bulundurmak için, doğrusal olmayan yaylar, kazıklar çevresinde düzenli aralıklarla kullanılmıştır. Bu yayların yanıl yük yer değiştirme eğrileri kum zemini için (p-y eğrileri) Reese'e (1975) göre tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan p-y yayları ile ZYE modellemesi, aynı zamanda Banerjee ve Prasad (2011), Prasad ve Banerjee (2013), Alipour ve diğ. (2013), Avşar ve diğ. (2017) tarafından incelenmiştir. Saha gözlemleri sırasında, köprünün bulunduğu yerde zemin tipi kum ve çakıl olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13). Doğrusal olmayan yaylar kazıklarda 0.5 m aralıklarla kazık boyunca kullanılmıştır.



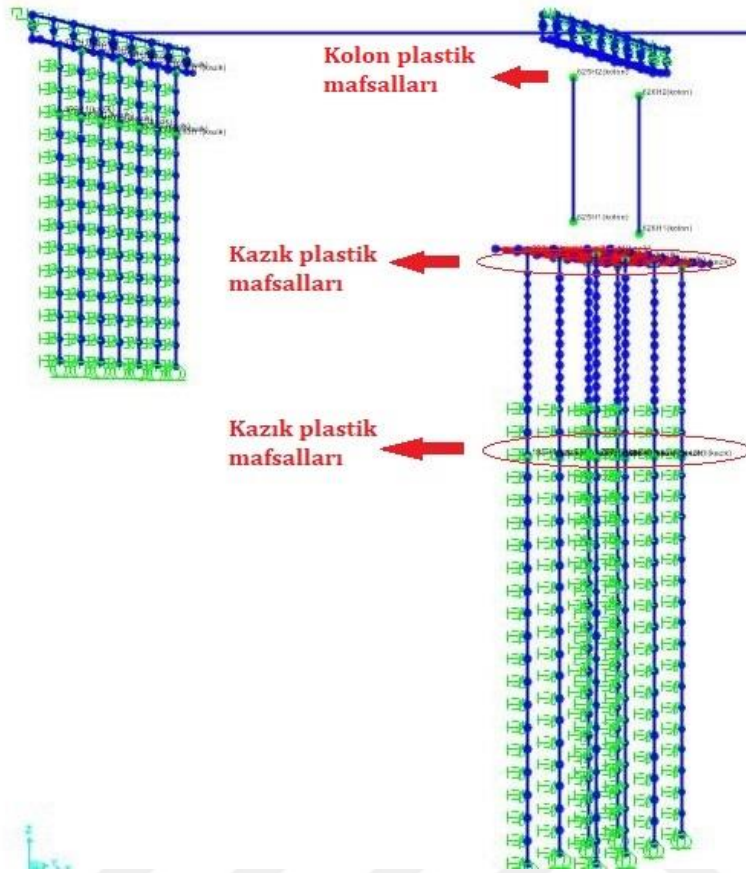
Şekil 3.13. Zemin tipi kum ve çakıl

Sıfır oyulmadan beklenen en büyük oyulma durumuna kadar her oyulma durumu için, 0.5m (Avşar ve diğ., 2017) derinlik artışı ile yeni bir analitik model oluşturulmuştur. p-y eğrilerine karşılık gelen doğrusal olmayan yaylar zemin malzemesinin, yani kazıklardaki yanıl direncin kaldırılmasını simüle etmek için modelden çıkarılmıştır.

Başka bir deyişle, oyulma derinliği sabit artış kullanılarak 0.5 m artış ile 6 m derinliğine kadar yükseltilmiştir. Böylece, sıfır oyulma (orijinal köprü modeli) ile birlikte 6 m oyulma derinliğine kadar 13 farklı analitik köprü modeli oluşturulmuştur. Oyulma derinliğinin kısa aralıklarla etkisinin araştırılmasının nedeni, oyulma derinliğindeki belirsizliktir. Ayrıca, deprem gerçekleştiğinde asıl oyulma derinliği bilinmediğinden, her 0.5 m oyulma derinliği için köprünün sismik tepkisi göz önüne alınarak her olası oyulma derinliği senaryosu dikkate alınmıştır. Köprünün doğrusal olmayan davranışını SAP2000 (2012) ile saptamak için, kazıkların en büyük moment bölgelerinde sismik yükler altında plastik mafsallar oluşması muhtemel olan yerlerde plastik mafsalları tanımlanmıştır (Dong ve diğ. 2013). Oyulmasız durumdaki köprüde en büyük moment kazık üst ucunda ve kazık üst ucundan 3 m aşağıda oluşmuşken, tam oyulma durumunda kazık üst ucundan 8 m aşağıda oluşmaktadır. Benzer şekilde, ara oyulma senaryoları için kazık üzerindeki plastik mafsalları konumları, 3 m ile 8 m arasında doğrusal interpolasyonla saptanmıştır. Kolonlarda alt ve üst uç noktalarına en büyük moment bölgesi olduğundan dolayı plastik mafsalları tanımlanmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Oyulmasız köprü modelin plastik mafsalları yerleri



Şekil 3.15. Tam oyulmalı köprü modelin plastik mafsalları yerleri

3.6.1. Modellemede kullanılan teknikler

Köprünün modeli aşağıdaki hususlar dikkate alınarak SAP2000 (2012) programıyla kurulmuştur:

- Model 3B çubuk elemanlarından oluşmaktadır.
- Tüm çubuk elemanları kesitlerin ağırlık merkezinden tanımlanmıştır.
- Yapı kütlesi dağılımı modele daha etkin olarak katılması için çubuklar tek parça çubuklar yerine, eşit parçalara ayrılmıştır.
- Köprü tabliyesinde mevcut 9 kiriş tek kiriş olarak tanımlanmış ve tabliyeler arasında genişleme derzini temsil eden boşluk elemanlar tanımlanmıştır.
- Köprü boyuna uzanan kirişler ile başlık kirişin arasında yer alan elastomerler kütlesi sıfır olan eğilme ve kesme rijitlikleri yüksek rijit elemanlar tanımlanmıştır. Çubuk elemanlar, tanımlanan bu elemanlarla birleştirilmiştir.
- Rijit elemanların gerçekçi olarak modellenmesine büyük özen gösterilmelidir. Rijit elemanlar için düşük rijitlik değerleri belirtilirse, analitik modelde rijit bölgeler doğru şekilde yansıtılmamış olabilir. Öte yandan, büyük bir elastik rijitlik kullanılması durumunda, çözümlemede yakınsama problemleri doğabilir (Avşar, 2009). Wilson'a (2002) göre, sayısal problemleri minimize etmek için rijit olarak

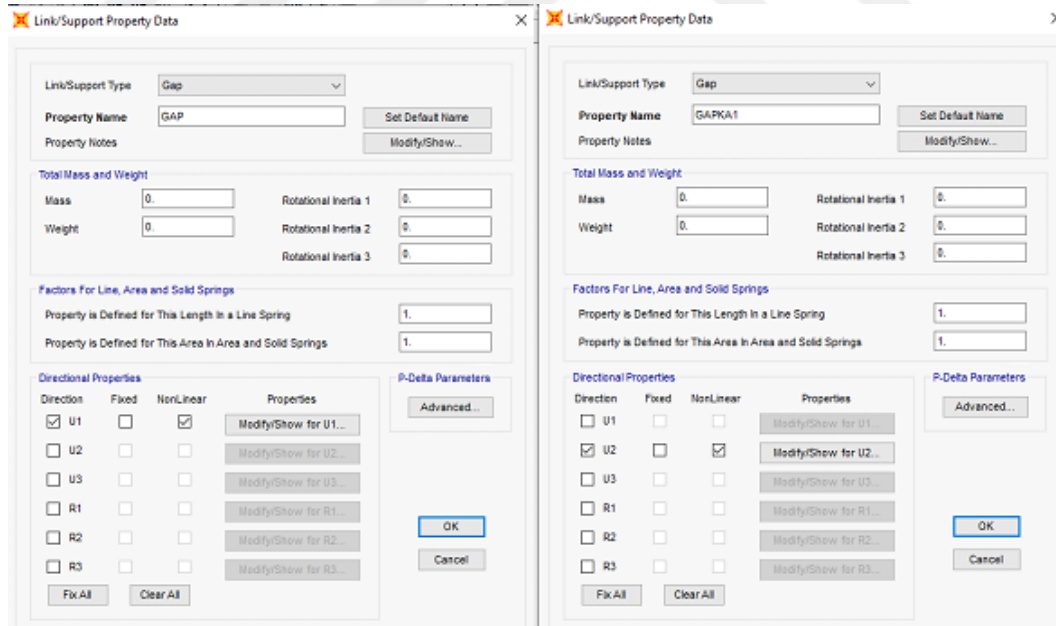
tanımlanan elemanın rijitliği, komşu eleman rijitliklerinin 100 katından fazla olmamalıdır.

- Mod sayısı yapı kütlesi %90 üzerinde kalacak şekilde girilmiştir.
- Başlık kirişinde deprem takozların etkisini katmak amacıyla elastomerlerin köprü enine doğrultusundaki yer değiştirmeleri kısıtlanmıştır.

3.7. Üstyapı

3B modellemede gerekli detaylandırma daha çok altyapıya verildiğinden, üst yapı en basit haliyle doğrusal elastik, tek çubuk eleman olarak modellenmiştir. Üst yapının tamamı, Şekil 3.11-3.12'de gösterildiği gibi dönüştürülmüş rijitliklere, özdeş kütle ve ağırlık özelliklerine sahip bir kiriş elemanı kullanılarak modellenmiştir. Üstyapı rijitliğinin, kirişlerin elastik özelliklerine dönüşümü, uygun modüler oranın statik özelliklerine uygulanmasıyla elde edilir. Domaniç (2008), tüm üst yapının eşdeğer kesit özelliklere sahip tek bir kiriş elemanı ile modellenmesinin etkisinin genel dinamik davranışta çok büyük hataya neden olmadığını belirlemiştir.

Tüm ayaklarda bulunan elastomer mesnetler NLLINK elemanı ile tanımlanmıştır. Köprü P3 ayağında genleşme derzini temsil etmek için 10 cm boşluk elemanı tanımlanmıştır (Şekil 3.16). Ayrıca kenar ayaklarda da köprü boyuna doğrultuda boşluk elemanları tanımlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 3.16. (a) orta ayağın gap elemanı; (b) kenar ayaklarda tanımlanmış gap elemanı

3.7.1. Zati yük hesabı

Öngerilmeli kirişin enkesit alanı: 0.3973 m^2

Oto korkuluk: 1 kN/m

Yaya korkuluğu: 0.5 kN/m

Tretuvar yolu genişliği: 3 m

- Öngerilmeli Kiriş Ağırlığı: $9 \text{ adet} \times 0.3973 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 = 89.39 \text{ kN/m}$
- Döşeme Zati Ağırlığı : $14.75 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 92.19 \text{ kN/m}$
- Tretuvar: $3 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 18.75 \text{ kN/m}$
- Asfalt Kaplama Ağırlığı: $11 \text{ m} \times 0.06 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 15.84 \text{ kN/m}$
- Korkuluk Ağırlığı: $2 \text{ adet} \times (1 \text{ kN/m} + 0.5 \text{ kN/m}) = 3.0 \text{ kN/m}$

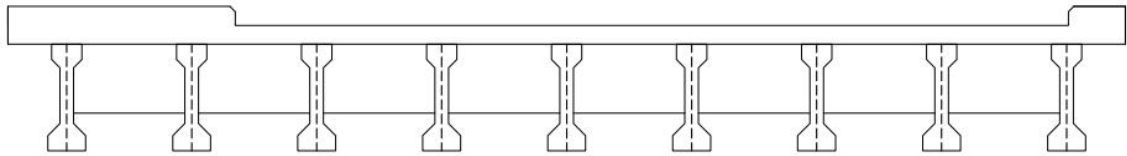
Köprü üst yapı birim uzunluğunun ağırlığı= 219.17 kN/m

Bir kenar ayak elastomer mesnetine gelen zati yük $219.17 \text{ kN/m} \times 22.3 \text{ m} \times 0.5 / 9 \text{ adet} = 271.53 \text{ kN / mesnet}$

Bir orta ayak elastomer mesnetine gelen zati yük $219.17 \text{ kN/m} \times 22.6 \text{ m} / 9 \text{ adet} = 550.36 \text{ kN/mesnet}$

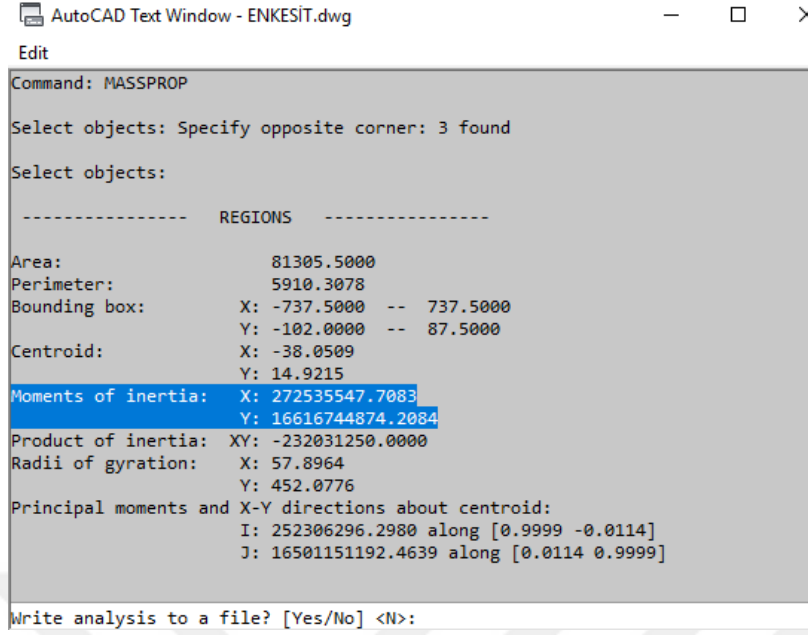
3.7.2. Tabliye

Tabliye kesiti kompozit olarak düşünülmüştür (Şekil 3.17). 9 öngerilmeli kiriş ve 25 cm kalınlığındaki döşeme bir bütün olarak tabliye çubuk elemanı şeklinde modellenmiştir.



Şekil 3.17. Tabliye kompozit kesiti

Tabliye kesit özellikleri Şekil 3.18’da gösterildiği gibi Autocad programında “region” komutuyla eleman enkesiti bir bölge halinde tanımlanmış, daha sonra global orijin, “ucs” komutu ile eleman ağırlık merkezine taşınmış ve “massprop” komutu ile özellikler görüntülenmiştir.



Şekil 3.18. Tabliye kesit özellikleri

- Kesit Alanı: 8.13 m²
- X yönü atalet momenti: 2.725 m⁴
- Y yönü atalet momenti: 166.167 m⁴
- Burulma atalet momenti (J): 165.01 m⁴

Özkütle ve özağırlık hesabı:

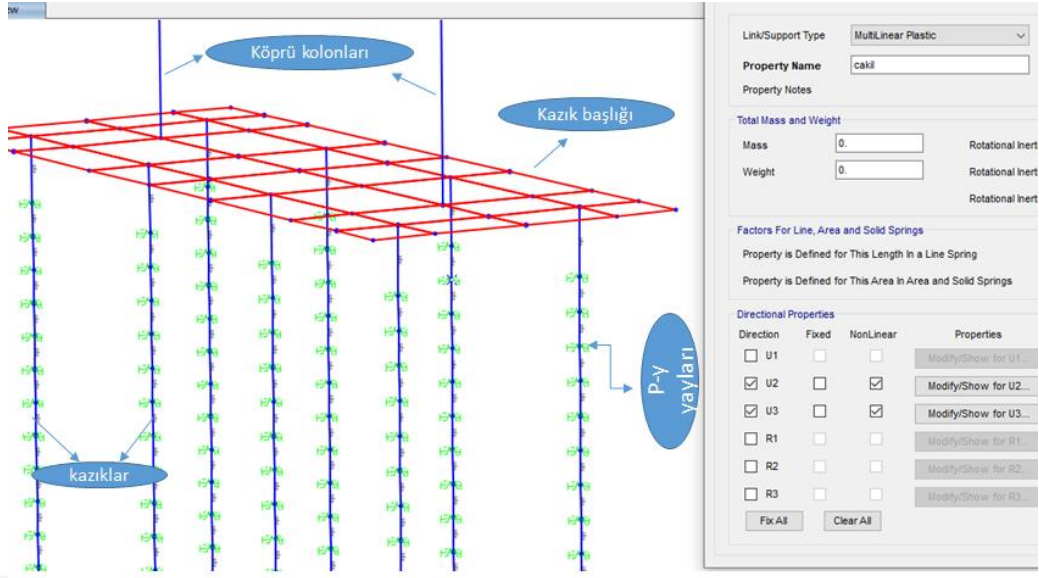
$$W: 219.17 \text{ kN/m} / 8.13 \text{ m}^2 = 26.96 \text{ kN/m}^3$$

$$M: 26.96 \text{ kN/m}^3 / 9.81 \text{ m/s}^2 = 2.75 \text{ kNs}^2/\text{m}^4$$

3.8. Altyapı

3.8.1. Temel elemanları

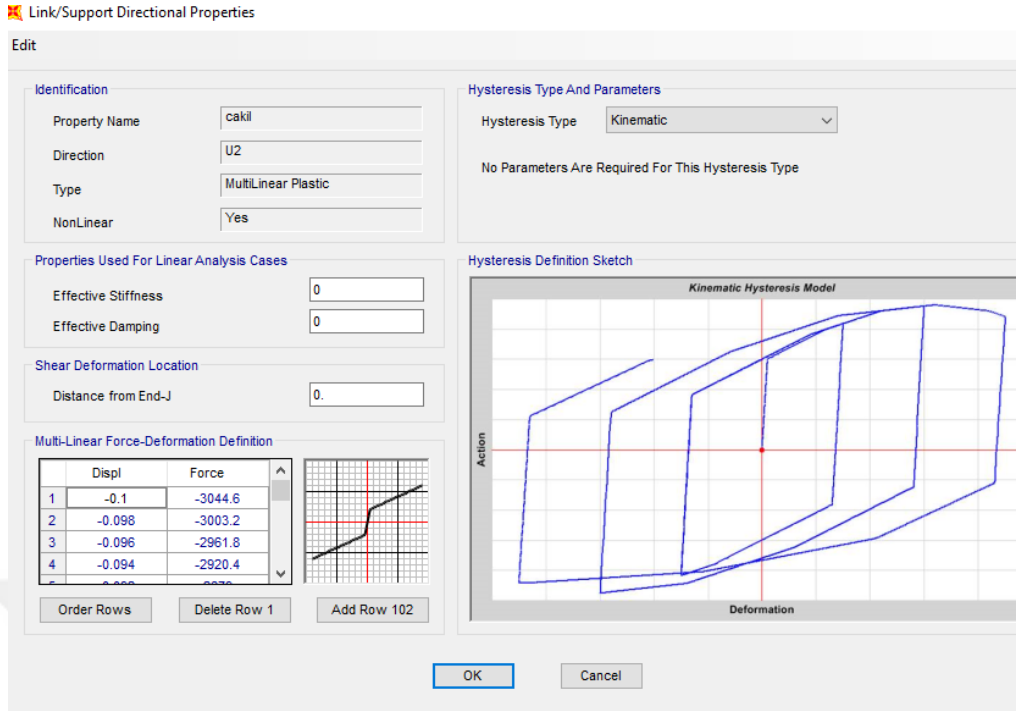
Temel elemanların modellenmesi Şekil 3.19'de gösterilmiştir. Kazık başlığı şel eleman olarak tanımlanmış ve rijit diyafram özelliği verilmiştir. Burada, sistemin düşey yer değiştirmesi her bir kazığın altına yerleştirilmiş basit mesnetler ile engellenmiştir. Doğrusal olmayan kazık yayları (multilinear plastic link) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.19. Temel elemanların modellenmesi

