

**ÇELİK KİRİŞLİ KÖPRÜLERİN VE ÖNGERMELİ
KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN MALİYET VE
DEPREM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Waheed RASEKH



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK KİRİŞLİ KÖPRÜLERİN VE ÖNGERMELİ KİRİŞLİ BETONARME
KÖPRÜLERİN MALİYET VE DEPREM PERFORMANSININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

Waheed RASEKH
(0000-0002-4085-3134)

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

TEZ ONAYI

Waheed RASEKH tarafından hazırlanan “ÇELİK KİRİŞLİ KÖPRÜLERİN VE ÖNGERMELİ KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN MALİYET VE DEPREM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
(ORCID: 0000-0002-1867-7103)

İkinci Danışman: Prof. Dr. Murat Dicleli (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
(ORCID: 0000-0002-1869-937X)

Başkan : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
(ORCID: 0000-0002-1867-7103)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER
(ORCID: 0000-0001-5820-0257)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Melih SÜRMEİ
(ORCID: 0000-0002-1657-1305)
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim
Dalı

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12/05/2020

Waheed RASEKH

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK KİRİŞLİ KÖPRÜLERİN VE ÖNGERMELİ KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN MALİYET VE DEPREM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Waheed RASEKH

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Murat Dicleli (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Bu tez kapsamında, çelik kirişli köprülerin ve öngermeli kirişli betonarme köprülerin inşaat maliyetleri ve deprem performansları karşılaştırılmalı olarak irdelenmektedir. Gerçekleştirilen bu irdelemelere göre sözkonusu köprülerin maliyet ve yapısal güvenlik kıstaslarına göre parametrik çalışmalar yapmak ve tasarımlarına ilişkin önerilerde bulunmak amaçlanmıştır. Bu amaçla, iki ana grup olarak çelik kirişli ve öngermeli kirişli köprüler den oluşan toplam 288 köprünün tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu köprülerin analizinde parametre olarak, farklı açıklık uzunlukları, kolon yükseklikleri, zemin tipleri ve sismik bölgeleri dikkate alınarak karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Tasarımda ve inşaat maliyetleri ile sismik performanslarının belirlenmesinde sonlu elemanlar programından ve geliştirilen MS EXCEL yazılımından yararlanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalara göre, köprülerin başlangıç maliyet hesabında öngermeli kirişli köprülerin çelik kirişli köprülerden daha ekonomik olduğu ve tasarımın minimum sınırları göz önüne alındığında, sismik yükler altında öngermeli kirişli köprülerin çelik kirişli köprülere göre daha iyi bir performans gösterdikleri sonuçlarına ulaşılmıştır. Bununla birlikte, sismik performans analizlerinde öngermeli ve çelik kirişli köprüler için aynı boyutlara sahip bir alt yapı kullanıldığında, çelik kirişli köprülerin daha iyi bir sismik performans sergilediği sonucuna da ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Öngermeli betonarme kirişler, çelik kirişler, Köprü, Doğrusal Olmayan Modelleme, maliyet tahmini, sismik performans.

2020, x + 98 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARISON OF THE COST AND SEISMIC PERFORMANCE OF STEEL GIRDER BRIDGES AND PRESTRESSED CONCRETE GIRDER BRIDGES

Waheed RASEKH

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Second Supervisor: Prof. Dr. Murat Dicleli (Middle East Technical University)

In this thesis, a comparative study of construction costs and seismic performances of prestressed concrete girder bridges and steel girder bridges are carried out. According to these examinations, it was aimed to make parametric studies and make suggestions regarding their designs according to the cost and structural security criteria of the considered bridges. For this purpose, a total of 288 bridges, consisting of steel girder and prestressed concrete (PC) girder bridges, were designed as two main groups. In the analysis of these bridges, the cost and seismic performance of prestressed concrete girder and steel plate girder bridges are compared particularly considering in the various span lengths, column heights, soil types, and seismic zones. Finite element program and developed MS EXCEL software have been utilized in the design and in determining construction costs and seismic performances. In the initially cost calculation, it was carried out from the studies that the PC girder bridge is more economical than the steel plate girder bridge. Accordingly, considering the minimum limits of the design, in seismic loads (PC) girder bridges perform better seismic performance than steel girder bridges. However, when substructure with the same dimensions is used for (PC) girder and steel girder bridges, steel girder bridges perform better seismic performance than (PC) girder bridges in seismic performance analyses.

Key words: Prestressed Girders, Steel Girders, Bridge, Nonlinear Modeling, Cost Estimation, Seismic Performance.

2020, x + 98 pages.

ÖNSÖZ

Elhamdülillahi rabbil alemin, vessalatü vesselamü ala rasülina Muhammedin ve ala alihi vesahbihi ecmain. Bu tezin tamamlanmasını nasip eden Rabbime sonsuz şükürler olsun. Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi, tecrübe, maddi ve manevi desteklerini hiçbir vakit esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e ve tez aşamasında bana çok değerli zamanını ayırıp tecrübelerini, kıymetli tavsiyelerini ve bilgi paylaşımlarını esirgemeyen ikinci tez danışmanım sayın Prof. Dr. Murat DİCLELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını ve kıymetli tecrübelerini hiç esirgemeyen ULUKUN mühendislik proje ofisinde çalışan çok değerli arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Burak Çağrı Duran'a ve İnş. Yük. Müh. Çağrı Demir'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında güzel tavsiyelerini ve yardımlarını esirgemeyen sayın Fikrat Almahdi'ye, Muhammed Enes Karaarslan'a, Mojibullah Noori'ye, Badradine Ali'ye ve Mujebul Rahman Latifi'ye teşekkürlerimi sunarım.

Naweed Ziarkash ve Omid Ziarkash abilerime ve Farrukh Vida kuzenime manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim ve hayatım boyunca ilgilerini, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme özellikle anne ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Waheed RASEKH
12/05/2020

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| ÖNSÖZ..... | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | x |
| 1. GİRİŞ 1 | |
| 1.1. Köprülerin Önemi..... | 1 |
| 1.2. Öngermeli Kirişli Köprüler..... | 1 |
| 1.3. Çelik Kirişli Köprüler..... | 2 |
| 1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı..... | 3 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 8 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 11 |
| 3.1. Genel Köprü Bilgileri..... | 11 |
| 3.1.1. Çalışmada Dikkate Alınan Parametreler..... | 11 |
| 3.1.2. Referans (Kıyas) Köprüsünün Bilgileri..... | 12 |
| 3.2. Malzeme Özellikleri..... | 28 |
| 3.3. Yükler..... | 28 |
| 3.3.1. Sabit Yükler..... | 28 |
| 3.3.2. Hareketli Yükler..... | 29 |
| 3.3.3. Yanal Toprak Basınçları..... | 30 |
| 3.3.4. Sismik Yükler..... | 31 |
| 3.4. Köprü Tasarımı..... | 32 |
| 3.4.1. Köprünün Üstyapı Tasarımı..... | 32 |
| 3.4.2. Elastomer Mesnetlerin Tasarımı..... | 35 |
| 3.4.3. Köprünün Altyapı Tasarımı İçin Analizlerde Kullanılan Deprem Modeli..... | 35 |
| 3.4.4. Orta Ayağın Tasarımı..... | 40 |
| 3.4.5. Kenar Ayaklar ve Temellerin Tasarımı..... | 41 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 42 |
| 4.1. Tasarım İçin Analiz Sonuçları..... | 42 |
| 4.1.1. Modal Titreşim Periyotları..... | 42 |
| 4.1.2. Altyapının Tasarım Sismik Kuvvetleri..... | 48 |
| 4.2. Köprülerin Maliyet Hesabı ve Maliyetlerin Karşılaştırılması..... | 54 |
| 4.2.1. Köprülerin Maliyet Hesabı..... | 54 |
| 4.2.2. Köprü Maliyetlerinin Karşılaştırılması..... | 56 |
| 4.3. Sismik Performans Analizleri..... | 60 |
| 4.3.1. Sismik Performans Analizlerinde Dikkate Alınan Köprü Parametreleri..... | 60 |
| 4.3.2. Yer Hareketlerin Seçilmesi..... | 60 |
| 4.3.3. Uzun Doğrultuda Kenar Ayağın Modeli..... | 64 |
| 4.3.4. Enine Doğrultuda Kenar Ayağın Modeli..... | 68 |
| 4.3.5. Orta Ayağın Modeli..... | 69 |
| 4.3.6. Köprü Tipleri Farklı Deprem Bölgelerinde, Analiz Sonuçları..... | 70 |
| 4.3.7. Köprü Tipleri Farklı Açıklık Uzunluklarda, Analiz Sonuçları..... | 71 |
| 4.3.8. Köprü Tipleri Farklı Yüksekliklerde, Analiz Sonuçları..... | 73 |
| 4.3.9. Köprü Tipleri Aynı Altyapı Üzerinde Farklı Deprem Bölgelerinde, Analiz Sonuçları..... | 74 |

| | |
|---|----|
| 4.3.10. Daha Fazla Tartışma İçin Ek Performans Analizleri | 75 |
| 5. SONUÇ | 77 |
| KAYNAKLAR | 78 |
| ÖZGEÇMİŞ | 81 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|------------|--|
| A | Kirişin kesit alanı |
| $A_{els.}$ | Elastomer mesnedin taban alanı |
| b_e | Efektif başlık genişliği |
| b_{fc} | Üst başlık genişliği |
| b_{ft} | Alt başlık genişliği |
| c_k | Viskoz sönümleyici sönüm katsayısı |
| D | Kolonun çapı |
| d | Gövde derinliği |
| E_c | Betonun elastisite modülü |
| EI | Elastomer mesnedi temsil eden çerçeve elemanın rijitliği |
| f^c | Betonun karakteristik basınç dayanımı |
| F_0 | Toprak basıncı |
| f_y | Çeliğin akma dayanımı |
| f_{yk} | Betonarme çeliğin karakteristik akma dayanımı |
| G | Zemin kayma modülü |
| g | Yer ivmesi |
| $G_{els.}$ | Elastomer mesnedin kayma modülü |
| G_0 | Başlangıç zemin kayma modülü |
| H | Kolon yüksekliği |
| h_{abut} | Kalkan duvarın yüksekliği |
| h_{ri} | Kauçuğun toplam yüksekliği |
| h_{rt} | Elastomer mesnedin yüksekliğidir |
| I_x | Kirişin x-etrafındaki atalet momenti |
| I_y | Kirişin y-etrafındaki atalet momenti |
| k | Rijitlik |
| k_0 | Sükunetteki dolgu basınç katsayısı |
| k_k | Çarpma yayın sertliği |
| K_{sh} | Doğrusal yayın sabiti |
| L | Açıklık uzunluğu |
| M_{pb} | Başlık Kirişinin Plastik Moment Kapasitesi |
| l_b | Başlık kirişin uzunluğu |
| m | Kütle |
| m_1 | Köprünün kenar ayağının kütlesi |
| m_2 | Köprünün üst yapınının kütlesi |
| M_w | Magnitüd (Büyüklik) |
| R | Deprem davranış katsayısı |
| T | Periyot |
| t_{fc} | Üst başlık kalınlığı |
| t_{ft} | Alt başlık kalınlığı |
| t_w | Gövde kalınlığı |

| | |
|------------|--|
| V_u | Dolgunun kayma direncinin nihai kapasitesi |
| W_{abut} | Kenar ayağın genişliği |
| γ | Zemin birim hacim ağırlığı |
| Δ | Kolonun maksimum yerdeğiřtirmesi |
| Δ_y | Kolonun akma durumundaki yerdeğiřtirmesi |
| μ | Sürtünme katsayısı |
| ν | Zemin Poisson oranı |
| v_s | Kesme dalga hızı |
| ϕ | Dolgu ile kenar ayak arasındaki sürtünme açısı |

Kısaltmalar Açıklama

| | |
|----------|---|
| AASHTO- | American Associations of State Highway and Transportation |
| LRFD | Officials- Load And Resistance Factor Design |
| ATC | Applied Technology Council |
| CALTRANS | California Transportation |
| FEMA | Federal Emergency Management Agency |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| KGM | Karayolları Genel Müdürlüğü |
| M-O | Mononobe-Okabe |
| PC | Prestressed Concrete |
| PEER | Pacific Earthquake Engineering Research Center |
| Sap2000 | Structural Analysis Program |
| SLS | Serviceability Limit State |
| TSDS | Tek Serbestlik Dereceli Sistem |
| ULS | Ultimate Limit States |
| XTRACT | Cross-Sectional X Structural Analysis of Components. |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1. 1. Tipik çelik kirişli (kompozit I kiriş) köprülerin üst yapısı (Chen ve Duan 2014) | 3 |
| Şekil 3.1. Referans köprünün yandan ve üstten görünüşleri, parantez içindeki değerler çelik kirişli köprüler içindir. (Boyutlar santimetre cinsindedir ve ölçekli değildir) | 14 |
| Şekil 3. 2. (a) Öngermeli kirişli ve (b) çelik kirişli köprülerin özellikleri (boyutlar santimetre cinsindedir ve ölçekli değildir)..... | 15 |
| Şekil 3. 3. HL93 | 29 |
| Şekil 3. 4. HL 93 | 30 |
| Şekil 3. 5. HL93 tasarım kamyon ile tasarım şerit yükü ile beraber | 30 |
| Şekil 3. 6. Tasarım tandem yükü ile tasarım şerit yükü | 30 |
| Şekil 3. 7. 0.35g deprem ivme katsayısı ve B tip zemin sınıfı için tasarım spektrum | 31 |
| Şekil 3. 8. (a) Öngermeli kirişin kesiti (b) Çelik kirişin kesiti | 34 |
| Şekil 3. 9. Deprem modeli (a) tüm modelin görünüşü, (b) orta ayağın detayları | 37 |
| Şekil 3. 10. Zemin-Temel Yayları | 38 |
| Şekil 3. 11. Temelin geometrik parametreleri ($L \geq B$) | 40 |
| Şekil 4. 1. Farklı deprem ivmelerinde köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması | 59 |
| Şekil 4. 2. Farklı deprem ivmelerinde köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması | 59 |
| Şekil 4. 3. Farklı açıklık uzunluklarında köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması | 59 |
| Şekil 4. 4. B tip zemin için kaydedilmiş depremin ölçeklenmiş ivme-periyot grafiği.... | 62 |
| Şekil 4. 5. B tip zemin için seçilen deprem ivme spektrumlarının ortalaması ve tasarım spektrumun ivme-periyot grafiği | 62 |
| Şekil 4. 6. D tip zemin için kaydedilmiş depremin ölçeklenmiş ivme-periyot grafiği ... | 63 |
| Şekil 4. 7. D tip zemin için seçilen deprem ivme spektrumlarının ortalaması ve tasarım spektrumun ivme-periyot grafiği | 64 |
| Şekil 4. 8. Boyuna doğrultuda köprü modelin genel görüntüsü..... | 67 |
| Şekil 4. 9. Boyuna doğrultuda köprü modelinde kenar ayağın detay görünümü..... | 67 |
| Şekil 4. 10. Enine doğrultuda köprü modelinde kenar ayağın detay görünümü..... | 69 |
| Şekil 4. 11. Farklı deprem bölgelerinde (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)..... | 70 |
| Şekil 4. 12. Farklı açıklık uzunluklarında (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)..... | 72 |
| Şekil 4. 13 Farklı kolon yüksekliklerinde (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)..... | 73 |
| Şekil 4. 14 Her iki tip köprü aynı altyapı ile farklı deprem bölgelerinde (a) boyuna doğrultuda D tip zemin (b) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)..... | 74 |
| Şekil 4. 15. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüleri ile yer ivme katsayıları (a) eğilme kontrollü kolon kesiti ve (b) basınç kontrollü kolon kesiti için | 75 |

Şekil 4. 16. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerinin kolonlarının etkileşim diyagramları (a) eğilme kontrollü kesit için ve (b) basınç kontrollü kesit için.....76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|---|
| Çizelge 2. 1. Öngermeli betonarme kiriş ve çelik kirişinin maliyet karşılaştırması | 9 |
| Çizelge 3. 1. Analiz setleri | 12 |
| Çizelge 3. 2. 0.2G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli (ikinci değer) ve çelik kirişli (birinci değer) köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | 16 |
| Çizelge 3. 2. 0.2G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 17 |
| Çizelge 3. 3. 0.2G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 3. 0.2G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 19 |
| Çizelge 3. 4. 0.35G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 4. 0.35G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 21 |
| Çizelge 3. 5. 0.35G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 5. 0.35G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 23 |
| Çizelge 3. 6. 0.5G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 6. 0.5G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 25 |
| Çizelge 3. 7. 0.5G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 7. 0.5G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)..... | 27 |
| Çizelge 3. 8. Öngermeli kirişlerin tipleri ve kesit özellikleri..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 9. Öngermeli kirişlerin kesit boyutları (Şekil 3.8a'ya bakınız)..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 3. 10. Çelik kirişlerin tipleri ve kesit özellikleri | 34 |
| Çizelge 3. 11. Çelik kirişlerin kesit boyutları (Şekil 3.8b'ye bakınız)..... | 34 |
| Çizelge 4. 1. 0.2G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları..... | 43 |
| Çizelge 4. 2. 0.2G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları | 44 |
| Çizelge 4. 3. 0.35G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları..... | 45 |
| Çizelge 4. 4. 0.35G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları | 46 |
| Çizelge 4. 5. 0.5G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları..... | 47 |
| Çizelge 4. 6. 0.5G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları | 48 |
| Çizelge 4. 7. 0.2G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 49 |
| Çizelge 4. 8. 0.2G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 50 |
| Çizelge 4. 9. 0.35G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 50 |
| Çizelge 4. 9. 0.35G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam)..... | 51 |

| | |
|---|---|
| Çizelge 4. 10. 0.35G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 51 |
| Çizelge 4. 10. 0.35G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam) | 52 |
| Çizelge 4. 11. 0.5G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 52 |
| Çizelge 4. 11. 0.5G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam) | 53 |
| Çizelge 4. 12. 0.5G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri..... | 53 |
| Çizelge 4. 12. 0.5G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam) | 54 |
| Çizelge 4. 13. Maliyet Hesabında Kullanılan Malzemelerin Birim Fiyatları | 55 |
| Çizelge 4. 14. 0.2G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması..... | 56 |
| Çizelge 4. 14. 0.2G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması (devam) | 57 |
| Çizelge 4. 15. 0.35G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 4. 15. 0.35G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması (devam) | 58 |
| Çizelge 4. 16. 0.5G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| Çizelge 4. 17. Sismik performans analiz setleri | 60 |
| Çizelge 4. 18. Deprem kayıtları, B tip zemin için..... | 60 |
| Çizelge 4. 19. Deprem kayıtları, D tip zemin için | 60 |

1. GİRİŞ

1.1. Köprülerin Önemi

Köprüler, taşıtların, trenlerin ve yayaların nehirleri, körfezi, dağları veya diğer engelleri aşır geçişini sağlayan yapılardır. Köprülerin ne kadar önemli yapılar olduğu tüm tarih boyunca tecrübe edilmiş bilinen bir gerçektir. Köprüler ulaşım sistemindeki en kilit unsurlardan biridir ve ülke ekonomisinde hayati bir rol oynamaktadır. Köprüler diğer geleneksel yapılara göre maliyetleri yüksek olan yapılardır. Buna rağmen zaruretten ve ulaşım maliyetlerini ve zamanı azaltma işlevlerinden dolayı eski çağlardan günümüze kadar inşa edilmeye devam etmiştir. Zira köprüler medeniyetlerin gelişmesinde, şehirlerin büyümesinde ve ekonomik değerlerinin artmasında önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, günümüzde de halen çoğu ülkede köprü talebi halen artmaktadır. Örneğin, ABD'de 1996-2006 yılları arasında yılda yaklaşık 1500 köprünün yapıldığı kaydedilmiş ve Dubai'de, 2012 yılı sonunda köprülerin sayısı 347'e ulaşmıştır (Batikha ve ark. 2017). Köprü sayısındaki bu önemli artışın ardından, düşük maliyetli köprü inşaatı tasarımcı için büyük bir önem kazanmaktadır. Bu nedenle, köprülerin gelişimi ile birlikte köprülerin daha güvenli ve ekonomik bir şekilde tasarlanıp inşa edilmesi için köprülerde kullanılacak olan malzemelerin tipi ve imalatı, inşaat mühendisliğinde önemli bir çalışma alanı olmuştur. Köprünün üst yapılarında günümüzde daha çok malzeme olarak betonarme ve çelik tercih edilmektedir. Bununla birlikte, öngermeli betonarme kirişler üzerinde betonarme tabliye ve çelik kirişler üzerinde betonarme tabliye uygulamaları da kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüler ele alınmakta ve aşağıda bu köprüler hakkında kısa bilgiler verilmektedir.

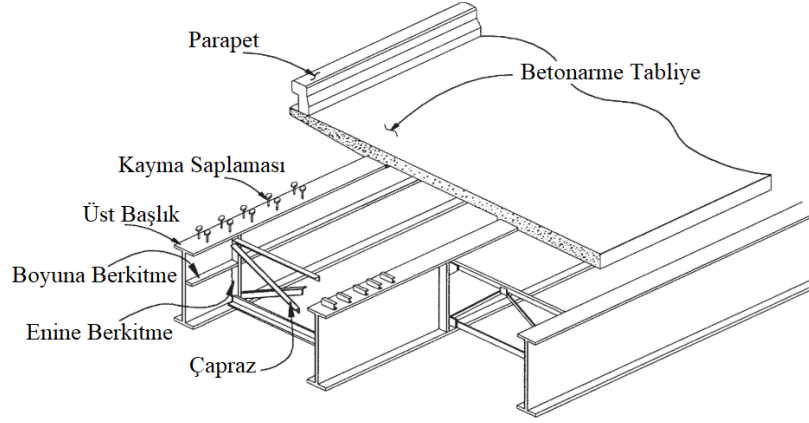
1.2. Öngermeli Kirişli Köprüler

Köprüler genel itibari ile taşıyıcı sistemlerine göre; betonarme plak, kutu kesitli, dolu gövde kirişli, kafes sistem, kemerli, asma ve askılı olarak sınıflandırılmaktadır. Bir köprünün yapısı üst yapı ve alt yapı olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Üst yapı, orta ayaklar ve kenar ayaklar gibi destek sağlayan yapılarının üzerindeki köprünün kısımlarını

temsil etmektedir. Üst yapı genellikle tabliye ve kirişlerden oluşmaktadır. Alt yapı ise, orta ayaklar, kenar ayaklar, mesnetler ve istinat duvarları köprünün üst yapı elemanlarına destek sağlayan elemanlardan oluşmaktadır. Günümüzde olan köprülerin daha dayanıklı ve ekonomik olmasının yanında, yapım ve inşaat süresinin kısa olması ve geniş açıklıkların geçilebilmesi gibi parametrelerin de ön plana çıkması, köprülerin üst yapılarında öngermeli kirişlerin kullanımını arttırmaktadır. Öngerme işlemi; sabit ve hareketli yükler altında oluşacak çekme gerilmelerinin kontrol altına alınması için betona önceden istenen düzeyde basınç verme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Öngerme ile tüm dış yükler altında taşıyıcı elemanlarda çekme gerilmesi oluşmayacak şekilde veya oluşacak gerilmelerin de çatlama olmayacak şekilde küçük kalması sağlanmaktadır. Öngermeli köprülerin üstyapısı genellikle betonarme tabliyeden ve öngermeli kirişlerden, altyapısı da genellikle orta ayaklardan ve kenar ayaklardan oluşmaktadır. Genel itibariyle bu tip köprülerde üstyapının yüklerinin altyapıya aktarılması elastomer mesnetler ile yapılmaktadır.

1.3. Çelik Kirişli Köprüler

Bilindiği gibi köprülerin üst yapılarında tercih edilen malzemelerden biri de çeliktir. Üst yapının ana taşıyıcı sistemi çelik malzeme kullanılıp tasarlanmış ise bu tip köprüler uygulamada ‘çelik köprü’ olarak tanımlanmaktadır. Köprünün üst yapısında ana taşıyıcı sistemindeki kirişleri, çelik-betonarme kompozit olan köprüler uygulamada ‘kompozit köprü’ ismi ile tabir edilmektedir. Bu tip köprülerde tabliye betonarmeden ve ana kirişler ise çelikten yapılmaktadır. Bu köprünün tabliyesini oluşturan betonarme döşemesi ile çelik kirişleri birbirine bağlanarak beraber çalışması sağlanmaktadır. Çelik kirişler ile betonarme tabliye arasındaki bağlantıyı sağlamak için kayma saplaması denilen elemanlar kullanılmaktadır. Böylece köprülerde dayanımı artırmak ve deformasyonları kontrol altına almak hedeflenmektedir. Şekil 1.1’de çelik kirişli köprülerin tipik detay gösterimi verilmektedir.



Şekil 1. 1. Tipik çelik kirişli (kompozit I kiriş) köprülerin üst yapısı (Chen ve Duan 2014)

1.4.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Kentleşme hızlandıkça ve şehir nüfusu hızla arttıkça, insanların seyahati ve malların nakliyesi daha önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda köprüler de hayati önemi sahip yapılar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, köprülerin maliyet ve yapısal güvenlik kriterlerine göre parametrik çalışmalar yaparak bunların tasarımlarına ilişkin önerilerde bulunmak amaçlanmıştır. Farklı karakterde yığma, betonarme, çelik ve ahşap olmak üzere çok farklı malzeme köprü inşasında kullanılmaktadır. Bu nedenle tüm köprüleri bir çalışmada değerlendirme imkanı yoktur. Köprüler içinde öngermeli kirişli köprüler ve çelik I kirişli köprüler en yaygın yapılan köprülerdir (Jagtap ve Shahezad 2016). I kirişli köprülerin imalat kolaylığı ve düşük maliyetleri olması bunların en popüler köprüler arasında yer almasını sağlamıştır (Batikha et al. 2017). Son yıllarda öngermeli betonarme kirişli köprüler ile daha büyük açıklıklar geçilebilmektedir. Diğer taraftan öngermeli kirişli ve çelik-betonarme I kirişli köprülerin ekonomik ömrü 45 sene olup kutu kirişli köprülerin ekonomik ömründen yaklaşık 17 sene daha fazladır (Boatman 2010). Son yıllarda öngermeli betonarme kirişli köprüler ile daha büyük açıklıklar geçildiğinden normal betonarme ve çelik köprülere karşı bir üstünlük ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, çelik köprülerin rekabet gücünü yeniden kazanmak için yeni fikirlere ihtiyaçları vardır.

Çelik plakalar yüksek çekme mukavemetine sahiptir, ancak basınç kuvvetlerinin neden olduğu burkulmaya karşı oldukça hassas olduğundan güçlendirilmesi gerekebilir. Bununla birlikte, çelik plakalar beton ile birleştirildiğinde, burkulmaya karşı direnci artar, bu da çelik köprüleri betonarme köprülere karşı daha ekonomik ve rekabetçi hale getirebilmektedir. Çelik-betonarme kompozit köprüler daha hafif olup, kalitenin tutturulması ve hızlı imalat yapılabilmesi yönlerinden betonarme köprülere göre daha avantajlı durumdadır. Ek olarak, kompozit köprülerde gürültü ve titreşim seviyelerinin azaltması beklenir ve bu nedenle çevre dostudur.

Öngermeli betonarme kirişlerinin kullanımının ana nedeni, başlangıç maliyetinin düşük olmasıdır. Şüphesiz, öngermeli betonarme kirişler inşaatın ilk aşamasında çelik kirişlere karşı daha ekonomik olabilir, ancak aynı şey bu köprülerin alt yapısı ve genel inşaat maliyetleri ile bu köprülerin sismik performansları için geçerli olmayabilir. Öngermeli kirişli köprülerinin üst yapısı, çelik kirişli köprülerinin üst yapısından daha ağırdır. Üst yapının kütlesinin artması, sismik tasarım kuvvetlerinin artmasına neden olmakta ve daha büyük alt yapı bileşenlerine yol açmaktadır. Bu nedenle, daha büyük alt yapı bileşenlerinin köprünün daha yüksek bir inşaat maliyetine neden olabileceği öngörülmektedir.

Tüm yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalarda uygulamalara konu olarak, çelik kirişli köprüler ve öngermeli kirişli betonarme köprüler seçilmiştir.

Gerçekleştirilecek analizlere konu olarak seçilen öngermeli kirişli köprüler ile çelik-betonarme I kirişli kompozit köprülerin maliyetleri ve depreme karşı gösterdiği performans analizleri gerçekleştirilerek elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak irdelenmektedir. Seçilen köprülerin tasarımında ve inşaat maliyetleri ile sismik performanslarının belirlenmesinde sonlu elemanlar programından ve geliştirilen MS EXCEL yazılımından yararlanılmıştır. Bu çalışmada farklı parametreler dikkate alınarak toplam 288 köprü tasarlanmıştır. Bu köprüler tasarlanırken göz önüne alınan parametrik özellikler aşağıda verilmektedir:

- Dikkate alınan açıklıklar: 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m
- Dikkate alınan yükseklikler: 8m,12m,16m,20m)
- Dikkate alınan zeminler: B ve D tip zemin (sert zemin ve yumuşak zemin),
- Dikkate alınan deprem ivmeleri: 0.2g, 0.35g, 0.5g

Yukarıda belirtilen amaç ve kapsam doğrultusunda gerçekleştirilen bu çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, köprüler hakkında genel bilgilerden sonra, öngermeli kirişli köprüler ve çelik-betonarme kirişli köprüler hakkında öz bilgiler ve değerlendirmeler sunulmaktadır. Birinci bölümü takiben bugüne kadar bu konuda yapılan çalışmaların irdelendiği literatür araştırması ikinci bölümde sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde, çalışma esnasında kullanılan materyaller ve yöntemler açıklanmaktadır. Bu bölümde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi sırasıyla özetlenebilir:

- i. Analizlerde dikkate alınan parametreler sunulmaktadır. Bunu takiben kıyaslama yapmaya imkan tanıyacak şekilde referans köprüsünün bilgileri ve özellikleri verilmektedir. Bölümün devamında çok yer almaması için referans köprüsü dışındaki diğer köprülerin boyut ve diğer özellikleri tablolar halinde verilmektedir.
- ii. Öngermeli betonarme kirişli ve çelik I kirişli köprülerin tasarımında göz önüne alınmış malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri verilmektedir.
- iii. Yapılan çalışma kapsamındaki uygulamalara konu olan köprülerin tasarımında kullanılan sabit yükler ve taşıtlardan kaynaklanan hareketli yükler belirlenmiştir. Bölümün devamında köprülerin kenar ayaklarının arkasındaki yanal toprak basınçlarının hesabında kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Daha sonra köprülerinin sismik tasarımında kullanılacak olan parametreler ve özellikle tasarım spektrumunun farklı deprem bölgeleri ve zemin tipleri için AASHTO-LRFD (2017) standardına göre belirlenmesi açıklanmaktadır.
- iv. Betonarme tabliye tasarımı, kiriş tipi, kiriş sayısı, öngermeli betonarme kirişlerin tasarımı ve çelik kirişlerin tasarımı yapılmıştır.
- v. Köprülerin mesnetleri ve alt yapıların tasarımının yapılabilmesi için oluşturulan deprem modellerinden bahsedilmektedir.

- vi. Çalışmada dikkate alınan toplam 288 farklı köprü elastomer mesnetlerinin ve alt yapılarının (başlık kirişleri, kolonlar, temeller ve kenar ayaklar) farklı açıklıklar, farklı kolon yükseklikleri, farklı zeminler ve deprem bölgeleri için tasarımları AASHTO-LRFD standardına göre yapılmaktadır.

Dördüncü bölümde bir önceki bölümde belirtilen materyal ve metotları kullanarak yapılan analizlerden elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölümde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi sırasıyla özetlenebilir:

- i. Öngermeli betonarme kirişli ve çelik kirişli köprülerin deprem analizinden elde edilen bulgular tablolar halinde yan yana karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Daha sonra bu analizlerin verilerine dayalı olarak genel yorumlar yapılmaktadır.
- ii. Köprülerin tasarımında ve maliyet hesaplarında göz alınan malzemelerin güncel birim fiyatları sunulmaktadır. Toplam 288 öngermeli betonarme kirişli ve çelik kirişli köprünün maliyetleri hesaplanarak tablolar halinde verilmektedir. Daha iyi anlaşılması için referans köprüsünün verileri grafikler üzerinde çizdirilmiştir. Bu bölümün takibinde elde edilen bulgular ve çizdirilen grafikler ile ilgili genel yorumlar yapılmaktadır.
- iii. Her iki tip köprünün deprem performans analizleri sert (B) ve yumuşak (D) tipi zeminler için ayrı ayrı bir referans köprüsü seçilip bu köprülerde dikkate alınan parametreler verilmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için B ve D tipi zeminler için ayrı ayrı yedişer deprem kaydı seçilmiştir. Performans analizleri için kullanılacak köprülerin depreme göre analizlerinde kullanılacak modeller verilmektedir. Modeller için köprülerin üstyapı, orta ayak, kenar ayak modellerinin nasıl oluşturulacağı ve bu modeller oluşturulurken hangi özellikler ve yöntemlerin dikkate alınacağı belirtilmektedir. Sap2000 programı yardımıyla köprülerin modelleri oluşturulup elde edilen deprem kayıtları altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bazı analiz bulguları grafikler üzerinde verilip karşılaştırılmıştır. Bölümün devamında çalışmanın

bazı parametrelerin etkisi daha iyi anlaşılması için ek performans analizleri de yapılmıştır.

Beşinci bölümde çalışma sonucu elde edilen bulgulara dayanarak oluşan tartışma konuları ve çalışmadan çıkartılan sonuçlar verilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Köprüler birçok ülkede kullanımda olan ve inşaatı devam eden en önemli yapılardan biridir. Köprüler ulaşım sistemindeki en kilit unsurlardan biridir ve ülke ekonomisinde hayati bir rol oynar. Köprüler diğer geleneksel bina türü yapılara göre çok maliyetli olan yapılardır. Bu nedenle, köprülerin gelişimi ile birlikte köprüleri daha güvenli, daha iyi performansa sahip, daha ekonomik bir şekilde tasarlayıp inşa etmek araştırmacıların ve mühendislerin çalışmalarına konu olmuştur. Gönümüzde köprünün üst kısımlarında malzeme olarak daha çok betonarme ve çelik tercih edilmektedir. Bunlardan I kirişli köprülerin en yaygın köprü tipi olduğu belirtilebilir. Bu tip köprüler I kirişli çelik-betonarme kompozit olabildiği gibi öngerilmeli kirişli köprüler de olabilmektedir. Bunun için bu iki tip köprü öngerilmeli betonarme kirişli ve çelik kirişli köprüler arasındaki maliyet ve deprem performanslarının irdelenmesi gerekli olmaktadır. Buna göre hangi köprünün maliyet ve deprem performansı açısından daha üstün olduğu konusunda ve köprünün açıklıkları, kolon yükseklikleri, zemin tipleri ve depremselliğin bu köprülerin maliyet ve performansları üzerindeki etkilerini irdelemek bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Birçok araştırmacı, uygun köprünün maliyet optimizasyonu bulmak için köprü maliyet optimizasyonu alanında farklı çalışmalar yürütmüştür. Örneğin, Lounis ve Cohn (1993), en optimum üstyapı tasarımını bulmak için kiriş aralığı, kiriş tipi, döşeme kalınlığı ve açıklık uzunlukları 10m ile 30m arasında değişkenlik gösteren farklı parametreleri ele alıp araştırmıştır. Sirca ve Adeli (2005), de optimum bir üstyapı tasarımını elde etmek için sinir ağıları algoritmalarını kullanarak benzer parametreleri incelemişlerdir.

Jagtap ve Shahezzad (2016), çalışmalarında öngerilmeli kirişli köprü ve çelik kirişli köprülerin inşaat maliyetlerini karşılaştırmak için farklı açıklıklarda köprü üst-yapılarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, 15m ye kadar kısa açıklık uzunluklarında çelik kirişlerin kullanılmasının daha uygun olduğunu bulunmuştur. Çalışmanın özeti olarak ögermeli kirişli köprülerin ve çelik kirişli köprülerin farklı açıklıklarda maliyetleri Çizelge 2.1'de Hindistan birim parası Rupi olarak verilmektedir. Bu tabloya göre öngerilmeli kirişli

köprüler 24m açıklık için %37 çelik köprülere göre daha ekonomik çıkmıştır. Bu değer 36m açıklık uzunluğu için % 46' ya kadar artmaktadır.

Çizelge 2. 1. Öngermeli betonarme kiriş ve çelik kirişinin maliyet karşılaştırması

| Sr.No. | Açıklık (m) | Öngermeli Kirişin Tahmini Maliyeti (Rupi) | Betonarme Kirişin Tahmini Maliyeti (Rupi) | Çelik Kirişin Tahmini Maliyeti (Rupi) | Farkı |
|--------|-------------|---|---|---------------------------------------|-------|
| 1 | 12 | 1,23,421.56 | | 1,63,090.20 | %24 |
| 2 | 18 | 2,59,385.41 | | 3,79,498.35 | %32 |
| 3 | 24 | 4,46,533.71 | | 7,05,246.15 | %37 |
| 4 | 30 | 7,12,229.06 | | 12,05,331.75 | %41 |
| 5 | 36 | 10,23,006.48 | | 19,08,847.5 | %46 |

Singh ve ark. (2016), çalışmalarında 100 yıllık servis ömrü göz önüne alarak 20m ve 25m açıklıklara sahip kirişli köprülerin üst yapı maliyetlerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada betonarme T-kiriş, betonarme I-kiriş, öngermeli I-kiriş ve çelik kompozit I-kiriş olmak üzere dört tip üstyapı kullanılmıştır. Çalışmalarında öngermeli I-kirişli köprü, kompozit çelik I-kiriş köprüye göre 20m ve 25m açıklıklar için sırasıyla %10 ve % 15 daha ekonomik çıkmıştır.

Khatri ve ark. (2012), karayolu köprülerinde, betonarme tabliyeden ve iki yada daha fazla çelik kirişten oluşan kompozit köprülerin, çelik ve betonarme köprülerden daha popüler olduğunu belirtmiştir. Çelik-betonarme kompozit köprünün, çelik köprüye kıyasla gürültü ve titreşim seviyeleri açısından daha uygun olduğu dolayısıyla da daha çevreci olduğu belirtilmiştir. Çelik-betonarme kompozit köprüler, betonarme köprülere göre daha iyi bir kaliteye sahip olup, daha hafif ve montaj işleri de daha kolay ve hızlıdır.

Batikha ve ark. (2017), farklı kiriş tiplerinin ve farklı açıklık uzunluklarının, köprülerin toplam yapım ve yaşam döngüsü maliyetleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmalarında üç tip kiriş: öngermeli beton, ardgermeli beton ve çelik kompozit incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, çelik kompozit kiriş daha düşük bir kesit derinliğine

sahiptir, ancak öngermeli kirişin servis ömrü boyunca maliyeti (bakım onarım maliyeti dahil) her zaman daha düşük çıkmıştır ve bazı durumlarda kompozit kiriş maliyetinin % 45'ine ulaştığı tespit edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen ve literatürde bulunan çalışmalarının çoğu sadece üstyapı maliyetinin optimizasyonuna odaklanmıştır. Sadece Aydın ve Ayvaz (2013) tarafından yapılan çalışma öngermeli köprünün toplam maliyet optimizasyonunu dikkate almış, ancak bu çalışmada sismik kuvvetleri ihmal edilmiştir. Bu nedenle, öngermeli betonarme kirişli ve çelik kirişli köprülerin üstyapı ve altyapıları ile beraber toplam yapım maliyetleri ve performans analizlerinin araştırılması gerekmektedir.

Bu nedenle, bu yüksek lisans tez çalışmasında her iki tip köprü olarak öngermeli betonarme kirişli köprü ve çelik kirişli köprü farklı parametrelere göre tasarlanıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre, bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda, çeşitli açıklık uzunluklarında (15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m), farklı kolon yüksekliklerinde (8m,12m,16m,20m), farklı zemin tiplerinde B ve D tip zeminler (sert zemin ve yumuşak zemin) ve farklı sismik bölgelerde (0.2g, 0.35g, 0.5g), öngermeli betonarme kirişli köprüler ve çelik kiriş köprüler tasarlanmıştır. Bu köprülerin toplam yapım maliyeti ve sismik performansları karşılaştırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bölüm 1’de bahsedildiği gibi, bu çalışmanın amacı doğrultusunda öngermeli betonarme kirişli köprülerin ve çelik kirişli köprülerin farklı açıklık uzunluklarında, farklı kolon yüksekliklerinde, farklı zemin sınıflarında ve çeşitli deprem bölgelerinde tasarlanıp, köprülerin toplam yapım maliyetleri ve sismik performansları irdelenmektedir.

Bu çalışmada köprülerin üst yapı tasarımları için MS EXCEL yazılımı ve sonlu elemanlar analiz programı olan SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Köprülerin alt yapı bileşenlerinin tasarımı ve köprülerin performans analizleri için de SAP2000 programı kullanılmıştır.

3.1. Genel Köprü Bilgileri

3.1.1. Çalışmada Dikkate Alınan Parametreler

Bu tez çalışması kapsamında altı farklı analiz seti dikkate alınmıştır. Bu araştırma çalışmasında dikkate alınan analiz setleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi her analiz seti farklı açıklık uzunlukları, kolon yükseklikleri, zemin sınıfları ve deprem ivme katsayıları dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre bütün analiz setleri iki tip köprü hem öngermeli kirişli ve hem çelik kirişli köprüler için ayrı ayrı yapılmıştır. Analize tabi tutulan tüm köprülerde kiriş akslar arası 2.5m ve köprülerin genişliği 12m olarak sabit tutulmuştur. Bu çalışmada 144 öngermeli kirişli köprü ve 144 çelik kirişli köprü olmak üzere toplam 288 köprü tasarlanıp analiz edilmiştir. Aşağıdaki tabloda koyu (bold) yazı ile yazılmış olan parametreler referans (kıyas) köprüsünün parametreleridir.

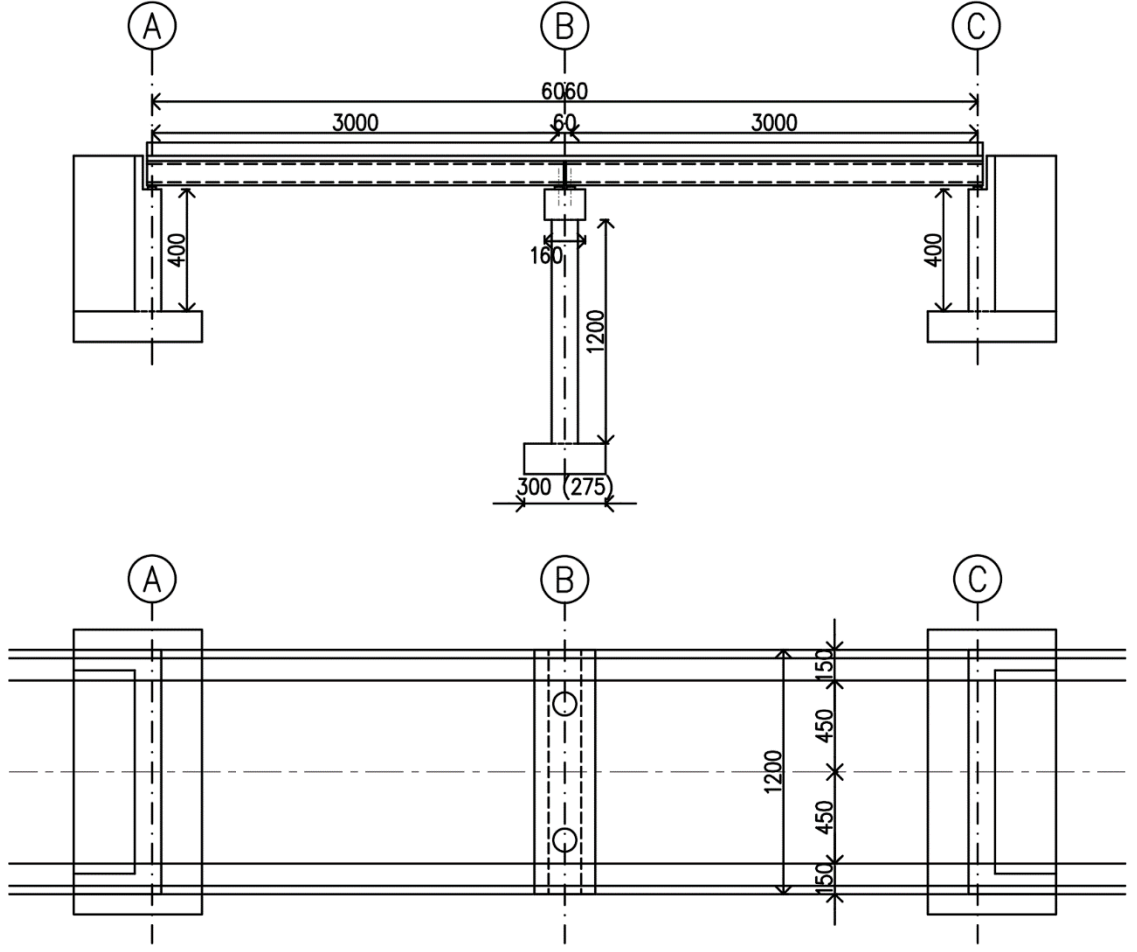
Çizelge 3. 1. Analiz setleri

| Analiz Seti | Köprü Tipi | Açıklık Uzunluğu (m) | Açıklık Sayısı | Kiriş Aralığı (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Deprem İvme Katsayısı (g) | Zemin Sınıfı |
|-------------|------------------------|----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| 1 | Öngörme / Çelik | 15 | 2 | 2.5 | 8, 12, 16, 20 | 0.2, 0.35, 0.5 | B, D |
| 2 | Öngörme / Çelik | 20 | 2 | 2.5 | 8, 12, 16, 20 | 0.2, 0.35, 0.5 | B, D |
| 3 | Öngörme / Çelik | 25 | 2 | 2.5 | 8, 12, 16, 20 | 0.2, 0.35, 0.5 | B, D |
| 4 | Öngörme / Çelik | 30 | 2 | 2.5 | 8, 12 , 16, 20 | 0.2, 0.35 , 0.5 | B, D |
| 5 | Öngörme / Çelik | 35 | 2 | 2.5 | 8, 12, 16, 20 | 0.2, 0.35, 0.5 | B, D |
| 6 | Öngörme / Çelik | 40 | 2 | 2.5 | 8, 12, 16, 20 | 0.2, 0.35, 0.5 | B, D |

3.1.2. Referans (Kıyas) Köprüsünün Bilgileri

Bu çalışmada iki açıklıklı öngermeli kirişli köprü ve çelik kirişli köprü seçilmiştir. Her bir köprü Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi farklı açıklık uzunluklarında, farklı kolon yüksekliklerinde, farklı zemin sınıflarında ve farklı deprem bölgelerinde ayrı ayrı tasarlanmıştır. Referans köprülerinde açıklık sayısı diğer köprülerde olduğu gibi iki ve köprünün genişliği 12m olarak belirlenmiştir. Öngermeli kirişli köprüler Şekil 3.2a’de gösterildiği gibi 0.25m kalınlığında bir betonarme tabliye ve beş AASHTO tip kirişten oluşmaktadır. Betonarme tabliye yüzeyinde 50 mm kalınlığında asfalt kaplama bulunmaktadır. Köprülerde kullanılan bileşenlerin boyutlarının daha iyi anlaşılması için 4. analiz setteki referans köprünün yüksekliği, yer ivme katsayısı ve zemin tipi sırasıyla 12m, 0.35g ve B olan hem öngermeli kirişli hem çelik kirişli köprü ayrıntılarıyla aşağıdaki şekillerde verilmektedir. Seçilen köprü orta ayağı, 1.15m çapında iki dairesel kolondan ve üzerinde 1.6x1.0 m (genişlik x yükseklik) ebatlarında dikdörtgen başlık kirişten oluşmaktadır. Köprünün orta ayağını destekleyen temel boyutları 12.0x3.0x1.5 m (uzunluk x genişlik x yükseklik) olarak belirlenmiştir. Orta ayağın ve kenar ayakların yükseklikleri sırasıyla 12m ve 4m olarak kabul edilmiştir. Çelik kirişli köprülerin üst

yapısında Şekil 3.2b’de verildiği gibi 0.25m kalınlığında betonarme tabliye ve 2.50m aralıklı beş çelik I kirişten (tip IV) oluşmaktadır. Bu köprünün orta ayağı 1.05m çapında kolonlardan ve 1.6x1.0m boyutlara sahip dikdörtgen başlık kirişten oluşmakta ve orta ayağı destekleyen temel boyutları 12.0x2.75x1.5 m olarak belirlenmiştir. Köprünün diğer özellikleri öngermeli kirişli köprü ile aynıdır. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin şematik görünümü Şekil 3.1’ verilmektedir. Çalışmada tasarlanan tüm köprülerin referans köprüye nazaran detaylı bilgi vermek yerine çok yer kaplamaması için hem öngermeli kirişli hem çelik kirişli köprü bileşenlerinin boyutları Çizelge 3.2’den Çizelge 3.7 ’ye kadar olan çizelgelerde verilmektedir. Çizelgelerde yıldız (*) ile işaretlenen harfler öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin birbirine eşit olduğunu göstermektedir. Diğer sütunlarda ise, ilk sayı çelik kirişli ikinci sayı ise öngermeli kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutlarını göstermektedir. Çizelgelerdeki değerler incelendiğinde, temel genişliği (L_f) bazı çelik kirişli köprülerde öngermeli kirişli köprülere göre daha büyük değerler olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise çelik kirişli köprülerin üstyapı hafifliğinden dolayı temellerdeki eksantrisite değerinin öngermeli kirişli köprüye göre daha büyük çıkmasıdır. Temellerdeki eksantrisite ($e=M/N$) değeri temellerde oluşan moment ve normal kuvvet oranına bağlıdır. Dolayısıyla normal yükler azaldığında eksantrisite değeri artar bunun dengelenmesi için temel boyutları artırılır.