P-Y CURVE									
b	1 m	Pile diameter, width				y, m	p, kN/m	p, kN	p.p_mul
ϕ	30 deg.	Friction angle				0	0.000	0.00	0.0
γ	17 kN/m ³	Unit weight of soil				1	0.002	31.53	15.8
γ_{eff}	7.19 kN/m ³	Bouyant for below water table				2	0.004	37.24	18.6
k_{py}	16.3 MN/m ³					3	0.006	41.05	20.5
N_{SPT}	6 blows/30	Submerged	Loose	Medium	Dense	4	0.008	43.99	22.0
		Above water table	6.8	24.4	61	5	0.010	46.42	23.2
z_w	0 m	Water table				6	0.012	48.49	24.2
z	1 m	Depth below ground surface				7	0.014	50.33	25.2
α	15 deg.					8	0.016	51.97	26.0
β	60 deg.					9	0.018	53.49	26.7
K_0	0.4					10	0.020	55.00	27.5
K_a	0.33					11	0.022	56.51	28.3
p_s	32.92 kN/m					12	0.024	58.03	29.0
p_s	206.68 kN/m					13	0.026	59.54	29.8
p_s	32.92 kN/m					14	0.028	61.05	30.5
z/b	1					15	0.030	62.57	31.3
A_s	2.07					16	0.032	64.08	32.0
B_s	1.59					17	0.034	65.59	32.8
p_u	68.24 kN/m					18	0.036	67.11	33.6
p_m	52.48 kN/m					19	0.038	68.24	34.1
y_m	0.0167 m	b/60				20	0.040	68.24	34.1
y_u	0.0375 m	3b/80				21	0.042	68.24	34.1
n	4.1611					22	0.044	68.24	34.1
C_u	140.38 kN/m ²					23	0.046	68.24	34.1
y_k	0.0019 m					24	0.048	68.24	34.1
						25	0.050	68.24	34.1

Şekil 3.20. P-y eğrilerinin Mathlock ve Reese formülleriyle excelde hesaplanması



Şekil 3.21. P-y eğrilerini Sap2000'e nonlineer olarak girilmesi

3.9. Kolon Kesme Kontrolü

Mevcut köprü kolonlarında yapılacak kayma donatısı hesapları en büyük iç kuvvetlerine göre yapılmıştır. Kolonların orta bölgesindeki enine donatı tasarımına esas kesme kuvveti V_e , Denk.(3.2)'de verilen kapasite tasarımı yaklaşımı ile hesaplanmıştır (TDY-2018). Kolon serbest yüksekliğinin alt ve üst uçlarındaki M_{pa} ve $M_{pü}$ değerleri, kolon kesitinin taşıma gücü momentinin 1.4 katı olarak alınmıştır.

$$V_c = \frac{(M_{pa} + M_{pü})}{l_n} \quad (3.2)$$

3.9.1. Köprü boyuna yönde kayma donatısı hesabı

Kapasite azaltma faktörü: $\phi = 0.85$ (AASHTO 8.16.1.2.2a)

Kolon kesit alanı: $A_g = 2500000 \text{ mm}^2$

Faydalı yükseklik: $d = 950 \text{ mm}$

Hesap genişliği: $b_w = 2500 \text{ mm}$

Karakteristik beton basınç dayanımı: $f'_c = 25 \text{ N/mm}^2$

Karakteristik çelik akma dayanımı: $f_y = 420 \text{ N/mm}^2$

Kesme kuvveti: $V_e = 2220.6 \text{ kN}$

Normal kuvvet: $P_u = 3139.6 \text{ kN}$

Boyuna yöndeki etriye aralığı: $s = 150 \text{ mm}$

$N/A_g = 1.26 \text{ N/mm}^2 < 0.1f_c' = 2.5 \text{ N/mm}^2$ (AASHTO IA7.6.2c)

Betonun kesme dayanımı:

$$V_c = 24.1 \left[0.0068 + \frac{N}{2000 \times A_g} \right] \times \sqrt{f_c'} \times b_w \times d = 2126.4 \text{ kN} \quad (3.3)$$

Kesitteki etriye: $6\Phi 16$, $A_v = 1206 \text{ mm}^2$

Etriyenin taşıdığı kesme kuvveti:

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} = 3208 \text{ kN} \quad (3.4)$$

$$V_e = 2220.6 < \phi(V_c + V_s) = 4534.2 \text{ kN} \quad (3.5)$$

Köprü boyuna yönünde kesme güvenliği sağlanmaktadır.

3.9.2. Köprü enine yönde kayma donatısı hesabı

Kapasite azaltma faktörü: $\phi = 0.85$ (AASHTO 8.16.1.2.2a)

Kolon kesit alanı: $A_g = 2500000 \text{ mm}^2$

Faydalı yükseklik: $d = 2400 \text{ mm}$

Hesap genişliği: $b_w = 1000 \text{ mm}$

Karakteristik beton basınç dayanımı: $f_c' = 25 \text{ N/mm}^2$

Karakteristik çelik akma dayanımı: $f_y = 420 \text{ N/mm}^2$

Kesme kuvveti: $V_e = 5297 \text{ kN}$

Normal kuvvet: $P_u = 3139.6 \text{ kN}$

Boyuna yöndeki etriye aralığı: $s = 150 \text{ mm}$

$N/A_g = 1.26 \text{ N/mm}^2 < 0.1f_c' = 2.5 \text{ N/mm}^2$ (AASHTO IA7.6.2c)

Betonun kesme dayanımı:

$$V_c = 24.1 \left[0.0068 + \frac{N}{2000 \times A_g} \right] \times \sqrt{f_c'} \times b_w \times d = 2148.8 \text{ kN} \quad (3.6)$$

Kesitteki etriye: $8\Phi 16$, $A_v = 1608 \text{ mm}^2$

Etriyenin taşıdığı kesme kuvveti:

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} = 10805.8 \text{ kN} \quad (3.7)$$

$$V_e = 5297 \text{ kN} < \varphi(V_c + V_s) = 11011 \text{ kN} \quad (3.8)$$

Köprü enine yönde kesme güvenliği sağlanmaktadır.

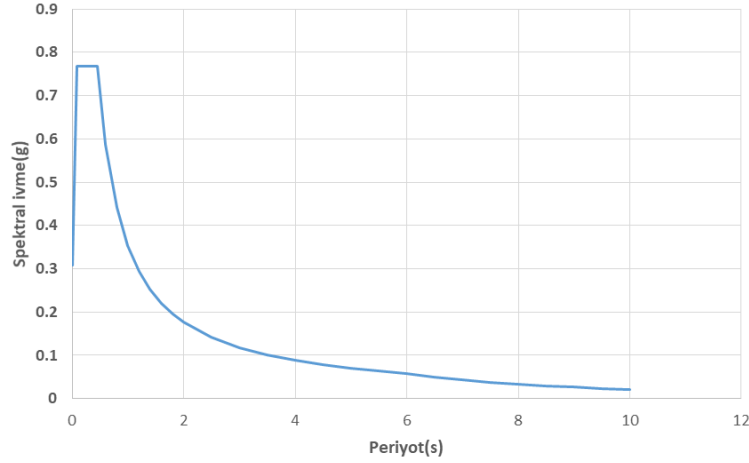
3.10. Yer Hareketi Kayıtlarının Seçimi

3.10.1. Genel hususlar

Boğaçay Köprüsü Antalya ve çevresi, Fethiye-Burdur Fay Zonu, Helenik-Kıbrıs Fayı'nın Antalya Körfezi'nde uzanan bölümü ile Kırkkavak Fayı ve Aksu Fayı boyunca uzanan fay zonunun etkisi altındadır. Türkiye'nin mevcut deprem bölgeleri haritasına (Şekil 3.23) göre (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü 2018 Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası), ana kaya derinliğinin fazlalığı ve zeminin yumuşaklığı nedenleri ile deprem şiddeti, bu alanlardaki yapılarda kayada bulunan yapılara göre daha fazla hissedilmektedir (Dipova, 2010). Olasılıklı sismik tehlike analizinin sonuçlarına göre, Antalya şehir merkezinde, anakayadaki PGA değeri 0,215 g ile 0,23 g arasında değiştiğini göstermektedir (Dipova ve Cangir, 2017). Boğaçay Köprüsü çalışma alanı AFAD'a (afad.gov.tr) göre 0.268 g PGA değerine sahiptir.

Boğaçay Köprüsü mevcut deprem bölgeleri haritasına göre 2. bölgede yer almaktadır. Zemin profili ve ivme katsayısı Türkiye'nin deprem bölgeleri haritasından tespit edilmiştir. 2. Deprem bölgesi için pik zemin ivmesi, 1997 yılında 475 yıl geri dönüş süresi olarak Türk Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar için Şartname'de (2018), 0.307 g olarak belirlenmiştir (TDY-2018). Tepki spektrum fonksiyonlarında, zemin sınıfı Z_D için elastik Tepki Spektrum Analizi (RSA), 475 yıllık dönme periyotlarına sahip Türk Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre $\xi = \% 5$ sönüm oranlarına göre oluşturulmuştur. Deprem yer hareketi düzeyi; DD-2 ve Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L = 6.0$ (s). Elde edilen diğer özellikler şunlardır: $S_S = 0.573$, $S_1 = 0.154$, $PGA=0.268$, $PGV=11.325$, $T_A = 0.092$ (s), $T_B = 0.459$ (s).

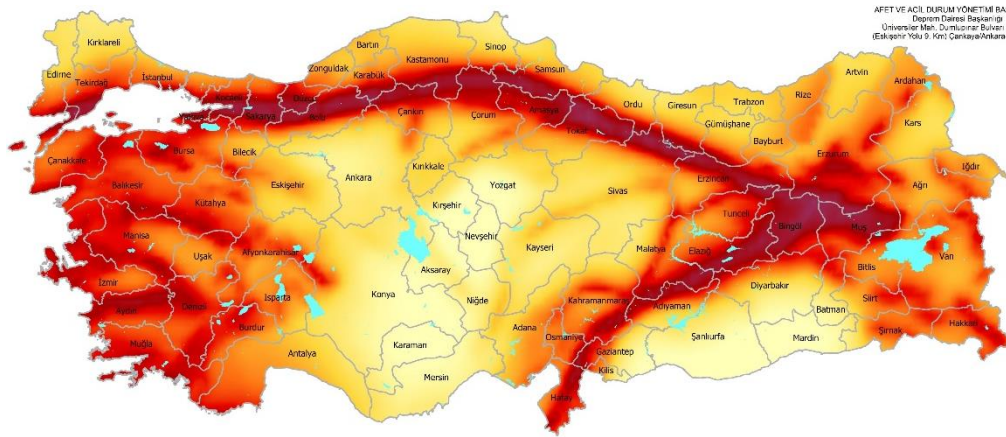
- $S_{DS} = S_S F_S = 0.573 \times 1.342 = 0.769$
- $S_{D1} = S_1 F_1 = 0.154 \times 2.292 = 0.353$



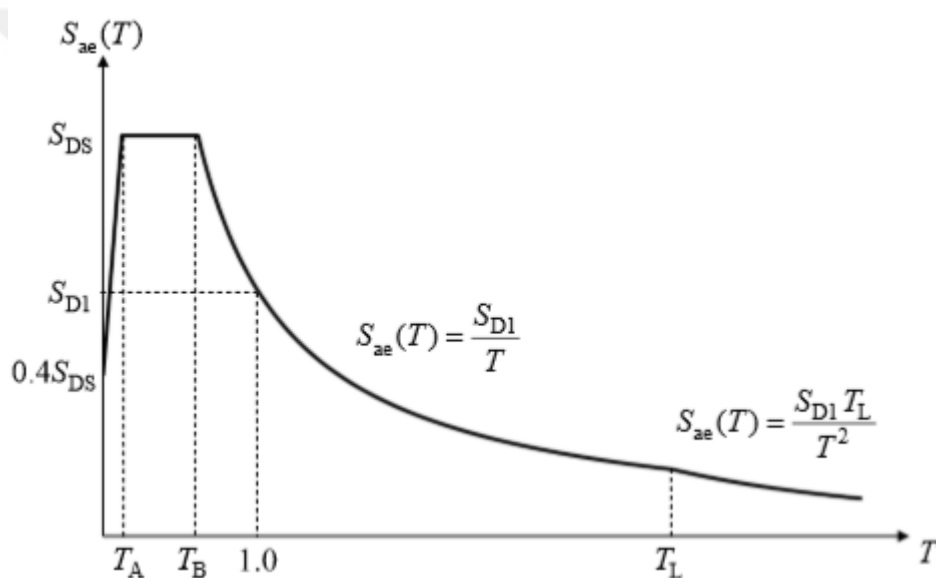
Şekil 3.22. Kordinatına göre elde edilen yatay elastik tasarım spektrumu

ZTA analizler farklı oyulma derinliği durumları için geliştirilen analitik köprü modelleri ile tekrarlanmıştır. Türkiye Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre, on bir deprem yer hareketi seçilmiş ve tepki değişkeninin ortalama değeri dikkate alınmıştır. Seçilen yer hareket çiftlerinin her biri için en büyük yer ivmesi (PGA), TEC (2018) 'de tanımlanan 0.307 g hedef PGA değerine eşit veya ondan daha büyük olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Analizlerde kullanılan yer hareketleri, köprü yerinin depremselliğini temsil eden deprem yer hareketlerinden seçilmiştir. Ayrıca, farklı deprem yükleri altında incelenen köprü için, PEER (2013) deprem veri tabanından 11 adet yatay zemin hareket çifti seçilmiştir. Bu veriler ışığında, seçilmiş olan Boğaçay Köprüsü'nün ZTA performans analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

11 adet (köprü boyuna ve enine doğrultularında) depremlerden oluşan bu yer hareketleri, doğrultu atımlı fay (strike slip) mekanizmasına sahiptir. Köprünün çevre fay hatların konumuna göre, 0 ile 100 km arası Joyner-Boore uzaklığı kullanılmıştır. zemin tipi çoğunlukla kumdan oluştuğundan yer hareketi kayıtları, kayma dalgası hızının 360 ms^{-1} 'den az olduğu istasyonlardan seçilmiştir. Aşağıdaki tabloda seçilen yatay yer hareketi çiftleri ve bunlarla ilgili karakteristik sismolojik bilgileri listelenmiştir. Seçilen depremler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmiştir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0.2T ve 1.5T (0.23s, 1.71s) periyotları arasındaki genliklerinin, tanımlanan tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. Her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılmıştır (TBDY 2018). Ölçeklenen deprem ivme kayıtları ve sonuç spektrumları 11 adet deprem için Şekil 3.28'de verilmiştir. T köprünün en yüksek modal kütle katılım oranına sahip moduna ait doğal titreşim periyodudur.