Şekil 3.1. Referans köprünün yandan ve üstten görünüşleri, parantez içindeki değerler çelik kirişli köprüler içindir. (Boyutlar santimetre cinsindedir ve ölçekli değildir)

Çizelge 3. 2. 0.2G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli (ikinci değer) ve çelik kirişli (birinci değer) köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|---------------------|-------|------------|--------------|---------|----------------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.*} | L _{els.*} | h _{rt} * | h _{ri} * |
| 15 | 8 | 0.65-0.68 | 1.6 | 0.7 | 12 | 12 | 2.25-2.5 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 0.96-0.965 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 3-2.75 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.28-1.3 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.1-4.25 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| 20 | 8 | 0.68-0.72 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.5-2.5 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 0.96-0.975 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.75-2.75 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.75-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5.25 | 2-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| 25 | 8 | 0.73-0.8 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.25-2.5 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 12 | 0.96-0.96 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 2.5-2.5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 3.75-3.5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---------|---|-----|----|----|--------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5 | 1.75-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |
|--|----|---------|---|-----|----|----|--------|----------|-------|-------|-------|-------|

Çizelge 3. 2. 0.2G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|----|----|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 0.78-0.88 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 2.5-2.5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.099 | 0.071 |
| | 12 | 0.96-0.99 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.5-2.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.144 | 0.082 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-4.25 | 1.75-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.144 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.144 | 0.082 |
| 35 | 8 | 0.82-0.91 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.5-2.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.144 | 0.082 |
| | 12 | 0.96-1.03 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.5-3 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.144 | 0.082 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 4-4.25 | 2-1.75 | 0.400 | 0.500 | 0.144 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5.5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.144 | 0.082 |
| 40 | 8 | 0.85-0.96 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.5-3 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.144 | 0.082 |
| | 12 | 0.96-1.08 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 3-3.25 | 1-2 | 0.400 | 0.500 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.1-3.75 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.085 | 0.061 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.085 | 0.061 |

Çizelge 3. 3. 0.2G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|------------------|-------|-----------|--------------|--------|---------|----------------------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | L (m) | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.} * | L _{els.} * | h _{rt} * |
| 15 | 8 | 0.82-0.9 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 2.5-2.5 | 1-1 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 0.96-0.96 | 1.7 | 1 | 12 | 12 | 2.75-2.75 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.25-4 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| 20 | 8 | 0.9-0.96 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.5-2.75 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 0.96-1 | 1.7 | 1.1 | 12 | 12 | 3-3 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 2 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.5 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| 25 | 8 | 1-1.06 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 3-3.25 | 1-2 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1-1.1 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 3-3.5 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 2 | 1.2 | 12 | 12 | 4-4.25 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 4.75-5 | 1.5-1.5 | 0.500 | 0.600 | 0.114 | 0.104 |

Çizelge 3. 3. 0.2G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 1.05-1.15 | 1.8 | 1.2 | 12 | 12 | 3-5.25 | 2-2 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.104 |
| | 12 | 1.1-1.2 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.5-4 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.28-1.3 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.75-4.25 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| 35 | 8 | 1.1-1.2 | 1.9 | 1.2 | 12 | 12 | 3.5-4 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.15-1.3 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.5-4.25 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.28-1.35 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.75-4.25 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.3 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| 40 | 8 | 1.15-1.25 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.5-4 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.2-1.35 | 2.5 | 1.3 | 12 | 12 | 4-4.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| | 16 | 1.35-1.4 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 4-4.75 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |

Çizelge 3. 4. 0.35G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|------------------|-------|-------------|--------------|--------|---------|----------------------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | L (m) | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.} * | L _{els.} * | h _{rt} * |
| 15 | 8 | 0.78-0.9 | 1.6 | 0.7 | 12 | 12 | 2.25-2.5 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 0.965-0.965 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 3-2.75 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 0.13-1.3 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.5-4.25 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| 20 | 8 | 0.9-0.95 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.5-2.5 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 0.965-0.975 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.75-2.75 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 16 | 1.3-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5.25 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| 25 | 8 | 0.9-1 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.25-2.5 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 12 | 0.965-1.05 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 2.75-2.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.3-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |

Çizelge 3. 4. 0.35G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 1-1.05 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 2.5-2.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.099 | 0.071 |
| | 12 | 1.05-1.15 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.75-3 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.3-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-4.25 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| 35 | 8 | 1.05-1.1 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.75-3 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.1-1.2 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3-3.25 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.3-1.3 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 4-4.25 | 2-1.75 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5.5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| 40 | 8 | 1.05-1.15 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 2.75-3.25 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.15-1.25 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 3-3.75 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.3-1.35 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 3.75-4 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.5 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |

Çizelge 3. 5. 0.35G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|------------------|-------|-----------|--------------|--------|---------|----------------------|----------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | L (m) | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.} * | L _{els.} * | h _{rt} * |
| 15 | 8 | 1-1.1 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 3.25-3.5 | 1-1 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1-1.15 | 1.7 | 1 | 12 | 12 | 3-3.5 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.3-1.3 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.5-4.25 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| 20 | 8 | 1.1-1.15 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3.5-3 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.15-1.2 | 1.7 | 1.1 | 12 | 12 | 3.5-3.75 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.3-1.28 | 2 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.5 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| 25 | 8 | 1.15-1.27 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.25-5 | 1-2 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.2-1.3 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 3.5-3.75 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.3-1.35 | 2 | 1.2 | 12 | 12 | 4-4.5 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 4.75-5 | 1.5-1.5 | 0.500 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |

Çizelge 3. 5. 0.35G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 1.25-1.37 | 1.8 | 1.2 | 12 | 12 | 5.25-5.5 | 2-2 | 0.450 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |
| | 12 | 1.3-1.45 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 3.75-4.5 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.35-1.5 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 4-4.5 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| 35 | 8 | 1.3-1.45 | 1.9 | 1.2 | 12 | 12 | 5.75-6.5 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.4-1.55 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 4.25-4.75 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.4-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 4.25-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.65 | 2.3 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5.25 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| 40 | 8 | 1.35-1.5 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 6-7.5 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.5-1.65 | 2.5 | 1.3 | 12 | 12 | 4.5-5.25 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| | 16 | 1.5-1.7 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 4.5-5.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.75 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |

Çizelge 3. 6. 0.5G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|------------------|-------|------------|--------------|--------|---------|----------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | L (m) | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.*} | L _{els.*} | h _{rt} * |
| 15 | 8 | 0.9-0.96 | 1.6 | 0.7 | 12 | 12 | 2.75-2.5 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 0.965-0.98 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 3-2.75 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.3-1.3 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.25-4.25 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| 20 | 8 | 1-1.06 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.75-3 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.085 | 0.061 |
| | 12 | 1-1.1 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.75-3 | 1-1 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5.25 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| 25 | 8 | 1.05-1.15 | 1.6 | 0.8 | 12 | 12 | 2.75-3 | 1.5-1.5 | 0.300 | 0.400 | 0.096 | 0.069 |
| | 12 | 1.1-1.22 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 3-3.25 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.085 | 0.061 |
| | 16 | 1.3-1.28 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 3.75-3.5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.25-5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.096 | 0.069 |

Çizelge 3. 6. 0.5G ve B tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 1.15-1.26 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 3-3.25 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.099 | 0.071 |
| | 12 | 1.15-1.35 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3.25-3.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.3-1.4 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4-5 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| 35 | 8 | 1.2-1.35 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3.25-3.75 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.25-1.4 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3.5-4 | 1.5-1.5 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.28-1.46 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 4-5 | 2-1.75 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5.5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| 40 | 8 | 1.3-1.45 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 3.5-4.25 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.3-1.5 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 3.75-4.5 | 1.5-2 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.35-1.55 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 3.75-4.5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 20 | 1.6-1.65 | 2.5 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |

Çizelge 3. 7. 0.5G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları

| Açıklık Uzunluğu | Kolon | | Başlık Kiriş | | | Temel | | | Elastomer Mesnet | | | |
|---------------------|-------|-----------|--------------|--------|---------|----------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | L (m) | H (m) | D (m) | b* (m) | h * (m) | l _b * (m) | B* (m) | L _f (m) | h _f (m) | B _{els.*} | L _{els.*} | h _{rt*} |
| 15 | 8 | 1.1-1.15 | 1.6 | 0.9 | 12 | 12 | 5.75-4.75 | 1-1 | 0.350 | 0.450 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.15-1.2 | 1.7 | 1 | 12 | 12 | 3.75-3.75 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 16 | 1.28-1.3 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 4.25-4.25 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.75-5.5 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| 20 | 8 | 1.17-1.25 | 1.6 | 1 | 12 | 12 | 6-4.75 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.25-1.3 | 1.7 | 1.1 | 12 | 12 | 3.5-5 | 1.5-1.5 | 0.400 | 0.500 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.28-1.28 | 2 | 1.1 | 12 | 12 | 4-3.75 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 5.5-5.5 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| 25 | 8 | 1.3-1.37 | 1.6 | 1.1 | 12 | 12 | 6.25-7.25 | 1-2 | 0.450 | 0.600 | 0.114 | 0.082 |
| | 12 | 1.3-1.45 | 1.8 | 1.1 | 12 | 12 | 5-6 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.129 | 0.093 |
| | 16 | 1.3-1.5 | 2 | 1.2 | 12 | 12 | 4.25-7.25 | 1.5-1.5 | 0.450 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2 | 1.4 | 12 | 12 | 4.75-5 | 1.5-1.5 | 0.500 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |

Çizelge 3. 7. 0.5G ve D tip zemin için tasarlanan öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin bileşenlerinin boyutları (devam)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----------|-----|-----|----|----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8 | 1.35-1.5 | 1.8 | 1.2 | 12 | 12 | 6.25-7.75 | 2-2 | 0.450 | 0.600 | 0.144 | 0.104 |
| | 12 | 1.4-1.6 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-7 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.45-1.6 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 4.25-5 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 20 | 1.6-1.6 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 5-5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| 35 | 8 | 1.4-1.55 | 1.9 | 1.2 | 12 | 12 | 7.5-8.25 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.5-1.65 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 5.25-8 | 2-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 16 | 1.5-1.7 | 2.2 | 1.3 | 12 | 12 | 4.5-5.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.75 | 2.3 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| 40 | 8 | 1.45-1.6 | 2 | 1.3 | 12 | 12 | 8.5-10 | 1.5-2 | 0.500 | 0.600 | 0.159 | 0.115 |
| | 12 | 1.6-1.8 | 2.5 | 1.3 | 12 | 12 | 5-8.5 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.130 | 0.095 |
| | 16 | 1.6-1.85 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 5-5.75 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |
| | 20 | 1.6-1.85 | 2.5 | 1.4 | 12 | 12 | 5-6 | 2-2 | 0.600 | 0.700 | 0.150 | 0.110 |

3.2. Malzeme Özellikleri

Köprü modellerinde kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda verilmektedir:

- Öngermeli betonarme kirişlerde kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla $f_c = 40$ MPa, $E = 30358$ MPa.
- Çelik kirişlerin ana kesitinde kullanılan çelik A709 50w ($f_y = 354$ MPa)'dır, enine ve düşey berkitme elemanlarında kullanılan çelik ise A709 36w ($f_y = 248$ MPa)'dır.
- Betonarme çeliği: S420 ($f_y = 420$ MPa)
- Köprünün alt yapı, tabliye ve diğer bileşenlerinde $f_c = 25$ MPa ve $E_c = 24000$ MPa
- Öngerme halatları
 - Yüksek dayanımlı düşük gevşemeli 0.6'' halatlar.
 - Nominal Çapı: 15.24 mm
 - Çelik Alanı: 140 mm²
 - Kopma Dayanımı: 1860 MPa
 - Akma Dayanımı: 1674 MPa
 - Elastisite Modülü: 197000 MPa

3.3. Yükler

Öngermeli kirişli köprüleri ve çelik kirişli köprüleri oluşturan yapı elemanları: öngermeli kirişler, çelik kirişler, betonarme tabliye, kolonlar, kenar ayaklar ve temellerdir. Bilindiği gibi öngermeli kirişli köprü üstyapısı öngermeli kirişler ve betonarme tabliyeden, çelik kirişli köprünün üstyapısı ise çelik kirişler ve betonarme tabliyeden oluşmaktadır. Alt bölümde köprü üstyapı elemanlarının tasarımları için kullanılan yükler açıklanacaktır. Köprü üstyapısının tasarımında sabit ve hareketli yükler olarak iki yük tipi dikkate alınmıştır.

3.3.1. Sabit Yükler

Sabit yükler köprünün üst yapısındaki elemanların öz ağırlıklarından meydana gelen yüklerdir. Bu çalışmada köprülerin üst yapısının tasarımında kullanılan sabit yükler olarak; öngermeli kirişlerin ağırlığı veya çelik kirişlerin ağırlığı, betonarme tabliye

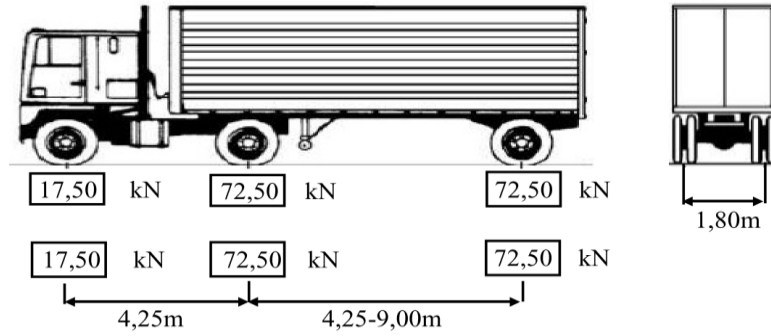
ağırlığı, ilave sabit yükler (kaplama, bordürler, kaldırımlar ve cephe elamanların) ağırlıkları dikkate alınmıştır.

3.3.2. Hareketli Yükler

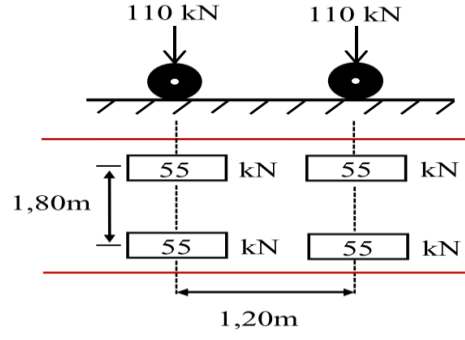
Köprülerin üzerinden geçen taşıtların ve bu taşıtların köprülerde oluşturduğu etkilerin güvenlik sınırları içerisinde karşılaması, köprülerin en mühim görevlerinden biridir. Türkiye’de köprüler tasarlanırken “Karayolları Genel Müdürlüğünün Teknik Şartnamesinde” H₃₀S₂₄ tasarım kamyonu hareketli yük olarak kullanılmaktadır. AASHTO LRFD (2017)'ye göre ise, hareketli yük için iki olumsuz yükleme durumu bulunmaktadır.

- HL93 tasarım kamyonu ile tasarım şerit yükü
- Veya tasarım tandem yükü ile tasarım şerit yükü

AASHTO-LRFD yönetmeliğinde HL93 tasarım kamyonu olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada köprülerin tasarımında HL93 tasarım kamyonu hareketli araç yükü olarak kullanılmıştır. HL93 tasarım kamyonun ve tasarım tandem yükü için dingil yükleri ve akslar arasındaki mesafeleri Şekil 3.3’te ve Şekil 3.4’te gösterilmektedir.

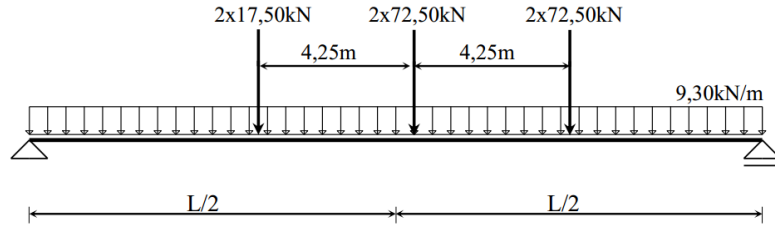


Şekil 3. 3. HL93 (ATMACA 2018)

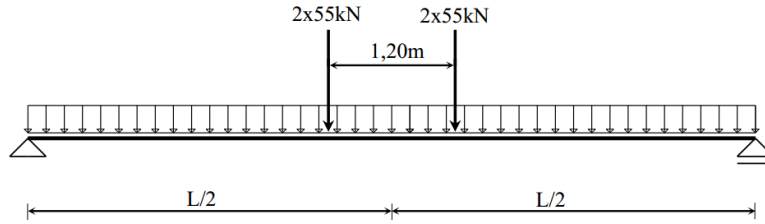


Şekil 3. 4. HL 93 (ATMACA 2018)

HL 93 tasarım kamyon yükü ile tasarım şerit yükünün kombinasyonu ve tasarım tandem yükü ile tasarım şerit yükünün kombinasyonları sırasıyla Şekil 3.5'te ve Şekil 3.6'te verilmektedir.



Şekil 3. 5. HL93 tasarım kamyon ile tasarım şerit yükü ile beraber



Şekil 3. 6. Tasarım tandem yükü ile tasarım şerit yükü

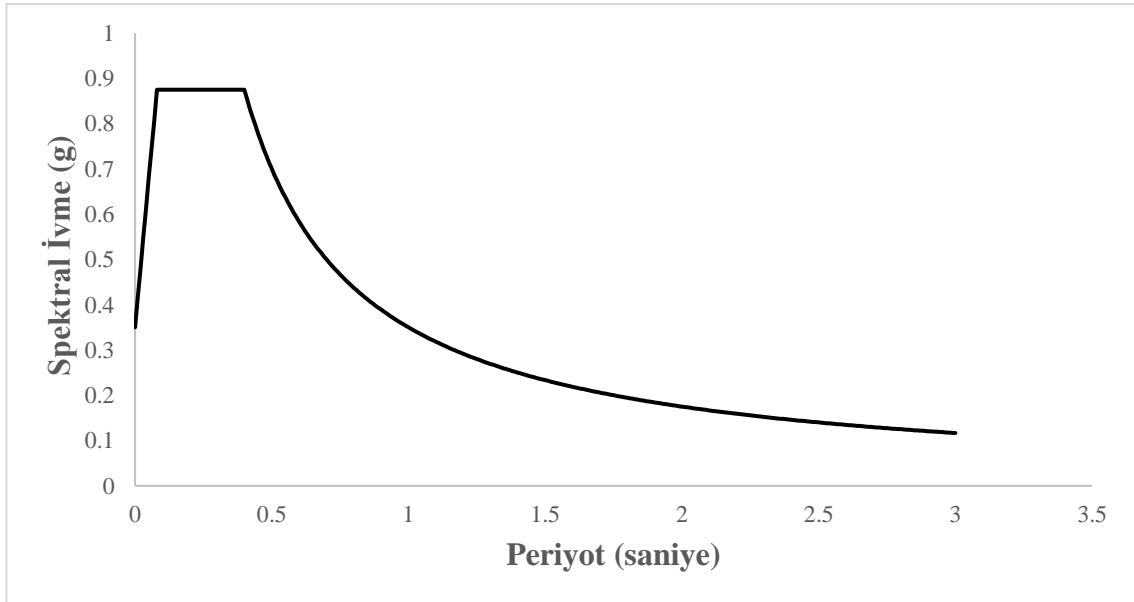
3.3.3. Yanal Toprak Basınçları

Köprünün kenar ayakları arkasındaki yanal toprak basıncı aktif ile pasif arasında değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, kenar ayakların arkasındaki yanal toprak basınçları, Rankine (1857) tarafından ortaya konulan toprak basıncı teorileri kullanılarak

hesaplanmıştır. Buna göre, yanal toprak basınçları Rankine'nin aktif toprak basıncının formülü kullanılarak hesaplanmaktadır. Bilindiği gibi, durgun zeminlerde meydana gelen yanal toprak basınçları kenar ayakların herhangi bir şekilde hareket etmemesine bağlıdır. Bununla birlikte, kenar ayaklar dolgudan dışarı doğru hareket ettiğinde, kenar ayakların herhangi bir noktasında yanal toprak basıncında bir azalma meydana gelecektir. Bu durumda oluşturulan yanal toprak basıncına aktif yanal toprak basıncı denir. Ancak, bu çalışmada sismik yükler altındaki yanal toprak basınçları Mononobe-Okabe yöntemi ile hesaplanmıştır. Mononobe-Okabe (M-O) yöntemi, depremler sırasında yanal toprak basınçlarını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

3.3.4. Sismik Yükler

Köprülerin sismik tasarımı için AASHTO-LRFD (2017)'de önerilen tasarım spektrumu kullanılmıştır. Tasarım spektrumu, AASHTO (2017) 'ya göre köprünün sismik tasarımı için kullanılmaktadır. Bu çalışmada köprülerin tasarımı için tasarım spektrumları her 0.2 g, 0.35 g ve 0.5 g deprem ivme katsayıları, B ve D tip zeminler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kıyas köprünün tasarım spektrumu 0.35g deprem ivme katsayısı ve B tip zemin sınıfı için aşağıda Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3. 7. 0.35g deprem ivme katsayısı ve B tip zemin sınıfı için tasarım spektrum

Köprülerin sismik analizlerinden elde edilen kuvvetler AASHTO LRFD (2017) standardına göre uygun deprem davranış katsayısına (R) bölünmesiyle sismik tasarım kuvvetleri belirlenebilir. Deprem davranış katsayısı (R) sadece sismik yüklerden kaynaklanan eğilme momentlerine uygulanacaktır, kesme kuvvetleri, eksenel kuvvetlerine ve diğer yüklerden meydana gelen eğilme momentlerine uygulanmayacaktır. Buna göre, köprülerin orta ayakları uzun doğrultuda üzerinde eğilmeyi izin veren elastomer mesnetler buldukları için konsol olarak çalışmaktadır ve enine doğrultuda çerçeve davranışı göstermektedir. Dolayısıyla uzun doğrultuda ve enine doğrultuda deprem davranış katsayıları sırasıyla $R=3$ ve $R=5$ olarak belirlenmiştir.

Temel ve başlık kirişlerin tasarımı ekonomik olması için azaltılmış deprem yükleri yerinde köprünün orta ayağının azaltılmamış taşıma gücü momentleri hesaplanıp 1.3 katsayısı ile arttırılarak, orta ayakta oluşan plastikleşme momentine göre başlık kiriş ve temel tasarımı yapılmaktadır. Azaltılmamış taşıma gücünün tanımı ise orta ayakta kullanılan malzemelerin dayanımlarında bir azaltma yapılmadan elde edilen kapasite momentidir. Ek olarak başlık kirişlerinde plastik mafsallara hiçbir zaman izin verilmemektedir.

3.4. Köprü Tasarımı

3.4.1. Köprünün Üstyapı Tasarımı

Köprülerin üstyapıları betonarme tabliyeden ve öngermeli kirişler ya da çelik kirişlerden oluşmaktadır. Betonarme tabliye ve kirişler beraber ve tek bir eleman kesit özelliğini gösteren kompozit bir eleman olarak dikkate alınmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi öngermeli betonarme kirişler elastomer mesnetler üzerinde basit bir şekilde mesnetlenmiş ve AASHTO LRFD standardına göre tasarlanmıştır. Buna göre öngermeli kirişli köprüler için öngermeli kiriş tipi, halatların sayısı ve yerleşimi, betonarme donatıların alanı ve ayrıca kesme donatıların alanı ve aralıkları belirlenmiştir. Kirişlerin uç bölgelerinde öngermeden dolayı oluşacak fazla gerilmeleri izin verilen seviyelere getirilmesi için öngerme halatların bir kısmını belirli mesafe boyunca plastik kılıflar ile kılıflanması tavsiye edilmektedir.

Çelik kirişleri de aynı varsayımlarla AASHTO LRFD standardına göre farklı açıklık uzunluklarında tasarlanmıştır. Tasarımdan elde edilen öngermeli kiriş tipleri ve kirişlerin geometrik özellikleri, açıklıklarına göre sırasıyla Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir. Ayrıca çelik kiriş tipleri ve kirişlerin geometrik özellikleri açıklıklarına göre sırasıyla Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de verilmektedir.

Çizelge 3. 8. Öngermeli kirişlerin tipleri ve kesit özellikleri

| Açıklık Uzunluğu (m) | Öngermeli kiriş tipi (AASHTO) | Kesit Derinliği D (m) | A (m ²) | I _x (m ⁴) | I _y (m ⁴) | Birim Uzunluğunun Ağırlığı (kN/m) |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 15 | III | 1.143 | 0.3613 | 0.0522 | 0.0051 | 9.025 |
| 20 | IV | 1.372 | 0.5090 | 0.1085 | 0.0101 | 12.725 |
| 25 | IV | 1.372 | 0.5090 | 0.1085 | 0.0101 | 12.725 |
| 30 | V | 1.651 | 0.6535 | 0.2169 | 0.0255 | 16.3375 |
| 35 | V | 1.651 | 0.6535 | 0.2169 | 0.0255 | 16.3375 |
| 40 | VI | 1.829 | 0.7000 | 0.3052 | 0.0256 | 16.75 |

Çizelge 3. 9. Öngermeli kirişlerin kesit boyutları (Şekil 3.8a’ya bakınız)

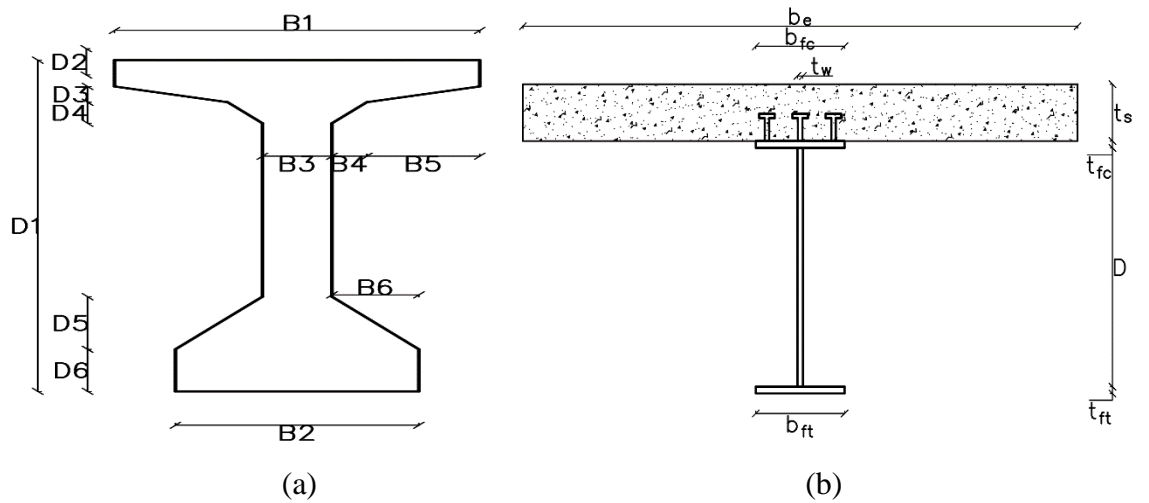
| | III | IV | V | VI |
|----|-------|-------|-------|-------|
| B1 | 0.406 | 0.508 | 1.067 | 1.067 |
| B2 | 0.559 | 0.660 | 0.711 | 0.711 |
| B3 | 0.178 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |
| B4 | 0.114 | 0.152 | 0.102 | 0.102 |
| B5 | 0.000 | 0.000 | 0.330 | 0.330 |
| B6 | 0.191 | 0.229 | 0.254 | 0.254 |
| D1 | 1.143 | 1.372 | 1.600 | 1.829 |
| D2 | 0.178 | 0.203 | 0.127 | 0.127 |
| D3 | 0.000 | 0.000 | 0.076 | 0.076 |
| D4 | 0.114 | 0.152 | 0.102 | 0.102 |
| D5 | 0.191 | 0.229 | 0.254 | 0.254 |
| D6 | 0.178 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |

Çizelge 3. 10. Çelik kirişlerin tipleri ve kesit özellikleri

| Açıklık Uzunluğu (m) | Çelik Kiriş Tipi | Kesit derinliği d (m) | A (m ²) | I _x (m ⁴) | I _y (m ⁴) | Birim Uzunluğunun Ağırlığı (kN/m) |
|----------------------|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 15 | I | 0.760 | 0.0385 | 0.0035 | 0.0002 | 3.003 |
| 20 | II | 0.760 | 0.0385 | 0.0035 | 0.0002 | 3.003 |
| 25 | III | 0.860 | 0.041 | 0.0047 | 0.0002 | 3.198 |
| 30 | IV | 1.110 | 0.05025 | 0.0094 | 0.0003 | 3.9195 |
| 35 | V | 1.160 | 0.0545 | 0.0114 | 0.0005 | 4.251 |
| 40 | VI | 1.360 | 0.0625 | 0.0178 | 0.0006 | 4.875 |

Çizelge 3. 11. Çelik kirişlerin kesit boyutları (Şekil 3.8b'ye bakınız)

| | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m | 40m |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d | 0.760 | 0.760 | 0.860 | 1.110 | 1.160 | 1.360 |
| D | 0.700 | 0.700 | 0.800 | 1.050 | 1.100 | 1.300 |
| b _{fc} | 0.350 | 0.350 | 0.350 | 0.400 | 0.450 | 0.500 |
| t _{fc} | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| t _w | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| b _{ft} | 0.350 | 0.350 | 0.350 | 0.400 | 0.450 | 0.500 |
| t _{ft} | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |



Şekil 3. 8. (a) Öngermeli kirişin kesiti (b) Çelik kirişin kesiti

3.4.2. Elastomer Mesnetlerin Tasarımı

Köprülerin elastomer mesnetleri ve altyapıları (orta ayaklar, temeller ve kenar ayaklar) AASHTO LRFD (2017) standardına uygun olarak tasarlanmaktadır. Elastomer mesnetler, kirişlere gelen yükleri başlık kirişine ve köprünün kenar ayaklarına aktarılmasını sağlayan kauçuk ve çelik plakalardan oluşan elemanlardır. AASHTO LRFD (2017) standardına göre; deprem yükleri altında, elastomer mesnetlerin köprünün uzun doğrultusunda yaptığı deplasmanlar, elastomer mesnet yüksekliğinin %50'sini geçmemelidir. Elastomer mesnetlerin taban boyutları deprem yükleri dışında diğer yükler altında AASHTO LRFD (2017) standardında önerilen mevcut A ve B yöntemlerinden A yöntemine göre uygun olarak belirlenmiştir.