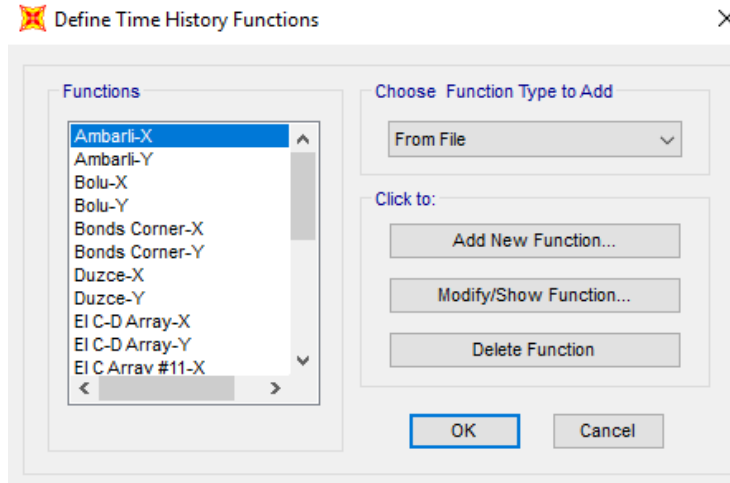
Şekil 3.23. Türkiye sismik bölge haritası (TDY-2018)



Şekil 3.24. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu (TDY-2018)

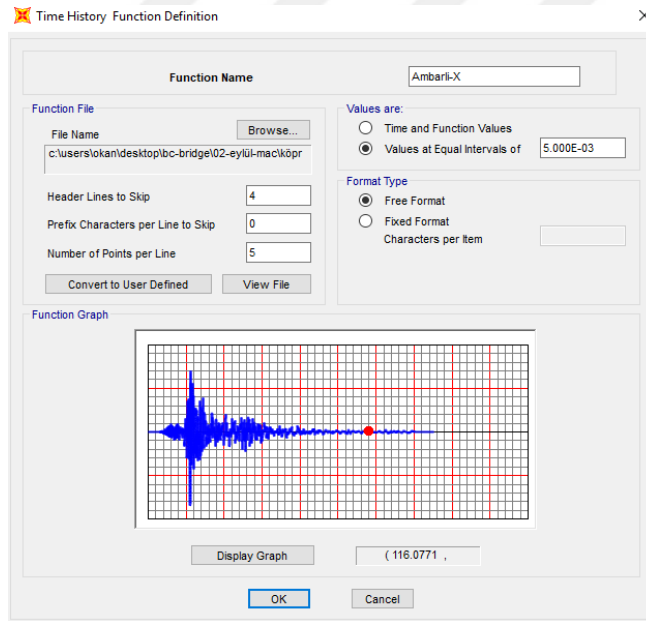
3.10.2. Deprem kayıtlarının Sap2000'e girilmesi

11 adet ölçekli deprem kayıtları Sap2000 (2012) programına Define komutundan Time history fonksiyonu olarak girilmiştir. Burada 11 kayıttan örnek amaçlı Ambarlı depremi ele alınmıştır.



Şekil 3.25. ZTA fonksiyon tanımlanması

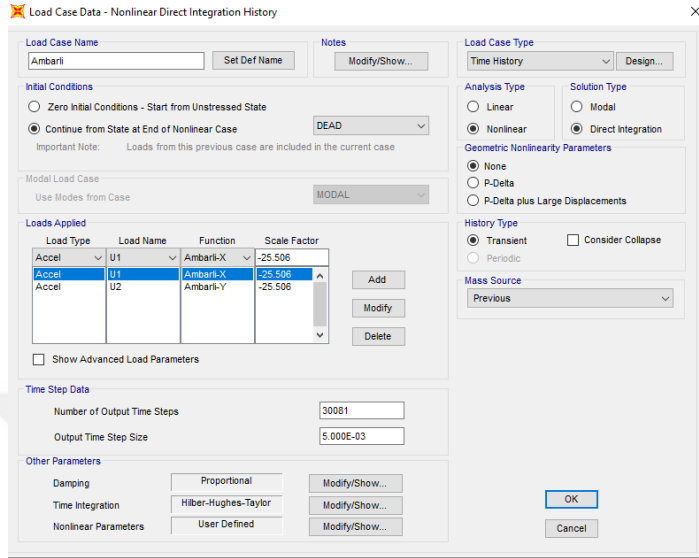
Dosya adı kısmına x doğrultusuna ait Ambarlı kaydı girilmiştir. Atlanacak başlık satırları 4 ve satır başına nokta sayısı 5 girilmiştir. Bu şekilde tüm 11 deprem kaydı x ve y doğrultularında tanımlanmıştır.



Şekil 3.26. Deprem kaydının tanımlanması

ZTA analizinde deprem kayıtları doğrudan integrasyon yöntemiyle çözülmüştür. Daha önce doğrusal olmayan olarak tanımlanan zati yük bu doğrusal olmayan analizde başlangıç yük olarak seçilmiştir. Yükleme çeşidi olarak kayıtlar ivme, u_1 ve u_2

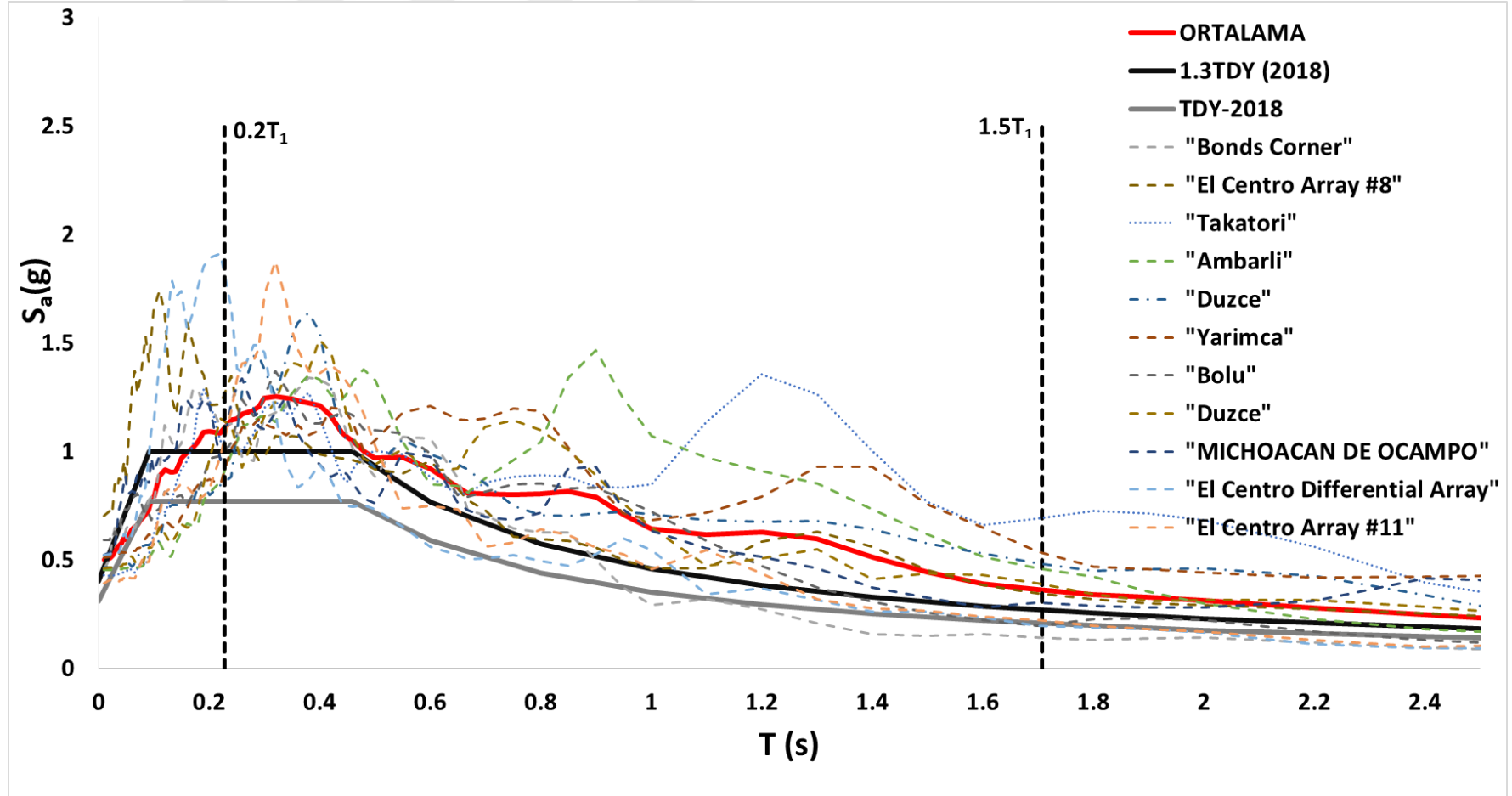
doğrultularına girilmiştir. Peer (2013)'ten elde edilen deprem kayıtların ölçekleri (g) cinsinden olduğundan, ölçekler $[(-1) \times 9.81 \times \text{ölçek}]$ şeklinde programa girilmiştir. Zaman adımlarının sayısı her kayda göre girilmiştir. 1. ve 2. temel periyoda göre sönüm orantılı bir şekilde hesaplatılmıştır.



Şekil 3.27. Doğrudan integrasyon için yüklemenin tanımlanması

Çizelge 3.3. Yer hareketleri, doğrultu atımlı (PEER 2013)

Depremler	Yıl	İstasyon	M _w	R _{jb} (km)	Vs30 (m/sec)	Ölçek	Doğrultu	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
"Imperial Valley-06"	1979	"Bonds Corner"	6.53	0.44	223.03	0.8	140	0.599	46.7	20.2
							230	0.777	44.9	15.1
"Imperial Valley-06"	1979	"El Centro Array #8"	6.53	3.86	206.08	1.1	140	0.61	54.4	41.7
							230	0.466	52.1	41.1
"Kobe_ Japan"	1995	"Takatori"	6.9	1.46	256	0.85	0	0.618	120.6	39.9
							90	0.671	122.9	29.6
"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Ambarli"	7.51	68.09	175	2.6	0	0.252	36.5	30.9
							90	0.186	35.1	22.4
"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.51	13.6	281.86	1.6	180	0.312	58.8	44
							270	0.364	55.6	24.9
"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Yarimca"	7.51	1.38	297	2.1	60	0.227	69.7	62.3
							150	0.322	71.8	47.3
"Duzce_ Turkey"	1999	"Bolu"	7.14	12.02	293.57	0.7	0	0.739	55.9	25.6
							90	0.806	65.8	13.1
"Duzce_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.14	0	281.86	1.2	180	0.404	70.9	49.6
							270	0.515	84.21	48
"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"MICHOACAN DE OCAMPO"	7.2	13.21	242.05	1.2	0	0.537	61.5	34.5
							90	0.408	43.5	20.6
"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"El Centro Differential Array"	7.2	22.83	202.26	1	90	0.506	38.8	33.5
							360	0.554	29.3	18.7
"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"El Centro Array #11"	7.2	15.36	196.25	1.1	90	0.586	63.2	53.7
							360	0.441	57.7	30.3



Şekil 3.28. %5 sönümlü tasarım spektrumu ve ölçeklenmiş kayıtların bileşke yatay spektrumu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

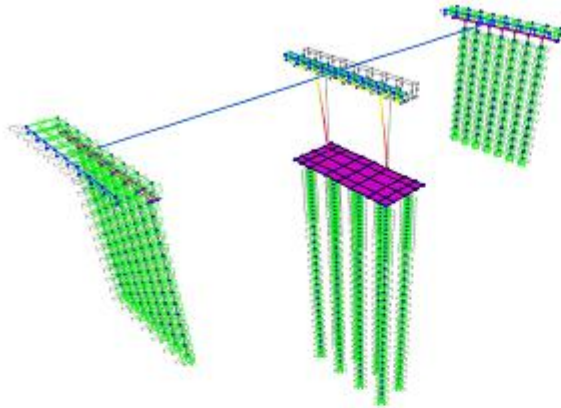
İncelenen köprüde deprem ve taşkından dolayı oluşan oyulma etkilerini belirlemek için modal analiz yanında ZTA analizi yapılmıştır. Oyulma etkisinde on üç (13) durum incelenmiştir. Başta yapı oyulmasız durumunda modellenip analiz edilmiştir. Daha sonra oyulma derinliği 0.5 metrelik artışla 6 m oyulmaya kadar arttırılmış ve farklı oyulma durumları için yapının tepkisi her birinde ayrı ayrı incelenip karşılaştırılmıştır.

4.1. Sap2000’le Köprü Modelinin Davranış Kontrolü

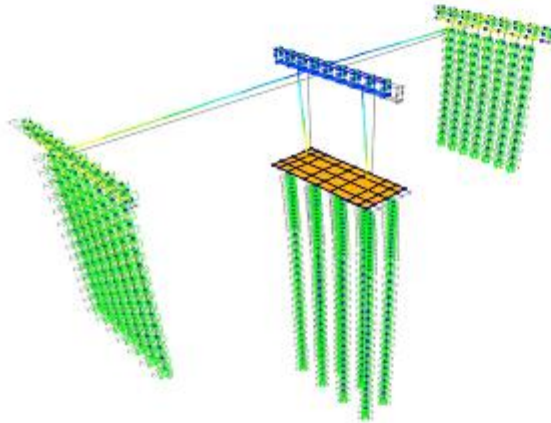
Köprü modellenirken basit bir model oluşturulmuş, yani 1 orta ayak ve 2 kenar ayaktan teşkil edilmiş 2 açıklıklı bir köprü oluşturmakla yola çıkılmıştır. Daha sonra açıklık sayısı birer artırılarak 7 açıklıklı köprü elde edilmiştir. Böylece model davranışının kontrolü yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Farklı açıklıklardaki köprünün etkin periyotları

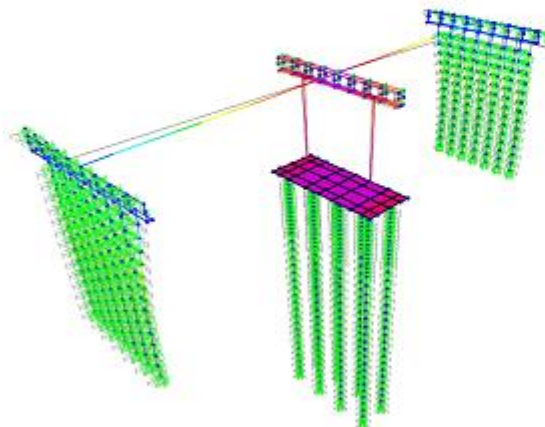
AÇIKLIK	1.Mod(boyuna doğrultuda) oluşan periyot	2.mod (enine doğrultuda) oluşan periyot	3.mod (burulma) oluşan periyot
2	T1=0.936s	T2=0.247s	T3=0.183s
3	T1=1.028s	T2=0.287s	T3=0.205s
4	T1=1.079s	T2=0.313s	T3=0.231s
5	T1=1.108s	T2=0.329s	T3=0.255s
6	T1=1.126s	T2=0.339s	T3=0.277s
7 açıklık (oyulmasız)	T1=1.138s	T2=0.350s	T3=0.304s

2-Açıklıklı Köprü

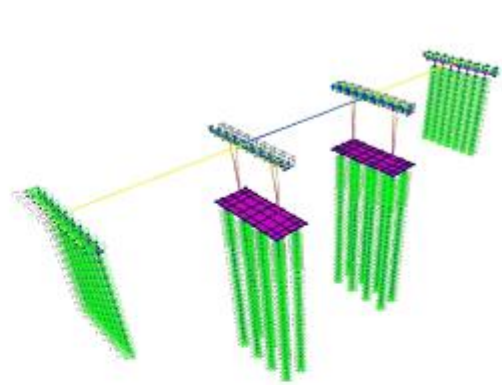
Mod.1 : Boyuna doğrultuda



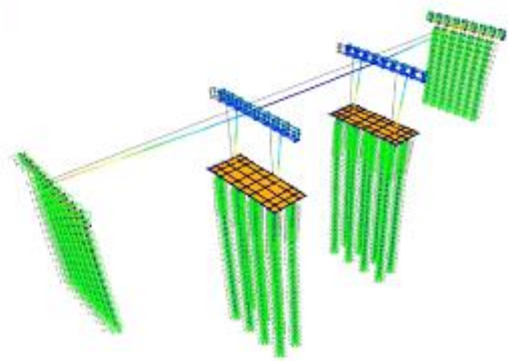
Mod.2 : Enine doğrultuda



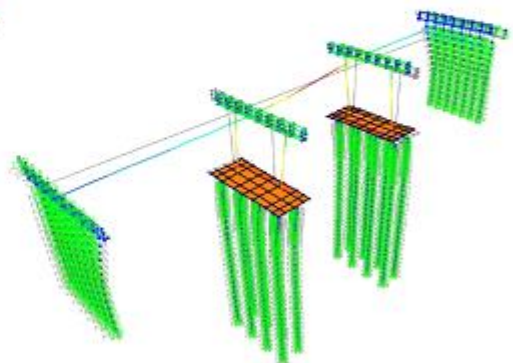
Mod.3 : Burulma

3-Açıklıklı Köprü

Mod.1 : Boyuna doğrultuda

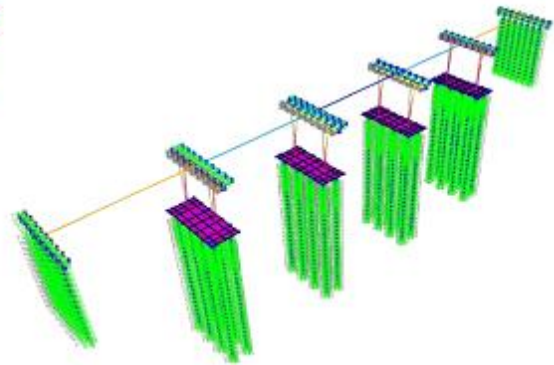
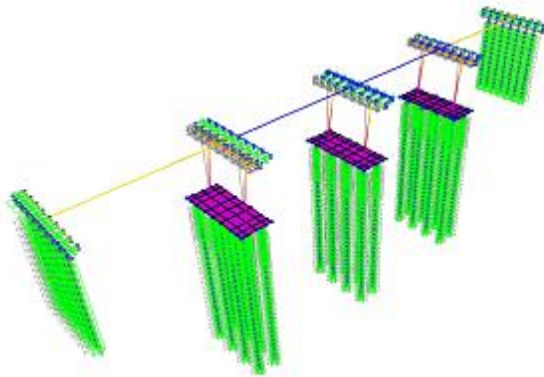