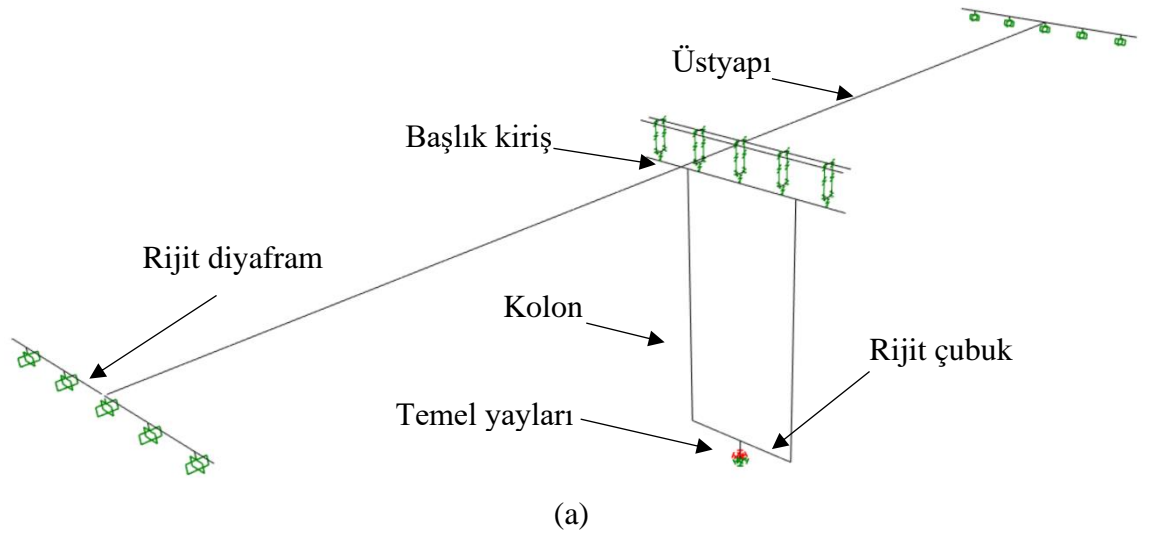
3.4.3. Köprünün Altyapı Tasarımı İçin Analizlerde Kullanılan Deprem Modeli

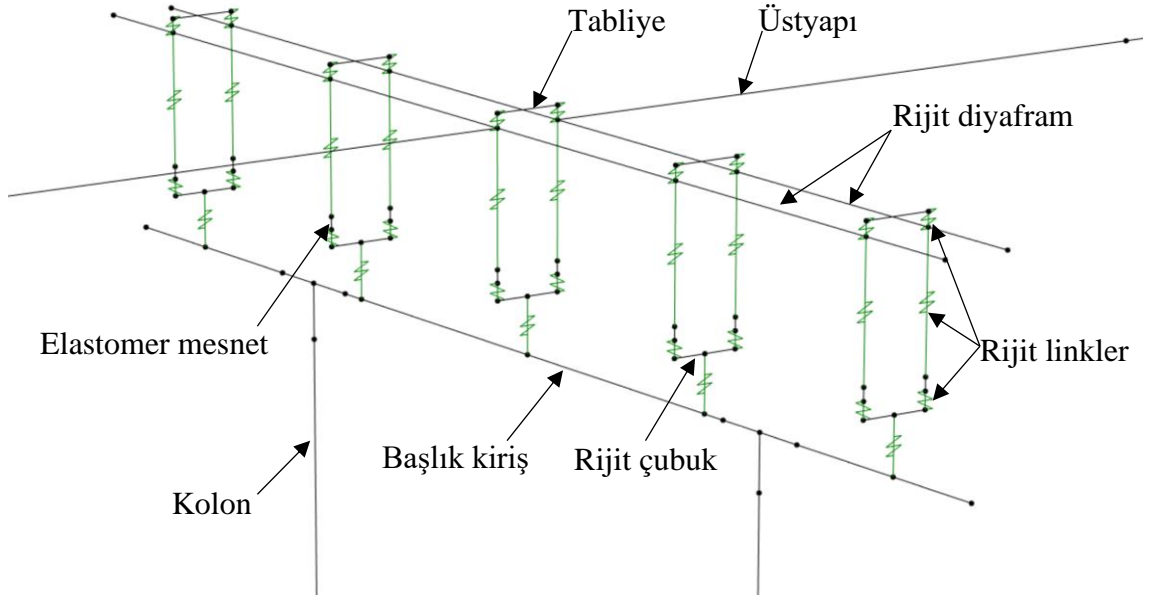
Öngermeli kirişli köprüler ve çelik kirişli köprüler çubuk ve link elemanlar ile sonlu eleman tabanlı SAP2000 programı kullanılarak Şekil 3.9'da gösterildiği gibi modellenmiştir. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin üstyapıları üç boyutlu çubuk eleman olarak idealleştirilmiştir. Buna göre, betonarme tabliye ile kirişler arasında tam bir kompozit etki varsayılmaktadır. Üstyapının Y-ekseni etrafında atalet momentinin hesabı için ilk betonarme tabliyenin efektif genişliği kullanılarak kompozit kesitin atalet momenti hesaplanır ve daha sonra kirişlerin sayısı ile çarpılmaktadır. Üstyapının Z-ekseni etrafındaki atalet momenti de betonarme tabliye ile kirişler arasında tam bir kompozit etki olduğu varsayımıyla hesaplanmaktadır. Köprünün orta ayağı üç boyutlu çerçeve elemanları kullanılarak modellenmiştir. Üstyapı çerçeve elemanların enine doğrultuda köprünün genişliği kadar uzanan fiktif diyafram kirişlerine bağlanmakta ve daha sonra bu fiktif diyafram kirişler dikey rijit link elemanlar kullanarak orta ayak ve kenar ayaklar üzerinde bulunan mesnetlere bağlanmaktadır. Enine doğrultuda uzanan fiktif diyafram elemanlar üstyapının etkisini mesnetlere düzgün yaymasını sağlamak için kullanılmaktadır. Başlık kiriş-kolon ve kolon-temel birleşim bölgeleri rijit elemanlar olarak modellenmiştir. Elastomer mesnetler, üstyapı kirişleri ile ona mesnetlik yapan başlık kirişleri ve kenar ayakları arasında yüklerin aktarılması ve yer değiştirmelerin

sınırlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Köprü elastomer mesnetler gerçek bir elastomer mesnedin rijitliğe sahip çerçeve elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu elastomer mesnetleri temsil eden çerçeve elemanlar, üstyapıyı altyapıya bağlamıştır ve bu çerçeve elemanlarda moment oluşumunun engellenmesi için çerçevelerin en üst uçlarında moment serbestliği tanımlanmıştır. Çerçeve elemanların yüksekliği elastomer mesnetlerin toplam kalınlığına eşit olarak ayarlanmıştır. Elastomer mesnetlerin kayma rijitliğini kullanarak eşdeğer bir dairesel elemanı modellemek için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$EI = \frac{(G_{els.} \cdot xA_{els.} \cdot xh_{rt}^2)}{3} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki formülde EI, elastomer mesnedi temsil eden çerçeve elemanın rijitliği, $G_{els.}$, elastomer mesnedin kayma modülüdür ve 20°C’de değeri 1.0 MPa’dır, $A_{els.}$ ve h_{rt} sırasıyla elastomer mesnedin taban alanı ve kauçuğun toplam yüksekliğidir.



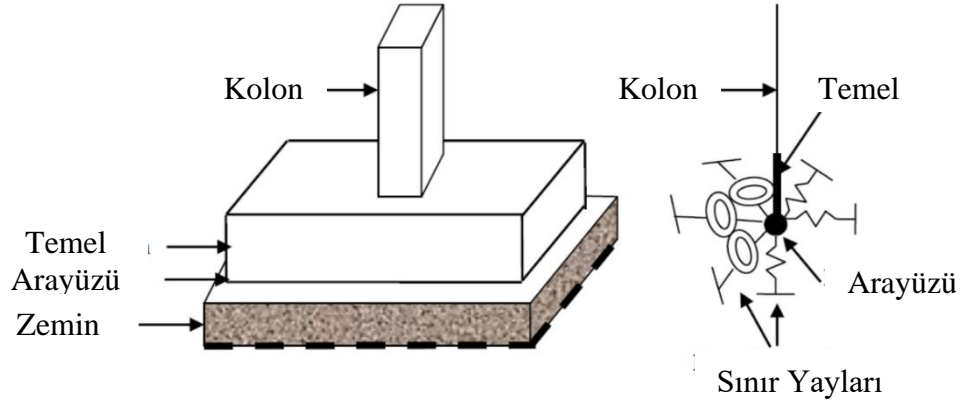


(b)

Şekil 3. 9. Deprem modeli (a) tüm modelin görünüşü, (b) orta ayağın detayları

Bu çalışmada, köprünün sünme, rötne ve ısı değişimlerinden dolayı hareketlerini karşılamak için uzun doğrultuda hareket etmesine izin verilmektedir. Ancak rüzgar kuvvetlerine karşı direnmesi için enine doğrultuda tutulmaktadır. Bu tasarım uygulaması sismik analizlerde modele yansıtılmıştır. Köprünün enine doğrultuda sabitlenmesi için yapısal modeldeki elastomer mesnetlere büyük bir yanal öteleme rijitliği verilmiştir.

Üstyapı yükleri temeller vasıtasıyla zemine aktarılmaktadır. Literatürde zemin-yapı etkileşimi, deprem yükleri altında yapı tepkisinin temel atlındaki zemin hareketini, zemin tepkisinin de yapı hareketini etkilediği olay olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, zemin yapı etkileşiminin analizlerde dikkate alınması için zemin üç boyutlu yaylar ile temsil edilerek temel altındaki taban yüzeylerine tanımlanmıştır. Köprülerin orta ayakları altında üç ötelenme ve üç dönme olmak üzere toplam altı yer değiştirme bileşeni için toplam altı yay sabiti hesaplanmıştır (Şekil 3.10'a bakınız).



Şekil 3. 10. Zemin-Temel Yayları

Bu çalışmada bu yayların rijitlikleri Dobry ve Gazetas (1986), Gazetas (1991) taraflarından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Gazetas (1991) tarafından yapılan elastik rijitlik önerileri ATC-40 (1996) ve FEMA 356 (2000) gibi tasarım şartnamelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Federal Acil Durum Yönetimi Ajansı'na (FEMA 356 (2000)) göre, yayların rijitlik değerleri iki adımda hesaplanmaktadır. İlk olarak, temelin yüzeydeki rijitlik değerleri hesaplanıp, daha sonra her bir rijitlik değeri için bir gömme düzeltme faktörü hesaplanmakta ve bu faktörler hesaplanan sertlik değerleri ile çarpılmaktadır. Bu çalışmada her iki adım birleştirilerek tek bir formül ile gösterilmektedir. Yayların rijitlikleri öteleme (K_x , K_y ve K_z), dönme (K_{xx} ve K_{yy}) ve burulma (K_{zz}) yönleri için aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$K_{emb} = \beta K_{sur} \quad (3.2)$$

$$K_{(x,sur)} = \frac{GB}{2-\nu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 1.2 \right] x \left(1 + 0.21 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[1 + 1.6 \left(\frac{hd(B+L)}{BL^2} \right)^{0.4} \right] \quad (3.3)$$

$$K_{(y,sur)} = \frac{GB}{2-\nu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.4 \frac{L}{B} + 0.8 \right] x \left(1 + 0.21 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[1 + 1.6 \left(\frac{hd(B+L)}{BL^2} \right)^{0.4} \right] \quad (3.4)$$

$$K_{(z,sur)} = \frac{GB}{1-\nu} \left[1.55 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 0.8 \right] x \left[1 + \frac{1}{21} \frac{D}{B} \left(2 + 2.6 \frac{B}{L} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.32 \left(\frac{d(B+L)}{BL} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3.5)$$

$$K_{(xx,sur)} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[0.4 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.1 \right] x \left(1 + 2.5 \frac{d}{B} \left[1 + \frac{2d}{B} \left(\frac{d}{D} \right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right] \right) \quad (3.6)$$

$$K_{(yy,sur)} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[0.47 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.034 \right] x \left(1 + 1.4 \left(\frac{d}{L} \right)^{0.6} \left[1.5 + 3.7 \left(\frac{d}{L} \right)^{1.9} \left(\frac{d}{D} \right)^{-0.6} \right] \right) \quad (3.7)$$

$$K_{(zz,sur)} = GB^3 \left[0.53 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 0.51 \right] x \left(1 + 2.6 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d}{B} \right)^{0.9} \right) \quad (3.8)$$

Burada, G ; zemin kayma modülü, ν ; zemin Poisson oranı, B , L ve d Şekil 3.11’de gösterilen temel boyutlarıdır, D ve h de Şekil 3.11’de gösterildiği gibi taban derinliğine ilişkin parametrelerdir.

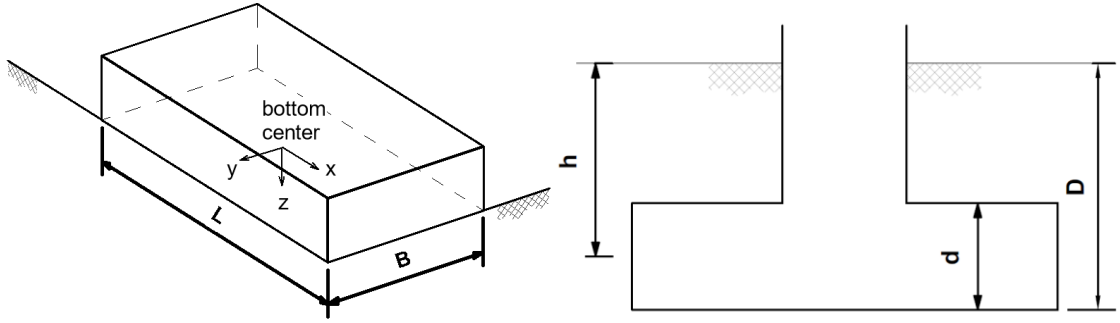
Yukarıdaki Gazetas formüllerinde kayma modülü G aşağıdaki formül ile hesaplanan başlangıç kayma modülü kullanılarak hesaplanmaktadır FEMA 356 (2000):

$$G_0 = \frac{\gamma v_s^2}{g} \quad (3.9)$$

Burada; v_s kesme dalga hızı, γ zemin birim hacim ağırlığı ve g yer ivmesidir. Federal Karayolu İdaresi (FHWA) Kavazanjian ve ark. (1997) tarafından yayınlanan Geoteknik Mühendisliği Genelgesi No. 3’te belirtildiği gibi döngüsel yüklemeler altında azaltılmış kayma modülünü (G) yansıtmak için farklı zemin sınıfları ve farklı yer ivme seviyeleri için verilen başlangıç kayma modülüne (G_0) bir azaltma faktörü uygulayarak kayma modülü hesaplanmaktadır. Bu amaçla, FEMA 356’de önerilen Çizelge 3.12’deki faktörler kullanılmıştır.

Çizelge 3. 12. Efektif kayma modülü oranı (G/G_0)

| Zemin Sınıfı | Efektif Pik İvmesi | | | |
|--------------|--------------------|------|------|------|
| | 0 | 0.1 | 0.4 | 0.8 |
| B | 1 | 1.00 | 0.95 | 0.90 |
| D | 1 | 0.90 | 0.50 | 0.10 |



Şekil 3. 11. Temelin geometrik parametreleri ($L \geq B$)

3.4.4. Orta Ayağın Tasarımı

Dikkate alınan her bir köprü durumu için çerçeve elemanları kullanarak üç boyutlu iki sütunlu orta ayak modellenmiştir. Başlık kiriş-kolon ve kolon-temel birleşimleri rijit bağlantılar olarak idealize edilmiştir. Üst yapı sabit ve hareketli yükleri başlık kirişi üzerindeki mesnet noktalarına uygulanmaktadır Başlık kirişi ve kolonlardaki iç kuvvetler yerçekimi yük analizlerinin yapılmasıyla belirlenmektedir. Başlık kirişlerinin sismik yükler altında hasarsız olduğu varsayılmaktadır. Kapasite tasarımı yaklaşımına göre başlık kirişin tasarımı için orta ayak kolonlarının plastik moment kapasiteleri 1,30 kat büyütülerek kullanılmıştır. Başlık kirişinin kesme donatısı kapasite tasarımı yaklaşımı takip edilerek aşağıdaki bağıntı ile başlık kirişlerinde oluşan maksimum sismik kesme kuvveti hesaplanmaktadır.

$$V = \frac{2M_{pb}}{l_b} \quad (3.10)$$

Burada M_{pb} , başlık kirişinin plastik moment kapasitesi ve l_b , iki kolon arasındaki başlık kirişinin net uzunluğudur. Benzer şekilde, kolonların kesme donatısı kolonların plastik moment kapasitesini kullanarak kapasite tasarım yaklaşımı ile belirlenir.

3.4.5. Kenar Ayaklar ve Temellerin Tasarımı

Köprülerin orta ayaklarının temelleri ve kenar ayakları, SAP2000 yapısal analiz programı kullanılarak dört düğümlü kabuk elemanlarıyla modellenmiştir. SLS (Hizmete Elverişlilik Limit Durumu) analizlerinde zemin rijitlik temsil edilmesi için temel altında elastik dikey yaylar kullanılmaktadır. Kullanılan bu elastik dikey yayların sertlik değerleri her bir zemin sınıfı (B ve D) için AASHTO-LRFD'deki verilen değerler kullanılmıştır. SLS (Hizmete Elverişlilik Limit Durumu) yükler altında analizlerin yapılmasıyla zemin tepkileri ve oluşan iç kuvvetler tasarım için hesaplanır. Analizlerde temelleri temsil eden kabuk elemanların altında tanımlanan yaylarda çekme gerilmesi gözlenmemiştir. ULS (Nihai Sınır Durumları) analizleri durumunda, zemin tepkileri AASHTO-LRFD'ye (2017) göre eşit olarak dağıtıldığı varsayılmaktadır. İlk olarak, düzgün dağılmış zemin basıncının gerilmesi ve uygulama alanı belirlenir. Daha sonra, model yayların çıkarılmasıyla modifiye edilir (sadece tabanın köşelerinde dört zayıf yay kullanılır) ve düzgün bir toprak basıncı ve ULS yükleri altında analiz edilip iç kuvvetler belirlenmektedir. ULS donatıları elde edilen bu iç kuvvetlere göre belirlenir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Tasarım İçin Analiz Sonuçları

4.1.1. Modal Titreşim Periyotları

Aşağıdaki Çizelge 4.1'den Çizelge 4.6'ye kadar olan çizelgelerde her köprünün boyuna ve enine doğrultularında modal titreşim periyotları farklı açıklık uzunlukları, kolon yükseklikleri, zemin tipleri ve deprem bölgeleri için verilmektedir. Görüldüğü gibi öngermeli kirişli köprülerin modal titreşim periyotları çelik kirişli köprülerin modal titreşim periyotlarına nazaran büyük çıkmaktadır. Bununla birlikte her köprü tipinde modal titreşim periyotları kendi arasında açıklık uzunluklarının artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemde (TSDS) temel titreşim periyodu aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.1)$$

Burada; m ve k sırasıyla tek serbestlik dereceli sistemin kütlelerini ve rijitliğini ifade etmektedir.

Yukarıdaki formüle göre üstyapının toplam ağırlığı arttığında köprünün modal titreşim periyodu artmaktadır ve diğer taraftan yapının toplam rijitliği arttığında ise köprünün modal titreşim periyodu azalmaktadır. Dolayısıyla, söz konusu olan köprülerde öngermeli kirişli köprülerin üstyapı ağırlığı çelik kirişli köprülerine nazaran daha fazla olduğu için öngermeli betonarme kirişli köprülerde modal titreşim periyotları daha yüksek çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde köprülerin parametrelerinin değişikliği ile köprülerin modal titreşim periyotları düzenli bir şekilde artış veya azalma göstermemektedir. Bunun nedeni ise köprülerde kullanılan elastomerlerin ve kolonların rijitliklerinde farklılık göstermesinden dolayıdır. Zemin sınıflarına göre değerleri incelendiğinde D tip zeminler üzerinde tasarlanan köprülerin modal titreşim periyotları B tip zeminler üzerinde tasarlanan köprülerin modal titreşim periyotlarına göre daha düşük çıkmaktadır. Çünkü üstyapı ağırlıkları sabit kalmak ile beraber D tip zemin üzerinde

tasarlanan köprülerin alt yapı boyutlarının artışı ile rijitlikleri de artış göstermektedir. Bunun sonucunda periyotlar azalmaktadır.

Çizelge 4. 1. 0.2G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|-------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.61 | 1.31 | 0.29 | 0.24 |
| | 12 | 1.57 | 1.27 | 0.29 | 0.24 |
| | 16 | 1.53 | 1.24 | 0.29 | 0.25 |
| | 20 | 1.52 | 1.24 | 0.30 | 0.26 |
| 20 | 8 | 1.71 | 1.49 | 0.33 | 0.30 |
| | 12 | 1.77 | 1.52 | 0.33 | 0.30 |
| | 16 | 1.74 | 1.49 | 0.33 | 0.30 |
| | 20 | 1.72 | 1.47 | 0.34 | 0.31 |
| 25 | 8 | 2.06 | 1.72 | 0.40 | 0.36 |
| | 12 | 1.79 | 1.46 | 0.39 | 0.35 |
| | 16 | 1.84 | 1.49 | 0.39 | 0.35 |
| | 20 | 1.81 | 1.48 | 0.39 | 0.36 |
| 30 | 8 | 2.09 | 1.68 | 0.45 | 0.41 |
| | 12 | 2.31 | 1.81 | 0.47 | 0.43 |
| | 16 | 2.26 | 1.75 | 0.47 | 0.42 |
| | 20 | 2.22 | 1.74 | 0.47 | 0.40 |
| 35 | 8 | 2.36 | 1.89 | 0.51 | 0.47 |
| | 12 | 2.46 | 1.95 | 0.54 | 0.50 |
| | 16 | 2.21 | 1.72 | 0.53 | 0.49 |
| | 20 | 2.17 | 1.70 | 0.53 | 0.49 |
| 40 | 8 | 2.29 | 1.82 | 0.56 | 0.52 |
| | 12 | 2.39 | 1.90 | 0.61 | 0.57 |
| | 16 | 2.52 | 1.94 | 0.62 | 0.56 |
| | 20 | 2.48 | 1.91 | 0.62 | 0.57 |

Çizelge 4. 2. 0.2G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|-------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.49 | 1.23 | 0.26 | 0.23 |
| | 12 | 1.45 | 1.18 | 0.27 | 0.23 |
| | 16 | 1.47 | 1.19 | 0.26 | 0.22 |
| | 20 | 1.46 | 1.19 | 0.27 | 0.24 |
| 20 | 8 | 1.43 | 1.24 | 0.29 | 0.27 |
| | 12 | 1.62 | 1.41 | 0.30 | 0.28 |
| | 16 | 1.34 | 1.16 | 0.29 | 0.28 |
| | 20 | 1.40 | 1.21 | 0.30 | 0.28 |
| 25 | 8 | 1.45 | 1.19 | 0.33 | 0.30 |
| | 12 | 1.64 | 1.38 | 0.36 | 0.34 |
| | 16 | 1.74 | 1.42 | 0.37 | 0.34 |
| | 20 | 1.64 | 1.34 | 0.36 | 0.34 |
| 30 | 8 | 1.79 | 1.42 | 0.38 | 0.35 |
| | 12 | 1.91 | 1.54 | 0.40 | 0.42 |
| | 16 | 1.98 | 1.56 | 0.44 | 0.42 |
| | 20 | 1.55 | 1.22 | 0.43 | 0.40 |
| 35 | 8 | 1.90 | 1.50 | 0.42 | 0.39 |
| | 12 | 2.00 | 1.63 | 0.48 | 0.47 |
| | 16 | 1.77 | 1.42 | 0.50 | 0.49 |
| | 20 | 1.77 | 1.39 | 0.51 | 0.48 |
| 40 | 8 | 2.06 | 1.60 | 0.47 | 0.42 |
| | 12 | 1.69 | 1.39 | 0.53 | 0.52 |
| | 16 | 1.91 | 1.50 | 0.59 | 0.56 |
| | 20 | 1.92 | 1.49 | 0.60 | 0.56 |

Çizelge 4. 3. 0.35G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|-------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.47 | 1.23 | 0.27 | 0.24 |
| | 12 | 1.57 | 1.27 | 0.29 | 0.24 |
| | 16 | 1.53 | 1.24 | 0.29 | 0.25 |
| | 20 | 1.52 | 1.24 | 0.30 | 0.26 |
| 20 | 8 | 1.56 | 1.34 | 0.31 | 0.28 |
| | 12 | 1.77 | 1.52 | 0.33 | 0.30 |
| | 16 | 1.74 | 1.48 | 0.33 | 0.30 |
| | 20 | 1.72 | 1.47 | 0.34 | 0.31 |
| 25 | 8 | 1.90 | 1.60 | 0.37 | 0.34 |
| | 12 | 1.75 | 1.45 | 0.38 | 0.35 |
| | 16 | 1.84 | 1.48 | 0.39 | 0.35 |
| | 20 | 1.81 | 1.48 | 0.39 | 0.36 |
| 30 | 8 | 1.97 | 1.53 | 0.42 | 0.37 |
| | 12 | 2.20 | 1.75 | 0.45 | 0.41 |
| | 16 | 2.26 | 1.74 | 0.47 | 0.42 |
| | 20 | 2.22 | 1.74 | 0.47 | 0.44 |
| 35 | 8 | 2.22 | 1.73 | 0.46 | 0.41 |
| | 12 | 2.34 | 1.86 | 0.51 | 0.48 |
| | 16 | 2.20 | 1.72 | 0.53 | 0.49 |
| | 20 | 2.17 | 1.69 | 0.53 | 0.49 |
| 40 | 8 | 2.17 | 1.69 | 0.50 | 0.45 |
| | 12 | 2.28 | 1.79 | 0.57 | 0.53 |
| | 16 | 2.48 | 1.94 | 0.61 | 0.56 |
| | 20 | 2.48 | 1.91 | 0.62 | 0.57 |

Çizelge 4. 4. 0.35G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|-------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.39 | 1.14 | 0.25 | 0.22 |
| | 12 | 1.36 | 1.16 | 0.26 | 0.23 |
| | 16 | 1.47 | 1.19 | 0.26 | 0.22 |
| | 20 | 1.46 | 1.19 | 0.27 | 0.24 |
| 20 | 8 | 1.34 | 1.15 | 0.27 | 0.25 |
| | 12 | 1.52 | 1.32 | 0.30 | 0.28 |
| | 16 | 1.34 | 1.16 | 0.29 | 0.28 |
| | 20 | 1.40 | 1.21 | 0.30 | 0.28 |
| 25 | 8 | 1.37 | 1.13 | 0.31 | 0.28 |
| | 12 | 1.55 | 1.29 | 0.34 | 0.32 |
| | 16 | 1.71 | 1.42 | 0.36 | 0.34 |
| | 20 | 1.64 | 1.34 | 0.36 | 0.34 |
| 30 | 8 | 1.71 | 1.33 | 0.35 | 0.32 |
| | 12 | 1.79 | 1.44 | 0.40 | 0.38 |
| | 16 | 1.89 | 1.53 | 0.43 | 0.41 |
| | 20 | 1.55 | 1.22 | 0.43 | 0.40 |
| 35 | 8 | 1.80 | 1.42 | 0.38 | 0.35 |
| | 12 | 1.90 | 1.51 | 0.45 | 0.42 |
| | 16 | 1.68 | 1.38 | 0.48 | 0.47 |
| | 20 | 1.75 | 1.39 | 0.50 | 0.48 |
| 40 | 8 | 1.97 | 1.52 | 0.42 | 0.37 |
| | 12 | 1.59 | 1.28 | 0.48 | 0.45 |
| | 16 | 1.80 | 1.45 | 0.54 | 0.53 |
| | 20 | 1.87 | 1.49 | 0.58 | 0.56 |

Çizelge 4. 5. 0.5G ve B tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|----------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.44 | 1.16 | 0.27 | 0.23 |
| | 12 | 1.56 | 1.27 | 0.29 | 0.24 |
| | 16 | 1.53 | 1.23 | 0.29 | 0.25 |
| | 20 | 1.52 | 1.24 | 0.30 | 0.26 |
| 20 | 8 | 1.50 | 1.29 | 0.29 | 0.27 |
| | 12 | 1.70 | 1.50 | 0.32 | 0.30 |
| | 16 | 1.74 | 1.49 | 0.33 | 0.30 |
| | 20 | 1.72 | 1.47 | 0.34 | 0.31 |
| 25 | 8 | 1.83 | 1.51 | 0.35 | 0.31 |
| | 12 | 1.66 | 1.39 | 0.37 | 0.34 |
| | 16 | 1.84 | 1.48 | 0.39 | 0.35 |
| | 20 | 1.81 | 1.48 | 0.39 | 0.36 |
| 30 | 8 | 1.87 | 1.46 | 0.38 | 0.33 |
| | 12 | 2.08 | 1.69 | 0.43 | 0.40 |
| | 16 | 2.20 | 1.74 | 0.46 | 0.42 |
| | 20 | 2.22 | 1.74 | 0.47 | 0.44 |
| 35 | 8 | 2.11 | 1.66 | 0.41 | 0.37 |
| | 12 | 2.23 | 1.78 | 0.48 | 0.45 |
| | 16 | 2.12 | 1.72 | 0.51 | 0.49 |
| | 20 | 2.17 | 1.69 | 0.53 | 0.49 |
| 40 | 8 | 2.06 | 1.59 | 0.43 | 0.38 |
| | 12 | 2.16 | 1.72 | 0.51 | 0.49 |
| | 16 | 2.37 | 1.90 | 0.57 | 0.55 |
| | 20 | 2.45 | 1.91 | 0.62 | 0.57 |

Çizelge 4. 6. 0.5G ve D tip zemin için köprülerin modal titreşim periyotları

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Uzun Doğrultu | | Enine Doğrultu | |
|----------------------------|----------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) | Öngermeli Köprü Periyot T (s) | Çelik Köprü Periyot T (s) |
| 15 | 8 | 1.37 | 1.10 | 0.25 | 0.21 |
| | 12 | 1.34 | 1.10 | 0.26 | 0.22 |
| | 16 | 1.47 | 1.19 | 0.26 | 0.23 |
| | 20 | 1.46 | 1.19 | 0.27 | 0.24 |
| 20 | 8 | 1.31 | 1.13 | 0.26 | 0.24 |
| | 12 | 1.47 | 1.27 | 0.29 | 0.27 |
| | 16 | 1.34 | 1.16 | 0.29 | 0.28 |
| | 20 | 1.40 | 1.21 | 0.30 | 0.28 |
| 25 | 8 | 1.34 | 1.09 | 0.30 | 0.27 |
| | 12 | 1.49 | 1.25 | 0.33 | 0.31 |
| | 16 | 1.64 | 1.42 | 0.35 | 0.34 |
| | 20 | 1.64 | 1.34 | 0.36 | 0.34 |
| 30 | 8 | 1.67 | 1.31 | 0.34 | 0.30 |
| | 12 | 1.74 | 1.40 | 0.39 | 0.36 |
| | 16 | 1.85 | 1.48 | 0.42 | 0.40 |
| | 20 | 1.55 | 1.21 | 0.43 | 0.40 |
| 35 | 8 | 1.79 | 1.40 | 0.38 | 0.33 |
| | 12 | 1.86 | 1.48 | 0.44 | 0.40 |
| | 16 | 1.65 | 1.34 | 0.47 | 0.46 |
| | 20 | 1.72 | 1.39 | 0.50 | 0.49 |
| 40 | 8 | 1.95 | 1.50 | 0.42 | 0.36 |
| | 12 | 1.55 | 1.25 | 0.47 | 0.44 |
| | 16 | 1.75 | 1.41 | 0.53 | 0.52 |
| | 20 | 1.83 | 1.49 | 0.57 | 0.56 |

4.1.2. Altyapının Tasarım Sismik Kuvvetleri

Köprülerin analizlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında öngermeli betonarme kirişli köprülerin tasarım sismik kuvvetleri çelik kirişli köprülerin tasarım sismik kuvvetlerine göre daha büyük çıkmaktadır. Öngermeli kirişli köprü daha ağır üstyapıya sahip olmasından dolayı daha büyük yüklere maruz kalmaktadır. Böylece büyük tasarım sismik kuvvetler köprü bileşenlerinin boyutlarını artırmaktadır. Bu nedenle öngermeli betonarme kirişli köprülerin altyapı bileşenlerinin boyutları daha büyük çıkmaktadır.

Öngermeli betonarme kirişli ve çelik kirişli köprülerin açıklık uzunluklarının artışı ile tasarım sismik kuvvetleri de artış göstermektedir. Benzer sonuçlar köprü kolonlarının artışında da gözlemlenmektedir. Yalnız bazı köprülerde kolonların yüksekliğinin artması halinde kesme ve moment değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi bazı köprülerdeki narinlik sınırını aşmamak için kolonların boyutları gerektiğinden daha büyük seçilmesidir. Bu davranış daha çok 16m yüksekliğe sahip köprülerde görülmektedir.

Çizelge 4. 7. 0.2G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| 15 | 8 | 543 | 57 | 443 | 49 | 267 | 66 | 170 | 42 |
| | 12 | 1003 | 73 | 908 | 69 | 474 | 78 | 350 | 58 |
| | 16 | 1736 | 97 | 1542 | 88 | 870 | 107 | 633 | 78 |
| | 20 | 2590 | 117 | 2446 | 113 | 1366 | 134 | 1080 | 106 |
| 20 | 8 | 695 | 72 | 561 | 60 | 445 | 110 | 320 | 80 |
| | 12 | 1135 | 83 | 1275 | 95 | 656 | 108 | 972 | 112 |
| | 16 | 1818 | 101 | 1700 | 96 | 1093 | 134 | 966 | 118 |
| | 20 | 2762 | 125 | 2619 | 120 | 1773 | 174 | 1594 | 156 |
| 25 | 8 | 1052 | 106 | 731 | 76 | 957 | 236 | 603 | 150 |
| | 12 | 1146 | 82 | 1027 | 76 | 902 | 149 | 787 | 130 |
| | 16 | 1989 | 110 | 1774 | 100 | 1545 | 190 | 1350 | 166 |
| | 20 | 2419 | 109 | 2742 | 125 | 1983 | 194 | 2172 | 205 |
| 30 | 8 | 1418 | 140 | 913 | 94 | 1590 | 392 | 1005 | 249 |
| | 12 | 1463 | 103 | 1160 | 84 | 1585 | 209 | 1078 | 178 |
| | 16 | 2250 | 123 | 1926 | 108 | 1939 | 238 | 1829 | 225 |
| | 20 | 3357 | 149 | 3049 | 138 | 2986 | 291 | 2906 | 284 |
| 35 | 8 | 1652 | 161 | 1120 | 114 | 2066 | 509 | 1403 | 347 |
| | 12 | 1733 | 122 | 1233 | 90 | 1719 | 282 | 1283 | 211 |
| | 16 | 2344 | 128 | 2011 | 113 | 2274 | 279 | 2164 | 266 |
| | 20 | 3522 | 157 | 3054 | 138 | 3457 | 337 | 4612 | 450 |
| 40 | 8 | 1927 | 185 | 1243 | 125 | 2766 | 680 | 1774 | 438 |
| | 12 | 1991 | 138 | 908 | 69 | 2336 | 383 | 350 | 58 |
| | 16 | 2528 | 137 | 1542 | 88 | 2660 | 326 | 633 | 78 |
| | 20 | 3806 | 169 | 2446 | 113 | 4046 | 394 | 1080 | 106 |

Çizelge 4. 8. 0.2G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| 15 | 8 | 2190 | 220 | 1652 | 175 | 878 | 216 | 501 | 124 |
| | 12 | 1924 | 140 | 1796 | 135 | 563 | 93 | 424 | 70 |
| | 16 | 3291 | 183 | 3040 | 173 | 916 | 113 | 712 | 88 |
| | 20 | 5136 | 232 | 4857 | 223 | 1489 | 144 | 1203 | 117 |
| 20 | 8 | 2697 | 270 | 2220 | 231 | 1347 | 330 | 1003 | 247 |
| | 12 | 2369 | 171 | 2020 | 149 | 887 | 146 | 709 | 117 |
| | 16 | 3384 | 192 | 3254 | 187 | 1192 | 146 | 1122 | 138 |
| | 20 | 5298 | 240 | 5060 | 232 | 1867 | 181 | 1735 | 168 |
| 25 | 8 | 3702 | 361 | 2950 | 299 | 2519 | 614 | 1898 | 465 |
| | 12 | 3285 | 233 | 2289 | 168 | 1782 | 291 | 1189 | 196 |
| | 16 | 3975 | 221 | 3614 | 204 | 1877 | 230 | 1739 | 213 |
| | 20 | 5870 | 264 | 5337 | 243 | 2779 | 269 | 2564 | 249 |
| 30 | 8 | 4741 | 451 | 3512 | 349 | 4403 | 1067 | 3006 | 736 |
| | 12 | 4592 | 317 | 3264 | 233 | 3469 | 565 | 2379 | 390 |
| | 16 | 4570 | 248 | 3835 | 214 | 3016 | 369 | 2510 | 308 |
| | 20 | 5953 | 268 | 5256 | 242 | 3911 | 379 | 3563 | 346 |
| 35 | 8 | 5425 | 515 | 4054 | 400 | 6186 | 1494 | 4327 | 1055 |
| | 12 | 5792 | 398 | 3838 | 272 | 5810 | 940 | 3740 | 612 |
| | 16 | 5006 | 273 | 3698 | 207 | 4567 | 557 | 3477 | 426 |
| | 20 | 6554 | 292 | 5751 | 262 | 5551 | 537 | 5140 | 498 |
| 40 | 8 | 6123 | 569 | 4606 | 447 | 8489 | 2041 | 5804 | 1411 |
| | 12 | 6524 | 450 | 4145 | 293 | 8317 | 1343 | 5422 | 885 |
| | 16 | 5907 | 318 | 4671 | 259 | 6891 | 838 | 5693 | 696 |
| | 20 | 6954 | 308 | 6057 | 274 | 7527 | 727 | 6860 | 665 |

Çizelge 4. 9. 0.35G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| 15 | 8 | 2019 | 211 | 1268 | 137 | 1271 | 312 | 560 | 138 |
| | 12 | 1857 | 137 | 1610 | 121 | 896 | 148 | 623 | 103 |
| | 16 | 3204 | 180 | 2795 | 159 | 1639 | 201 | 1165 | 143 |

Çizelge 4. 9. 0.35G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam)

| | | | | | | | | | |
|----|----|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| | 20 | 4748 | 215 | 4282 | 197 | 2542 | 249 | 1890 | 185 |
| | 8 | 2296 | 235 | 1931 | 205 | 1834 | 450 | 1368 | 337 |
| 20 | 12 | 1986 | 145 | 1809 | 135 | 1148 | 189 | 972 | 160 |
| | 16 | 3181 | 177 | 3078 | 174 | 1912 | 235 | 1777 | 218 |
| | 20 | 4834 | 218 | 4584 | 210 | 3102 | 303 | 2788 | 273 |
| | 8 | 2834 | 286 | 2050 | 212 | 3118 | 763 | 1968 | 484 |
| 25 | 12 | 2569 | 184 | 1824 | 135 | 2126 | 349 | 1402 | 231 |
| | 16 | 3480 | 192 | 3225 | 182 | 2703 | 332 | 2482 | 305 |
| | 20 | 5292 | 237 | 4800 | 219 | 4277 | 418 | 3800 | 371 |
| | 8 | 3486 | 343 | 2731 | 280 | 4636 | 1132 | 3438 | 843 |
| 30 | 12 | 3659 | 257 | 2549 | 185 | 3674 | 600 | 2561 | 421 |
| | 16 | 3938 | 215 | 3494 | 195 | 3394 | 416 | 3370 | 414 |
| | 20 | 5875 | 261 | 5336 | 242 | 5224 | 510 | 5082 | 497 |
| | 8 | 3991 | 388 | 3141 | 318 | 6025 | 1470 | 4930 | 1208 |
| 35 | 12 | 4266 | 299 | 3017 | 218 | 4907 | 800 | 3515 | 576 |
| | 16 | 4270 | 233 | 3520 | 197 | 4192 | 514 | 3788 | 465 |
| | 20 | 6164 | 275 | 5345 | 243 | 6050 | 590 | 5765 | 563 |
| | 8 | 4610 | 441 | 3361 | 336 | 7607 | 1850 | 5508 | 1349 |
| 40 | 12 | 4873 | 336 | 3444 | 245 | 6398 | 1042 | 4586 | 750 |
| | 16 | 5032 | 272 | 3745 | 208 | 5539 | 677 | 4337 | 532 |
| | 20 | 6661 | 295 | 5728 | 259 | 7081 | 691 | 6619 | 647 |

Çizelge 4. 10. 0.35G ve D tip zemin için ort ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| | 8 | 4723 | 477 | 3469 | 366 | 2276 | 551 | 1247 | 305 |
| 15 | 12 | 4536 | 325 | 2922 | 220 | 1453 | 237 | 682 | 112 |
| | 16 | 5093 | 283 | 4690 | 267 | 1410 | 172 | 1094 | 134 |

Çizelge 4. 11. 0.35G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam)

| | | | | | | | | | |
|----|----|-------|------|-------|-----|-------|------|-------|------|
| | 20 | 7654 | 345 | 7229 | 332 | 2170 | 210 | 1738 | 169 |
| | 8 | 5362 | 533 | 4656 | 480 | 2944 | 711 | 2366 | 575 |
| 20 | 12 | 5373 | 384 | 4657 | 340 | 2236 | 363 | 1810 | 296 |
| | 16 | 5045 | 285 | 5049 | 289 | 1744 | 213 | 1722 | 211 |
| | 20 | 7875 | 357 | 7529 | 346 | 2715 | 263 | 2507 | 244 |
| | 8 | 7287 | 708 | 5610 | 566 | 5133 | 1226 | 3625 | 878 |
| 25 | 12 | 7155 | 504 | 5420 | 393 | 4083 | 658 | 2938 | 479 |
| | 16 | 6766 | 374 | 5994 | 315 | 3235 | 394 | 2665 | 326 |
| | 20 | 8728 | 391 | 7939 | 362 | 4043 | 391 | 3710 | 360 |
| | 8 | 8647 | 821 | 6640 | 657 | 8267 | 1955 | 5712 | 1373 |
| 30 | 12 | 9767 | 670 | 7008 | 497 | 7833 | 1250 | 5227 | 847 |
| | 16 | 9532 | 515 | 6532 | 363 | 6478 | 781 | 4282 | 523 |
| | 20 | 8851 | 398 | 7818 | 359 | 5690 | 550 | 5157 | 500 |
| | 8 | 9801 | 928 | 7435 | 732 | 11289 | 2647 | 7692 | 1839 |
| 35 | 12 | 11445 | 783 | 8425 | 594 | 12068 | 1905 | 8188 | 1317 |
| | 16 | 11423 | 617 | 7076 | 392 | 10203 | 1220 | 6497 | 791 |
| | 20 | 10586 | 471 | 8551 | 389 | 8805 | 847 | 7492 | 726 |
| | 8 | 10836 | 1005 | 8247 | 798 | 14751 | 3435 | 9897 | 2356 |
| 40 | 12 | 14155 | 970 | 10180 | 709 | 16850 | 2638 | 11709 | 1872 |
| | 16 | 13864 | 740 | 9158 | 504 | 16007 | 1896 | 10431 | 1263 |
| | 20 | 13032 | 575 | 9005 | 408 | 14194 | 1353 | 10009 | 969 |

Çizelge 4. 12. 0.5G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| | 8 | 3054 | 313 | 2454 | 263 | 2023 | 494 | 1253 | 308 |
| 15 | 12 | 2612 | 191 | 2301 | 173 | 1250 | 206 | 890 | 147 |
| | 16 | 4340 | 241 | 3993 | 228 | 2174 | 267 | 1663 | 204 |

Çizelge 4. 13. 0.5G ve B tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam)

| | | | | | | | | | |
|----|----|-------|-----|------|-----|-------|------|-------|------|
| | 20 | 6476 | 292 | 6117 | 281 | 3414 | 334 | 2700 | 264 |
| | 8 | 3898 | 398 | 3294 | 348 | 3448 | 840 | 2578 | 631 |
| 20 | 12 | 3757 | 273 | 2820 | 210 | 2435 | 398 | 1565 | 257 |
| | 16 | 4544 | 253 | 4249 | 241 | 2731 | 336 | 2416 | 297 |
| | 20 | 6906 | 311 | 6549 | 299 | 4431 | 433 | 3984 | 390 |
| | 8 | 4741 | 488 | 3738 | 386 | 6023 | 1459 | 4052 | 989 |
| 25 | 12 | 5220 | 373 | 3680 | 271 | 4790 | 780 | 3034 | 497 |
| | 16 | 4972 | 274 | 4607 | 259 | 3861 | 473 | 3545 | 435 |
| | 20 | 7559 | 339 | 6856 | 312 | 6110 | 597 | 5429 | 531 |
| | 8 | 6279 | 617 | 4768 | 488 | 9654 | 2328 | 6382 | 1552 |
| 30 | 12 | 6975 | 490 | 4459 | 322 | 8496 | 1377 | 4911 | 803 |
| | 16 | 6897 | 375 | 4992 | 279 | 6562 | 802 | 4816 | 591 |
| | 20 | 8392 | 372 | 7622 | 346 | 7462 | 728 | 7262 | 710 |
| | 8 | 7050 | 686 | 5289 | 535 | 13086 | 3147 | 8789 | 2135 |
| 35 | 12 | 7860 | 550 | 5553 | 400 | 10833 | 1753 | 7362 | 1200 |
| | 16 | 8002 | 437 | 5028 | 281 | 8721 | 1064 | 5409 | 664 |
| | 20 | 8806 | 392 | 7634 | 347 | 8642 | 842 | 8231 | 803 |
| | 8 | 8367 | 801 | 6320 | 631 | 16615 | 3978 | 11593 | 2800 |
| 40 | 12 | 9442 | 650 | 6329 | 449 | 14756 | 2382 | 9268 | 1509 |
| | 16 | 9576 | 518 | 6074 | 337 | 12064 | 1466 | 7334 | 898 |
| | 20 | 10181 | 451 | 8182 | 370 | 11141 | 1084 | 9456 | 923 |

Çizelge 4. 14. 0.5G ve D tip zemin için orta ayağın tasarım sismik kuvvetleri

| L (m) | H (m) | Uzun Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | | Enine Doğrultu Öngermeli Köprü | | Çelik Köprü | |
|----------|----------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) | Mom. (kN.m) | Kesme (kN) | Mom. (kN.m) | Kes. (kN) |
| 15 | 8 | 5972 | 595 | 5026 | 525 | 2911 | 698 | 2006 | 486 |
| | 12 | 6290 | 449 | 5307 | 392 | 2069 | 336 | 1410 | 230 |
| | 16 | 6445 | 357 | 5722 | 326 | 1771 | 216 | 1308 | 160 |
| | 20 | 9674 | 436 | 9135 | 420 | 2733 | 265 | 2195 | 213 |

Çizelge 4. 15. 0.5G ve D tip zemin için ort ayağın tasarım sismik kuvvetleri (devam)

| | | | | | | | | | |
|----|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 20 | 8 | 7421 | 737 | 6355 | 654 | 4179 | 995 | 3359 | 811 |
| | 12 | 7818 | 558 | 6879 | 500 | 3388 | 544 | 2790 | 453 |
| | 16 | 6385 | 361 | 6125 | 351 | 2189 | 268 | 2061 | 253 |
| | 20 | 9962 | 451 | 9514 | 437 | 3393 | 328 | 3161 | 307 |
| 25 | 8 | 10023 | 973 | 8244 | 829 | 7212 | 1697 | 5411 | 1287 |
| | 12 | 10958 | 769 | 8087 | 583 | 6618 | 1052 | 4521 | 731 |
| | 16 | 10839 | 596 | 7079 | 399 | 5490 | 661 | 3348 | 409 |
| | 20 | 11040 | 495 | 10041 | 458 | 5050 | 487 | 4672 | 453 |
| 30 | 8 | 11682 | 1108 | 9000 | 889 | 11219 | 2586 | 7747 | 1838 |
| | 12 | 14047 | 963 | 10082 | 713 | 11438 | 1783 | 7677 | 1234 |
| | 16 | 13694 | 739 | 9705 | 537 | 9502 | 1131 | 5949 | 770 |
| | 20 | 11197 | 503 | 9885 | 454 | 7107 | 685 | 6501 | 630 |
| 35 | 8 | 12913 | 1222 | 9984 | 982 | 14770 | 3377 | 10254 | 2414 |
| | 12 | 15520 | 1061 | 11736 | 826 | 15891 | 2460 | 11254 | 1790 |
| | 16 | 16399 | 883 | 10674 | 589 | 14583 | 1719 | 9658 | 1166 |
| | 20 | 15467 | 687 | 10818 | 492 | 12437 | 1179 | 9385 | 907 |
| 40 | 8 | 14296 | 1326 | 10781 | 1043 | 19646 | 4463 | 12849 | 3030 |
| | 12 | 20008 | 1370 | 14284 | 992 | 23012 | 3489 | 15628 | 2459 |
| | 16 | 20337 | 1083 | 13451 | 738 | 22700 | 2617 | 14925 | 1787 |
| | 20 | 18743 | 826 | 11392 | 516 | 20159 | 1894 | 12540 | 1212 |

4.2. Köprülerin Maliyet Hesabı ve Maliyetlerin Karşılaştırılması

4.2.1. Köprülerin Maliyet Hesabı

Tüm analiz setlerindeki köprüler modellenip analiz edilmiştir. Analiz sonuçları kullanılarak köprülerin tüm bileşenlerinin (elastomer mesnetler, orta ayakları, kenar ayakları, başlık kirişleri ve temeller) boyutları AASHTO LRFD (2017) standardına göre belirlenmiştir. Her bir köprü bileşeninin donatıları belirlenmiştir. Çelik kirişli ve öngermeli kirişli köprülerde kullanılan malzemelerin birim fiyatları aşağıdaki Çizelge 4.13'te verilmektedir.