Mod.2 : Enine doğrultuda



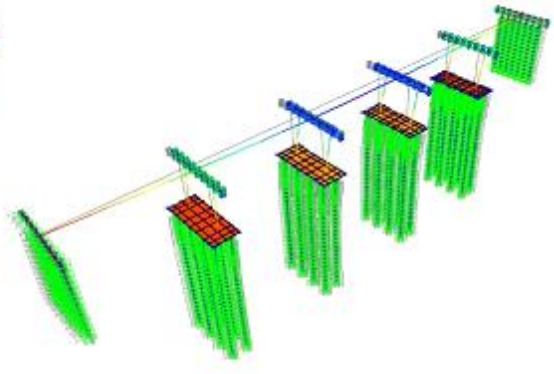
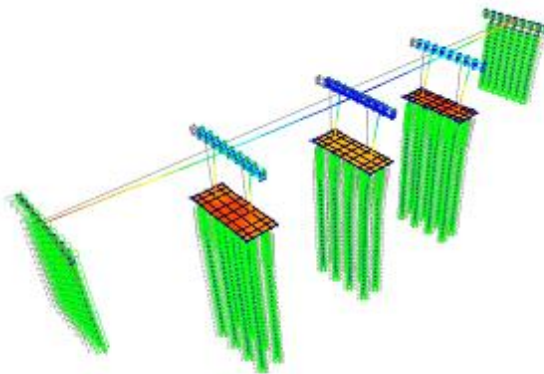
Mod.3 : Burulma

Şekil 4.1. 2 ve 3-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri

4-Açıklıklı Köprü**5-Açıklıklı Köprü**

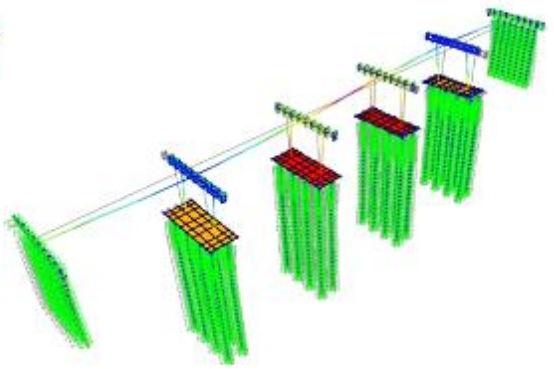
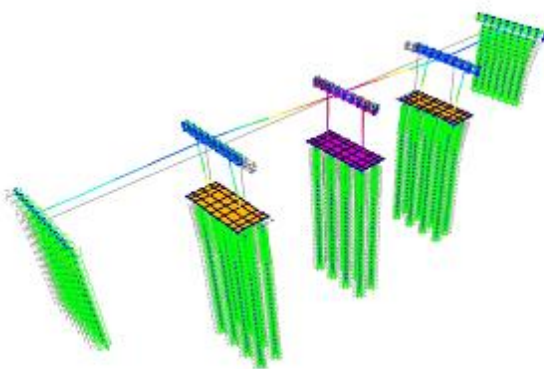
Mod.1 : Boyuna doğrultuda

Mod.1 : Boyuna doğrultuda



Mod.2 : Enine doğrultuda

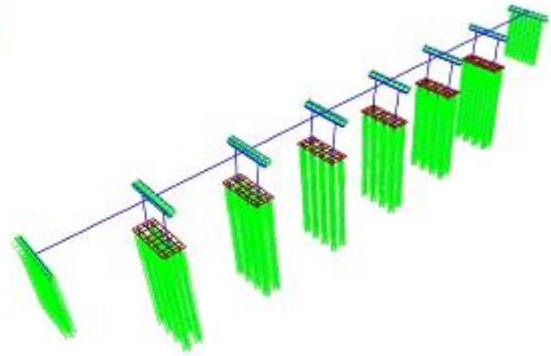
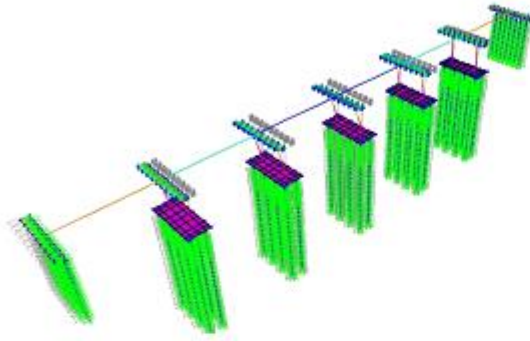
Mod.2 : Enine doğrultuda



Mod.3 : Burulma

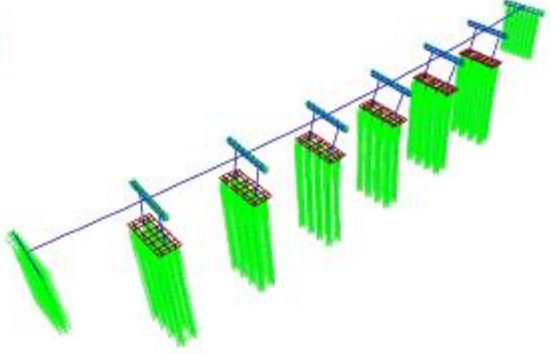
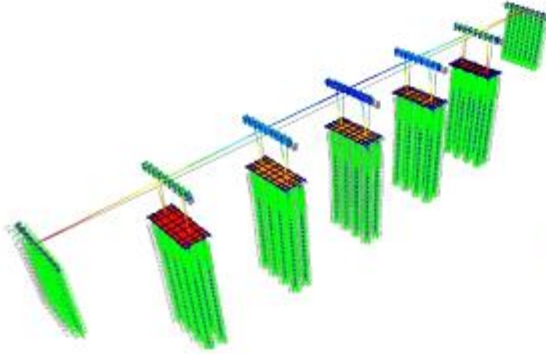
Mod.3 : Burulma

Şekil 4.2. 4 ve 5-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri

6-Açıklıklı Köprü**7-Açıklıklı Köprü**

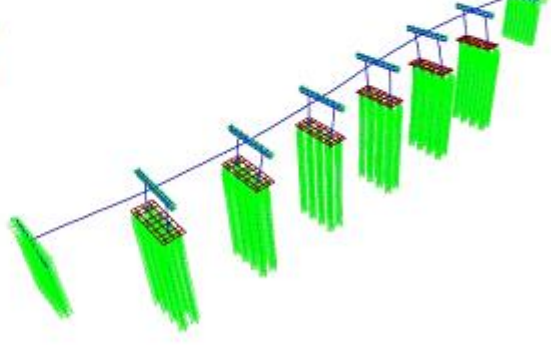
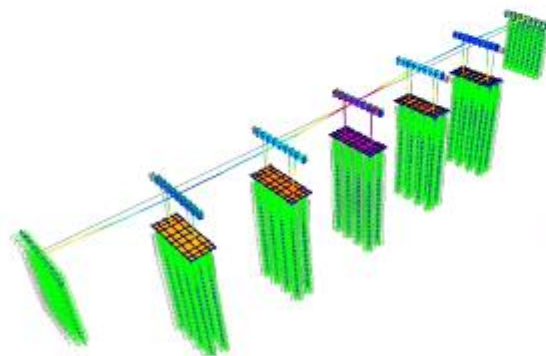
Mod.1 : Boyuna doğrultuda

Mod.1 : Boyuna doğrultuda



Mod.2 : Enine doğrultuda

Mod.2 : Enine doğrultuda



Mod.3 : Burulma

Mod.3 : Burulma

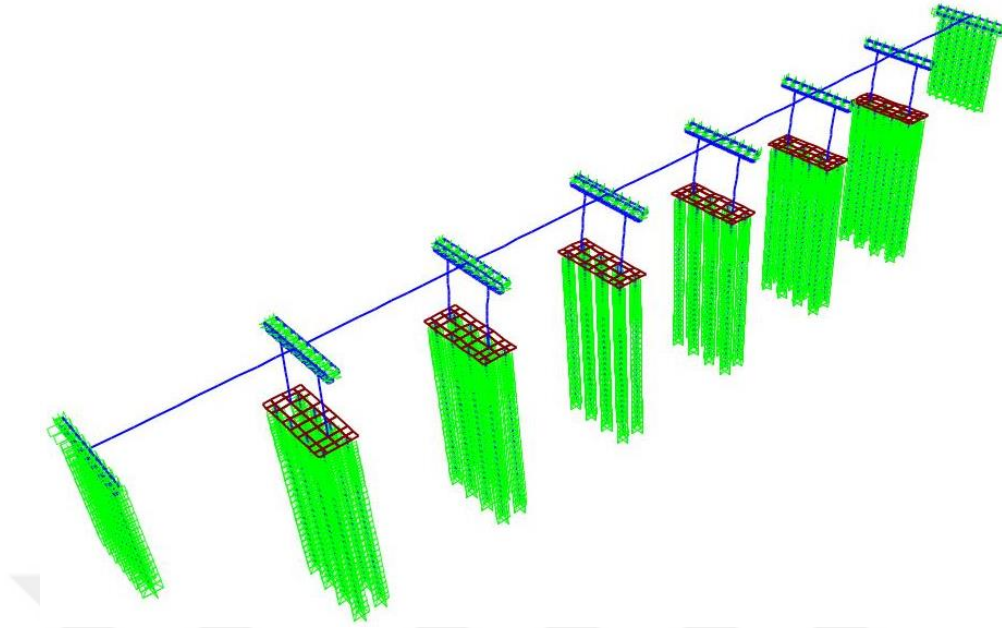
Şekil 4.3. 6 ve 7-açıklıklı köprü modellerinin etkin mod şekilleri

4.2. Modal Analiz Sonuçları

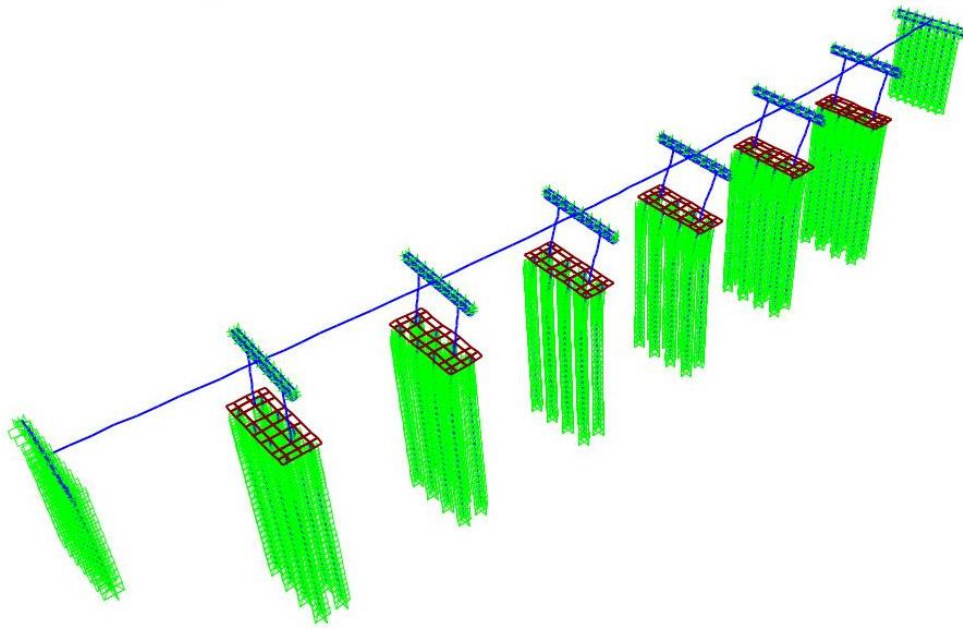
Deprem yönetmeliğine (TDY, 2018) göre yapıların dinamik analizde, her bir mod için hesaplanan etkin kütleler toplamı bina toplam kütle katılımının % 90'ından fazla olması kuralına göre hesaba katılacak yeterli titreşim mod sayısı belirlenmiştir. Analiz sonucunda sıfır oyulma ile 0.5 m'lik artışla ve en fazla 6 m oyulmaya kadar her oyulma durumu için yapının farklı temel periyotları elde edilmiştir. 13 tip oyulma derinliği için Çizelge 4.2'de Modal Kütle Katılım Oranı (MPMR) verilmiştir. Aşağıdaki şekillerde ise sıfır ve tam oyulma durumları için modal analiz sonuçlarından elde edilen mod şekilleri ve etkin periyotları gösterilmiştir (Şekil 4.4-4.9).

Çizelge 4.2. Etkin modlar ve kütle katılım oranları

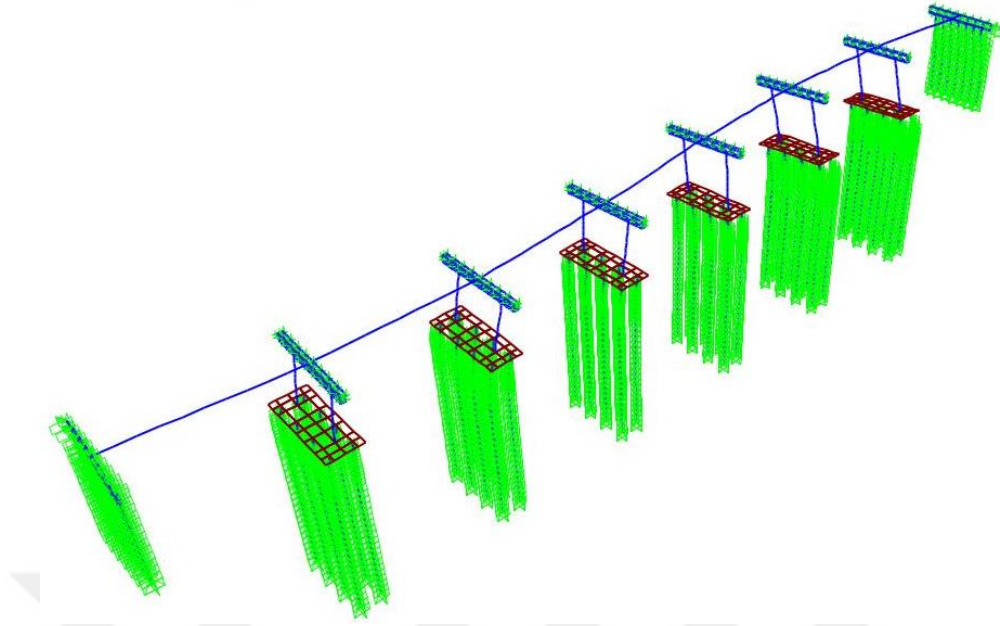
Oyulma (m)	Mod1: Boyuna doğ.		Mod2: Enine doğ.		Mod3: Burulma	
	Periyot T1(s)	MPMR (%)	Periyot T2(s)	MPMR (%)	Periyot T3(s)	MPMR (%)
0	1.1379	41.58	0.3497	51.43	0.3038	46.41
0.5	1.1444	41.92	0.3572	53.75	0.3039	48.72
1	1.1516	42.31	0.3727	54.95	0.3148	49.26
1.5	1.1597	42.77	0.3913	56.15	0.3275	49.76
2	1.1691	43.32	0.4135	57.32	0.3423	50.21
2.5	1.1802	43.98	0.4403	58.44	0.3596	50.59
3	1.1899	44.57	0.4637	59.22	0.3741	50.84
3.5	1.2005	45.21	0.4891	59.95	0.3894	51.06
4	1.2124	45.93	0.5171	60.62	0.4053	51.26
4.5	1.2258	46.74	0.5478	61.26	0.4221	51.46
5	1.2416	47.67	0.5825	61.88	0.4399	51.65
5.5	1.2608	48.78	0.6226	62.51	0.4593	51.86
6	1.2858	50.15	0.6717	63.14	0.4812	52.08



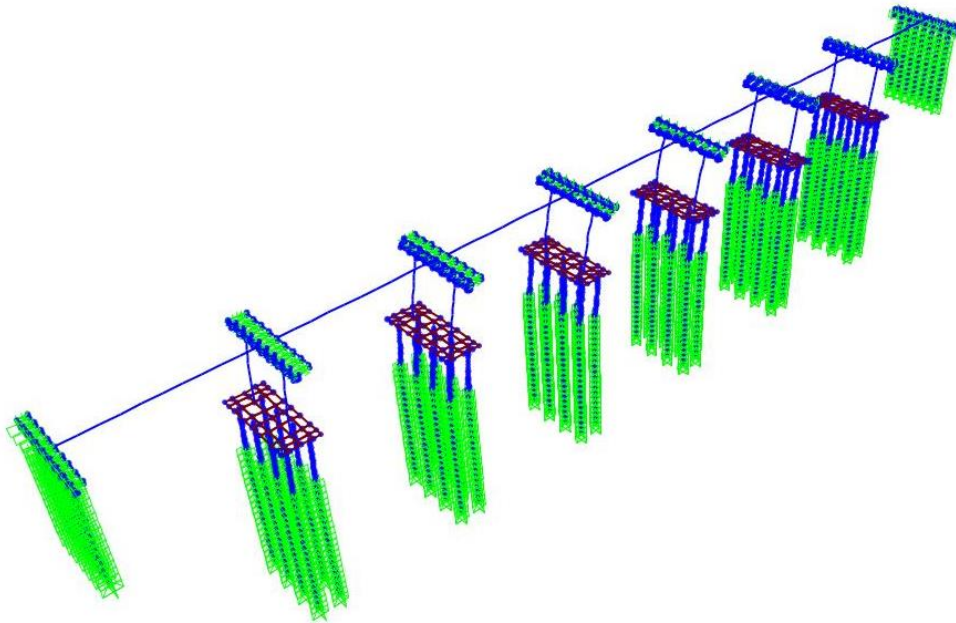
şekil 4.4. Mod şekli 1, $T=1.13$ s oyulma olmayan durum iin (boyuna doğrultuda)