Çizelge 4. 16. Maliyet Hesabında Kullanılan Malzemelerin Birim Fiyatları

| Malzeme | Birim | Birim Fiyat (\$) |
|---|-----------------|------------------|
| Çelik kirişlerin yerlerine konulması (montaj-işleri) | ton | 237.5 |
| İmalat İşleri (yapma profil, hazır profil, plaka imalatları, stud çakılması, kumlama ve boyama ve genel giderler) | ton | 741 |
| Malzeme Temini (çelik, cıvata, boya, stud, sarf) | ton | 997.5 |
| Orta ayağın temeli ve kenar ayakların kazılması | m ³ | 10.07 |
| Orta ayak ve kenar ayaklar temelleri altında demirsiz beton | m ³ | 40.3 |
| Köprü bileşenlerinde kullanılan beton | m ³ | 87.81 |
| Kenar ayakların arkasındaki dolgu | m ³ | 11.3 |
| Başlık kirişin yapımı için kullanılan iskele | m ³ | 7.12 |
| Öngermeli kirişlerde kullanılan beton | m ³ | 123.9 |
| Öngermeli kirişlerin yerlerine konulması | ton | 8.05 |
| Betonarme çeliği | ton | 824.86 |
| Öngerme çeliği (malzeme temini ve işçiliği) | ton | 2912.29 |
| Genleşme derzi | m | 868.59 |
| Elastomer mesnet | dm ³ | 10.74 |
| Köprülerde polimer bitümlü membran ile su yalıtımı yapılması | m ² | 5.86 |
| Korkuluk | m ³ | 87.81 |

Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) her yıl inşaat işleri için birim fiyatlar açıklamaktadır. Bu tez çalışmasında, toplam inşaat maliyetleri hesaplanırken (KGM) tarafından açıklanan 2019 birim fiyatları kullanılmıştır. Ancak, piyasaya sürülen birim fiyatlara nakliye masrafları dahil değildir. Bu nedenle, ulaşım maliyetleri hesaplanan köprü inşaat maliyetlerine dahil değildir. Buna ek olarak, yol dolguları, asfalt kaplama, yol işaretleri, yaya kaldırım yolları, aydınlatma vb. gibi karayolu inşaatı için diğer maliyetler dikkate alınmamıştır. Son olarak, hesaplanan maliyetler en güncel döviz kurları kullanılarak ABD Doları'na çevrilmiştir.

4.2.2. Köprü Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Köprülerin maliyetleri farklı açıklık uzunlukları, farklı yüksekleri, farklı zemin cinsleri ve farklı deprem bölgeleri için aşağıdaki Çizelge 4.14'ten Çizelge 4.16'e kadar olan çizelgelerde verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre çelik kirişli köprülerin maliyetleri öngermeli betonarme kirişli köprülere göre daha yüksek çıkmaktadır. Çelik kirişli köprülerin altyapı bileşenlerinin boyutları öngermeli kirişli köprülere göre, daha düşük çıkmasına rağmen maliyetleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ise çelik malzemelerin birim fiyatlarının çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüler arasında maliyet farkları 15m, 20m, 25m, 30m, 35m ve 40m açıklık uzunlukları için sırasıyla yaklaşık %23, %28 %30, %35, %37, ve %41 olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar üzerinde zemin tipleri, köprü yükseklikleri ve deprem bölgelerinin bariz bir etkisi gözlemlenmemiştir. Köprülerin maliyetleri üzerinde etken parametrelerin daha iyi anlaşılması için Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sadece referans köprüsünün maliyetleri grafikler üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.1'de referans köprülerinin maliyet değerleri deprem bölgelerine göre verilmektedir. Görüldüğü gibi maliyetler 0.2G ile 0.5G arasında bariz bir farklılık göstermemektedir. Şekil 4.2' ise referans köprülerinin maliyetleri köprülerin yüksekliklerine göre verilmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere köprülerin maliyetleri üzerinde en etkili parametre açıklık uzunlukları olmuştur. Görüldüğü gibi açıklık uzunlukların artmasıyla öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin maliyetlerinin farkları da artmaktadır.

Çizelge 4. 17. 0.2G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | B Tip Zemin | | D Tip Zemin | |
|----------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) |
| 15 | 8 | 214 | 284 | 218 | 287 |
| | 12 | 218 | 288 | 223 | 293 |
| | 16 | 230 | 299 | 232 | 303 |
| | 20 | 243 | 315 | 247 | 317 |
| 20 | 8 | 226 | 320 | 235 | 326 |

Çizelge 4. 18. 0.2G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması (devam)

| | | | | | |
|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | 12 | 231 | 324 | 237 | 333 |
| | 16 | 241 | 335 | 249 | 346 |
| | 20 | 256 | 349 | 261 | 354 |
| 25 | 8 | 253 | 367 | 264 | 374 |
| | 12 | 256 | 371 | 266 | 378 |
| | 16 | 265 | 381 | 273 | 388 |
| | 20 | 280 | 395 | 286 | 402 |
| 30 | 8 | 286 | 450 | 303 | 460 |
| | 12 | 290 | 454 | 306 | 468 |
| | 16 | 299 | 463 | 310 | 473 |
| | 20 | 314 | 478 | 324 | 489 |
| 35 | 8 | 317 | 519 | 333 | 531 |
| | 12 | 320 | 522 | 337 | 536 |
| | 16 | 331 | 536 | 344 | 545 |
| | 20 | 348 | 550 | 355 | 559 |
| 40 | 8 | 353 | 618 | 366 | 631 |
| | 12 | 356 | 617 | 373 | 640 |
| | 16 | 364 | 628 | 379 | 646 |
| | 20 | 381 | 649 | 388 | 657 |

Çizelge 3. 13. 0.35G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması

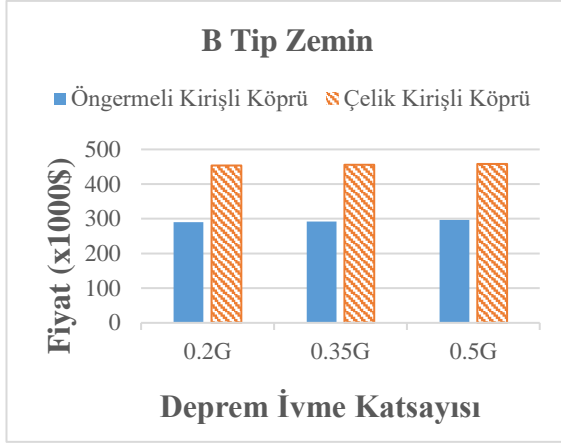
| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | B Tip Zemin | | D Tip Zemin | |
|----------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) |
| 15 | 8 | 215 | 284 | 221 | 290 |
| | 12 | 218 | 286 | 226 | 294 |
| | 16 | 230 | 301 | 233 | 304 |
| | 20 | 243 | 314 | 247 | 317 |
| 20 | 8 | 228 | 321 | 237 | 329 |
| | 12 | 231 | 324 | 241 | 333 |
| | 16 | 241 | 336 | 248 | 343 |
| | 20 | 256 | 349 | 261 | 354 |
| 25 | 8 | 254 | 368 | 272 | 377 |
| | 12 | 258 | 372 | 272 | 382 |
| | 16 | 265 | 382 | 275 | 389 |
| | 20 | 280 | 395 | 286 | 402 |
| 30 | 8 | 288 | 451 | 306 | 468 |
| | 12 | 292 | 456 | 311 | 471 |

Çizelge 4. 15. 0.35G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması (devam)

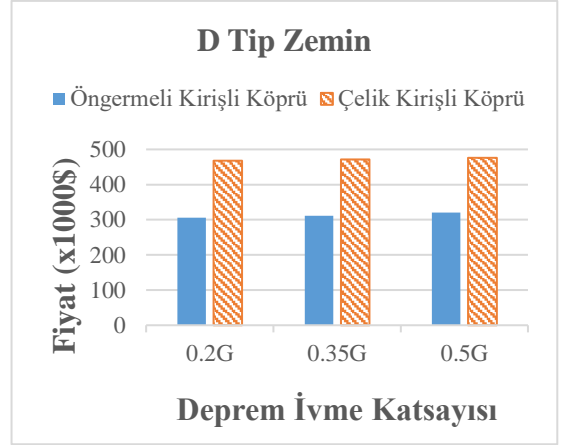
| | | | | | |
|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | 16 | 299 | 464 | 315 | 475 |
| | 20 | 314 | 478 | 324 | 489 |
| 35 | 8 | 319 | 521 | 345 | 539 |
| | 12 | 323 | 524 | 343 | 542 |
| | 16 | 332 | 536 | 351 | 548 |
| | 20 | 348 | 550 | 358 | 559 |
| | 8 | 355 | 620 | 380 | 639 |
| 40 | 12 | 360 | 624 | 382 | 647 |
| | 16 | 366 | 633 | 388 | 650 |
| | 20 | 380 | 650 | 394 | 658 |

Çizelge 3. 14. 0.5G için köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması

| Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | B Tip Zemin | | D Tip Zemin | |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) | Öngermeli Köprü (USD) (x1000) | Çelik Köprü (USD) (x1000) |
| 15 | 8 | 216 | 286 | 224 | 294 |
| | 12 | 219 | 288 | 228 | 297 |
| | 16 | 230 | 300 | 233 | 303 |
| | 20 | 243 | 314 | 247 | 317 |
| 20 | 8 | 230 | 322 | 242 | 337 |
| | 12 | 233 | 324 | 246 | 335 |
| | 16 | 242 | 335 | 249 | 343 |
| | 20 | 256 | 349 | 261 | 355 |
| 25 | 8 | 257 | 370 | 280 | 382 |
| | 12 | 261 | 373 | 277 | 387 |
| | 16 | 266 | 381 | 284 | 390 |
| | 20 | 280 | 395 | 286 | 402 |
| 30 | 8 | 292 | 455 | 315 | 473 |
| | 12 | 297 | 458 | 320 | 476 |
| | 16 | 303 | 464 | 319 | 478 |
| | 20 | 314 | 478 | 325 | 489 |
| 35 | 8 | 324 | 524 | 351 | 544 |
| | 12 | 328 | 527 | 354 | 554 |
| | 16 | 337 | 536 | 357 | 553 |
| | 20 | 348 | 550 | 362 | 559 |
| 40 | 8 | 363 | 625 | 390 | 646 |
| | 12 | 366 | 628 | 394 | 652 |
| | 16 | 372 | 635 | 393 | 654 |
| | 20 | 382 | 650 | 400 | 659 |

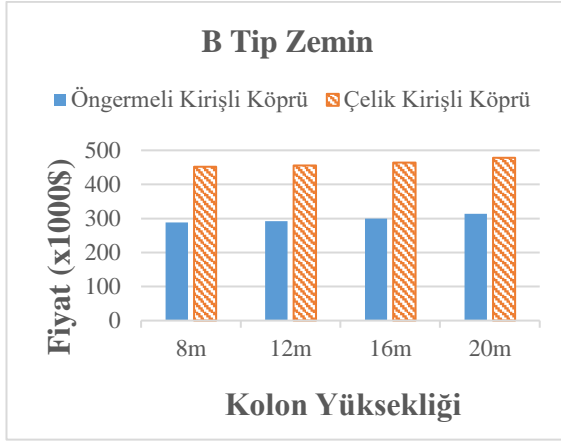


(a)

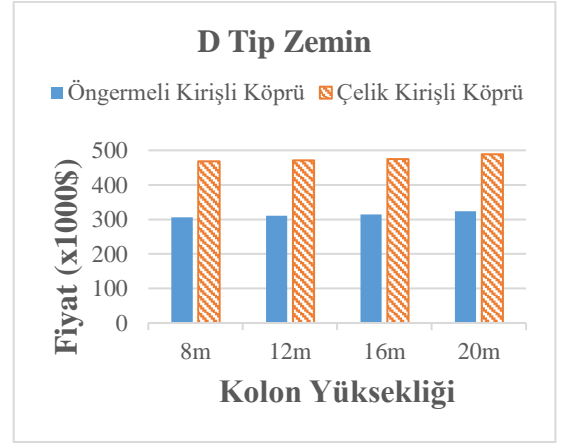


(b)

Şekil 4. 1. Farklı deprem ivmelerinde köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması

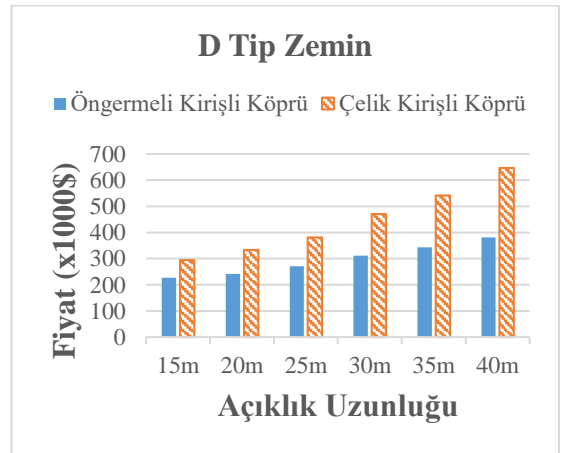
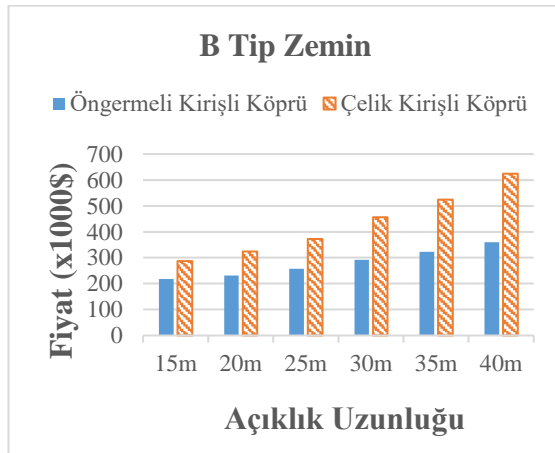


(a)



(b)

Şekil 4. 2. Farklı deprem ivmelerinde köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 3. Farklı açıklık uzunluklarında köprülerin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması

4.3. Sismik Performans Analizleri

4.3.1. Sismik Performans Analizlerinde Dikkate Alınan Köprü Parametreleri

Tez çalışmasının bu bölümünde öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin sismik performans analizlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Bu amaçla öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüler değişen yapısal özelliklere sahip ve farklı sismik bölgelerde her bir B ve D tipi zeminler için birçok analiz seti yapılmıştır. Bu karşılaştırmada Çizelge 4.17’de verildiği gibi 36 analiz seti farklı parametreler göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Köprülerin, boyuna ve enine doğrultuda ayrı ayrı modelleri oluşturulup toplam $36 \times 2 = 72$ analiz modeli elde edilmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. 17. Sismik performans analiz setleri

| Analiz Seti | Köprü Tipi | Kiriş Aralığı (m) | Açıklık Sayısı | Deprem İvme Katsayısı (g) | Açıklık Uzunluğu (m) | Kolon Yüksekliği (m) | Zemin Tipi |
|-------------|---------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| 1 | Öngermeli köprü/ Çelik Köprü | 2.5 | 2 | 0.2,0.35, 0.5 | 30 | 12 | B, D |
| 2 | Öngermeli köprü/ Çelik Köprü | 2.5 | 2 | 0.35 | 20, 30, 40 | 12 | B, D |
| 3 | Öngermeli köprü/ Çelik Köprü | 2.5 | 2 | 0.35 | 30 | 12, 16, 20 | B, D |

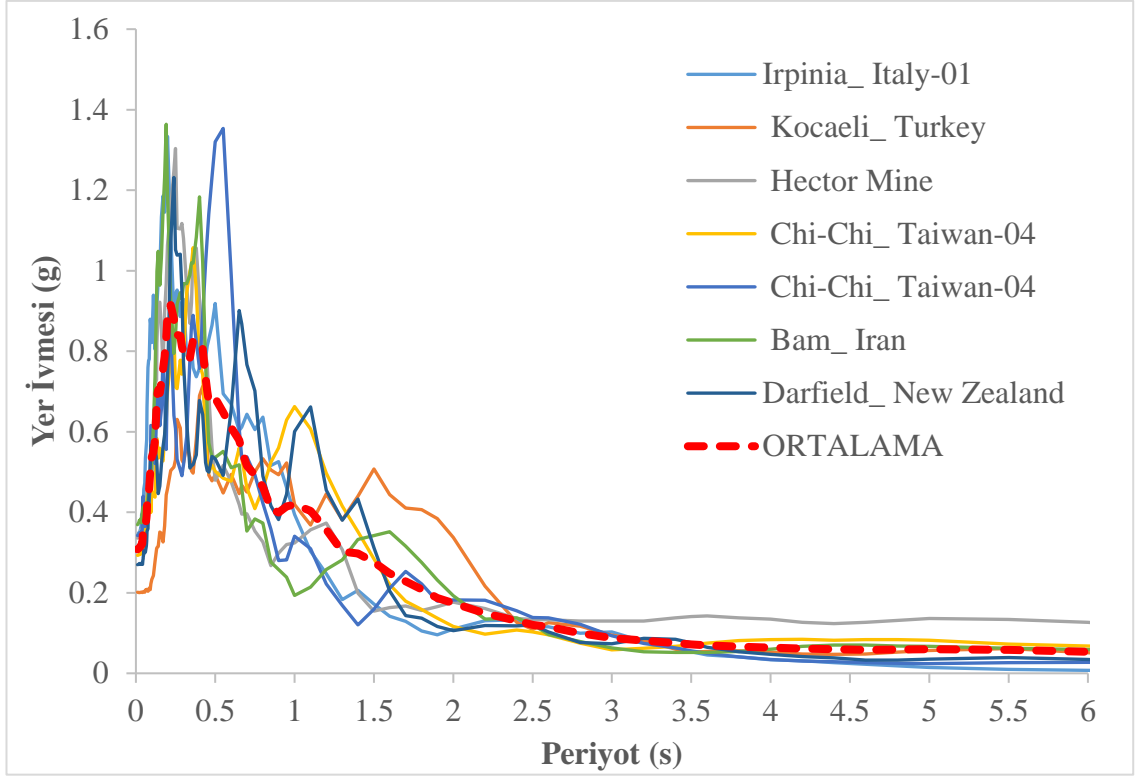
4.3.2. Yer Hareketlerin Seçilmesi

Tasarım spektrumları AASHTO LRFD (2017) standardına göre seçilmektedir. Buna göre, tasarım ivme spektrumları B ve D zemin tiplerine göre seçilir. AASHTO LRFD (2017)’e göre seçilen tasarım ivme spektrumlarına uyumlu olacak şekilde PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), Türkçe karşılığı Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi veri alanında yer alan kayıtlardan B ve D tip zeminler için ayrı ayrı 7 deprem kaydı seçilmiştir. Zaman Tanım Alanında Hesap Analizlerinde kullanılmak üzere

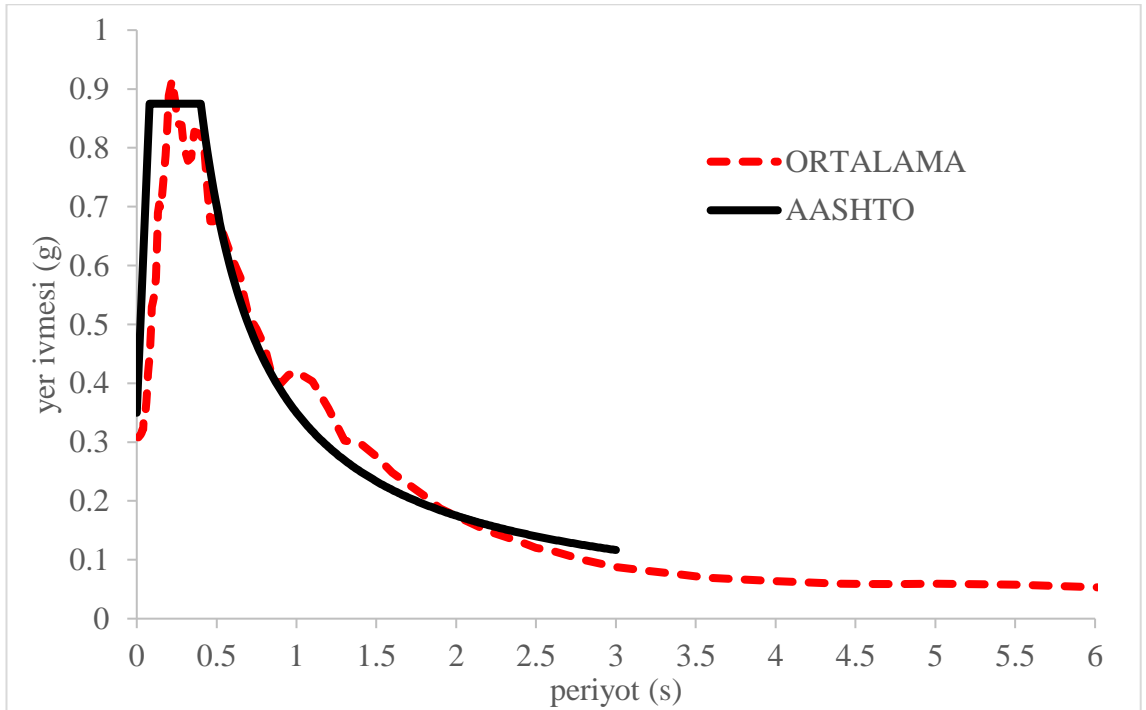
(PEER), kuvvetli yer hareketi veri bankasında bulunan deprem kayıtlarından, ölçülen istasyon verileri elde edilmiştir. Bunun ile birlikte deprem kayıtları seçilirken köprülerin, üzerinde bulunduğu B ve D tip zeminin özelliklerine en yakın zemin sınıflarında meydana gelen deprem kayıtları tercih edilmiştir. Seçilen deprem kayıtlarının özellikleri her bir zemin için aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 3. 15. Deprem kayıtları, B tip zemin için

| NO | Deprem | Yıl | İstasyon | M_w | Mesafe (kN) | A_p (g) |
|----|-----------------------|------|-------------------------|-------|-------------|-----------|
| 1 | Irpinia_ Italy-01 | 1980 | Rionero In Vulture | 6.9 | 27.49 | 0.34 |
| 2 | Kocaeli_ Turkey | 1999 | Bursa Sivil | 7.51 | 65.53 | 0.20 |
| 3 | Hector Mine | 1999 | Heart Bar State Park | 7.13 | 61.21 | 0.33 |
| 4 | Chi-Chi_ Taiwan-04 | 1999 | CHY035 | 6.2 | 25.01 | 0.29 |
| 5 | Chi-Chi_ Taiwan-04 | 1999 | CHY042 | 6.2 | 34.1 | 0.34 |
| 6 | Bam, Iran | 2003 | Mohammad Abad-e-Madkoon | 6.6 | 46.2 | 0.37 |
| 7 | Darfield, New Zealand | 2010 | CSHS | 7 | 43.6 | 0.27 |



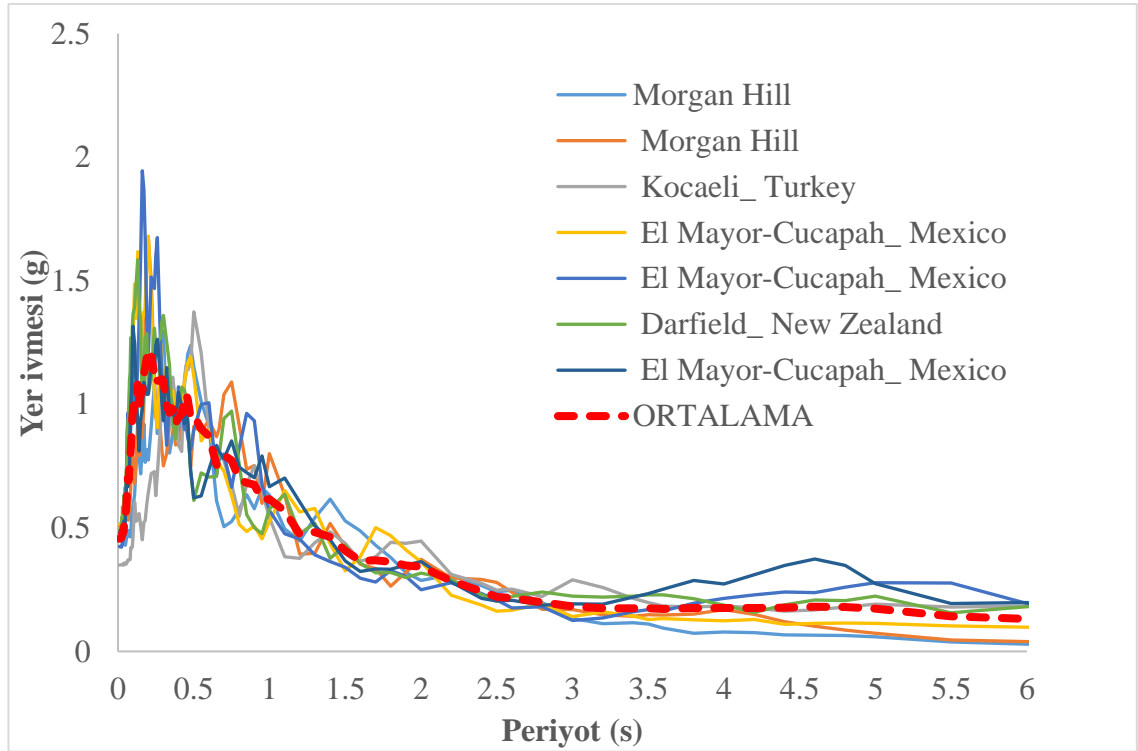
Şekil 4. 4. B tip zemin için kaydedilmiş depremin ölçeklenmiş ivme-periyot grafiği