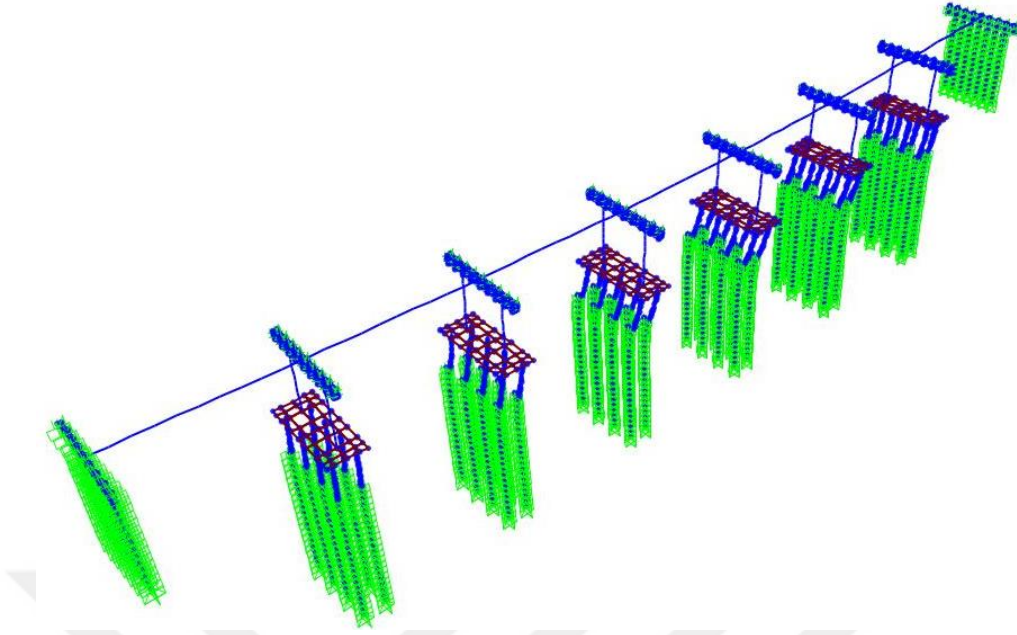
şekil 4.5. Mod şekli 2, $T=0.35$ s oyulma olmayan durum için (enine doğrultuda)



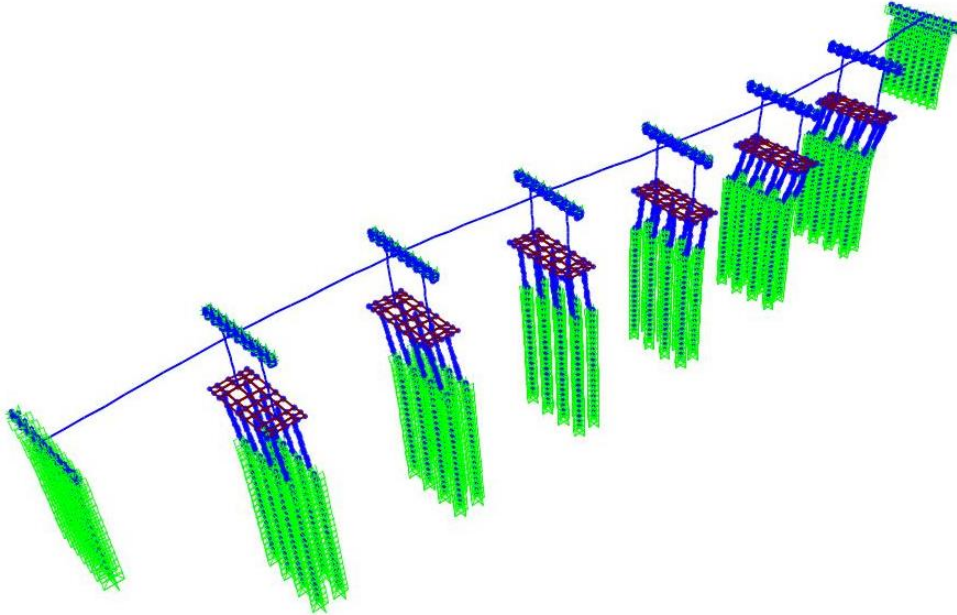
şekil 4.6. Mod şekli 3, $T=0.30$ s oyulma olmayan durum için (burulma)



şekil 4.7. Mod şekli 1, $T=1.29$ s tam oyulma durumu (boyuna doğrultuda)



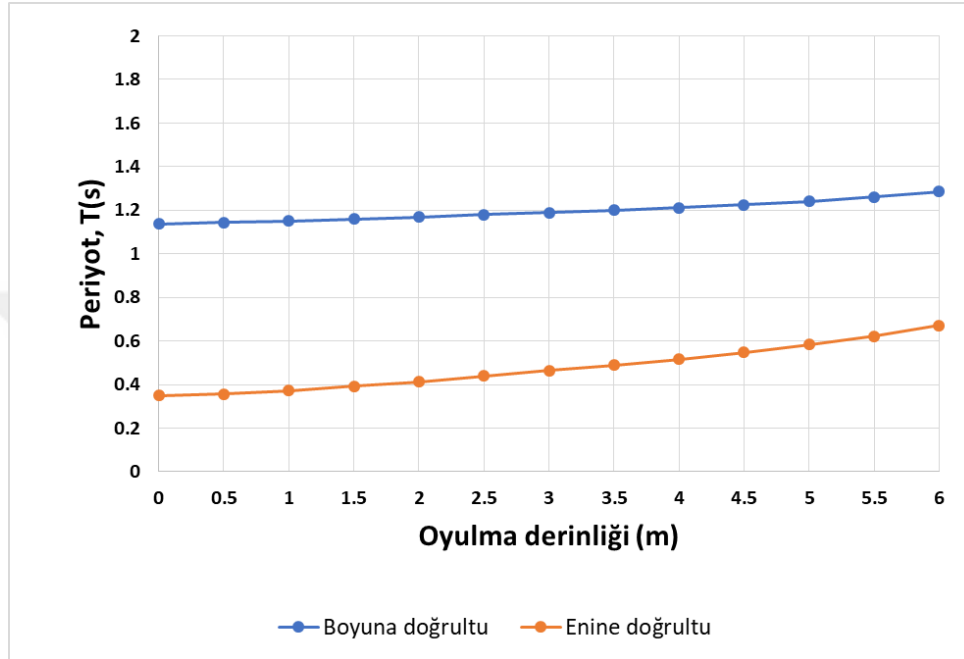
Şekil 4.8. Mod şekli 2, $T=0.67$ s tam oyulma durumu (enine doğrultuda)



Şekil 4.9. Mod şekli 3, $T=0.48$ s tam oyulma durumu (burulma)

Şekil 4.10'da, köprünün temel periyodundaki değişim ve oyulma derinliğindeki artış gösterilmektedir. Kazık temelleri etrafındaki malzemelerin aşınması, köprünün temel periyodunu artırmakla birlikte, temellerde yanal dayanımın serbest bırakılması nedeniyle köprünün yanal rijitliğinin azaldığını göstermiştir. Böylelikle, artan oyulma

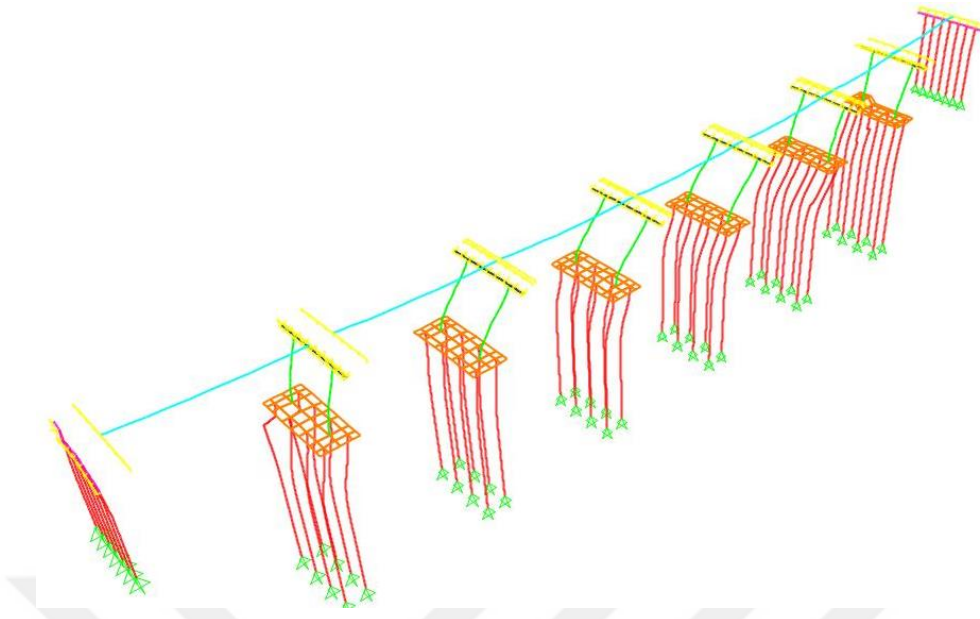
derinliği köprünün temel periyodunu arttırmıştır. Köprü boyuna doğrultudaki temel periyodu, oyulmasız durumda yaklaşık 1.13 s iken, tam oyulma (6 m) durumunda 1.29 s'ye ulaşmaktadır. Oyulmanın 6 m düzeyine çıkması ile temel periyottaki artış yaklaşık %14 olarak saptanmıştır. Enine doğrultuda ise, temel periyodu oyulma olmadığı durumda 0.35 s iken tam oyulma durumunda yaklaşık %91 artışla 0.67 s'ye ulaşmaktadır.



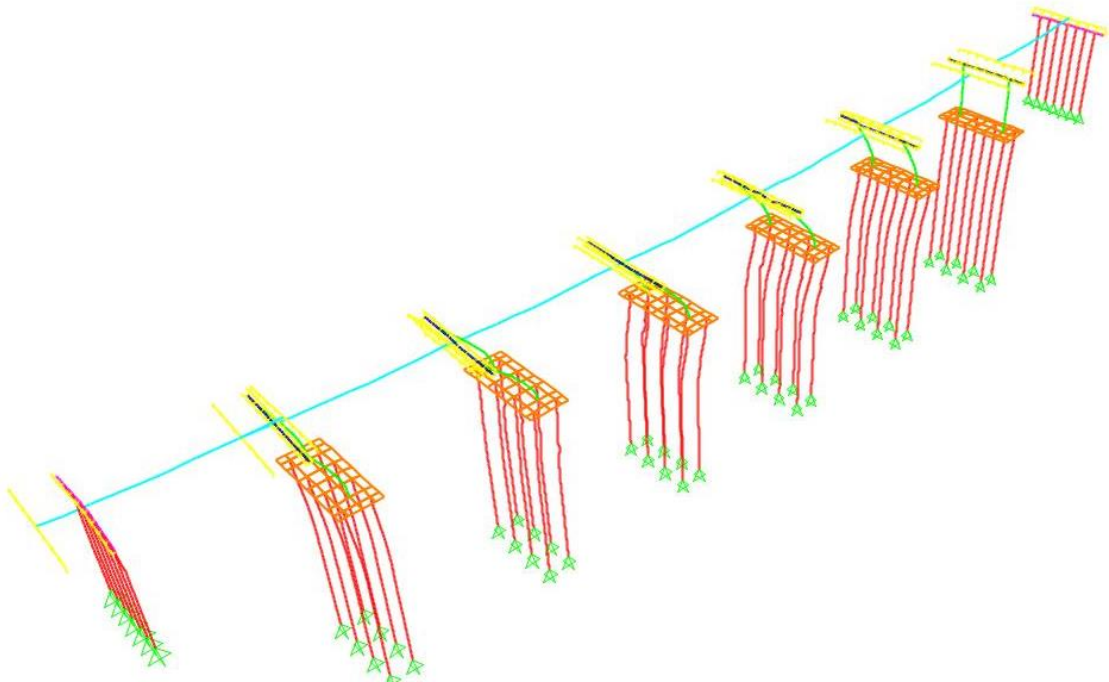
Şekil 4.10. Oyulma derinliğine göre köprü doğal titreşim periyodu değişimi

4.3. ZTA Analiz Sonuçları

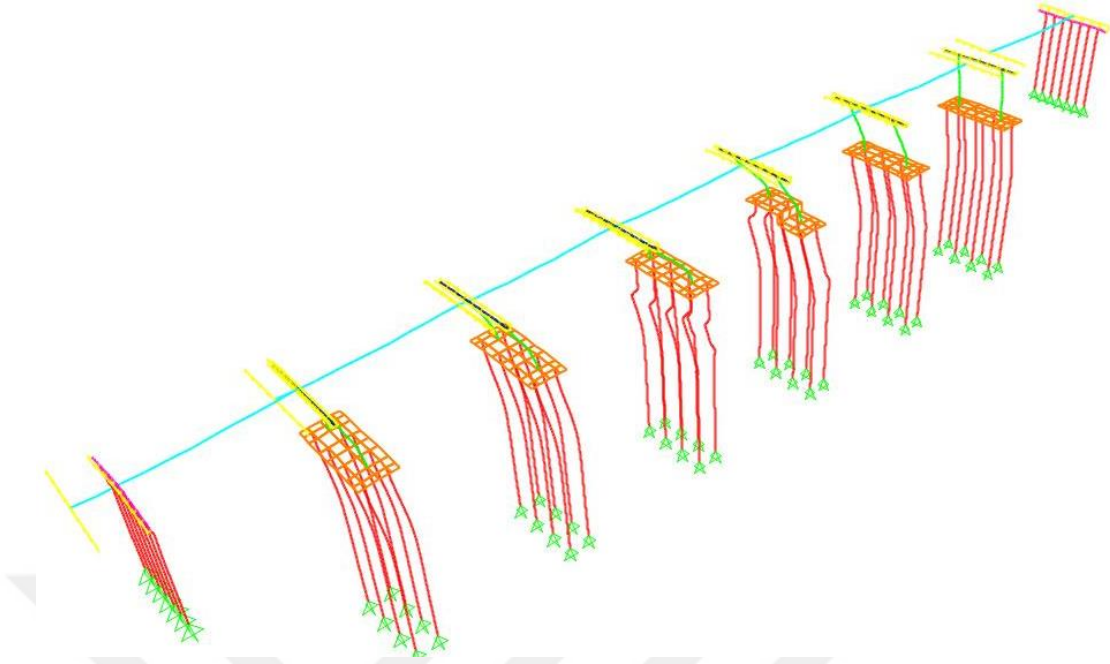
Şekil 4.11-4.13'te ZTA analizinden elde edilen sonuçlardan köprü modeline verilmiş deprem kayıtlarından bir kaçının yer değiştirmiş şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.11. Bolu depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli



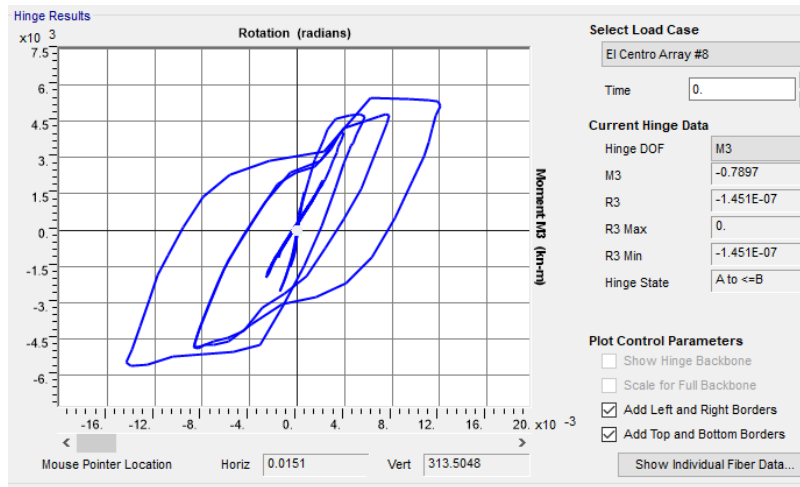
Şekil 4.12. Michoacan De Ocampo depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli



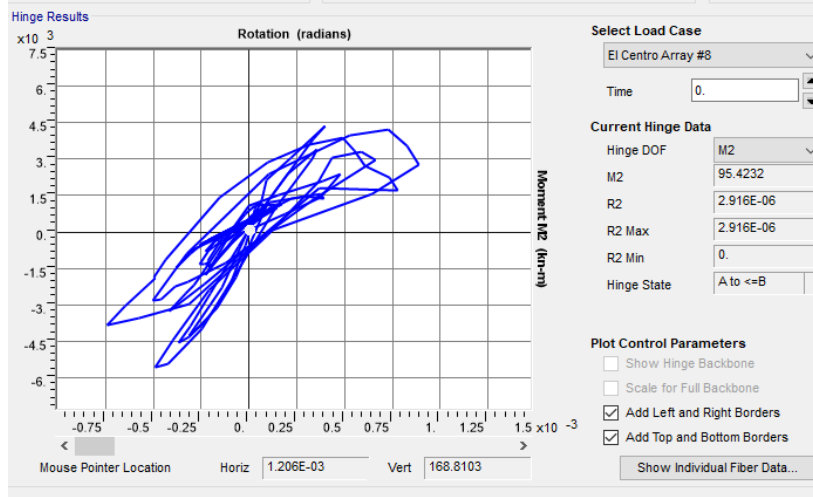
Şekil 4.13. El Centro Differential Array depreminin altında köprünün yer değiştirmiş şekli

4.3.1. Plastik mafsal davranışı

Plastik mafsal hipotezi, gerek binalarda gerekse köprü ve viyadüklerde deprem etkisi altında yapılan doğrusal olmayan analiz ile şekil değiştirmeye göre performans değerlendirmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydinoğlu, 2005). Literatürde plastik mafsal boyunun tanımlanması için pek çok bağlantı mevcuttur. Bu çalışmada kolon ve kazıklarda Şekil 3.14-3.15'te gösterildiği gibi modellemeye kolaylık sağlanması için (Fiber PM2M3) plastik mafsal tipi kullanılmıştır. Analiz sonrası oluşan plastik mafsaldan örnek olarak P3 aksında oluşan plastik mafsal Şekil 4.14-4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Tam oyulmalı durum için Elcentro Array depremi altında M3 yönünde P3 aksı kolonunda plastik mafsal oluşumu



Şekil 4.15. Tam oyulmalı durum için Elcentro Array depremi altında M2 yönünde P3 aksı kolonunda plastik mafsall oluşumu

4.2.1. Kolonların üst ucu yer değiştirme ve ivmesi

Farklı oyulma derinliklerine sahip 13 oyulma senaryosunun her biri için ve seçilen 11 deprem yer hareketi (Çizelge 3.3) kaydının her biri için toplam 143 çift yönlü (x, y) doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlardan köprü ayaklarının üst yapıyla bağlandığı noktalarda enine ve boyuna maksimum ivme ve yer değiştirmeleri, ayakların alt ucuna ve kazıkların üst başlığına gelen maksimum moment ve kesme kuvveti incelenmiştir. Şekil 4.16-4.19'da, kolon üst ucu yer değiştirme ve ivmelerinde meydana gelen değişiklik, 11 yer hareketi kaydının etkisi altında olan sıfır oyulma ve 6 farklı oyulma derinliği için gösterilmiştir. Grafiklerde mevcut 6 eğrinin her biri 11 farklı depremin ortalama yer değiştirme ve ivme değerlerini göstermektedir. Grafiklerin yatay eksenı mevcut köprünün orta ayaklarını temsil etmektedir.

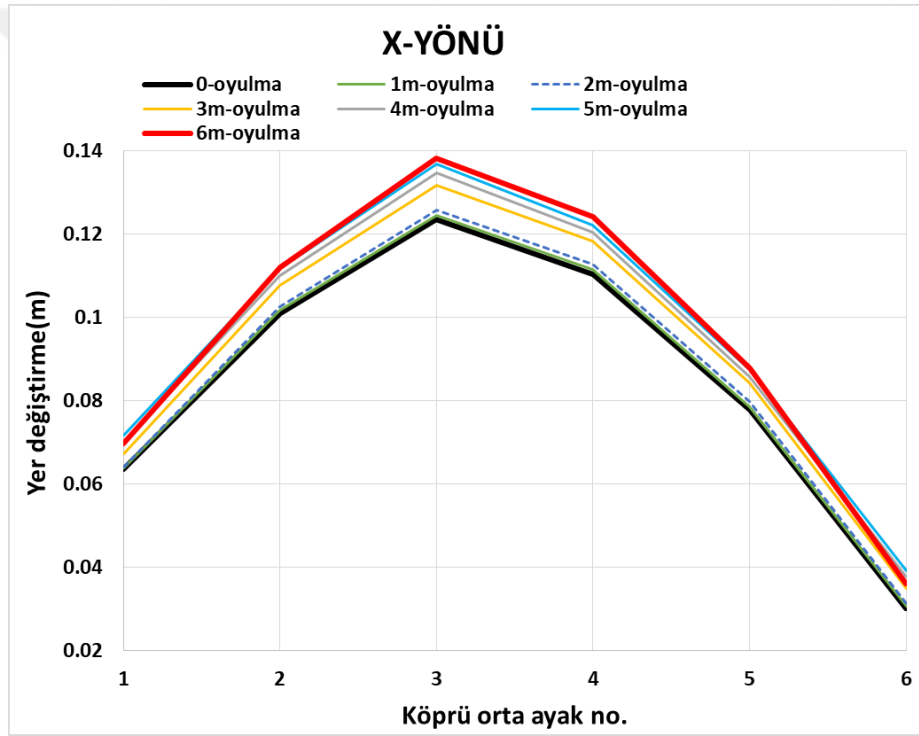
Şekil 4.16 x-doğrultusundaki en büyük kolon yer değiştirmelerini göstermektedir. Burada, oyulma arttıkça köprü boyuna doğrultusunda (x), kolon uçlarında yer değiştirme talepleri düşük oranda artışı görülmektedir. Oyulmasız durumda 0.123 m olarak belirlenen boyuna yer değiştirme, tam oyulma durumunda 0.138 m değerine çıkmaktadır. Burada, köprü boyuna doğrultusunda (x) kolon rijitliklerinin kazık grup rijitliğine göre düşük olmasından dolayı, oyulma artışı ile yer değiştirmelerde belirgin bir değişim görülmemiştir.

Şekil 4.17'de enine doğrultuda, oyulma arttıkça yer değiştirmelerin arttığı görülmüştür. Oyulmasız durumda yer değiştirme 0.025 m iken, tam oyulma durumunda 0.07 m yer değiştirme görülmektedir. Enine doğrultuda (y), kazık grup rijitliğine göre kolonlarının rijitliğinin artışından dolayı, oyulma etkileri ile kazık boyuna yer alan ve kazığa yanal direnç sağlayan zeminin ortadan kalkmasıyla, kazıklar daha esnek hale gelmiş ve bu şekilde yer değiştirmelerde belirgin bir artış görülmüştür. Ayrıca, yer değiştirmelerde 2 m oyulma derinliğinden sonra gözlemlenen ani artışın nedeni, zeminin

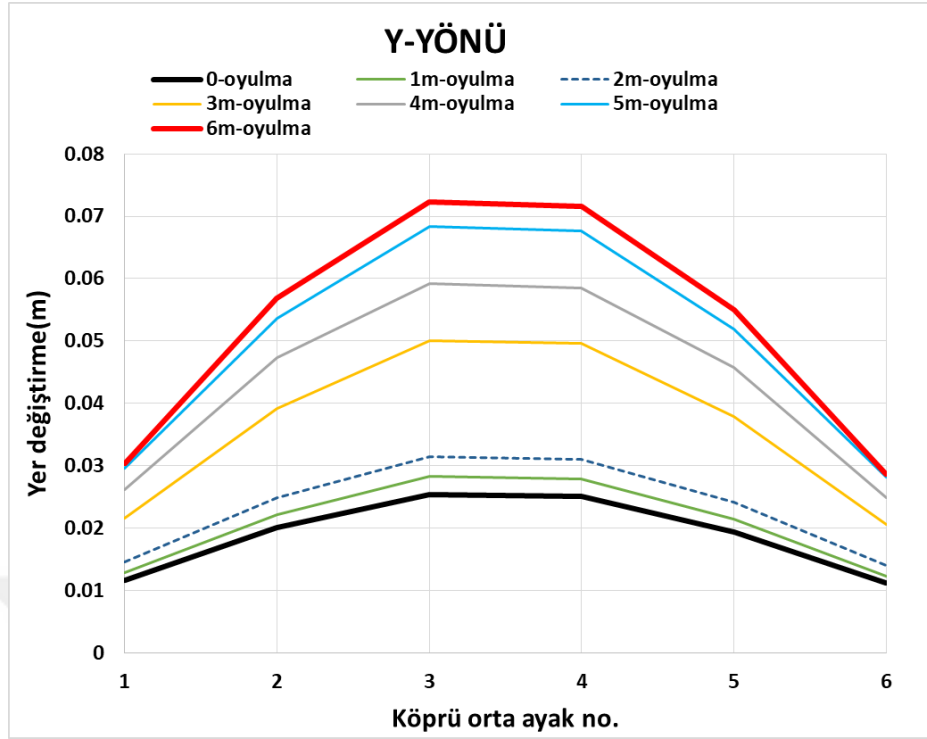
oyulma sonrasında ilk ve altındaki kum katmanlarına göre daha rijit olan tabakalarının ortadan kalkmasıdır.

Şekil 4.18'de köprü boyuna doğrultusunda (x), kolon uç ivmelerinde oyulma arttıkça 2 m oyulma derinliğine kadar belirgin bir ivme artışı olmayıp, 2 m oyulma derinliğinin üzerinde olan durumlarda kolon uçlarında oluşan ivmelerin yaklaşık olarak 0.25g değerinden 0.60g değerine çıktığı görülmüştür. Burada, kazıklar üzerinde oluşan oyulma kolonlara etkiyen boyuna doğrultudaki ivmeleri arttırmaktadır. Enine doğrultuda ise (y), oyulma artışı ile kolon uç ivmelerinde kararlı bir değişim görülmemiştir (Şekil 4.19).

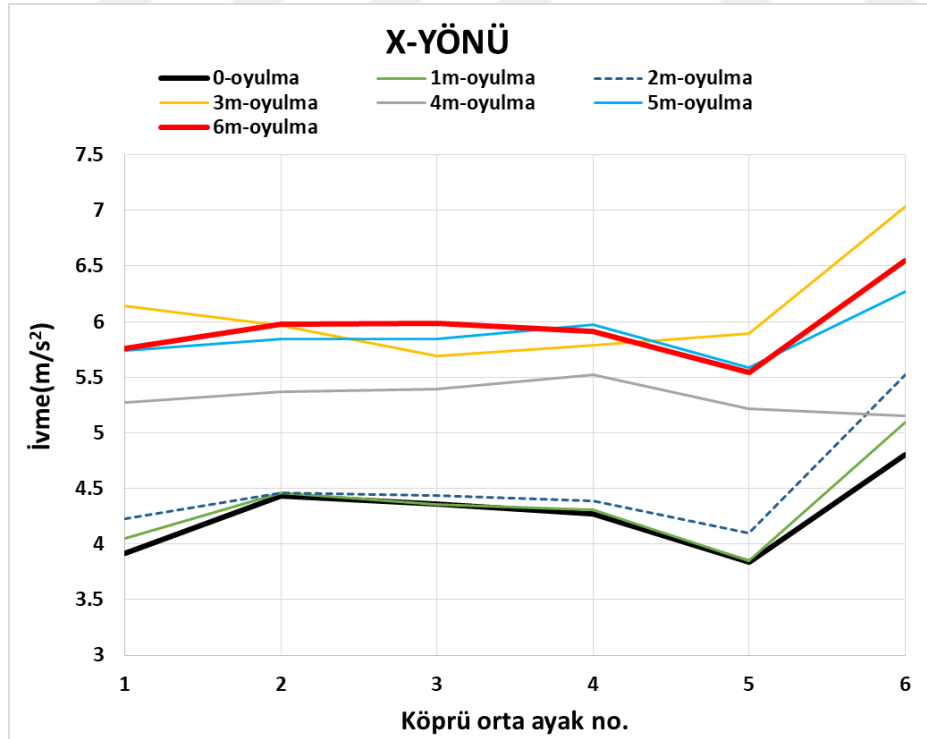
İki doğrultu karşılaştırıldığında, oyulma artışı ile kararlı olarak enine doğrultuda yer değiştirme taleplerinin artışı boyuna doğrultuya göre daha baskındır.



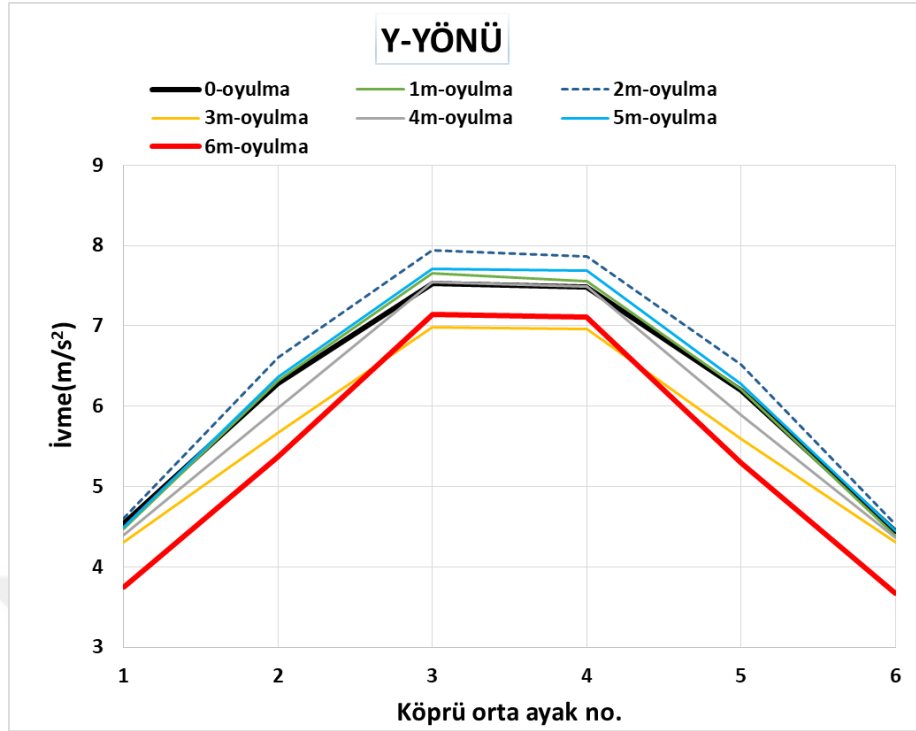
Şekil 4.16. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının x-doğrultusunda yer değiştirmesi



Şekil 4.17. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının y-doğrultusundaki yer değiştirmesi



Şekil 4.18. 11 adet deprem kayıtların ortalamalarının x-doğrultusundaki ivmesi



Şekil 4.19. 11 adet deprem kayıtlarının ortalamalarının y-doğrultusundaki ivmesi

4.2.2. Kolon tabanı kesit tesirleri

Şekil 4.20-4.21'de, 6 orta ayak kolonlarının 11 adet depremten dolayı alt ucunda oluşan kesme kuvveti ve eğilme momentleri gösterilmiştir.

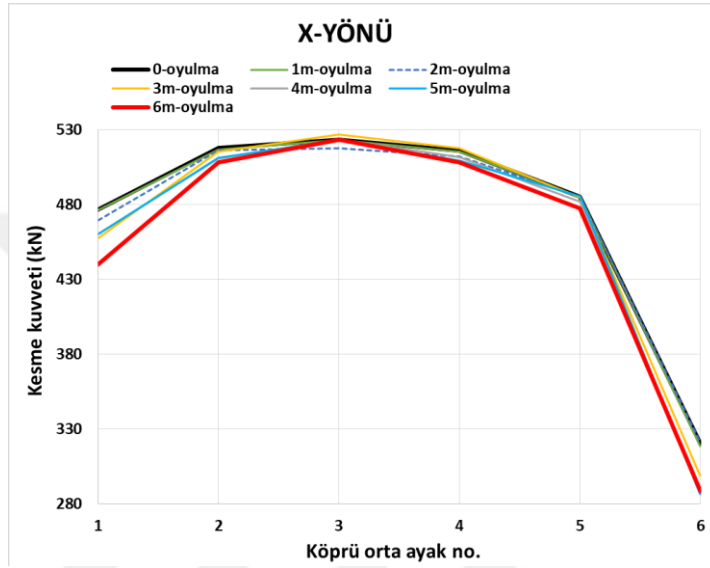
Boyuna doğrultuda (x), oyulma artışı ile kolon kesit tesirlerinde belirgin bir artış görülmemiştir (Şekil 4.20a-4.20b). Burada gözlemlenen davranış, kolonların oyulma etkileri altındaki yer değiştirme davranışına paralellik göstermektedir. Kolonlar boyuna doğrultuda zayıf eksenleri ile rijitliğe katkıda bulunduklarından dolayı, kazık grubuna göre rijitlikleri düşük kalmakta ve kazıklarda oluşan oyulmadan etkilenmeleri düşük düzeyde kalmaktadır.

Oyulma miktarı arttıkça, köprü enine doğrultusunda (y), kesme kuvveti ve moment taleplerinde sıfır oyulmadan 2 m oyulma derinliğine kadar ve 3 m ile 5 m oyulma derinliğine kadar belirgin bir talep azalımı görülmemektedir. Yukarıda belirtilen yer değiştirme ve ivme değişimlerine benzer olarak tabakalanma etkilerinden dolayı, 2m–3m ve 5m–6m oyulma derinlikleri aralığında, taleplerde azalma belirgin olarak görülmektedir.

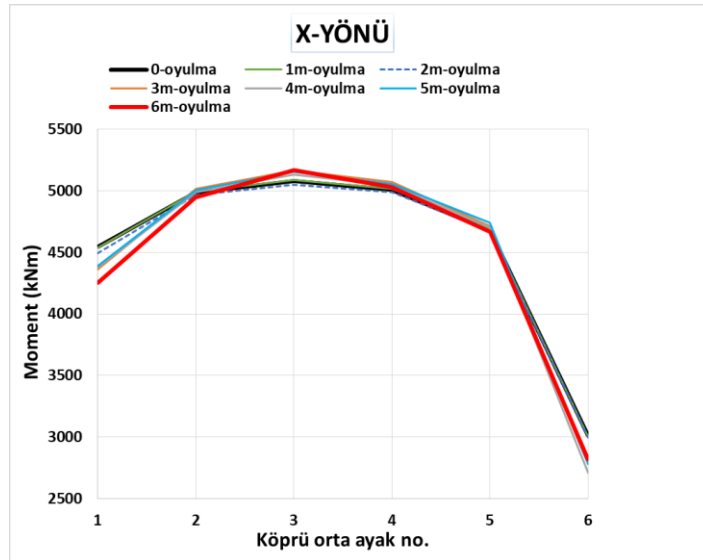
Kesme kuvveti ve eğilme momenti talepleri düşünüldüğünde, oyulmanın artmasıyla enine doğrultuda (y), 2 kata yakın bir talep azalması söz konusudur. Her deprem için analiz sonuçları ayrı ayrı incelendiğinde, belirli oyulma derinliklerinde zemin tabakalarının değişiminden dolayı süreksizlik olduğu görülse dahi ortalama kesme kuvveti ve oyulma derinliği arasındaki genel eğilim ters orantılı olarak görülmektedir.

Tam oyulma durumu sıfır oyulma durumu ile karşılaştırıldığında, kesme kuvvetindeki azalma y doğrultusunda yaklaşık 2 kata ulaşmıştır. X doğrultusunda ise belirgin bir artış görülmemiştir.

Burada, kazıkların zemin ile etkileşimde olmayan yüksekliğinin oyulma sonrası artmasından dolayı, kazık rijitlikleri azalmakta ve oyulma artışı kolonlarda oluşan kesme taleplerinde düşüşe yol açmaktadır. Sonuç olarak, oyulma derinliği arttıkça, kazıkların serbest yüksekliği etrafındaki zemin malzemesinin çıkarılmasıyla artmış ve bu da köprü yapısal sistemine ek esneklik kazandırmıştır.