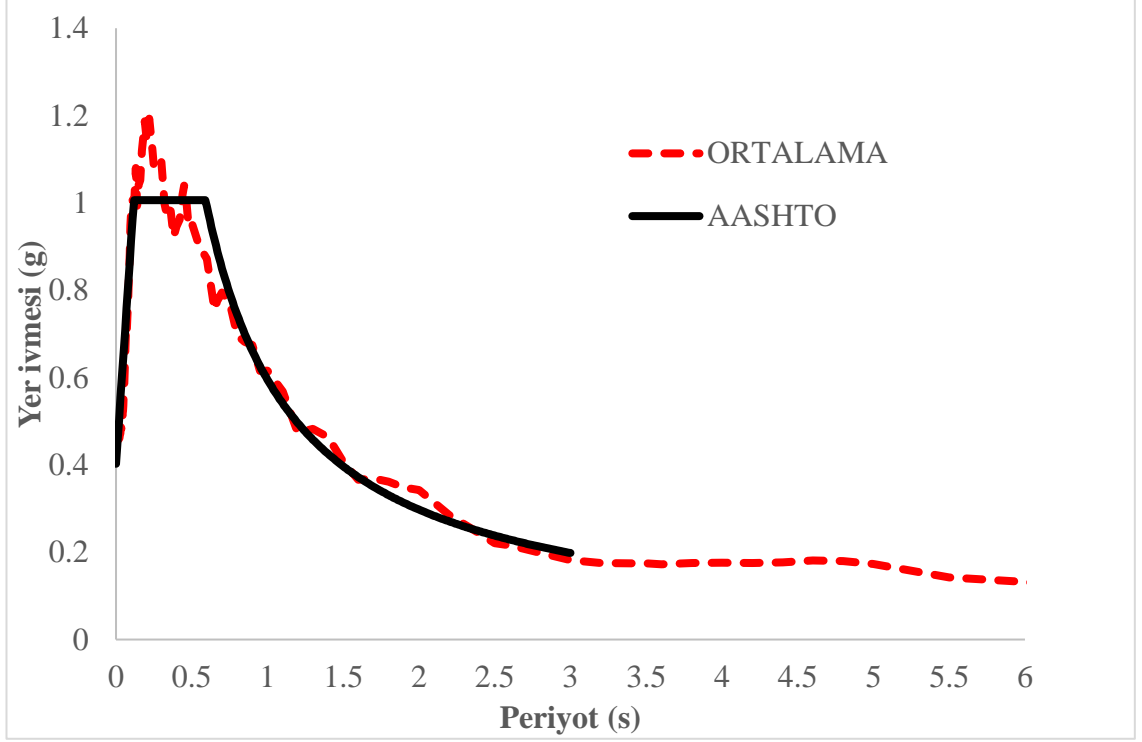
Şekil 4. 5. B tip zemin için seçilen deprem ivme spektrumlarının ortalaması ve tasarım spektrumunun ivme-periyot grafiği

Çizelge 3. 16. Deprem kayıtları, D tip zemin için

| NO | Deprem | Yıl | İstasyon | Mw | Mesafe (km) | Ap (g) |
|----|---------------------------|----------|-------------------------------|------|-------------|--------|
| 1 | Morgan Hill | 1984 | Fremont – Mission San Jose | 6.19 | 31.34 | 0.42 |
| 2 | Morgan Hill | 1984 | San Juan Bautista_ 24 Polk St | 6.19 | 27.15 | 0.51 |
| 3 | Kocaeli_ Turkey | 1999 | Hava Alani | 7.51 | 58.33 | 0.35 |
| 4 | El Mayor- Cucapah_ Mexico | 2010 | Bonds Corner | 7.2 | 30.75 | 0.51 |
| 5 | El Mayor- Cucapah_ Mexico | 2010 | Meloland_ E Holton Rd | 7.2 | 30.18 | 0.42 |
| 6 | Darfield_ Zealand | New 2010 | DORC | 7 | 29.96 | 0.49 |
| 7 | El Mayor- Cucapah_ Mexico | 2010 | Brunts Corner | 7.2 | 60.84 | 0.48 |



Şekil 4. 6. D tip zemin için kaydedilmiş depremin ölçeklenmiş ivme-periyot grafiği



Şekil 4. 7. D tip zemin için seçilen deprem ivme spektrumlarının ortalaması ve tasarım spektrumun ivme-periyot grafiği

4.3.3. Uzun Doğrultuda Kenar Ayağın Modeli

Son araştırmalar, köprünün sismik tepkisini belirlemek için kenar ayaklarda zemin-yapı etkileşiminin rolünün çok önemli olduğunu göstermektedir. Kenar ayaklar sismik performans analizlerde iki boyutlu olarak modellenip idealize edilmiştir. Kenar ayaklar ile dolgu arasındaki yapı-zemin etkileşimi sadece basınçta çalışan yatay doğrusal yaylar kullanılarak yansıtılmıştır. Bu yatay doğrusal yaylar kenar ayağın derinliği boyunca belirli aralıklarda düğüm noktalarına bağlanmıştır. Buna göre, Denklem 4.2’de önerilen ilişki kullanılarak doğrusal yayların sabitleri hesaplanmıştır (Dicleli ve Mansour 2003). Hesaplanan doğrusal yayın sabiti (K_{sh}) düğüm noktaları arasındaki alanın çarpımıyla bu yayın rijitliği elde edilmiştir.

$$k_{sh} = \left(\frac{14500}{H} \right) z \quad (4.2)$$

Burada; H kenar ayağın yüksekliği, z kenar ayağın tepesinden olan derinliği göstermektedir.

Kenar ayağın temeli ve zemin etkileşimi, dönme ve öteleme yayları kullanılarak modellenmiştir (Dobry ve Gazetas 1986).

Doğrusal yaylar ile kenar ayaklar arasında boşluk elamanlar yani genişleme derzi temsil eden (gap) elemanlar tanımlanmıştır. Buna göre, doğrusal yatay yaylar basınçta bu gap elemanlar vasıtasıyla çalışmakta olup bu yaylarda çekme oluşumu engellenmektedir. Daha sonra kenar ayağın ve üstyapının bağlandığı kenar ayağın en üst noktasına sabit bir çekme ve basınç yükü uygulanıp bu noktadaki deplasmanlar okunmaktadır. Yay ilişkisi kullanılarak uygulanan yükler elde edilen deplasmanlara bölünür ve kenar ayakların tepkileri belirlenir.

Kenar ayağın modeli idealize edildikten ve basitleştirildikten sonra daha önce seçilen yedişer deprem yer hareketi kullanılarak Zaman Tanım Alanında Hesap Analizleri gerçekleştirilir. Kenar ayağı üstyapıya bağlayan noktada oluşan maksimum deplasmanlar her bir deprem yer hareketi altında belirlenmektedir. Daha sonra kenar ayağa eşdeğer bir kütle bulunması için aynı deprem yer hareketleri bir kütleyle bağlı tek serbestlik dereceli sisteme (TSDS) uygulanır. Deneme yanılma yöntemi kullanılarak bu (TSDS)'deki deplasmanların ortalaması kenar ayak deplasmanlarının ortalaması ile benzer sonuçlar verecek şekilde eşdeğer kütle belirlenir. Bu benzer yer değiştirmelerin elde edilişi, (TSDS)'de kullanılan kütle kenar ayağın gerçek kütlelerinin yaklaşık %22'ine tekabül edilmesiyle bulunmaktadır.

Köprünün her iki tarafındaki kenar ayaklarına dolgunun çekme ve basınç tepkileri çift doğrulu (bilinear) yaylar kullanılarak köprünün genel sismik modelinde yansıtılmıştır. Ek olarak, deneme yanılma yöntemi kullanılarak bulunan kenar ayakların eşdeğer kütleleri de bu yaylara tanımlanmıştır.

Üstyapının kalkan duvarına çarpması ve daha sonra kalkan duvarının dolgu ile davranışı, CALTRANS Sismik Tasarım Kriterleri Sürüm 2.0'da (CALTRANS, 2019) tanımlanan prosedür kullanılarak idealleştirilmiştir. Üstyapının kenar ayağının kalkan duvarına çarpması durumunda dayanma sertliğini dahil etmek için CALTRANS (2019) 'da çift doğrulu (bilinear) bir model tanımlanmıştır.

$$F_{abut} = w_{abut} \left(\frac{5.5h_{abut}^{2.5}}{1 + 2.37h_{abut}} \right) \quad (4.3)$$

$$K_{abut} = w_{abut} (5.5h_{abut} + 20) \quad (4.4)$$

Burada; w_{abut} ve h_{abut} , sırasıyla kenar ayağın genişliği ve kalkan duvarın yüksekliğidir. (4.3) ve (4.4) denklemlerde birimler İngiliz Birim Sistemi (Imperial Units) olarak verilmektedir.

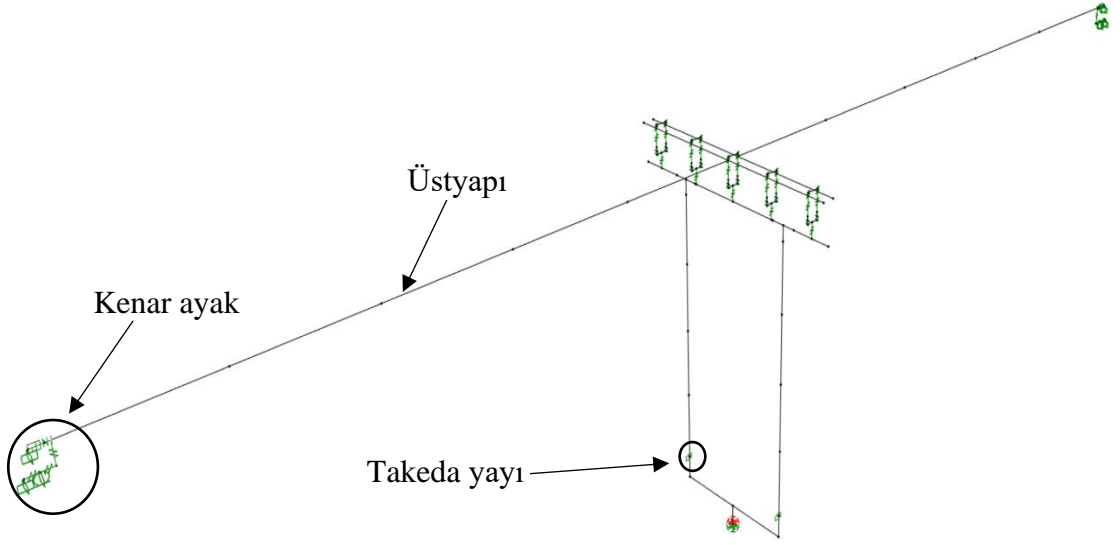
Köprünün üstyapı ve kenar ayakları arasına çarpma etkisi genişleme derzi (gap eleman) ve viskoz sönümleyici elemanları kullanılarak modelde dikkate alınmıştır. Viskoz sönümleyici elemanı, üstyapı ve kenar ayağın çarpmasının etkisindeki enerji dağılımını simüle etmek için üstyapı ve kenar ayağın arasına bağlanmaktadır. Viskoz sönümleyici sönüm katsayısı (c_k) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır (DesRoches ve Muthukumar 2004).

$$c_k = 2\xi \sqrt{k_k \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (4.5)$$

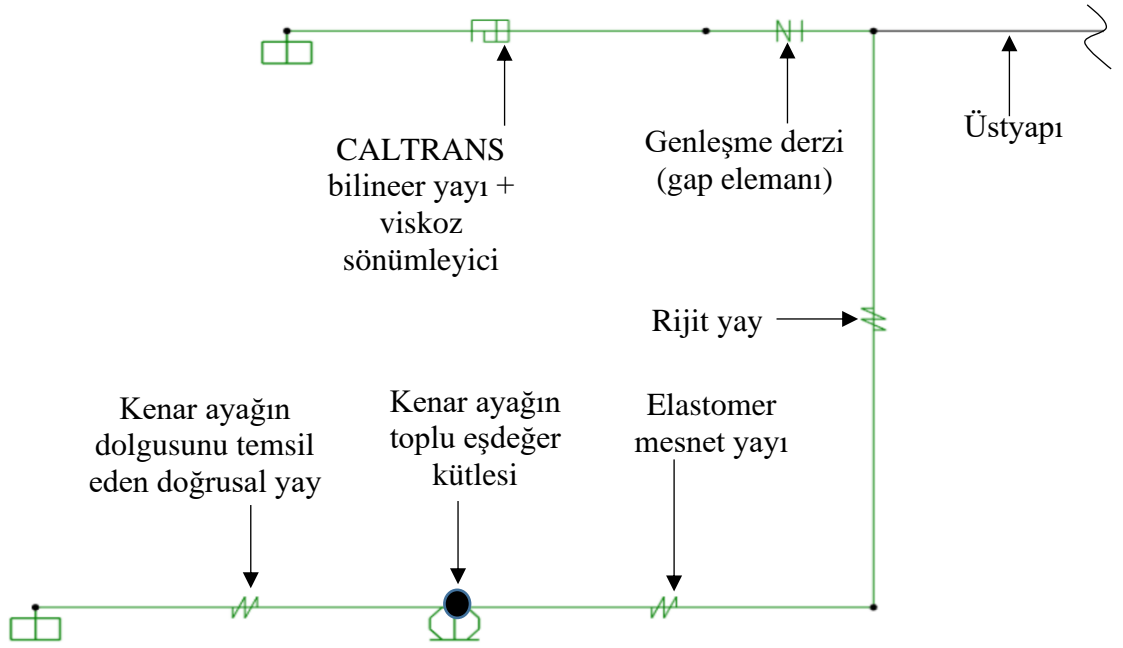
$$\xi = -\frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (4.6)$$

Burada; m_1 ve m_2 sırasıyla köprü kenar ayağının ve üstyapının kütleleridir, k_k çarpma yayın sertliğidir ve değeri 4.38×10^6 kN/m dir, e ise geri getirme katsayısıdır ve değeri 0.8 olarak alınmıştır.

Buna göre, CALTRANS'ta (2019) önerilen yay ve viskoz sönümleyici elemanı sadece üstyapı kenar ayağa çarptığında çalışmaktadır. Çünkü üstyapıyı kenar ayağından ayıran genişleme derzi mevcuttur. Genleşme derzinin boyutu, köprülerin deprem analizinin sonucunda elde edilen yer değiştirme derecesine göre belirlenmektedir.



Şekil 4. 8. Boyuna doğrultuda köprü modelin genel görüntüsü



Şekil 4. 9. Boyuna doğrultuda köprü modelinde kenar ayağın detay görünümü

4.3.4. Enine Doğrultuda Kenar Ayağın Modeli

Enine doğrultuda köprülerin kenar ayakları Şekil 4.10'da gösterildiği gibi basit bir tasarım felsefesi ile modellenmiştir. Buna göre, kenar ayağın duvarı, kanatları ve temeli eşdeğer çizgi kütlelerine sahip çerçeve elamanları kullanılarak modellenmiştir. Kenar ayak temeli ve zemin arasındaki etkileşim, (3.2)'den (3.8)'e kadar olan denklemler kullanılarak dönme ve öteleme yayları hesaplanıp modele yansıtılmıştır. Kenar ayak ve dolgu arasındaki etkileşim Denklem (4.2)'te verilen yatay doğrusal yaylar kullanılarak tanımlanmaktadır.

Dolgudan kaynaklanan yanal toprak basınçları kenar ayak üzerinde normal bir kuvvet olarak uygulanmaktadır. Kenar ayağa uygulanan normal kuvvet, kenar ayağının yüzeyi ile dolgu arasındaki sürtünme katsayısı ile çarpılarak bir sürtünme direnci elde edilir. Köprü enine yönde hareket ettiğinde bu sürtünme direnci aktif hala gelir ve dolgu ile kenar ayak arasında bir kayma meydana gelmektedir. Buna göre, enine yöndeki sismik analizlerinde kaymadan dolayı dolgu ile kenar ayak arasındaki oluşan sürtünme dikkate alınması için Dicleli ve Mansour (2003) tarafından önerilen basit bir elastik yaklaşım kullanılarak dolgunun kayma sertliği hesaplanıp ve kuvvet-deformasyon davranışı modelde tanımlanmıştır.

$$k_{sh} = \frac{GBH}{L_w} \quad (4.7)$$

Burada; H kenar ayağın yüksekliği, B kenar ayağın iki kanat duvarı arasındaki genişlik, L_w kanat duvarının uzunluğu ve G dolgunun kayma modülüdür.

Toprak basıncı F_0 , aşağıdaki bağlantı ile hesaplanır:

$$F_0 = \frac{1}{2} \gamma H^2 BK_0 \quad (4.8)$$

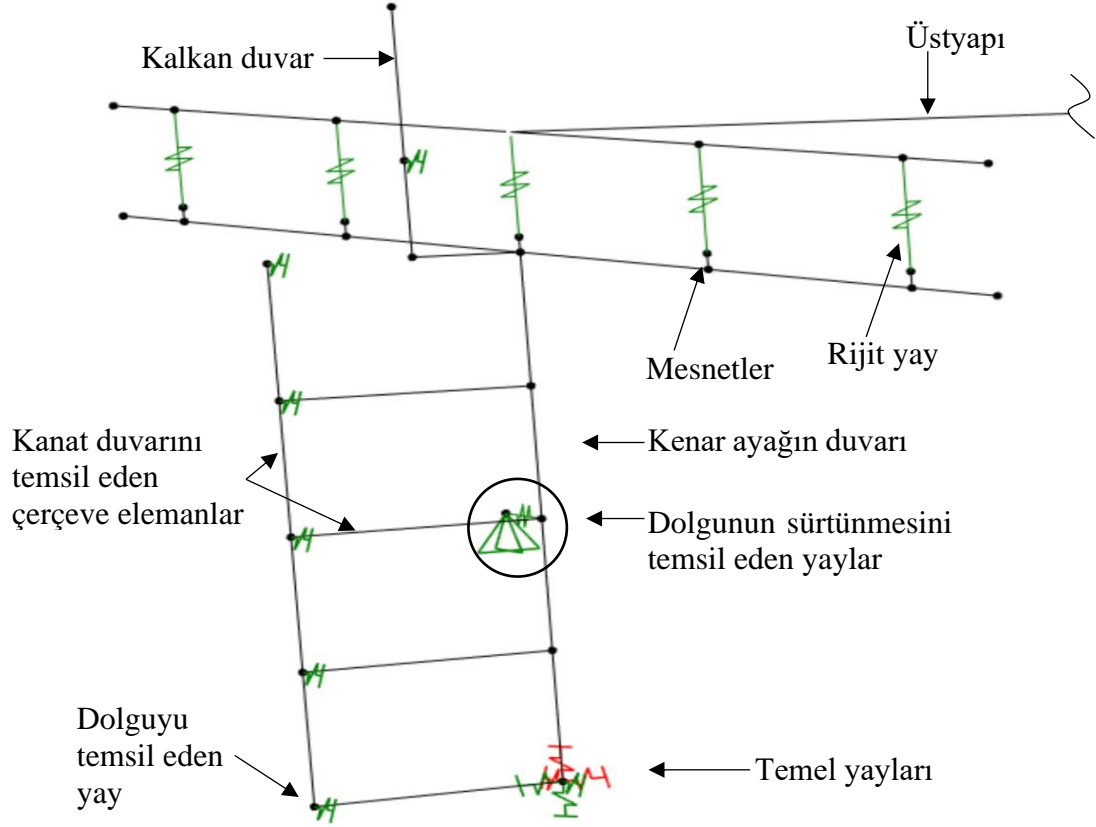
Sürtünme katsayısı μ , aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\mu = \tan \phi \quad (4.9)$$

Dolgunun (V_u) kayma direncinin nihai kapasitesi ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V_u = \mu F_0 \quad (4.10)$$

Yukarıdaki formüllerde γ zeminin birim hacim ağırlığıdır, K_0 sükunetteki dolgu basınç katsayısıdır, ϕ dolgu ile kenar ayak arasındaki sürtünme açısıdır.



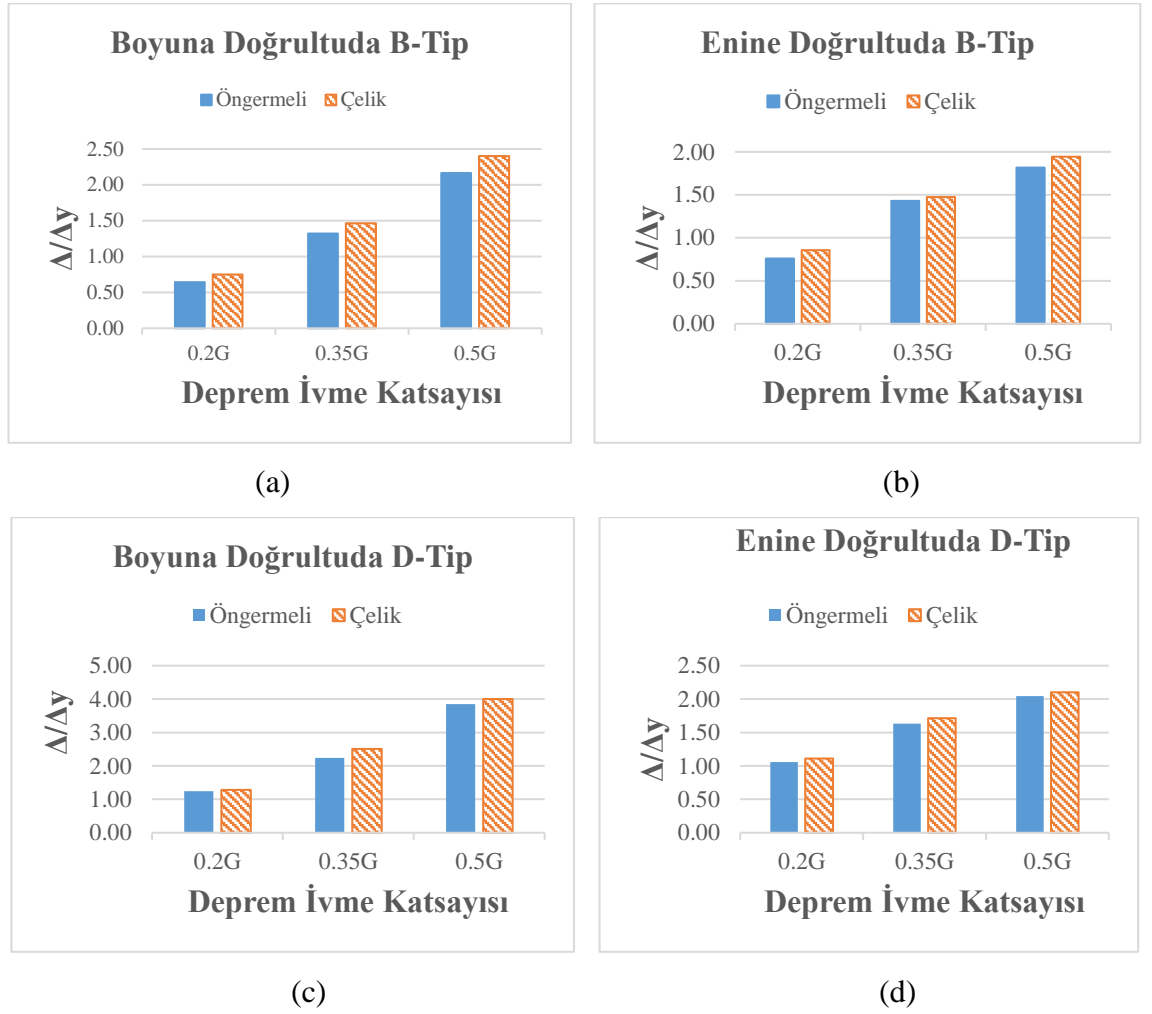
Şekil 4. 10. Enine doğrultuda köprü modelinde kenar ayağın detay görünümü

4.3.5. Orta Ayağın Modeli

Başlık kiriş-kolon ve kolon-temel birleşim kısımları rijit elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada ele alınan köprülerin performanslarının değerlendirilmesi için betonarme kolonlarının kesit özelliklerine göre doğrusal olmayan davranışları elde edilmiştir. Buna göre betonarme kolonların davranışları XTRACT (2007) programı kullanılarak belirlenmiştir. XTRACT (2007) programıyla bu çalışmada ele alınan köprülerin kolonlarının moment eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Bunun ile birlikte bu çalışmada plastik mafsallar sadece kolonlarda tanımlanmıştır. Bu nedenle, ele alınan köprülerin kolonlarının histeretik davranışı Takeda ve ark. (1970) tarafından önerilen histeretik modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Takeda ve ark. (1970) tarafından önerilen

histerezis modeli, betonarme malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarını tanımlamak için en yaygın kabul gören modeldir (İlki ve Kumbasar 2000). Orta ayağın temeli ile zemin arasındaki etkileşim, öteleme ve dönme yayları kullanılarak modellenmiştir (Dobry ve Gazetas 1986).

4.3.6. Köprü Tipleri Farklı Deprem Bölgelerinde, Analiz Sonuçları

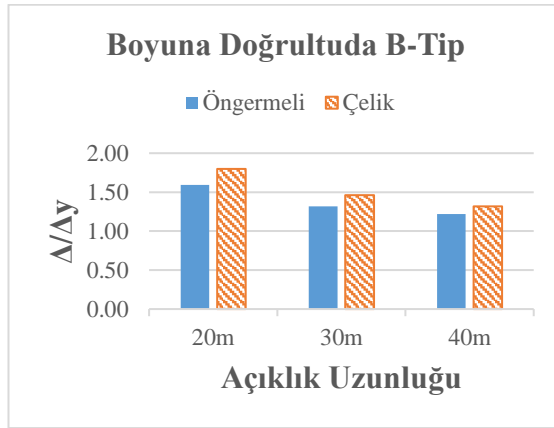


Şekil 4. 11. Farklı deprem bölgelerinde (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)

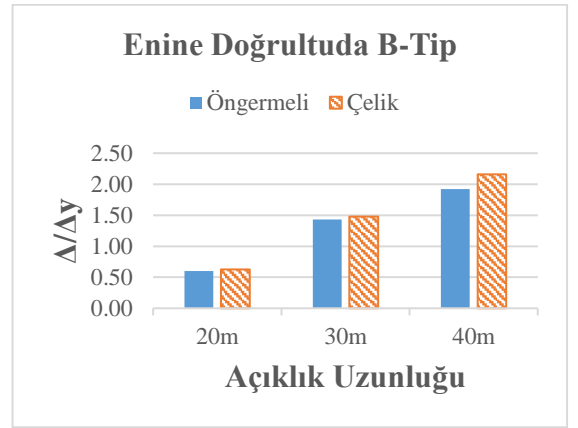
Şekil 4.11’de öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerinin farklı zeminlerde ve farklı deprem bölgelerde süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$) verilmektedir. Çelik kirişli köprülerinin üstyapı ağırlıkları öngermeli kirişli köprülere nazaran daha hafif olmasına rağmen süneklik

oranları daha büyük (daha düşük sismik performans) çıkmaktadır. Her iki B ve D tip zeminlerde hem boyuna ve hem enine doğrultularda yaklaşık aynı eğilimi takip etmektedir. Sebebi ise kolonlarının tasarımından kaynaklanmaktadır. Her iki tip köprü minimum tasarım şartlarına göre tasarlandıkları için böyle bir davranış sergilemiştir. Dolayısıyla, kolonların köprülerinin sismik performansları üzerindeki etkisi daha sonraki bölümlerde ayrıntılı açıklanacaktır. Yukarıdaki sonuçlara bakıldığında öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin süneklik oranları arasındaki farklar, deprem bölgeleri ve zemin tiplerine göre önemli bir değişiklik göstermemektedir. Her iki tip köprü B ve D tip zeminler için hem boyuna hem enine doğrultuda deprem ivme katsayılarına göre süneklik oranları yaklaşık aynı artışı göstermektedir.

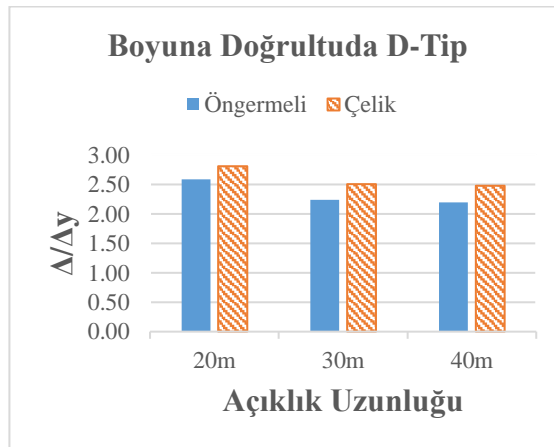
4.3.7. Köprü Tipleri Farklı Açıklık Uzunluklarda, Analiz Sonuçları



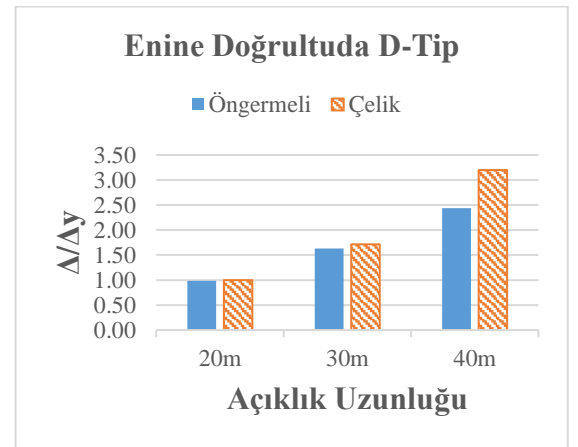
(a)



(b)



(a)

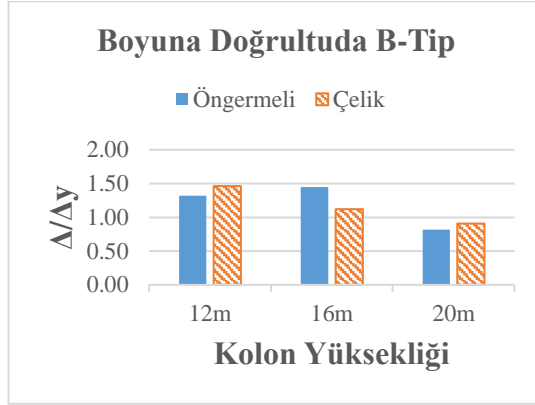


(b)

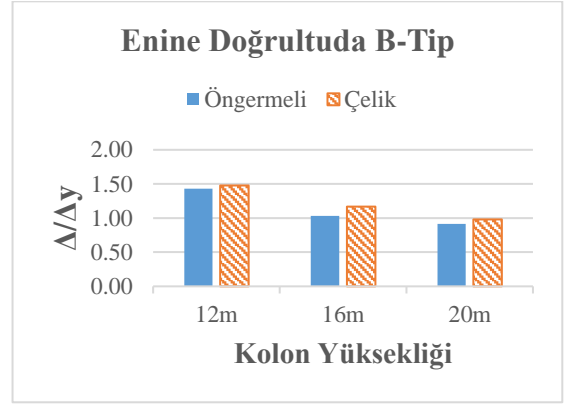
Şekil 4. 12. Farklı açıklık uzunluklarında (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)

Şekil 4.12’de öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerinin farklı zeminlerde ve farklı açıklık uzunluklarında süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$) verilmektedir. Her köprünün süneklik oranı B ve D tip zeminler için uzun doğrultuda açıklık uzunluklarının artmasıyla azalmaktadır. Yani performanslarında iyileşme gözükmemektedir. Bu davranış köprülerin enine doğrultusunda ise açıklık uzunluklarının artmasıyla ters bir ilişki sergilemektedir. Uzun doğrultuda köprülerin açıklıklarının artmasıyla beraber üstyapı kütleleri de artmaktadır. Üstyapı kütleleri arttığında daha büyük sismik kuvvetlere neden olmakta ve böylece altyapı bileşenlerin boyutlarının ve rijitliklerinin artmasına yol açmaktadır. Buna göre kolonların moment eğrilik kapasiteleri de artmaktadır. Dolayısıyla rijitliklerindeki artış kütlelerin artışından daha şiddetli olmakta ve böylece deplasmanlar azalarak açıklık uzunluklarına bağlı olarak köprülerin süneklik oranı azalmaktadır. Her iki tip köprü arasında süneklik oranındaki farklar uzun doğrultuda açıklıkların artmasına **bağlı bir değişiklik kaydetmemektedir.**

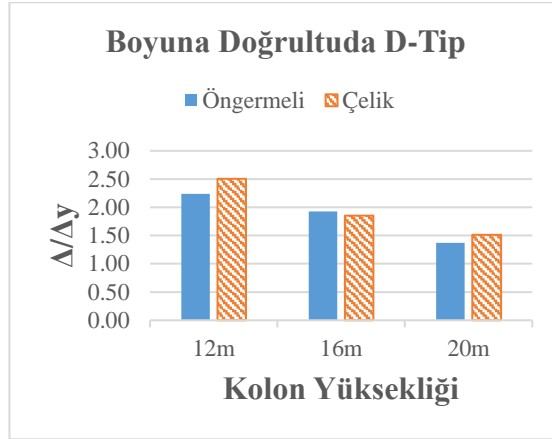
4.3.8. Köprü Tipleri Farklı Yüksekliklerde, Analiz Sonuçları



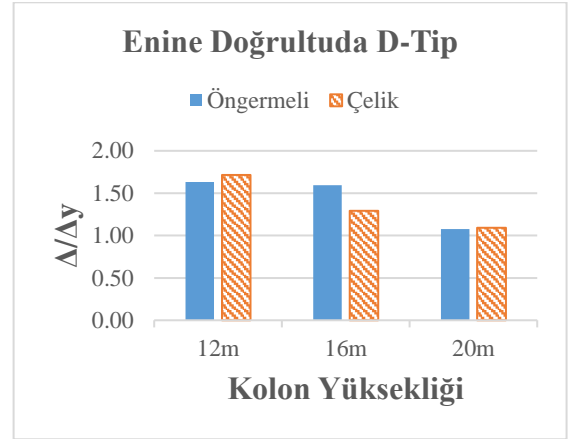
(a)



(b)



(c)

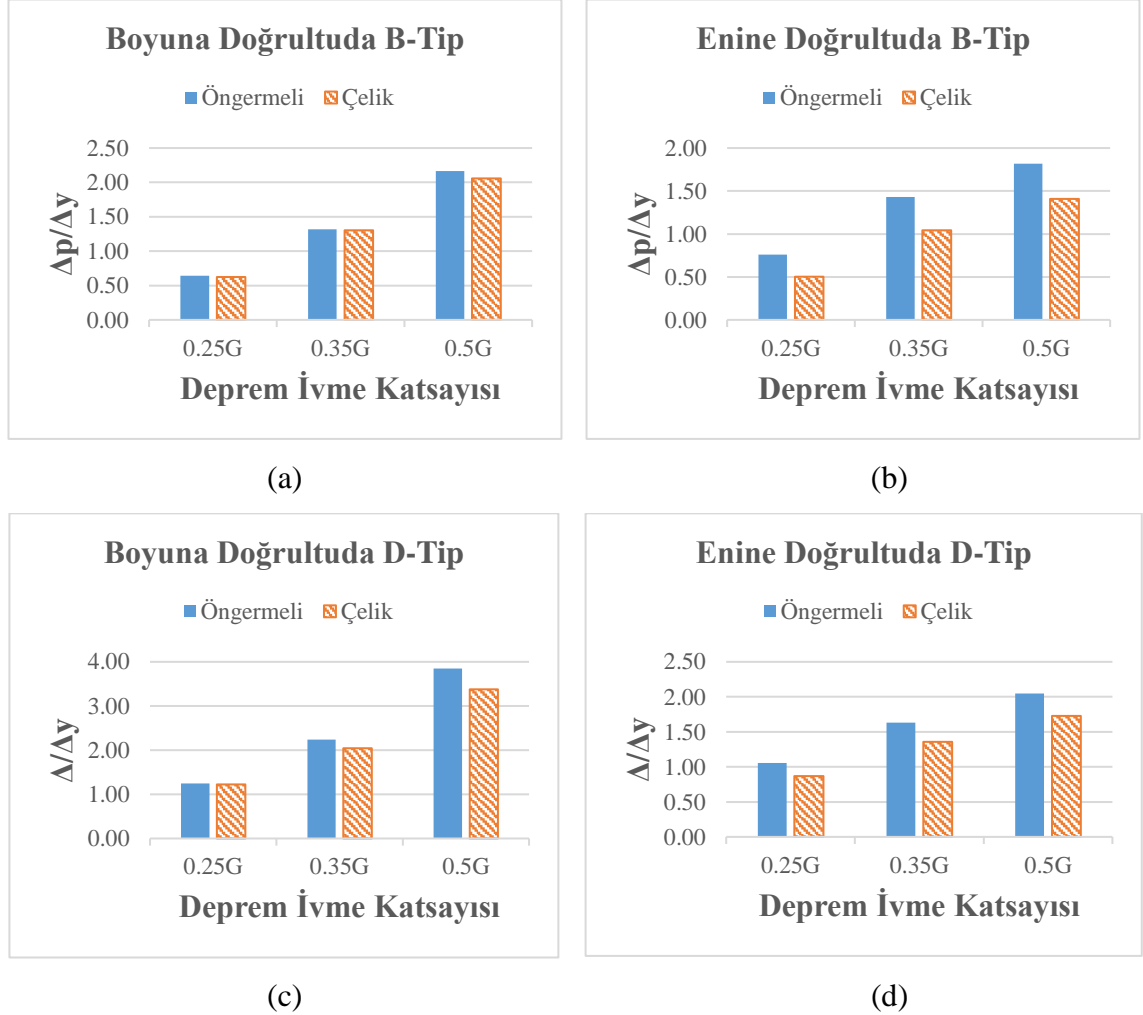


(d)

Şekil 4. 13 Farklı kolon yüksekliklerinde (a) boyuna doğrultuda B tip zemin (b) enine doğrultuda B tip zemin (c) boyuna doğrultuda D tip zemin (d) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)

Şekil 4.13'te öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerinin farklı zeminlerde ve farklı kolon yüksekliklerinde süneklik oranları ($\Delta / \Delta y$) verilmektedir. Şekil 4.13a'da görüldüğü gibi tüm analizlerde çelik kirişli köprülerinin süneklik oranları öngermeli kirişli köprüye göre daha az çıkmıştır. Fakat 16m yüksekliğe sahip köprülerde farklı bir sonuç çıkmaktadır. Bunun nedeni ise yukarıdaki bölümlerde açıklandığı gibi narinlik sınırının aşılmasıdır.

4.3.9. Köprü Tipleri Aynı Altyapı Üzerinde Farklı Deprem Bölgelerinde, Analiz Sonuçları

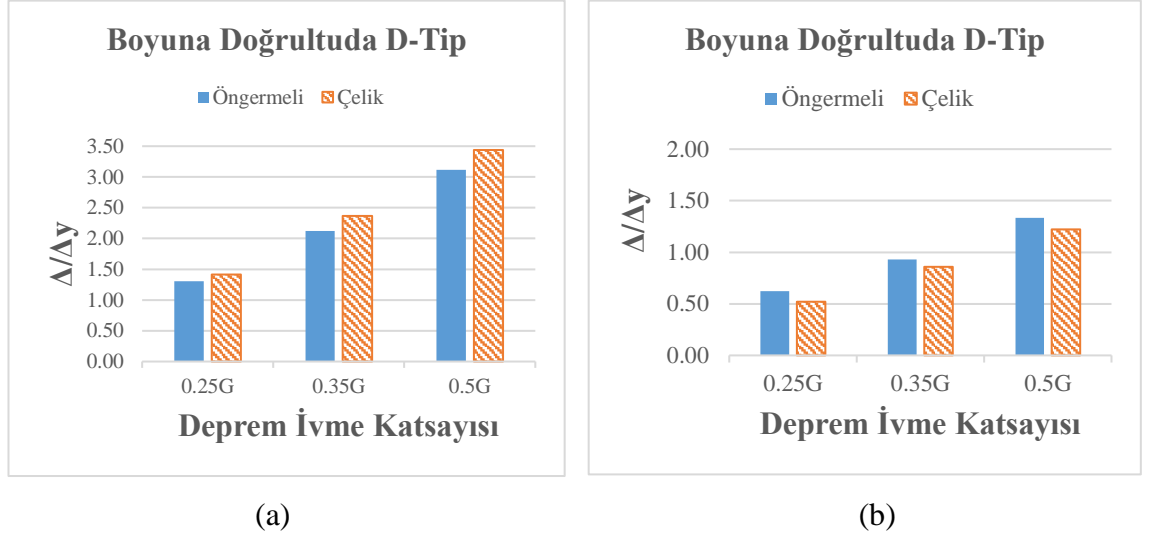


Şekil 4. 14 Her iki tip köprü aynı altyapı ile farklı deprem bölgelerinde (a) boyuna doğrultuda D tip zemin (b) enine doğrultuda D tip zemin için köprülerin süneklik oranı ($\Delta / \Delta y$)

Şekilde görüldüğü gibi çelik kirişli köprülerin süneklik oranı öngermeli kirişli köprülerin süneklik oranına göre daha düşüktür. Dolayısıyla eğer öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüler aynı altyapı üzerinde inşa edilirse, çelik kirişli köprülerin performansı daha iyi çıkacaktır. Altyapı aynı seçildiğinden dolayı köprülerin yaptığı deplasmanlar üstyapı kütlelerine göre değişiklik gösterecektir. Öngermeli kirişli köprülerin üstyapı kütleleri çelik kirişli köprülerin üstyapı kütlelerine göre daha büyüktür ve bundan dolayı genellikle daha büyük deprem yüklerine maruz kalmaktadır. Sonuç olarak öngermeli kirişli

köprülerin performansı çelik kirişli köprülerin performansına göre daha düşük çıkmaktadır. Her iki tip köprünün süneklik oranları B ve D tip zemin için deprem ivme katsayılarının artmasıyla her iki yönde artmaktadır.

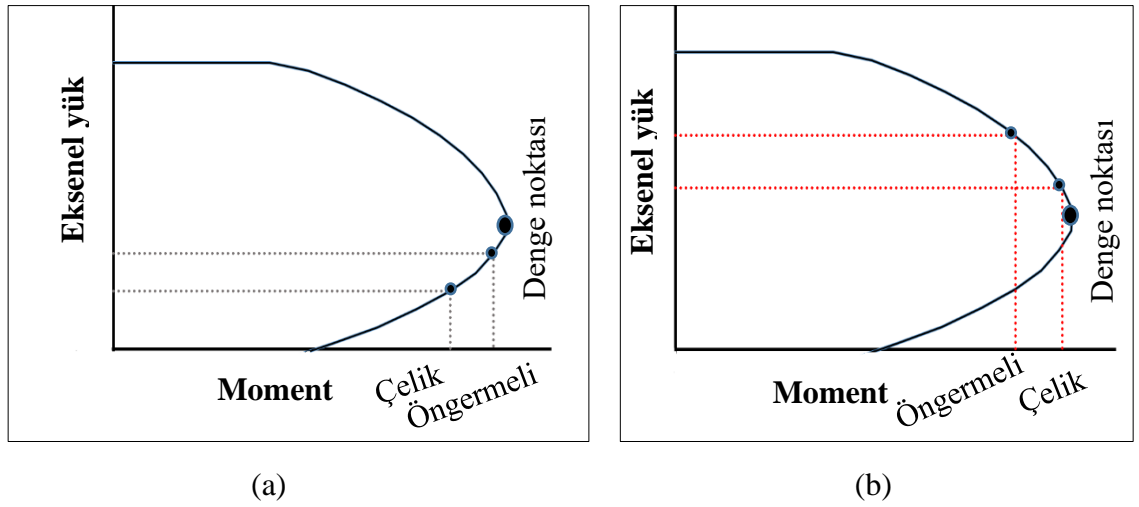
4.3.10. Daha Fazla Tartışma İçin Ek Performans Analizleri



Şekil 4. 15. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüleri ile yer ivme katsayıları (a) eğilme kontrollü kolon kesiti ve (b) basınç kontrollü kolon kesiti için

Kolonların, öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerin sismik performansları üzerindeki etkisini daha fazla araştırmak için ek sismik performans analizleri yapılmıştır. Bu amaçla iki ek analiz seti oluşturulmuştur. İlk analiz setinin sonuçları her bir tip köprü için aynı rijitliğe sahip kolonlar ve elastomerler kullanılması halinde Şekil 4.15a’da gösterilmiştir. İkinci analiz setinin sonuçları Şekil 4.15b’de gösterildiği gibi her bir tip köprü için aynı rijitliğe sahip kolonlar ve elastomerler kullanılmıştır. Ancak bu setteki köprü kolonlarının kesitleri basınç kontrollü olacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre bu kesitlerde eksenel yük daha yüksektir. Böylece kolon davranışı denge noktasının üzerindeki bölgede eksenel yük tarafından daha fazla kontrol edilmektedir. Şekil 4.15’te görüldüğü gibi üstyapı hafiflettikçe yani öngermeli kirişli köprüden çelik kirişli köprüye geçince süneklik oranı ilk analiz seti için artmaktadır. İkinci analiz setinde kolon kesitlerinin basınç kontrollü olduğu için süneklik oranı azalmaktadır. Balans noktasının altında kalan kolon kesitleri

için eğilme davranışı daha etkindir. Birinci setteki analiz sonuçları gösterdiği gibi kolonlardaki aksel yük azaldıkça kolon moment kapasitesi de azalmaktadır. Bununla birlikte, ikinci setteki analiz sonuçlarına bakıldığında, basınç kontrollü bir kesitte ters bir davranış gözlemlenir, yani aksel yük azalınca kolon moment kapasitesi artmaktadır. Bu davranışlar Şekil 16.'da etkileşim diyagramlarında şematik olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada bütün köprüler tasarım kodlarının minimum şartlarına göre tasarlanmıştır. Bundan dolayı, öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprü kolonlarının kesitlerinde eğilme kontrollü davranış sergilemiştir. Sonuç olarak, kolon üzerinde daha küçük aksel yük üreten çelik kirişli köprüler sismik performans üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır. Bu çalışmada çelik kirişli köprülerin üstyapısı, öngermeli kirişli köprülere nazaran daha hafif olmasına rağmen sismik performansları daha düşük gelmiştir. Sebebi ise bu bölümde açıklandığı gibi tasarımdan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. 16. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprülerinin kolonlarının etkileşim diyagramları (a) eğilme kontrollü kesit için ve (b) basınç kontrollü kesit için

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında, çelik kirişli köprülerin ve öngermeli kirişli betonarme köprülerin farklı parametreleri göz önüne alınarak inşaat maliyetleri ve deprem performanslarının karşılaştırılması üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Toplam 288 köprünün tasarımı yapıldıktan sonra her köprünün toplam inşaat maliyetleri hem öngermeli kirişli köprüler için hem çelik kirişli köprüler için hesaplanmıştır. Çelik kirişli köprülerinin altyapıları öngermeli kirişli köprülerinin altyapılarına göre daha küçük çıkmasına rağmen toplam inşaat maliyetleri daha fazla çıkmaktadır. Buradaki en önemli faktör çeliğin birim fiyatının pahalı olmasıdır.
2. Maliyet karşılaştırılması yapılırken en etken parametre köprülerinin açıklık uzunlukları olmuştur. Öngermeli kirişli ve çelik kirişli köprüler arasında maliyet farkları 15m, 20m, 25m, 30m, 35m ve 40m açıklık uzunlukları için sırasıyla yaklaşık %23, %28, %30, %35, %37, ve %41 olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar üzerinde zemin tipleri, köprü yükseklikleri ve deprem ivme katsayılarının bariz bir etkisi gözlemlenmemiştir.
3. Bununla birlikte çelik kirişli köprülerinin altyapı maliyetleri öngermeli kirişli köprülerinin altyapı maliyetlerine göre daha az olmuştur. Altyapı maliyet farkları açıklık uzunluklarına göre %1'den %9'a kadar çıkmaktadır.
4. Her iki tip köprü standardın minimum şartlarına göre tasarlandığı zaman, çelik kirişli köprülerin sismik performansı öngermeli betonarme kirişli köprülerin sismik performansına göre daha düşük çıkmıştır. Bu davranış ise önceki bölümlerde açıklandığı üzere tasarımdan kaynaklanmaktadır.
5. Sonuç itibariyle bu çalışmada köprüler minimum tasarım şartları gözetilerek tasarlandığı zaman, öngermeli betonarme kirişli köprülerin çelik kirişli köprülere göre hem maliyet hem performans açısından daha iyi bir konumda olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- AASHTO. 2017.** AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (8th Edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- ATMACA, B. 2018.** ÖNGERİLMELİ KİRİŞLİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ HESAP VE TASARIMININ İRDELENMESİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ, Doktora Tezi, KTÜ fen bilimleri enstitüsü, inşaat mühendisliği anabilim dalı, Trabzon.
- Aydın, Z., Ayvaz, Y. 2013.** Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering.*, 17(4): 769–776.
- Batikha, M., Al Ani, O., Elhag, T. 2017.** The effect of span length and girder type on bridge costs. *MATEC Web of Conferences.*, 2017, 120: 08009.
- Boatman, B. 2010.** Prestressed vs . Steel Beams : Expected Service Life, Undergraduate Student, Michigan State University, Michigan Department of Transportation, Ann Arbor, USA.
- Caltrans, S. D. C. 2019.** Caltrans seismic design criteria version 2.0. California Department of Transportation, Sacramento, California.
- Chen, W. F., Duan, L. 2014.** Bridge engineering handbook. CRC Press, Florida, USA, 386 pp.
- Computers and Structures, Inc. 2019.** CSI analysis reference manual for SAP2000.
- DesRoches, R., Muthukumar, S. 2004.** Implications of seismic pounding on the longitudinal response of multi-span bridges - An analytical perspective. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration.*, 3(1):, 57–65.
- Dicleli, M., Mansour, M. Y. 2003.** Seismic retrofitting of highway bridges in Illinois using friction pendulum seismic isolation bearings and modeling procedures. *Engineering Structures.*, 25(9): 1139–1156
- Dobry, R., Gazetas, G. 1986.** Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering.*, 112(2): 109–135.
- Federal Emergency Management Agency. 2000.** Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE),

Washington, D.C.

- Ilki, A., Kumbasar, N. 2000.** Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members. Proc. ASCE 14th Engineering Mechanics Conference, 2000, University of Texas, Austin.
- Jagtap, B. C., Shahezad, M. 2016.** Comparative Study of Prestressed Concrete Girder and Steel Plate Girder for Roadway Over Bridge. *Engineering and Technology.*, 1(1): 113–117.
- Kavazanjian Jr, E., Matasovic, N., Hadj-Hamou, T., & Sabatini, P. J. 1997.** Geotechnical Engineering Circular No. 3: Design Guidance. Geotechnical Earthquake Engineering for Highways. Volume I-Design Principles (No. Report No: FHWA-SA-97-076).
- Khatri, V., Singh, P. K., Maiti, P. R. 2012.** Comparative study of prestressed steel – concrete composite bridge of different span length and girder spacing. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER).*, 2(5): 3917–3922.
- Lounis, Z., Cohn, M. Z. 1993.** Optimization of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Systems. *PCI Journal.*, 38(4): 60–78.
- Singh, N., Devgan, N. P., Kalra, A. M., Pal, S. 2016.** Effect on Economy on Successive Increase in the Span of Bridges. Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering, May 5 – 6, 2016, Ottawa, Canada.
- Sirca, G. F., Adeli, H. 2005.** Cost optimization of prestressed concrete bridges. *Journal of Structural Engineering.*, 131(3): 380–388.
- Takeda, T., Sozen, M. A., & Nielsen, N. N. 1970.** Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division.*, 96(12): 2557-2573.
- XTRACT v3.0.8 (2007)** Cross-sectional X Structural Analysis of Components. Rancho Cordova CA. TRC/Imbsen Software Systems.

EKLER

EK 1 Aaaaaaaaaaaaaaaaaa aa
aa

EK 2 Aaaaaaaaaaaaaaaaaa aa
aa

EK 3 Aaaaaaaaaaaaaaaaaa aa
aa

EK 4 Aaaaaaaaaaaaaaaaaa aa
aa

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Waheed RASEKH
Doğum Yeri ve Tarihi : FARAH/AFGANİSTAN 08/04/1992
Yabancı Dil : Türkçe, İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Ginahkan Lisesi
Lisans : Erciyes Üniversitesi
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

İletişim (e-posta) : waheedrasekh52@gmail.com