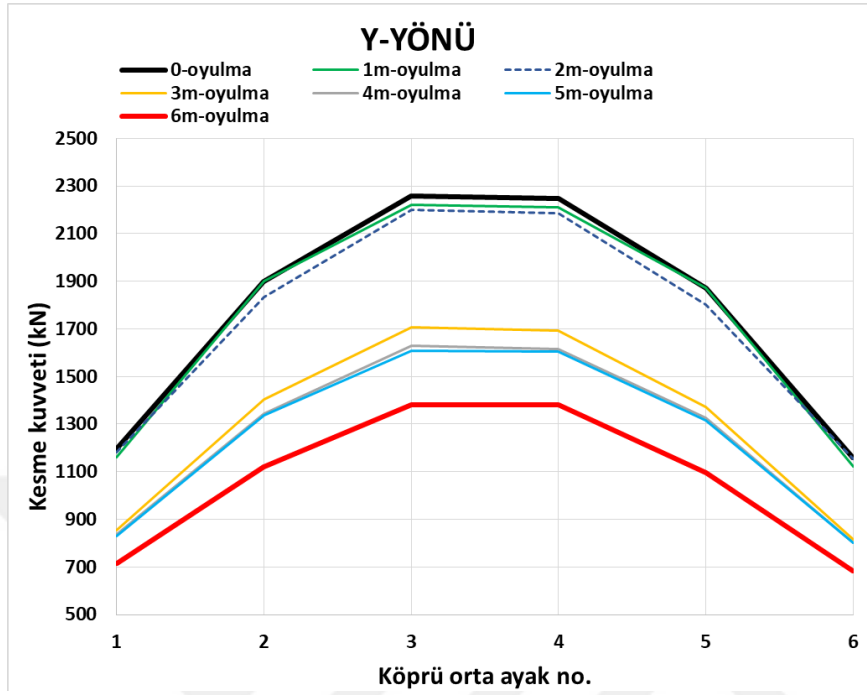


(a)

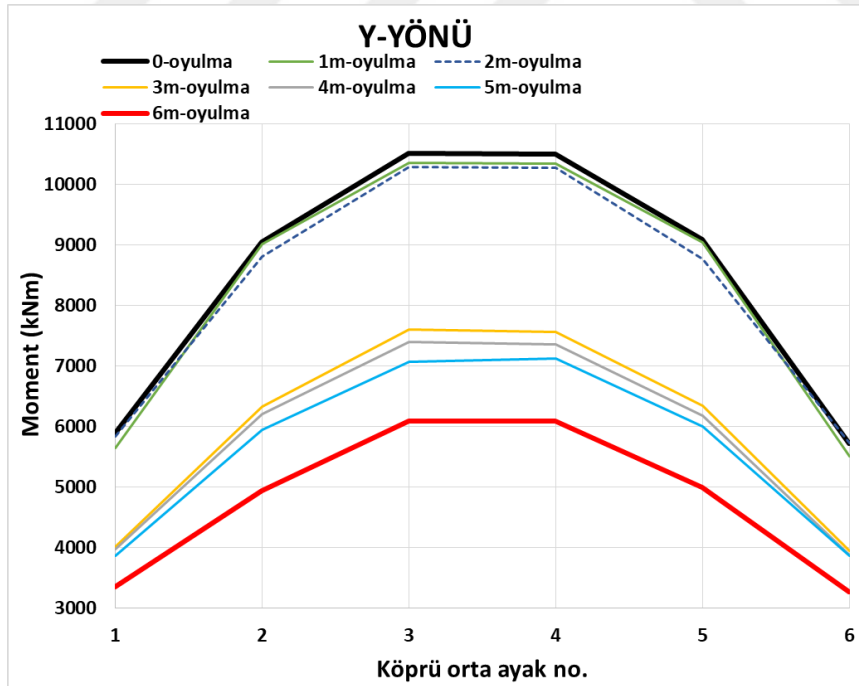


(b)

Şekil 4.20. 13 tip oyulma için (a)-(b) 11 adet deprem kayıt ortalamalarının boyuna doğrultuda kolon tabanı kesit tesirleri



(a)

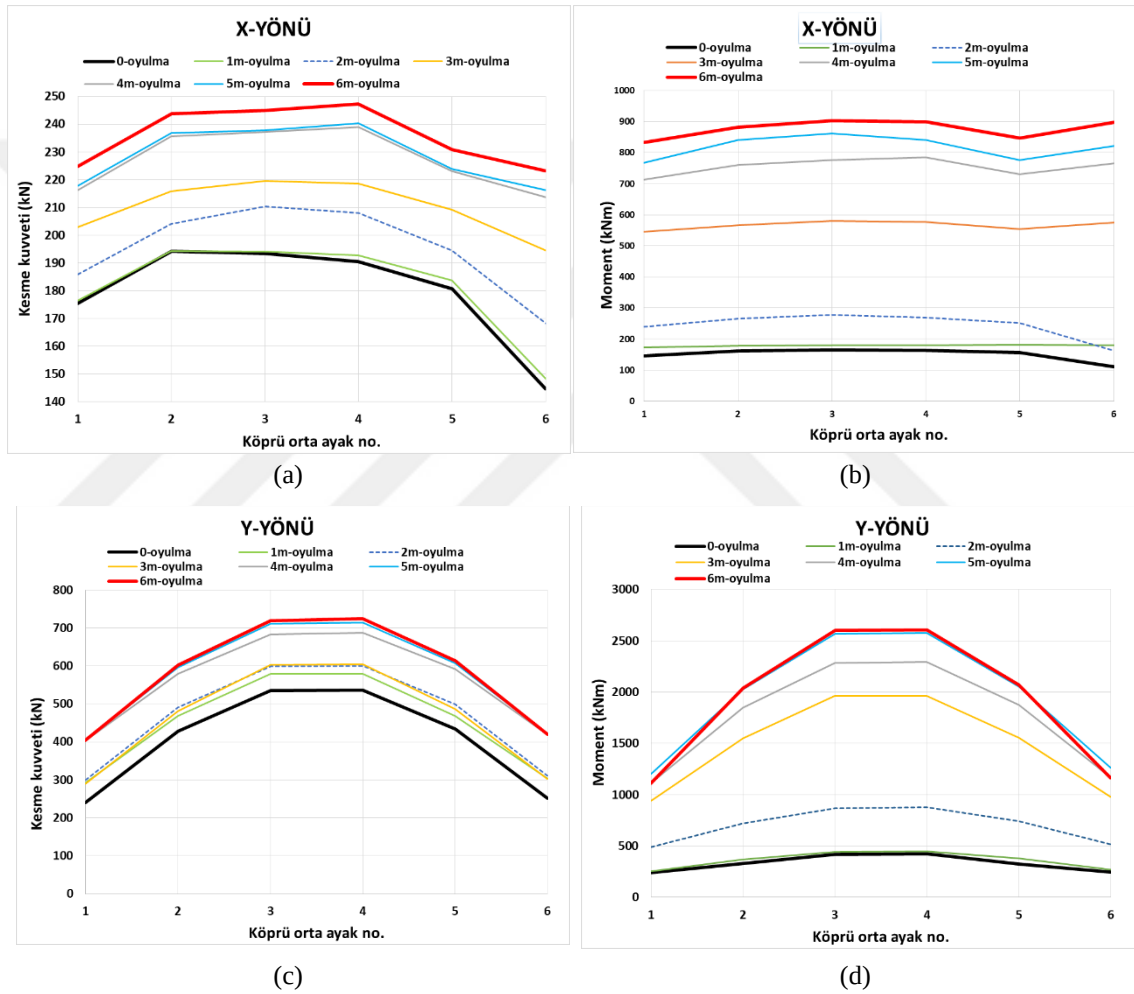


(b)

Şekil 4.21. 13 tip oyulma için (a)-(b) 11 adet deprem kayıt ortalamalarının enine doğrultuda kolon tabanı kesit tesirleri

4.2.3. Kazık – kazık başlığı birleşimi kesit tesirleri

11 adet deprem kaydı için, kazıklar için olası plastik mafsallık bölgesi olan ve kazık boyunca en büyük eğilme momentinin oluştuğu bölgelerden biri olan kazık – kazık başlığı birleşim bölgesine (kazık üst ucunda), etkiyen kesme kuvveti ve eğilme momentlerinde, köprü enine ve boyuna doğrultularında (x ve y) oyulma artışı ile birlikte belirgin olarak artış görülmüştür (Şekil 4.22a-4.22d). Bunun nedeni, oyulma artışı ile kazık grubunun yanal rijitliğinin azalarak daha esnek hale gelmesidir. Bu nedenle, kazık rijitliklerindeki düşüş kazık kesit tesirlerini arttırmakta ve kolonlarda oluşan kesme kuvveti ve moment taleplerinde azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.22. 13 tip oyulma için (a)-(d) 11 adet deprem kaydı ortalamalarının kazık – kazık başlığı birleşimi kesit tesirleri

5. SONUÇLAR

Köprü temellerinde oluşan oyulma, karayolu köprülerine zarar veren en önemli nedenlerinden biridir. Yapısal tasarımlarda sadece deprem etkilerini göz önüne almak yeterli değildir. Hem deprem hem de oyulmanın birleşik etkilerinin oluşma olasılığı yüksek olduğundan yapısal tasarım süreci boyunca oyulma etkileri dikkate alınmalıdır. Oyulma kaynaklı olumsuzluklar, deprem kaynaklı olumsuzluklardan daha yaygın olduğundan, oyulmanın tasarımda ihmal edilmesi köprü tasarımını dinamik etkilere karşı savunmasız hale getirebilir. Bu çalışmada, daha önceki yıllarda taşkın kaynaklı oyulmaya maruz kalmış olan Antalya'da bulunan Boğaçay Köprüsü durum çalışması olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada SAP2000 programıyla köprü modeli oluşturulmuş ve zaman tanım alanında sismik performans analizleri yapılarak oyulma etkileri altında davranışı belirlenmiştir. 2018 Deprem Yönetmeliği göz önünde bulundurularak, 13 farklı oyulma derinliği senaryosu 11 farklı yer hareketi çifti kullanılarak incelenmiştir. Burada, sıfır oyulma ve 0.5 m farkla değişen ve maksimum 6.0 m kadar öngörölmüş oyulma derinliklerine maruz kalabilecek Boğaçay Köprüsü'nün modelleri geliştirilmiştir. Kazık-zemin etkileşimi, p-y yayları olarak bilinen çoklu-doğrusal elastik ötesi davranış gösteren bağlantı elemanları kullanılarak modele dahil edilmiştir. Zeminin davranışını gösteren bu yaylar köprü kazıklarının tüm uzunluğu boyunca 0.5 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Taşkın veya akış kaynaklı oyulma varlığında, yanıl dayanım kaybını modellemek için köprü oyulma derinliğine kadar bu yaylar kaldırılmıştır.

Analiz sonuçları, kazıkların serbest uzunluğunun oyulma sonucunda köprü kazıklarını çevreleyen zemininin uzaklaştırılmasından dolayı arttığını ve sismik hareketlere dayalı yatay üst yapı yer değiştirmesinin köprü enine doğrultusunda belirgin bir artışını göstermektedir. Oyulma oluşumuna ilişkin iki aşırı durum göz önüne alındığında, incelenen köprüden deprem kuvvetleri altındaki üst yapı yanıl yer değiştirmelerinin, oyulmasız durumla karşılaştırıldığında tam oyulma durumunda köprü enine doğrultusunda yaklaşık üç katına kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, köprü geometrisinin oyulma nedeniyle değişmesi (yatay yer değiştirmelerindeki artış), köprü'nün bir deprem sırasında maruz kalacağı sismik hasarın daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.

Oyulmanın ayakların kesme talebine etkisi köprü enine doğrultusunda belirgin düzeydedir. Burada, oyulma derinliği arttıkça kolonlardaki kesme talebi azalmış olup, 6 m oyulma artışı, köprü ayaklarının eğilme talebindeki yaklaşık iki kat azalmaya ve sonuçta köprüye etkiyen sismik kuvvetlerde düşüşe neden olmuştur. Oyulma derinliği arttıkça, kazıkların serbest yüksekliği, kazıkların etrafındaki zemin malzemesinin çıkarılmasıyla artmış ve bu da köprü yapısal sistemine ek esneklik kazandırmıştır. Oyulmadan dolayı geometri değişikliklerinin köprü'nün sismik tepkisi üzerinde özellikle üst yapı yer değiştirmeleri üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Oyulma etkileri oyulmanın derinliğine göre, köprülerin sismik tepkisinde önemli bir değişikliğe yol açabilir. Bu nedenle, karayolu köprülerinin tasarım sürecinde oyulma ve depremin birleşik etkileri birlikte dikkate alınmalıdır.

6. KAYNAKLAR

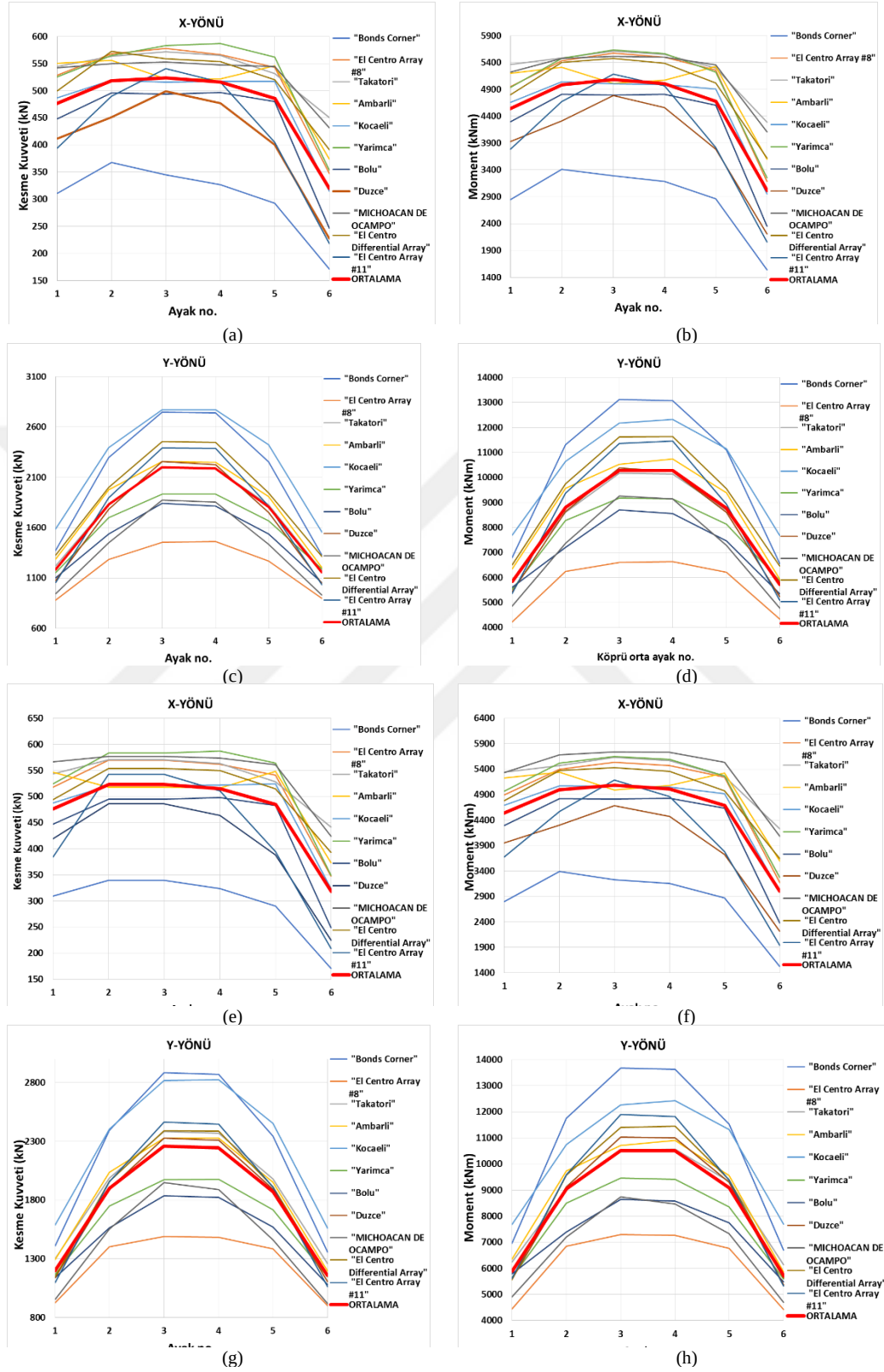
- AASHTO, 1996, "AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design", American Association of State Highway and Transportation Officials 16th Ed. with 2001 Interims, Washington D.C.
- AASHTO, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges, Adopted by the American Association of Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 2007, LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- AASHTO, L. (2007). SI-2007. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- Alipour, A., Shafei, B., and Shinozuka, M. (2010). "Evaluation of Uncertainties Associated with Design of Highway Bridges Considering the Effect of Scouring and Earthquake." Proceeding of Structure Congress 2010, Section. Bridges I, pp.288-297.
- ATC, 1996, ATC 32, Improved Seismic Design Criteria for California Bridges, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- ATC, A. (1996). 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council, report ATC-40. Redwood City
- ATKINSON, J., 2007. The Mechanics of Soils and Foundations. Taylor & Francis, Milton Park, Abingdon, LONDON, 431s.
- Aviram, A., Mackie, K. R., & Stojadinović, B. (2008). Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Avşar, Ö., Atok, B & Caner A. (2017), "In-Depth Investigation of Seismic Vulnerability of an Aging River Bridge Exposed to Scour", *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(s).
- Avşar, Ö., (2009). "Fragility based seismic vulnerability assessment of ordinary highway bridges in Turkey" PhD Dissertation, Middle East Technical University.
- Bennett, C.R., Lin, C., Parsons, R., and Han, J. (2009). "Evaluation of behavior of a laterally loaded bridge pile group under scour conditions." Proceedings of SEI 2009 Structures Congress, Texas, pp. 290-299.
- Briaud, J. L. (2004). Pier and contraction scour in cohesive soils (Vol. 516). *Transportation Research Board*.
- Brown, D.A., O'Neill, M.W., Hoit, M., McVay, M., El Naggar, M.H., and Chakraborty, S. (2001). "Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups." NCHRP Report 461, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Caltrans (2008). Seismic Design Criteria 1.4. California Department of Transportation.
- CALTRANS, 2006, Seismic Design Criteria Version 1.4, California Department of Transportation.
- CALTRANS-SDC. (2013). Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.4. U.S.A.: California Department of Transportation.

- Christensen, D. S. (2006). Full scale static lateral load test of a 9 pile group in sand.
- COŞAR, A.(2010). “ Meskun yerlerde dere ıslah çalışmaları ve boğa çayı”.
- Das, B. (2007). Principles of Foundation Engineering. U.S.A.: Global Engineering.
- Diamantidis, D., & Arnesen, K. (1986). Scour effects in piled structures—*A sensitivity analysis*. Ocean engineering, 13(5), 497-502.
- Dipova, N., 1997. Assessment of soil behaviour in the Konyaaltı region (Antalya), M.S.Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Domanıç K.A., 2008, Effects of Vertical Excitation on Seismic Performance of Highway Bridges and Hold-Down Device Requirements, Master Thesis, Department of Civil Engineering, METU, Ankara.
- Dong, Y., Frangopol, D. M., and Saydam, D. (2013). “Time-variant sustainability assessment of seismically vulnerable bridges subjected to multiple hazards.” *Earthquake Eng. Struct. D.*, 42(10), 1451–1467.
- ElGawady, M., & Greenwood, S. M. (2009). Seismic Assessment of WSDOT Bridges with Prestressed Hollow Core Piles–Part 2
- Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake spectra*, 16(3), 573-592.
- FEMA, A. (2005).440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Redwood City.
- FEMA, P. (2000). Commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Gautham Ganesh Prasad. (2011). “Analysis of bridge performance under the combined effect of earthquake and flood-induced scour” Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.
- Jain, S.C. and Fischer, E. E. (1979). “Scour around Circular Bridge Piers at High Froude Numbers.” Rep. No. FHwa-RD-79-104, Federal Hwy. Administration (FHWA), Washington, D.C.
- John V. Klinga, Alice Alipour. (2015). “Assessment of structural integrity of bridges under extreme scour Conditions”. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003-9293, United States.
- Johnson, P. A. (1995). “Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 8, pp. 626-629.
- Kizilduman, S. (2016). A study on seismic behavior of scour-vulnerable bridges, PhD Dissertation, Middle East Technical University.
- Sondevir, (2012). Köprü Bir Kez Daha Çöktü. Retrieved from Son Devir
Ekonomi:<http://ekonomi.dunyabulteni.net/gundem/65171/kopru-bir-kezdaha-Coktu>.
- Kramer, S., 1996, “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice Hall, New Jersey.

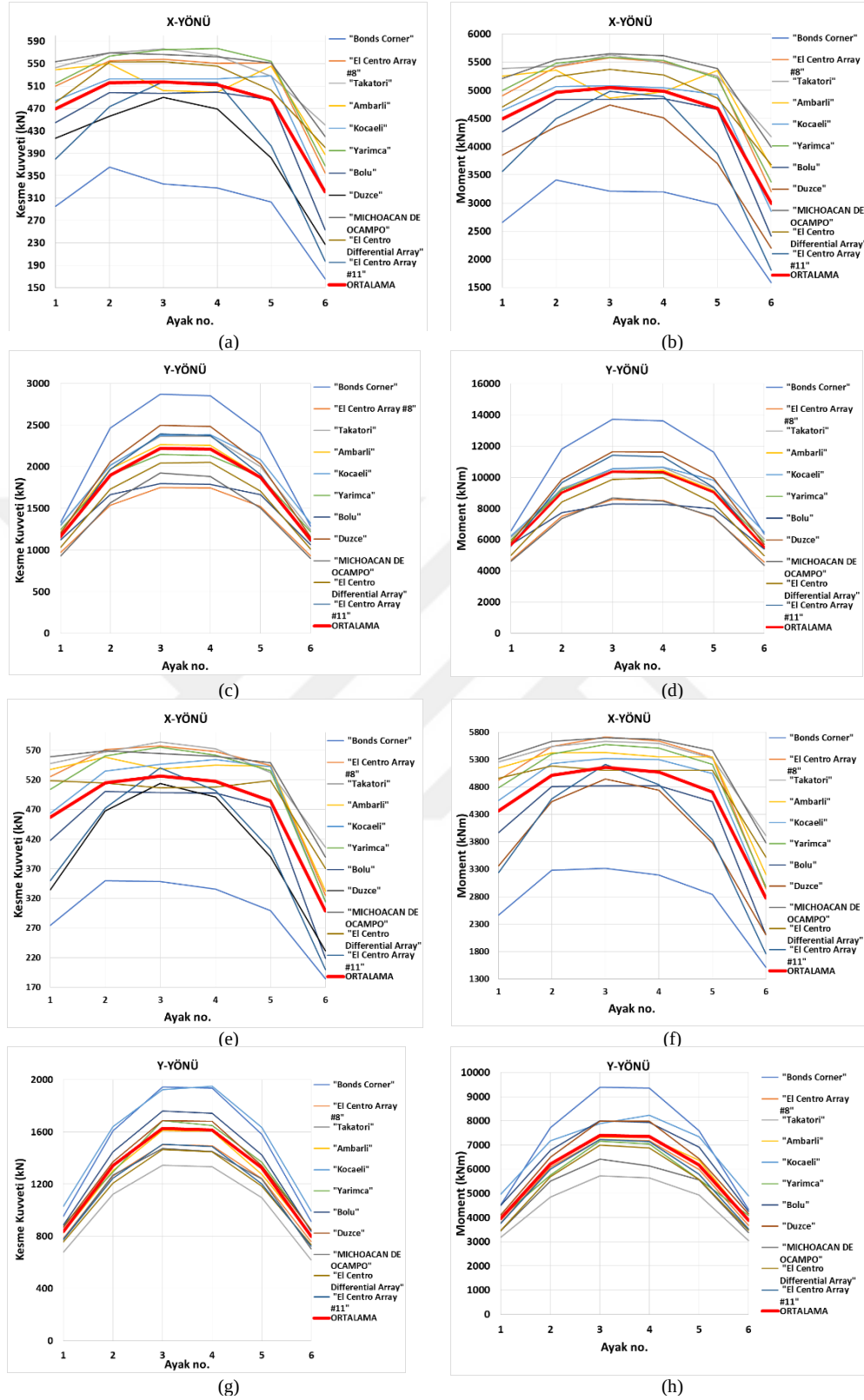
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., and Girard, L. W. (2007). "Countermeasures to protect bridge piers from scour." NCHRP Report 593, National cooperative highway research program, Transportation Research Board of The National Academies.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. P., & Cardoso, A. H. (2013). Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(10), 1089-1098.
- Laursen, E. M., and Toch, A. (1956). "Scour around Bridge Piers and Abutments." Bulletin No. 4, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa.
- Lin, C. (2012). Evaluation of lateral behavior of pile-supported bridges under scour conditions (Doctoral dissertation, University of Kansas)
- Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Offshore Technology in Civil Engineering's Hall of Fame Papers from the Early Years, 77-94.
- McClelland, B., & Focht, J. A. (1958). Soil modulus for laterally loaded piles. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 123(1), 1049-1063.
- McVay, M. C., & Niraula, L. (2004). Development of PY curves for large diameter piles/drilled shafts in limestone for FBPIER (No. Final Report,).
- McVay, M. C., Shang, T. I., & Casper, R. (1996). Centrifuge testing of fixed-head laterally loaded battered and plumb pile groups in sand.
- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2), 125-136.
- Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000). Bridge scour, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- Ministry of Public Works and Settlement, Government of Republic of Turkey, 1998, "Specification for Structures to be Built in DisasterAreas",
- Ministry of Public Works and Settlement, Republic of Turkey, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- Ministry of public works and settlement, General Directorate of Disaster Affairs. (1996). <http://www.deprem.gov.tr/en/Category/earthquake-zoning-map-96531>.
- Mokwa, R. L., Duncan, J. M., and Charles, E. V. (2000). "Investigation of the resistance of pile caps and integral abutments to lateral loading." Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, 2000.
- Mokwa, R. L., Duncan, J. M., and Charles, E. V. (2000). "Investigation of the resistance of pile caps and integral abutments to lateral loading." Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, 2000.
- Priestley N., Seible F., Calvi M., 1996, Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, New York.
- Reese, L. C. (2001). Van Impe. WF, Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading, AA Balkema, Rotterdam.
- Reese, L. C., & Van Impe, W. F. (2010). Single piles and pile groups under lateral loading. CRC Press.

- Reese, L. C., Isenhower, W. M., & Wang, S. T. (2006). Analysis and design of shallow and deep foundations (Vol. 10). Hoboken, NJ: Wiley.
- Reese, L. C., Wang, S. T., & Fouse, J. L. (1975). Use of drilled shafts in stabilizing a slope. *In Stability and Performance of Slopes and Embankments II* (pp. 1318-1332). ASCE.
- Richardson, E.V. and Davis, S. R. (2001). "Evaluating Scour at Bridges." Publication No. FHWA NHI 01-001, Hydraulic Engineering Circular No – 18, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 2001.
- Rollins, K. M., Olsen, K. G., Jensen, D. H., Garrett, B. H., Olsen, R. J., & Egbert, J. J. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(10), 1272-1283.
- Sevgili, G. (2007). Seismic performance of multisimple-span skew bridges retrofitted with link slabs, Middle East Technical University.
- Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. (1969). "Local Scour around Bridge Piers." *Asce Proc, Journal of Hydraulic Division*, Vol. 95, No. 6, pp. 1919-1940.
- TS500. (2000). TS500 Requirements for design and construction of reinforced concrete structures.
- Tsai, C. and Chen, Y. (2006). "Seismic Capacity Evaluation of Bridges with Scoured Group Pile Foundations." 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Paper No. 053.
- Tuna, T. (2016, June 18). Köprü Çökme Noktasında. Retrieved July 20, 2016, from haberhurriyeti:<http://www.haberhurriyeti.com/kopru-cokme-noktasinda-159293.html>.
- Walsh, J. M., (2005), "Full-scale lateral load test of a 3 x 5 pile group in sand,"
- Wardhana, K., & Hadipriono, F. C. (2003). Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3), 144-150.
- Wilson E.L., 2002, "Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures", Computers and Structures, Inc., Berkeley, Calif.
- Yanmaz, A. M. (2002). Köprü Hidroliği, First Edition. Ankara: Metu Press.
- Yanmaz, A. M., ve diğ., (2018). İkili Köprü Ayaklarında Temiz Su Oyulmasının Zamansal Gelişimi. *İMO Teknik Dergi*, 2018 8167-8184, Yazı 493
- Yanmaz, A., and Caner, A. (2012). Çaycuma Köprüsünün Çökmesi Üzerine Görüşler. Ankara: Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti.
- Yüksekol Ü.T., 2007, A Simple Assessment of Lateral Pier Response of Standard Highway Bridges on Pile Foundations, Master Thesis, Department of Civil Engineering, METU, Ankara.

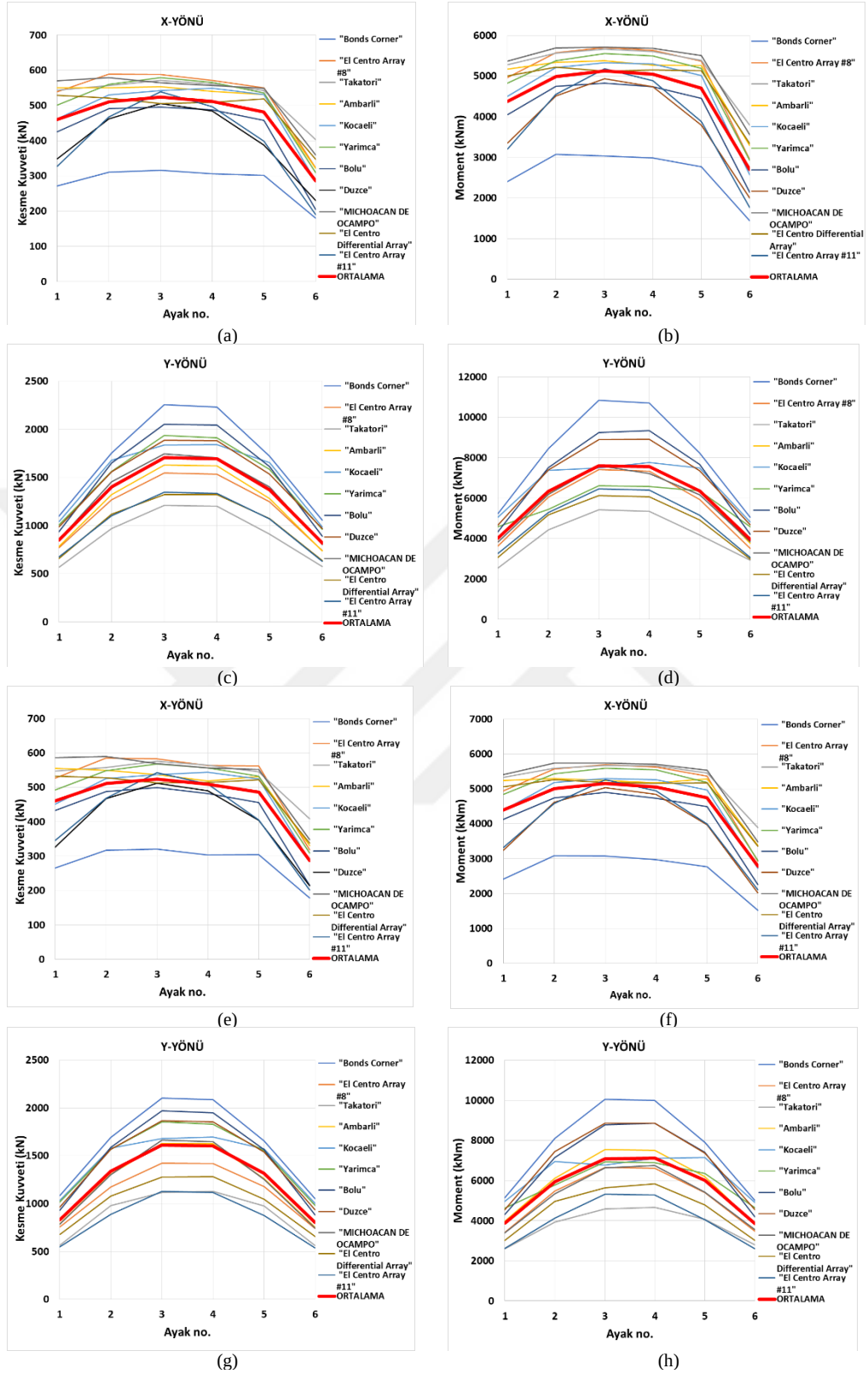
7. EKLER



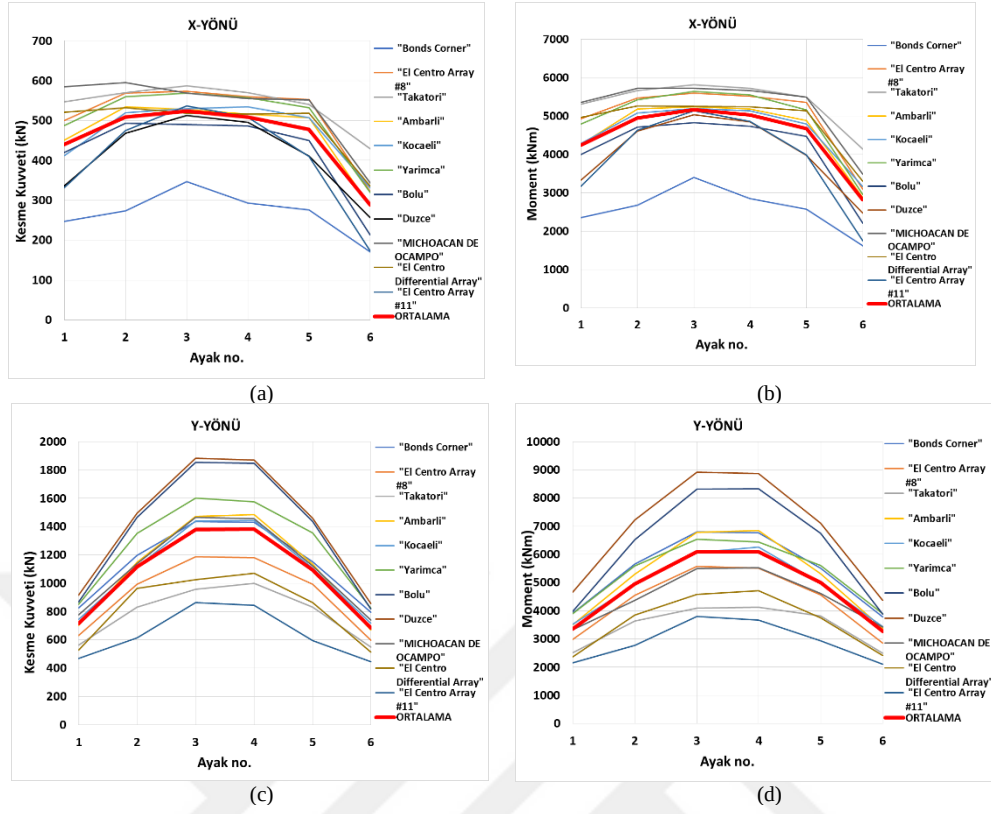
Şekil E1. Oyulmasız (a-d) ve 1m oyulmada (e-h) köprü enine ve boyuna doğrultularında kolon alt ucundaki maksimum kesme ve moment talepleri için kullanılan deprem kayıtları



Şekil E2. 2m (a-d) ve 3m oyulmada (e-h) köprü enine ve boyuna doğrultularında kolon alt ucundaki maksimum kesme ve moment talepleri için kullanılan deprem kayıtları



Şekil E3. 4m (a-d) ve 5m oyulmada (e-h) köprü enine ve boyuna doğrultularında kolon alt ucundaki maksimum kesme ve moment talepleri için kullanılan deprem kayıtları



Şekil E4. 6m (a-d) oyulmada köprü enine ve boyuna doğrultularında kolon alt ucundaki maksimum kesme ve moment talepleri için kullanılan deprem kayıtları

ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Akram ZAKY

akram.zaky7@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2012-2016	Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya