

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PREKAST KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN
AASHTO'YA GÖRE DEPREME DAYANIKLI TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Can AKOĞUL**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PREKAST KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN
AASHTO'YA GÖRE DEPREME DAYANIKLI TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Can AKOĞUL
501041019**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Oğuz Cem ÇELİK
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Feridun ÇILI
Doç.Dr. Cem YALÇIN (B.Ü.)**

TEMMUZ 2007

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, prekast kirişli betonarme köprülerin AASHTO'ya göre depreme dayanıklı tasarımına ilişkin koşullar verilmiş ve sayısal bir örnek incelenmiştir.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, disiplinli çalışmanın önemini bana gösteren değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Oğuz Cem ÇELİK'e, çalışmamın her noktasındaki yardımları için teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan ve bugünlere ulaşmamda büyük emekleri olan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bana her türlü kolaylığı sağlayan ve yardımlarını eksik etmeyen TEKFEN MÜHENDİSLİK A.Ş. yöneticilerine ve çalışma arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür etmek isterim.

Temmuz 2007

İnş. Müh. Can AKOĞUL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Konu	1
1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
2 AASHTO'YA GÖRE KÖPRÜLERİN DEPREME DAYANIKLI TASARIMI	5
2.1 Giriş	5
2.2 AASHTO'nun Tarihsel Gelişimi	5
2.2.1 Standart şartname (1949 - 1961)	6
2.2.2 Standart şartname (1961 - 1975)	6
2.2.3 Standart şartname (1975 - 1992)	7
2.2.4 Standart şartname (1992 - 2002)	9
2.3 Şartname Kapsamı	9
2.4 İvme Katsayısı	10
2.4.1 İvme katsayısının gelişimi	12
2.4.2 Yer hareketi parametreleri	12
2.4.3 İvme hesaplama yöntemleri	13
2.5 Önem Sınıflandırması	14
2.6 Deprem Performans Kategorisi	15
2.7 Zemin Etkisi	15
2.7.1 Yerel zemin katsayısı	17
2.8 Elastik Deprem Davranış Katsayısı	17
2.8.1 Mod birleştirme yöntemi için elastik deprem davranış katsayısı	17
2.9 Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı	18
2.10 Elastik Kuvvetlerin ve Yerdeğıştirmelerin Belirlenmesi	19
2.11 Ortogonal Deprem Kuvvetlerinin Birleştirilmesi	19
2.12 Minimum Mesnet Genişlikleri	20
2.13 Hesap Esasları	21

2.13.1 Çözüm yönteminin seçilmesi	22
2.13.2 Düzgün yayılı yük yöntemi	22
2.13.3 Tek modlu spektrum çözüm yöntemi	23
2.13.4 Çok modlu spektrum çözüm yöntemi	23
2.13.5 Zaman tanım alanında çözüm yöntemi	24
3 ELASTOMER MESNETLER	25
3.1 Giriş	25
3.2 Elastomer Mesnetlerin Üstünlükleri	25
3.3 Elastomer Mesnetlerin Sakıncaları	28
3.4 Elastomer Mesnet Tasarımı	29
3.4.1 Elastomer mesnet özellikleri	29
3.4.2 Kullanma yükleri altında tasarım	32
3.5 İzolatör Olarak Elastomer Mesnet	34
3.5.1 Giriş	34
3.5.2 Esneklik	35
3.5.3 Enerji sönümleme	35
3.5.4 Düşük yatay yükler altında rijitlik	38
3.5.5 İzolasyonun etkileri	38
3.5.6 Tasarım	40
3.5.7 Hesap yöntemi	44
4 TÜRKİYE'DE YAYGIN BİÇİMDE UYGULANAN KARAYOLU KÖPRÜ TIPLERİ	46
4.1 Giriş	46
4.2 Prekast Kiriş Tipleri	46
4.3 Altyapı Tipleri	49
4.4 Türkiye'de İnşa Edilen Köprülerden Örnekler	52
5 SAYISAL İNCELEME	56
5.1 Köprü Elemanları	57
5.2 Malzeme Sınıfları	60
5.3 Deprem Parametreleri	61
5.3.1 Spektrum eğrisi	61
5.4 Elastomer Mesnet	62
5.4.1 Elastomer mesnet özellikleri	62
5.5 Köprünün Modellenmesi	64
5.5.1 Elastomersiz model	66
5.5.2 Elastomerli model	66
5.5.3 Basit model ve kontrol hesabı	67

5.6 Çözümler	69
5.6.1 Elastomersiz model çözümü	69
5.6.2 Elastomerli model çözümü	69
5.6.3 Basit model çözümü ve kontrol hesabı	71
5.6.4 Çözümlerin değerlendirilmesi	72
5.7 Kısa Kolonlu Köprünün Modellenmesi	73
5.7.1 Elastomersiz model çözümü	73
5.7.2 Elastomerli model çözümü	74
5.7.3 Basit model çözümü ve kontrol hesabı	76
5.7.4 Çözümlerin değerlendirilmesi	77
5.8 Sonuçların Karşılaştırılması	78
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
6.1 Köprü Elemanları	81
6.2 Sonuçlar ve Öneriler	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	86

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
ATC	: Applied Technology Center
ATC-6	: Seismic Design Guidelines for Highway Bridges
NCEER	: National Center of Earthquake Engineering Research
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CALTRANS	: California Department of Transportation
AASHO	: American Association of State Highway Officials
SEAOC	: Structural Engineers Association of California
CA	: California
MO	: Missouri
SC	: South Carolina
EGY	: Emniyet Gerilmeleri Yöntemi
TGY	: Taşıma Gücü Yöntemi
FHWA	: Federal Highway Administration
ATC-3-06	: Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings
ÖS	: Önem Sınıfı
DPK	: Deprem Performans Kategorisi
Z	: Zemin Sınıfı
SMSM	: Tek Modlu Spektrum Çözüm Yöntemi
MMSM	: Çok Modlu Spektrum Çözüm Yöntemi
CQC	: Tam Karesel Birleştirme
FDOT	: Florida Department of Transportation
BS 5400	: British Standards Institution, Steel, Concrete and Composite Bridges: Part 9, Bridge Bearings
ASTM-A 416	: Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete
SAP	: Structural Analysis Program

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Dönüş Periyodları ve Aşılma Olasılıkları.....	14
Tablo 2.2 : Deprem Performans Kategorileri.....	15
Tablo 2.3 : Yerel Zemin Katsayısı.....	17
Tablo 2.4 : Deprem Yüğü Azaltma Katsayıları.....	19
Tablo 2.5 : Minimum Gerekli Hesap.....	22
Tablo 2.6 : Düzenli Köprü Koşulları.....	22
Tablo 3.1 : Farklı Sertliklerde Elastomer Özellikleri.....	29
Tablo 3.2 : FDOT Mesneti için Fiziksel Parametreler.....	31
Tablo 3.3 : FDOT Mesnet Rijitlik Değerleri.....	31
Tablo 4.1 : Türkiye’de İnşa Edilen Köprü Örnekleri.....	53
Tablo 5.1 : Köprü Elemanları Kesit Özellikleri.....	57
Tablo 5.2 : Beton Özellikleri.....	60
Tablo 5.3 : Donatı Özellikleri.....	60
Tablo 5.4 : Elastomer Mesnet Özellikleri.....	62
Tablo 5.5 : Köprü Modellerinin Karşılaştırılması.....	79

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : AASHTO Tasarım Akış Şeması.....	10
Şekil 2.2 : Efektif İvmenin Davranış Spektrumundan Türetilmesi.....	13
Şekil 2.3 : İvme Katsayıları – ABD.....	16
Şekil 2.4 : DBYBHY ve AASHTO Spektrumları (A=0.4/Zemin Profili I)....	18
Şekil 2.5 : DBYBHY ve AASHTO Spektrumları (A=0.4/Zemin Profili III). 18	18
Şekil 2.6 : Minimum Mesnet Genişlikleri.....	21
Şekil 3.1 : Elastomer Mesnet.....	26
Şekil 3.2 : Elastomer Mesnet Kesiti	26
Şekil 3.3 : Üstyapı ile Altyapı Arasındaki Bağlantı.....	27
Şekil 3.4 : Farklı Zemin Spektrum Eğrileri.....	28
Şekil 3.5 : Elastomerin Mesnetin İvme Spektrumuna Etkisi.....	35
Şekil 3.6 : Elastomerin Mesnetin Yerdeğiştirme Spektrumuna Etkisi.....	36
Şekil 3.7 : İzolatörün Enerji Sönümlemesi.....	36
Şekil 3.8 : Artan Sönüm.....	37
Şekil 3.9 : İzolatörün Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı.....	37
Şekil 3.10 : İzolasyonlu Köprünün Davranış Spektrumu.....	39
Şekil 3.11 : İzolasyonlu Köprülerin Tasarımı.....	39
Şekil 3.12 : Çevrimsel Davranış.....	40
Şekil 3.13 : Viskoz Davranış.....	41
Şekil 3.14 : Kesişim Alanı (A_r).....	43
Şekil 3.15 : Elastomerli Üç Boyutlu Köprü Modeli.....	44
Şekil 3.16 : İzolatörlü Köprünün Tek Modlu Basit Hesap Yöntemi.....	45
Şekil 4.1 : 120cm'lik Prekast Kirişte Tipik Kesit.....	47
Şekil 4.2 : 90cm'lik Prekast Kirişte Tipik Kesit.....	48
Şekil 4.3 : Farklı Yüksekliklerde “T” tipi Prekast Kirişler.....	48
Şekil 4.4 : Farklı Yüksekliklerde “U” tipi Prekast Kirişler.....	48
Şekil 4.5 : Sekizgen Kesitli Tekil Kolon.....	49
Şekil 4.6 : Dairesel Kesitli Tekil Kolon.....	50
Şekil 4.7 : Eliptik Kesitli Üç Kolonlu Çerçeve Ayak.....	50
Şekil 4.8 : Eliptik Kesitli İki Kolonlu Çerçeve Ayak.....	51
Şekil 4.9 : Perde Ayak.....	51
Şekil 4.10 : Köprü Fotoğrafı-1	52
Şekil 4.11 : Köprü Fotoğrafı-2	52
Şekil 4.12 : Köprü Fotoğrafı-3	54
Şekil 4.13 : Köprü Fotoğrafı-4	54
Şekil 4.14 : Köprü Fotoğrafı-5	54
Şekil 4.15 : Köprü Fotoğrafı-6	55
Şekil 4.16 : Köprü Fotoğrafı-7	55
Şekil 4.17 : Köprü Fotoğrafı-8	55
Şekil 5.1 : Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası.....	57

Şekil 5.2	: Köprü Boy Kesiti	58
Şekil 5.3	: Üstyapı En kesiti.....	59
Şekil 5.4	: Kolon ve Prekast Kiriş Kesiti.....	60
Şekil 5.5	: AASHTO Spektrum Eğrisi.....	61
Şekil 5.6	: Kullanılan Elastomer Mesnetin Detayı.....	62
Şekil 5.7	: Link Elemanı.....	64
Şekil 5.8	: Orta Ayak Görünüşü ve Ayak Hesap Boyu.....	65
Şekil 5.9	: Üstyapı ile Altyapı Arasındaki Bağlantı.....	65
Şekil 5.10	: Elastomersiz Modelleme.....	66
Şekil 5.11	: Elastomerli Modelleme.....	67
Şekil 5.12	: Basit Modelleme.....	68
Şekil 5.13	: Elastomersiz Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T=1.72sn.$	70
Şekil 5.14	: Elastomerli Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_e=1.36sn.$	70
Şekil 5.15	: Basit Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_b=1.36sn.$	71
Şekil 5.16	: Kısaltılan Orta Ayak Görüntüsü ve Ayak Hesap Boyu ($H = 11m$)	74
Şekil 5.17	: Elastomersiz Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T=0.60sn.$	75
Şekil 5.18	: Elastomerli Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_e = 1.08sn.$	75
Şekil 5.19	: Basit Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_b = 1.08sn.$	76
Şekil 5.20	: Orta Ayak Kesme Kuvveti Diyagramı.....	80
Şekil 5.21	: Orta Ayak Moment Diyagramı.....	80

SEMBOL LİSTESİ

A	: İvme katsayısı, elastomer mesnet alanı
A_a	: Efektif ivme katsayısı
A_{max}	: Beklenen maksimum yer ivmesi
A_r	: Elastomer mesnet kesişim alanı
A_s	: Elastomer mesnet kayma yüzeyi
A_v	: Efektif hıza bağlı katsayısı
A(T)	: Spektral ivme katsayısı
A, B, C, D	: Deprem performans kategorileri
B	: Temel altı yüzdürme kuvveti, dönme hesabı için mesnet genişliği
B₁, B₂	: Kesişim alanının hesabında mesnet boyları
C	: Köprü temel tipine bağlı katsayı
C_B	: Birleştirilmiş davranış katsayısı
C_{sm}	: Elastik deprem davranış katsayısı
D	: Zati yük
d	: Sistemin toplam yerdeğiştirme
d_i	: Elastomer mesnet Yerdeğiştirme
d_{sub}	: Altyapı uç yerdeğiştirme
d_t	: Toplam yerdeğiştirme
E	: Zemin basıncı, Elastisite modülü
E_c	: Elastomer basınç elastisite modülü
EDC	: Bir çevrimde sönmölen enerji
EPA	: Efektif ivme
EQ	: Deprem yükü
F	: Çerçeve faktörü
F_{max}	: Maksimum kuvvet
F_p, F_n	: Maksimum pozitif ve negatif kuvvet
F_y	: Elastomer akma yükü
f_y	: Çelik karakteristik akma dayanımı
G	: Kayma modülü
G_{eff}	: Efektif kayma modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Orta ayak boyu, elastomer mesnet yüksekliği
H_{kolon}	: Kolon boyu
H_r	: Elastomer katmanların toplam kalınlığı
h_{ri}	: Bir çelik plakanın kalınlığı
h_s	: Bir elastomer katmanın kalınlığı
I	: Yapı önem katsayısı, atalet momenti
K	: Rijitlik
K_d	: Elastik ötesi rijitlik
K_{eff}	: Efektif/etkin rijitlik, efektif doğrusal rijitlik
K_H	: Yatay rijitlik
K_R	: Dönme rijitliği

K_u	: Elastik (boşaltma) rijitlik
K_v	: Eksenel rijitlik
k_{eff}	: İzolatör efektif rijitliği
k_{sub}	: Ayak rijitliği
k_{yay}	: Yay rijitliği
\bar{k}	: Sertliğe bağlı sabit
L	: İki genişleme derzi arasındaki köprü uzunluğu, elastomer boyu
M	: Köprü kütlesi, kolon alt ucundaki Moment ($R=1$)
M_{Alt}	: Altyapı kütlesi
M_T	: Köprünün depremde titreşime giren kütlesi
$M_{Üst}$: Üstyapı kütlesi
N	: Kolon ya da kenar ayak mesnet yüzünden ölçülen mesnet genişliği
n	: Elastomer iç katman sayısı, mesnet adedi
P	: Yapıda 2.54cm yatay deplasman yaratacak statik yük
P_z	: Elastomer mesnetteki düşey yük
$P(A)$: Maksimum ivmenin aşılma olasılığı
p_e	: Eşdeğer statik deprem yükü
Q_d	: Elastomer mesnet karakteristik dayanım
Q_x	: Boyuna doğrultuda elde edilen elastik kuvvetin mutlak değeri
Q_y	: Enine doğrultuda elde edilen elastik kuvvetin mutlak değeri
R	: Deprem yükü azaltma katsayısı, deprem dönüş periyodu
R_N	: Kaya için belirlenmiş ve $1g$ 'ye göre normalize edilmiş spektral ivme
S	: Zemin büyütme katsayısı, yerel zemin katsayısı, verevlik açısı
S_a	: Spektral ivme
S_d	: Spektral yerdeğiştirme
S_i	: Bir elastomer katmanın şekil katsayısı
S_{ov}	: Genel şekil katsayısı
SF	: Hidrostatik basınç
T	: Periyod, elastomersiz model birinci elastik titreşim periyodu
T_b	: Basit model birinci elastik titreşim periyodu
T_B	: Elastomer mesnetli köprünün periyodu
T_e	: Elastomerli model birinci elastik titreşim periyodu
T_k	: Kontrol hesabından elde edilen birinci elastik titreşim periyodu
T_m	: Köprü m'inci titreşim moduna ilişkin periyod
T_M	: Monolitik köprünün periyodu
V	: Bir kolondaki kesme kuvveti
V_k	: Bir kenar ayaktaki yatay kuvvet
ΣV	: Toplam Taban Kesme Kuvveti:
W	: Köprü toplam ağırlığı, elastomer genişliği
x	: Köprü boyuna ekseni
y	: Köprü enine ekseni
Z	: Deprem yükü azaltma katsayısı
z	: Düşey eksen
β_d	: Zati yük katsayısı
β_e	: Zemin basınç yük katsayısı :
Δ_s	: Elastomerin servis durumunda kayma yerdeğiştirmesi
Δ_{max}	: Elastomerin maksimum Yerdeğiştirmesi
Δ_p, Δ_n	: Maksimum pozitif ve negatif yerdeğiştirme
θ_m	: Elastomer mesnette toplam düşey yükten oluşan maksimum dönme
σ	: Düşey yüklerden oluşan basınç gerilmesi

σ_H	: Hareketli yükten oluşan ortalama basınç gerilmesi
σ_{TY}	: Zati ve hareketli yükün mesnette yarattığı ortalama basınç gerilmesi
γ	: Grup VII kombinasyonu yük katsayısı
γ_c	: Düşey yükten oluşan kayma şekil değiştirmesi
γ_r	: Dönmeden dolayı oluşan kayma şekil değiştirmesi
$\gamma_{s,s}$: Servis durumu yerdeğiştirmeden oluşan kayma şekil değiştirmesi
$\gamma_{s,eq}$: Deprem durumu yerdeğiştirmeden oluşan kayma şekil değiştirmesi
γ_r	: Dönmeden dolayı oluşan kayma şekil değiştirmesi
Φ	: Donatı çapı

PREKAST KİRİŞLİ BETONARME KÖPRÜLERİN AASHTO'YA GÖRE DEPREME DAYANIKLI TASARIMI

ÖZET

Prekast öngerilmeli kirişli betonarme köprüler karayollarında en çok uygulanan köprü sistemidir. Köprülerin depreme dayanıklı tasarımı hakkında ülkemizde bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu nedenle köprü tasarımı genellikle AASHTO'ya göre yapılmaktadır.

Bu çalışmada yönetmeliğimizden seçilen deprem parametrelerinin, AASHTO tasarım koşulları ile birlikte kullanılarak köprülerin depreme dayanıklı tasarım ilkeleri açıklanmaya çalışılmıştır.

Elastomer mesnetlerin projelendirme aşamasında dikkate alınması sonucu deprem davranışındaki değişimler gerçek bir köprü örneği üzerinde incelenmiştir.

Altı bölümden oluşan çalışmanın birinci bölümü, konunun açıklanmasına ve konu ile ilgili çalışmaların gözden geçirilmesine ayrılmış, çalışmanın amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde köprülerin AASHTO'ya göre depreme dayanıklı tasarım koşulları verilmiştir. Yönetmeliğin tarihsel gelişimi ile deprem yükünün yıllar içindeki tanımları özetlenmiştir. Köprü hesap esasları açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde elastomer mesnetlerin özellikleri ve deprem davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Dördüncü bölümde Türkiye'de yaygın biçimde kullanılan üstyapı ve altyapı tipleri gösterilmiş; son 15 yıl içinde ülkemizde inşa edilen bazı köprü örnekleri verilmiştir.

Beşinci bölümde elastomer mesnetlerin gerçek bir köprü örneği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elastomersiz, elastomerli ve basit olmak üzere üç ayrı model çözülmüş; sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Altıncı bölüm, bu çalışmada varılan sonuçları kapsamaktadır. Çalışmanın başlıca özellikleri ve sayısal sonuçların değerlendirilmesi bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1- Türkiye'deki köprülerin deprem parametreleri DBYBHY'den alınarak sistem tasarımı AASHTO'ya göre yapılmasında bir sakınca görülmemiştir.
- 2- Aynı parametreler kullanıldığında iki yönetmelik uyarınca benzer tasarım spektrumları elde edilmektedir
- 3- DBYBHY'de yer alan yapı önem katsayısı AASHTO spektrumlarında kullanılmamaktadır. Deprem yükünü bu katsayı ile arttırmak mühendis ve işveren yorumuna bırakılmıştır.

- 4- İki yönetmeliğin deprem yükü azaltma katsayıları birbirinden çok farklıdır.
- 5- Elastomerler üzerine serbestçe oturan prekast kirişli betonarme köprüler Türkiye’de yaygın biçimde inşa edilmektedir.
- 6- Elastomer mesnetli köprülerde, proje aşamasında elastomerin göz önüne alınması sonucu iç kuvvetlerde önemli azalmalar olmaktadır. Bununla birlikte yerdeğıştirmeler artmaktadır.
- 7- Düzgün köprülerde basitleştirilmiş hesap yöntemleri oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN OF RC BRIDGES WITH PRECAST CONCRETE GIRDERS ACCORDING TO AASHTO

SUMMARY

RC bridges with precast prestressed girders are most common bridge system on highways. In our country there is lack of specification about earthquake resistant design of bridges. Therefore bridges are mostly designed according to AASHTO.

In this study, the principles of seismic design of bridges are disclosed taking seismic inputs from 2007 Turkish Earthquake Code and AASHTO design provisions together.

The effect of the elastomeric bearings on the dynamic characteristics of a specific bridge in Turkey is examined.

The study consists of six chapters. The first chapter covers the subject, the results of a literature survey and the scope and objectives of the study.

In the second chapter, earthquake resistant design principles of bridges according to AASHTO are given. Changes of the seismic design criteria and seismic load definition are summarized. Selection and method of seismic analysis of bridges are reviewed.

The third chapter is assigned to determination of elastomeric bearing properties and seismic behaviour of isolated bridges.

In the fourth chapter, common types of superstructures and substructures are demonstrated. Some bridge examples which are built in Turkey are given to show the changes over the past 15 years.

The fifth chapter is devoted to the numerical investigations. In this chapter, effects of elastomeric bearings are investigated on seismic behaviour changes of a specific bridge. Three different bridge models, non-isolated, isolated and simplified, are analysed. The comparative results are given.

The sixth chapter covers the results achieved in this study. The basic features of the study, the evaluation of the numerical results are represented in this chapter..

The basic conclusions are summarized below.

- 1- Bridges in Turkey can be designed with seismic inputs from 2007 Turkish Earthquake Code and design requirements according to AASHTO.
- 2- Similar design spektrums can be obtained according to Turkish Code and AASHTO if same inputs are used.

- 3- AASHTO seismic response shall be determined without importance factor in Turkish Earthquake Code. Increasing the magnitude of seismic force with this coefficient is in scope of Engineer and Employer decision.
- 4- Response modifications factors of two specifications are different one from other.
- 5- Simply supported bridges with precast girders on elastomeric bearings are widely built in Turkey.
- 6- There is significant decrease in internal forces of bridge elements when the effect of elastomeric bearings is taken into account
- 7- Simplified analysis methods give accurate results in regular bridges.

1 GİRİŞ

1.1 Konu

Prekast kirişli betonarme karayolu köprüleri, Türkiye’de en çok uygulanan köprü tipidir. Betonarme köprüler uygulama ve imalat bakımından yükleniciye kolaylık sağlayan köprülerdir. Ancak ülkemizde köprü tasarım yönetmeliği olmaması, köprü projelendiren mühendisler için belirsizlikler oluşturmaktadır. Bu çalışmada bu belirsizlikler belirtilip açıklanmaya çalışılacaktır.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik’in (2007) 1.1.5 nolu maddesinde belirtildiği gibi köprülerin tasarımı, yönetmeliğin kapsamı dışındadır. Madde 1.1.7’de açıklandığı üzere köprülere ve yönetmeliğin kapsamı dışındaki diğer yapılara uygulanacak koşul ve kurallar, kendi özel yönetmelikleri yapıncaya dek, ilgili Bakanlıklar tarafından çağdaş uluslararası standartlar göz önünde tutularak saptanacak ve projeleri bu esaslara göre düzenlenecektir. Bu iki madde uyarınca deprem bölgelerinde yapılacak köprülerin tasarımı için geçerliliğini kanıtlamış ve ülkemiz koşullarına uyabilecek bir yönetmeliğin seçilmesi gerekmektedir.

Türkiye’nin depremsellik açısından konumu düşünüldüğünde, benzer depremsellik özelliklerine sahip bir coğrafyadaki ülkenin yönetmeliğini kullanmak uygun olmaktadır. Yönetmeliğin tarihi boyunca, yaşanan büyük depremler sonucunda gerekli değişikliklerin yapılmasıyla güncel tasarım kriterlerine sahip olması diğer önemli özelliktir. Bu koşullar göz önüne alındığında Türkiye’de köprü tasarımı için kullanılabilir en kapsamlı yönetmeliklerden biri Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Kurumunun (AASHTO) yayınladığı yönetmeliktir; bu çalışmada bu yönetmelik kuralları izlenecektir. AASHTO yönetmeliği genel olarak iki bölüme oluşur. Bunlar, “Tasarım” ve “İnşaat”tır. Tasarım bölümü de kendi içinde ikiye ayrılır. Bölüm IA “Depreme Dayanıklı Tasarım” adındaki bölüm, bu tez kapsamında

ayrıntılı olarak incelenecektir.

Tasarımda sonucu etkileyen en önemli etkenlerden biri köprünün taşıyıcı sisteminin gerçeğe en yakın biçimiyle modellenmesidir. Modelleme, köprüyü oluşturan elemanların geometrik ve mekanik özelliklerinin matematiksel olarak tanımlanmasıdır. Prekast kirişlerin uçlarında bulunan elastomer mesnetlerin köprünün deprem davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için gerçek bir köprü elastomerli ve elastomersiz olarak modellenmiştir.

Tez kapsamında son 15 yıl içinde yurdumuzun çeşitli bölgelerinde inşa edilmiş bazı karayolu köprülerinin özellikleri tablo olarak verilmiştir. Bu tablo kullanılarak köprü elemanlarının bu süre içindeki değişimleri açıklanacaktır.

1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar

Köprülerin depreme dayanıklı tasarımıyla ilgili ülkemizde bir yönetmelik bulunmamaktadır. Deprem yönetmeliğimizde (2007) [1] belirtildiği üzere yetkili kurumlar tarafından uluslararası çağdaş standartlar seçilerek köprü tasarımı bu yönetmeliğin koşulları doğrultusunda gerçekleştirilecektir. Türkiye’de genellikle ABD’de oluşturulmuş tasarım şartnameleri kullanılmaktadır. Amerika’da köprüler için geliştirilmiş bir çok çalışma bulunmaktadır. Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Kurumu ulaştırma hakkında kapsamlı planlar hazırlayan ve eyaletlerin oluşturduğu ulaştırma ofislerine teknik destek sağlayan bir organizasyondur. AASHTO, [2, 3] kurullardan oluşmaktadır; her kurulun alt komiteleri vardır. Köprü ve Ulaştırma Yapıları Komitesi, Karayolları Kurulunun kapsamında çalışan bir alt komitedir. AASHTO Köprü ve Ulaştırma Yapıları komitesi de teknik komitelerden destek almaktadır. Köprü tasarım ve araştırmaları için 20 adet teknik komite (T1-T20) oluşturulmuştur. Depreme dayanıklı tasarım T3 kodlu komitenin görevidir. AASHTO şartnamesini belli sürelerle geliştirerek köprü tasarımına ilişkin yenilikleri mühendislere sunmaktadır, [4, 5].

AASHTO dışında ABD eyaletlerinin kendi oluşturduğu ulaştırma kurumları bulunmaktadır. Bunların önde gelenlerinden biri Kaliforniya eyaletindeki birimdir (CALTRANS), [6]. Bu kurumun ortaya koyduğu tasarım yaklaşımları AASHTO tarafından kabul görmüş ve yönetmeliklere eklenmiştir .

AASHTO'nun yardım aldığı diğer bir kurum Applied Technology Council' dir (ATC). ATC-6 projesi günümüzde kullanılan köprü yönetmeliklerin temelini oluşturmaktadır, [7, 8].

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) gibi ulusal kuruluşlar da kapsamlı araştırmalar gerçekleştirmektedirler. Bu araştırmaların sonuçları özetlenerek yönetmelik koşullarını oluşturmaktadır.

Elastomer mesnet servis yükleri altında tasarımı AASHTO'nun standart şartnamesinde verilmektedir. Elastomerin izolatör olarak tasarlanmasında yararlanılan kaynak AASHTO'nun izolatörler için hazırladığı kılavuz şartnamedir, [9]. Bu kılavuz, standart şartnamedeki depreme dayanıklı tasarım bölümü ile uyumludur.

Köprülerde kullanılan elastomer mesnetlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Yazdani ve diğerleri, AASHTO'daki metotlar ile elastomer mesnetlerin rijitliklerin uygun biçimde hesaplandığını söylemiştir, [10]. Dai ve diğerleri, elastomerin periyodu uzatarak köprüye etkiyen yükleri azalttığını belirtmiştir, [11]. Jangid mevcut deprem kayıtlarını kullanarak yaptığı çalışmada elastomer mesnetlerin köprünün deprem davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmıştır, [12]. Dicleli ve diğerleri faya yakın inşa edilen izolasyonlu köprülerde eşdeğer doğrusal çözüm yönteminin n tasarımıda kullanılmasını önermiştir, [13]. Kikuchi ve diğerleri elastomer mesnetlerin analitik ve test sonuçları arasında uygunluk olduğunu ve hesaplarda bu değerlere bağlı kalınabileceğini belirtmiştir, [14].

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, köprülerin depreme dayanıklı tasarımında projelendirme aşamalarının gözden geçirilmesi, elastomer mesnetlerin modellenme ilkeleri ve sistem davranışına olan etkisini incelemektir.

Projelendirme sırasında deprem parametreleri DBYBHY'den seçilerek AASHTO'ya göre sistem tasarımı yapılmaktadır. İki yönetmeliğin farklı yapı tipleri için tasarım koşulları içermesinden kaynaklanan belirsizlikler açıklanmaya çalışılmıştır.

Elastomer mesnetlerin tasarım sırasında dikkate alınması sonucu deprem davranışındaki değişim sayısal bir örnekle ile incelenmiştir.

2 AASHTO'YA GÖRE KÖPRÜLERİN DEPREME DAYANIKLI TASARIMI

2.1 Giriş

AASHTO Şartnamesi, köprülerin depreme dayanıklı tasarımı ve yapımı için hükümler içermektedir. Köprü ömrü boyunca, şartnamede tanımlanan deprem yükünün aşılma olasılığı düşüktür. Hükümlere göre tasarlanan ve inşa edilen köprülerde hasar oluşabilir, ancak göçmenin gerçekleşmemesi gerekmektedir. Depreme dayanıklı tasarımın amaçları şu şekilde belirtilmektedir:

1. Yapı ömrü boyunca oluşma olasılığı yüksek, hafif ile orta şiddet arasındaki depremlerde köprü elemanlarının elastik sınırlar içinde kalması ve en az hasarın oluşması,
2. Tasarımda esas olan deprem hareketinde gerçekçi deprem hareketinin ve kuvvetlerinin bulunması ve kolonlardaki plastik mafsal oluşması sınırında onarılabilecek hasarların oluşması,
3. Büyük depremlerde köprünün tümünün ya da kısmen göçmesini engellemektir

2.2 AASHTO'nun Tarihsel Gelişimi

Son 50 yıl içinde deprem mühendisliğinde ve ulaştırma yapılarının uygulamalarında önemli değişiklikler olmuştur [15]. Bu bölümde ABD'de köprülerin deprem yüklerine göre hesabının tarihçesi özetlenmiştir. Yıllar içindeki değişimleri görmek için AASHTO'nun belli süreler içinde revize edip yayınlandığı tasarım kriterleri arasındaki farklara bakmak gerekir.

- Amerikan Eyalet Karayolları Kurumu (AASHO)

Karayolu Köprüleri için Şartname'nin ilk baskısı 1931 yılında yapılmıştır. 11. baskı, AASHTO tarafından 1973 senesinde oluşturulmuştur.

- Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Kurumu (AASHTO)

1973'te Karayolları Köprüleri için Ara Şartname ve devamında Karayolları Köprüleri için Şartname'nin 12. baskısı (1975) yayınlanmıştır. 2002 yılında 17. baskıya ulaşılmıştır. Bu baskıda ortaya konan ilkeler tez kapsamında incelenecektir.

2.2.1 Standart şartname (1949 – 1961)

Depremi köprüler üstündeki etkisi ilk kez 5. baskıda (1949) göz önüne alınmıştır. Bu baskı, deprem sonucu yapıda gerilmeler oluştuğunu belirtmektedir ancak hesap yöntemi içermemektedir. 6.(1953) ve 7.(1957) baskılarda aynı kriter tekrarlanmıştır.

2.2.2 Standart şartname (1961 – 1975)

8. baskı (1959) ilk defa deprem yükünü tanımlar. Eşdeğer statik kuvvet EQ, yatay yönde köprüye etkilidir.

$$EQ = CD \quad (2.1)$$

Şartnamede yük kombinasyonları “Grup” adıyla tanımlanmıştır. Statik yüklemeler altı farklı kombinasyonla birleştirilmiştir. Deprem yükü ise Grup VII kombinasyonunun bir bileşenidir:

$$GrupVII = D + E + B + SF + EQ \quad (2.2)$$

Burada D, E, B, SF ve EQ sırasıyla yapının zati ağırlığı, yapıya etkiyen zemin basıncı, viyadük ayakları su içindeyse temel altı yüzdürme kuvveti ve ayaklara etkiyen hidrostatik basınç ve deprem yüküdür. Bu deprem yükü, 1961'de Kaliforniya İnşaat Mühendisleri Birliği'nin (SEAOC) binalar için geliştirdiği yatay yükleme koşulundan türetilmiştir

C'nin sayısal değerleri köprünün temel tipine ve zemin taşıma kapasitesine göre belirlenmiştir. Zemin taşıma kapasitesi 171kN/m²'den daha büyük zemine oturan

tekil temelli viyadüklerde C değeri 0.02, daha düşük olduğu durumlarda 0.04 belirlenmiştir. Kazıklı temellerde C=0.06 olarak seçilmektedir, [15, 16].

Grup VII kombinasyonu, emniyet gerilmeleri yöntemiyle kullanıldığından gerilmelerde %33.3'lük bir artışa izin verilmektedir. Şartnamede, deprem bölgeleri belirtilmemiştir.

9.(1965), 10.(1969) ve 11.(1973) baskılarda bu kriter değişikliğe uğramadan kullanılmıştır.

2.2.3 Standart şartname (1975 – 1992)

1971'deki San Fernando, CA depremi sonrasında birçok köprü ciddi hasar görmüş, bazıları göçmüştür. Bu olay köprülerin depreme dayanıklı tasarımında bir dönüm noktası olmuştur [3,13].

Bunun sonucunda Kaliforniya Ulaştırma Kurumu (CALTRANS), 1973 yılında köprüler için yeni deprem tasarım kriterleri yayınlamıştır. Bölgenin aktif faylara göre konumu, zeminin etkisi ve köprünün dinamik karakteristikleri hesaba katılmıştır, [2, 15,16].

1975 yılında AASHTO, Karayolu Köprüleri için Ara Şartname'nin oluşturulmasında CALTRANS'ın tasarım kriterlerini temel almış ve ülkenin tüm bölgelerinde uygulanabilecek şekilde revize etmiştir, [2, 15, 16].

Eşdeğer statik yük EQ, yakın rijitliğe ayaklara sahip köprüye herhangi bir yatay yönde etkitilecektir.

$$EQ = C_B FD \quad (2.3)$$

Burada D yapının ağırlığını, F tekil kolonlar için 1, çerçeve sistemler için 0.8 olmak üzere çerçeve faktörünü ve C_B birleştirilmiş davranış katsayısını temsil etmektedir:

$$C_B = A_{\max} R_N S / Z \quad (2.4)$$

Bu bağıntıda :

A_{max} : Beklenen Maksimum Yer ivmesi (Risk haritalarından alınan değer)

R_N : Kaya için belirlenmiş ve $1g$ 'ye göre normalize edilmiş spektral ivme değeri

S : Zemin büyütme katsayısı

Z : Deprem yükü azaltma katsayısı. Elastik olmayan şekil değiştirmeleri hesaba katmak için yapı eleman tiplerine bağlı olarak hesaplanır

A_{max} değeri, I., II. ve III. deprem bölgeleri için sırasıyla 0.09g, 0.22g ve 0.5g olarak belirlenmiştir.

San Francisco, CA, St. Louis, MO ve Charleston, SC şehirleri geçmişte yaşanan büyük depremlerden dolayı III. bölgede ayrı bir bölümde gösterilmiştir. 1975 yılındaki ara yönetmelikte R_N , S ve Z için sayısal değerler verilmemiştir. Bunun yerine A_{max} 'nın farklı değerlerine ilişkin T periyodunun fonksiyonu olan C_B 'nin dört diyagramı verilmiştir. Periyod tek serbestlik dereceli sistem bağıntısından

$$T = 0.32\sqrt{\frac{W}{P}} \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanır.

Bu bağıntıda, P yapının tamamında 2.54cm (1inch) yatay deplasmanı yaratacak toplam statik yüküdür.

12. (1977), 13. (1983) ve 14. (1989) baskılarda, 1975 Ara Yönetmelikteki depreme dayanıklı tasarım kriterleri değişikliğe uğramadan tekrarlanmıştır. Buna karşın bu üç yönetmelikte ilk kez tasarımcıya emniyet gerilmeleri yöntemi (EGY) ile taşıma gücü yöntemi (TGY) arasında seçim hakkı verilmiştir. EGY ile yapılan hesaplarda Grup VII kombinasyonunda emniyet gerilmelerinde %33'lük bir artışa izin verilmekteydi. TGY'de ise Grup VII yüklemesi aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

$$GrupVII = \gamma[\beta_d D + \beta_e E + B + SF + EQ] \quad (2.6)$$

Burada, γ 1.3 değerini alır. β_d kolonların minimum eksenel yük ve maksimum moment ya da dışmerkezlilik kontrolünde 0.75, kolonların maksimum eksenel yük ve minimum moment kontrolünde 1 ve eğilme-çekme elemanlarının kontrolü için 1 değerini almaktadır. β_e yatay zemin basıncı için 1.3 ve rijit çerçevelerde pozitif moment elde etmek için 0.5 olarak seçilir.

2.2.4 Standart şartname (1992-2002)

ATC, 1981'de Federal Karayolları İdaresi (FHWA) sponsorluğu altında Köprüler için Deprem Tasarım Kılavuzunu yayınlamıştır. Bu kılavuz ATC-6 olarak bilinmektedir. Bu çalışma AASHTO yönetmeliğine ilk önce 1983 yılında ek kılavuz olarak, sonra 1990 yılında deprem şartları olarak ilave edildi.

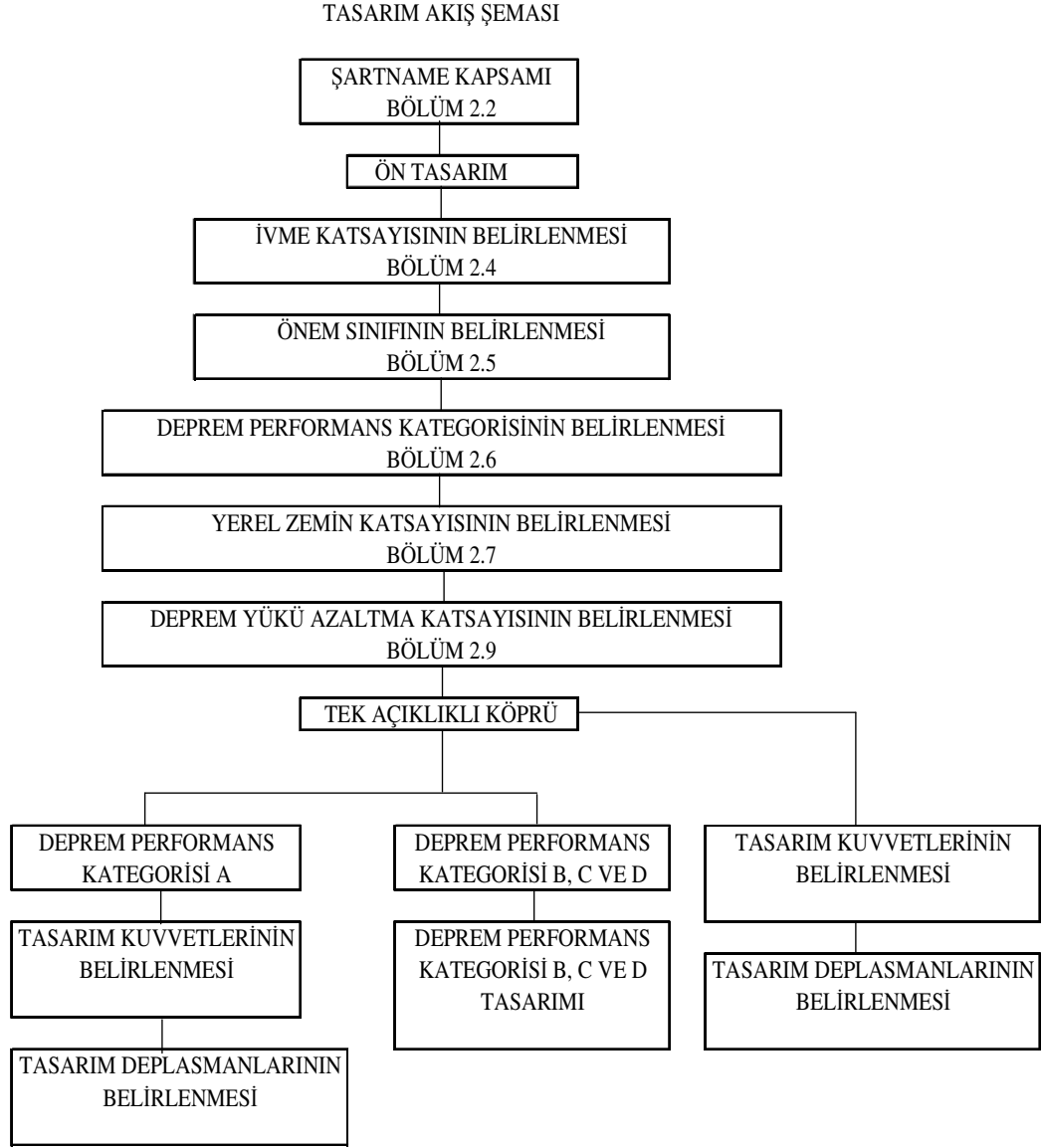
ATC-6'nın hazırlanmasının ardından geçen süre içinde deprem mühendisliğinde önemli ilerlemeler yaşanmıştır. 1989 Loma Prieta, CA depremi, 1990 ve 1991 Kosta Rika ve Filipinler depremleri ve 1994 Northridge, CA depremi şartnameler ve köprü performansları için ciddi deneyimler olmuştur [8].

1992 yılında AASHTO'nun kriterlerin tekrar gözden geçirilmesi isteği üzerine Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırmaları Merkezi (NCEER) tasarım şartlarını inceleyerek güncellenmiştir. Bu çalışma AASHTO Standart Şartname'nin 15.(1992), 16.(1996) ve 17. (2002) baskılarının "Deprem Dayanıklı Tasarım" bölümünü oluşturmaktadır.

2.3 Şartname Kapsamı

Şartnamenin IA adındaki bölümü, yeni yapılacak köprülerin depreme dayanıklı tasarım ve yapımı için oluşturulmuştur. Şartname, çelik ve öngermeli/betonarme kirişli ve kutu kesitli olmak üzere açıklıkları 150m'yi geçmeyen köprüler için uygulanmaktadır. Kapsamı dışındakiler asma, kablolu, kemer tipi ve hareketli köprülerdir.

Şartname minimum koşulları belirlemektedir. Tek açıklı köprüler için ayrıntılı deprem hesabı gerekmemektedir.



Şekil 2.1: AASHTO Tasarım Akış Şeması

2.4 İvme Katsayısı

Şartnamenin uygulanmasında kullanılacak ivme katsayısı (A), risk haritalarından belirlenmektedir, Şekil 2.2. AASHTO’da ivme katsayılarıyla tanımlanan deprem yükünün 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı yüzde 10’dur (75 yıllık sürede aşılma olasılığı %15'e yakındır). Bu değer yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna eşittir.

Aşağıda sözü geçen durumlarda, “yere özel” ivme katsayılarının uzmanlarca belirlenmesi gerekir:

- Aktif fay hattına yakın olan yerler
- Bölgede düşük olasılıklı depremlerin beklenmesi (<%10)
- Köprünün önemine göre uzun süre kullanılması (>50 yıl)

Örnek olarak, 250 yıllık kullanma ömrüne sahip önemli bir köprünün tasarım depreminin bu süre içinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanıyorsa, dönüş periyodu 2400 yıla denk gelmektedir. ABD’deki bazı eyaletler kendi risk haritalarını geliştirmiştir. Bu eyaletlerin birçoğu 475 yıllık dönüş periyodunu kullanmaktadır.

Türkiye’de ise DBYBHY, bina önem katsayısı $I=1$ olan yapılar için tasarım depreminin 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanmaktadır. Tasarım depreminde can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasarın oluşması sınırlandırılmalıdır [1].

AASHTO’nun köprü yönetmeliği ve DBYBHY’in bina yönetmeliği olduğu göz önüne alınırsa iki yönetmeliğin ortaya koyduğu şartları eşleştirmek doğru görünmemektedir. Ancak uygulamada deprem parametrelerinin yönetmeliğimizden seçilmesi zorunluluğu bu karşılaştırmanın yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu yüzden her iki yönetmeliğin aynı tasarım depremini ve benzer deprem performans kriteri tanımladığı kabul edilirse AASHTO’nun verdiği tasarım spektrumların oluşturulmasında Türkiye deprem bölgesi haritasındaki ivme değerlerinin kullanılabilmesi sonucuna varılabilir.

DBYBHY’de hastaneler gibi çok önemli yapılarda deprem yükü hesaplarında ivmeler 1.5 ile arttırılmaktadır. AASHTO şartnamesi yapı önem katsayısı tanımlamamaktadır. Gerekli güvenlik koşulları deprem yükü hesabından bağımsız olarak kesitlerin boyutlandırılmasında ve köprü stabilitesinin korunmasında sağlanmaktadır. Köprülerin yönetmeliğimizce önemli olduğu kabul edilip uygulanan deprem yükünün %50 büyütülmesi mühendis ve işverenin yorumuna bırakılmıştır.

2.4.1 İvme Katsayısının Gelişimi

Şartnamede kullanılan ivme katsayısı esasen binalar için geliştirilen ATC-3-06 (1978) adındaki çalışmadan elde edilmiştir. Yer hareketinden oluşan ivme ve bundan türetilen elastik davranış spektrumu taşıyıcı sistem tipine bağlı olmadığından ATC-3-06'daki ivme değerleri köprüler için de kullanılabilir [7].

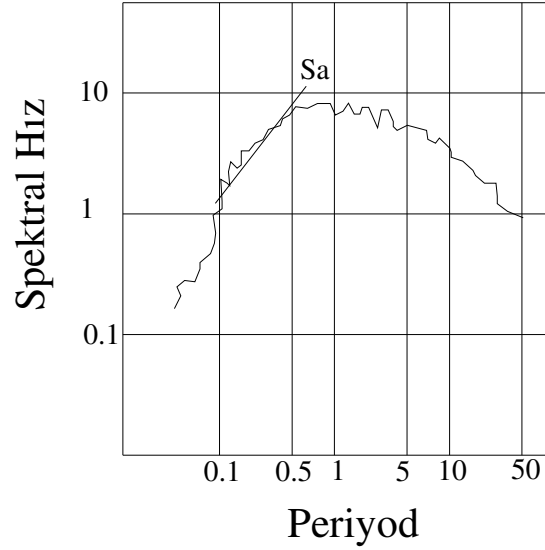
ATC-3-06'da iki ivme katsayısı ve buna ilişkin iki harita oluşturulmuştur. Bu iki katsayı, Efektif İvme Katsayısı A_a ve Efektif Hıza bağlı İvme Katsayısı A_v 'dir. İki ivme için de eyalet haritaları ve eş yükselti eğrili harita bulunmaktadır. Köprüler için Deprem Tasarım Kılavuzunun (ATC-6) oluşturulma aşamasında yalnızca efektif hıza bağlı ivmenin kullanılması ve buna İvme Katsayısı (A) denmesine karar verilmiştir. Tasarımda kolaylık sağlamak için yalnızca eş yükselti eğrilerinden oluşan risk haritası seçilmiştir. ATC-6 projesi 1983 yılındaki AASHTO şartnamesine ek kılavuz olarak eklenmiştir. Günümüzdeki şartnamede bulunan risk haritası ise 1988 yılında ABD Harita Kurumu'nun oluşturduğu ve NEHRP'nin yayınladığı yeni yapılacak binalar için deprem hükümlerini içeren çalışmadakinin aynısıdır .

2.4.2 Yer Hareketi Parametreleri

Yer hareketini karakterize etmeye yarayan tasarım parametresi Efektif İvme'dir (EPA). Bu parametrenin fiziksel olarak tam bir tanımı yoktur ve elastik davranış spektrumunun oluşturulmasında kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere EPA 0.1~0.5sn arasında değişen periyotlarda spektral ordinatla orantılıdır. Bu oran %5 sönümlü spektrumlar için 2.5 alınmaktadır:

$$EPA = \frac{S_a}{2.5} \quad (2.7)$$

Yatay yükün elde edilmesinde kullanılan İvme Katsayısı A, EPA'nın yerçekimi ivmesine (g) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Örnek olarak, eğer EPA 0.2g ise A=0.2 değerini almaktadır. Şekil 2.2'de gösterilen A değerleri EPA/g'nin yüzdesidir. Bu yüzden haritadan okunan A değerleri 100'e bölünerek kullanılmalıdır.



Şekil 2.2: Efektif İvmenin Davranış Spektrumundan Türetilmesi

Şartnamede EPA'nın ilişkin olduğu bölgedeki 50 yıllık sürede aşılma olasılığı %10'dur. Gerçekte bu olasılık kesin olarak hesaplanamamaktadır. Buna ek olarak haritalar sismologlar tarafından basitleştirildiği için deprem riski her yerde aynı olmamaktadır. Bu nedenle tasarım yer hareketinin aşılmama olasılığı %80~90 aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Tasarım ömrü olarak seçilen 50 yıllık zaman dilimi, tüm yapılar için geçerli olmamaktadır, [5].

2.4.3 İvme Hesaplama Yöntemleri

Bir bölgeye ait ivmenin belirlenmesinde deterministik ve probabilistik yöntem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

Deterministik yöntemde ivme düzeyi deprem kaynağının yerine ve büyüklüğüne göre hesaplanmaktadır. Kaynak yeri ve deprem büyüklüğüne (magnitüd) göre deneysel olarak bölgenin yer ivmesi bulunmaktadır.

Diğer bir yaklaşım probabilistik yöntemdir. Bu yöntemde ivme düzeyi, bölgenin yakınındaki aktif bölgelerde depremin oluşma olasılığının bir fonksiyonu olarak çıkarılmaktadır. Bu çıkarımda köprünün kullanılma ömrü, yakındaki tüm kaynakların büyüklüğü, yeri ve aktivite durumları ve kaynak ile bölge arasında yer hareketinin azalması göz önüne alınmaktadır. Bu yöntemde hesaplanan oluşma olasılığı depremin ortalama dönüş periyodu ile tam ilişkilidir. Başka bir deyişle 50 yıllık

kullanma ömründe %10'luk aşılma olasılığına sahip yer hareketinin dönüş periyodu yaklaşık 475 yıla eşittir. Bu periyod aşağıda verilen bağıntıyla hesaplanabilir:

$$P(A_{maks} > A) = 1 - e^{-\frac{T}{R}} \quad (2.8)$$

Burada P maksimum ivmenin aşılma olasılığını, T yapı kullanma ömrünü, R depremin dönüş periyodunu simgeler. Dönüş periyodları ve aşılma olasılıkları arasındaki ilişki Tablo 2.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Dönüş Periyodları ve Aşılma Olasılıkları

Dönüş Periyodu (Yıl)	Aşılma Olasılığı	
	50 yıl kullanım süresi	100 yıl kullanım süresi
25	%86	%98
50	%63	%86
72	%50	%75
150	%28	%49
250	%18	%33
475	%10*	%19
950	%5	%10
2475	%2	%4

(* AASHTO'da ve DBYBHY'de tanımlanan deprem haritaları bu olasılıktan hesaplanmıştır.)

2.5 Önem Sınıflandırması

0.29'dan büyük ivme katsayılarına sahip köprülerde, Deprem Performansı Kategorisinin belirlenmesi için Önem Sınıflandırılması (ÖS) yapılması gerekir.

1. Birincil Köprüler - ÖS = I

2. İkincil Köprüler - ÖS = II

2.6 Deprem Performansı Kategorisi

Her köprü, İvme Katsayısı (A) ve Önem Sınıfına (ÖS) göre dört Deprem Performans Kategorisinden (DPK) birine atanır, Tablo 2.2. Hesap ve tasarım kuralları, DPK tarafından belirlenir.

Tablo 2.2: Deprem Performans Kategorileri (DPK)

İvme Katsayısı	Köprü Sınıflandırması	
	Birincil	İkincil
$A^* \leq 0.09$	A	A
$0.09 \leq A \leq 0.19$	B	B
$0.19 \leq A \leq 0.29$	C	C
$0.29 \leq A$	D	C

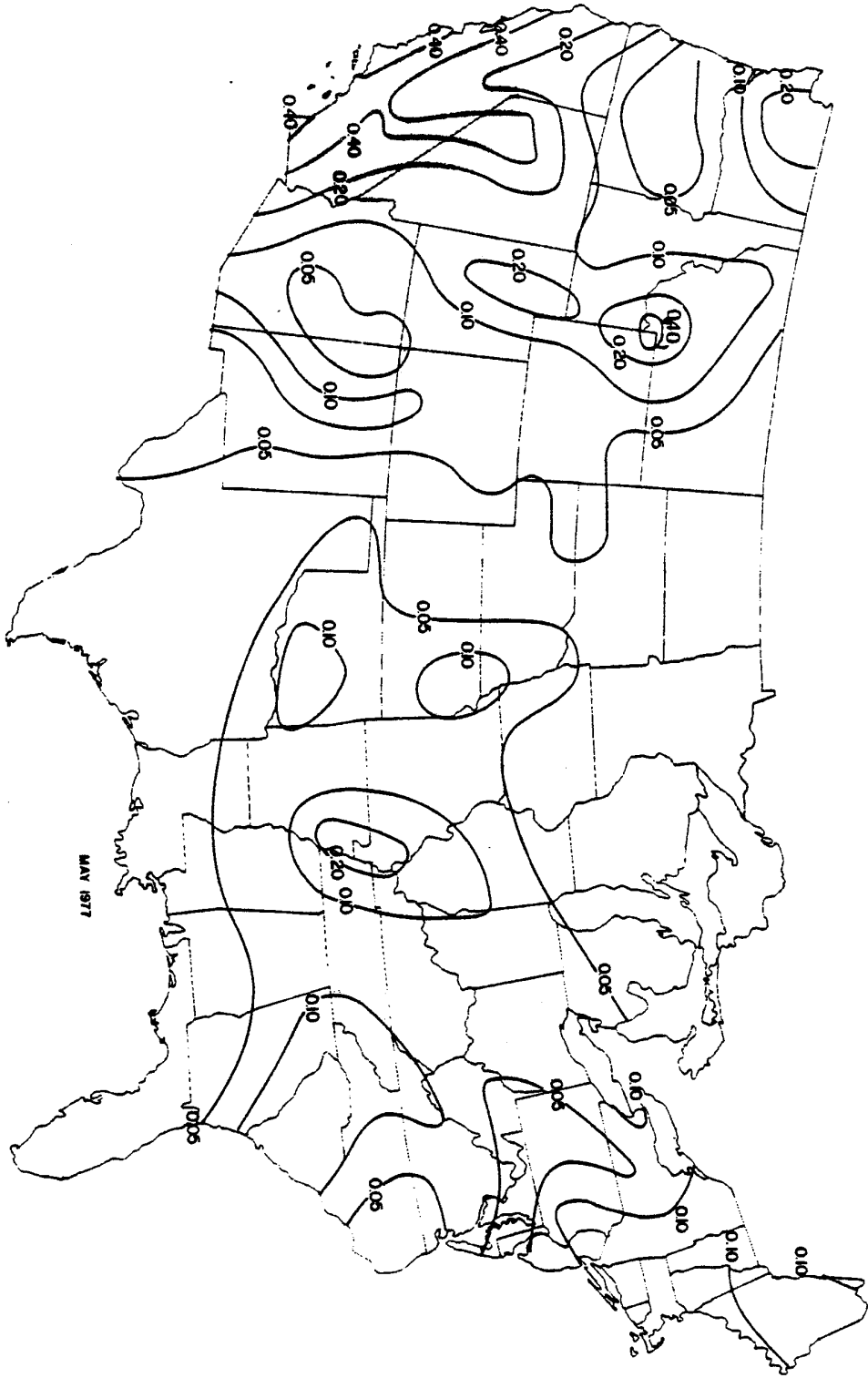
(* A değeri köprünün bulunduğu bölgeye göre risk haritalarından alınır, Şekil 2.3.)

2.7 Zemin Etkisi

Yerel zemin koşullarının köprü üzerindeki etkisi, zemin profil tiplerine bağlı olarak Yerel Zemin Katsayısı (S) ile göz önüne alınmaktadır. Dört Zemin Profil Tipi tanımlanmaktadır:

- Tip I, aşağıdaki ikisinden biridir:
 - Kaya (760m/sn'den daha büyük bir kayma dalgası hızı ile karakterize edilmektedir)
 - Kalınlığı 60m'yi geçmeyen ve kaya üzerinde bulunan kum, çakıl ya da sert kil tabakaları içeren sert zeminler
- Tip II, sert kil ya da derin kohezyonsuz zeminlerdir. Zemin kalınlığı 60m'den fazladır ve kaya üzerinde kum, çakıl ya da sert kil tabakaları bulunmaktadır.
- Tip III, yumuşak-orta serlikte kil ve kumdur.
- Tip IV, kalınlıkları 12m'yi aşan yumuşak kil ya da silttir.

Bu tipler, yaklaşık olarak yönetmeliğimizdeki Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin profiline karşı gelmektedir, [18]. Yere özel elastik deprem katsayısının uzmanlarca belirlendiği durumlarda bölge katsayısı kullanılmasına gerek kalmamaktadır.



Şekil 2.3: İvme Katsayıları – ABD

2.7.1 Yerel zemin katsayısı

Yerel Zemin Katsayısı (S) zemin koşullarının, elastik davranış katsayısı ve spektrum üzerindeki etkisini yaklaşık olarak hesaba katmak için belirlenmiştir, Tablo 2.3.

Tablo 2.3: Yerel Zemin Katsayısı (S)

	Zemin Profil Tipi			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

2.8 Elastik Deprem Davranış Katsayısı

Elastik deprem davranış katsayısı, elastik hesapta kullanılan yatay deprem kuvvetini tanımlamaktadır. Deprem yönetmeliğimizdeki spektral ivme katsayısına $A(T)$ yaklaşık olarak karşı gelmektedir.

Uzmanlarca hazırlanan %5 sönüm oranlı, yere özel davranış spektrumu bu koşulların yerini alabilir. Bu spektrumun depremselliği ve zemin koşullarını göz önüne alması gerekmektedir, [2, 3]. %2 sönümlü spektrumlarda deprem katsayıları 1.25 ile arttırabilir. Düşey deprem yükü, spektrumun ordinatları 0.67 ile çarpılması sonucu yeterli yakınlıkta hesaplanabilmektedir, [5].

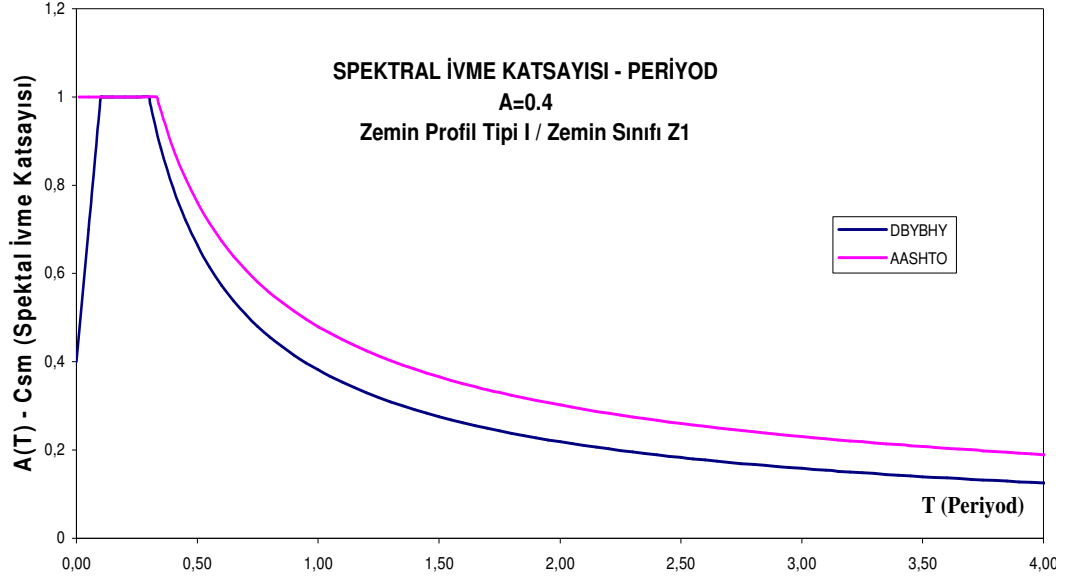
2.8.1 Mod birleştirme yöntemi için elastik deprem davranış katsayısı

Elastik deprem davranış katsayısı C_{sm} , tasarım kuvvetlerinin belirlenmesi için aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

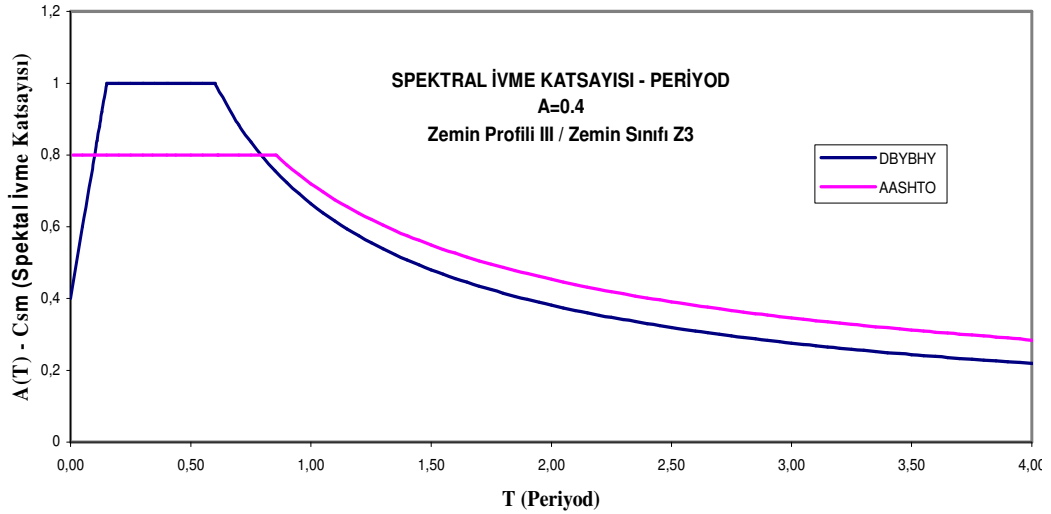
$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (2.9)$$

Burada, A risk haritasından okunan İvme Katsayısı (Şekil 2.3), S Boyutsuz Yerel Zemin Katsayısı (Tablo 2.2) ve T_m köprünün m'inci titreşim moduna ilişkin periyoddur

C_{sm} değerinin $2.5A$ 'yı geçmemesi gerekmektedir. Zemin Profil Tipinin III ya da IV ve $A \geq 0.30$ olduğu yerlerde C_{sm} $2.0A$ 'den fazla olamaz, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5.



Şekil 2.4: DBYBHY ve AASHTO Spektrumları (A=0.4/Zemin Profili I)



Şekil 2.5: DBYBHY ve AASHTO Spektrumları (A=0.4/Zemin Profili III)

2.9 Deprem Yüğü Azaltma Katsayıları

Deprem Performans Kategorisi B, C ya da D olan köprülerin eleman ve bağlantıları için tasarım kuvvetleri, elastik deprem kuvvetlerinin uygun bir Deprem Yüğü Azaltma Katsayısına (R) bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu azaltma katsayıları Tablo 2.4'de verilmiştir. Bu katsayılar, deprem yönetmeliğindeki taşıyıcı sistem davranış katsayısının karşılığıdır.

Tablo 2.4: Deprem Yüğü Azaltma Katsayıları [2, 17]

Altyapı ¹	R	Bağlantı ³	R
Perde Ayak ²	2	Üstyapı ile Kenarayak arasında	0.8
Betonarme Kazık Grubu		Üstyapıda genişleme derzi	0.8
a.Yalnız düşey kazıklar	3		
b.Eğik kazık varsa	2		
Tek kolon	3	Kolon, ayak veya kazık grubu ile başlık kirişi ya da üstyapı arasında ⁴	1
Çelik ya da Kompozit Kazık Grubu		Kolon ya da ayak ile temel arasında ⁴	1
a.Yalnız düşey kazıklar	5		
b.Eğik kazık varsa	3		
Çerçeve türü Ayak	5		

1. R katsayısı altyapının iki dik aksı için kullanılmalıdır.
2. Perde ayak, zayıf doğrultuda kolon gibi düşünülerek tek kolona ilişkin R katsayısı ile hesaplanabilir. Gerekli etriye şartlarının sağlanması gerekmektedir.
3. Kesme ve eksenel yükü aktarmaya yarayan mekanik gereçlerdir (örneğin mesnetler ve deprem takozu). Katsayılar sadece bağlantı aracı yardımıyla hareketi engellenmiş doğrultuda oluşan kuvvete uygulanmalıdır.
4. Bağlantılar kolonda oluşan plastik mafsala ilişkin en büyük kuvvetlere göre hesaplanabilir. Eksenel kuvvete ilişkin bulunan nominal moment kapasitesi, dayanımdaki artış göz önüne alınarak 1.30 ile artırılmalıdır.

2.10 Elastik Kuvvetlerin ve Yerdeğıştirmelerin Belirlenmesi

Deprem kategorisi B, C ya da D olan köprülerin iki dik aksındaki elastik kuvvetler ve yerdeğıştirmeler her aks için bağımsız olarak Bölüm 2.13’de açıklanan hesap esasları yardımıyla belirlenir. Elde edilen değerler, Bölüm 2.10’a göre birleştirilir. Genelde iki dik aks olarak, köprü boyuna ve enine yönü seçilmektedir. Yine de seçim tasarımcıya bırakılmıştır. Kurptaki köprülerde, boyuna aks olarak iki kenar ayağı birleştiren hayali bir çizgi düşünebilir.

2.11 Ortogonal Deprem Kuvvetlerinin Birleştirilmesi

Ortogonal deprem kuvvetlerinin birleştirilmesi, deprem hareketinin yönündeki belirsizliği ve yatayda iki dik yönde deprem kuvvetlerinin eşzamanlı oluşma olasılığını hesapta göz önüne almak için yapılmaktadır.

İki dik yönde hesaplanan elastik deprem kuvvetlerin birleştirilmesiyle aşağıdaki iki “Yük Durumu” oluşturulmaktadır:

- Yük Durumu 1: Boyuna doğrultuda hesapta elde edilen elastik kuvvetin mutlak değerinin (Q_x) tamamına, diğer dik (enine) doğrultuda elde edilen mutlak değer (Q_y) %30'unun eklenmesiyle, her elemanın asal eksenlerindeki elastik kuvvetler bulunur.

$$Q_x + 0.3Q_y \quad (2.10a)$$

- Yük Durumu 2: Enine doğrultuda hesapta elde edilen elastik kuvvetin mutlak değerinin (Q_y) tamamına, diğer dik (boyuna) doğrultuda elde edilen mutlak değer (Q_x) %30'unun eklenmesiyle, her elemanın asal eksenlerindeki elastik kuvvetler bulunur.

$$Q_y + 0.3Q_x \quad (2.10b)$$

2.12 Minimum Mesnet Genişlikleri

Tüm köprülerde, deprem performans kategorisi (DPK) ve açıklık sayısından bağımsız olmak üzere her kiriş derzinde minimum mesnet genişlik koşulları sağlanmalıdır, Şekil 2.6.

Mesnet genişlikleri için, deprem performans kategorilerine göre farklı bağıntılar verilmiştir.

DPK A ve B:

$$N = (203 + 1.67 + 6.66H)(1 + 0.000125S^2) \text{ (mm)} \quad (2.11a)$$

DPK C ve D:

$$N = (305 + 2.5L + 10H)(1 + 0.000125S^2) \text{ (mm)} \quad (2.11b)$$

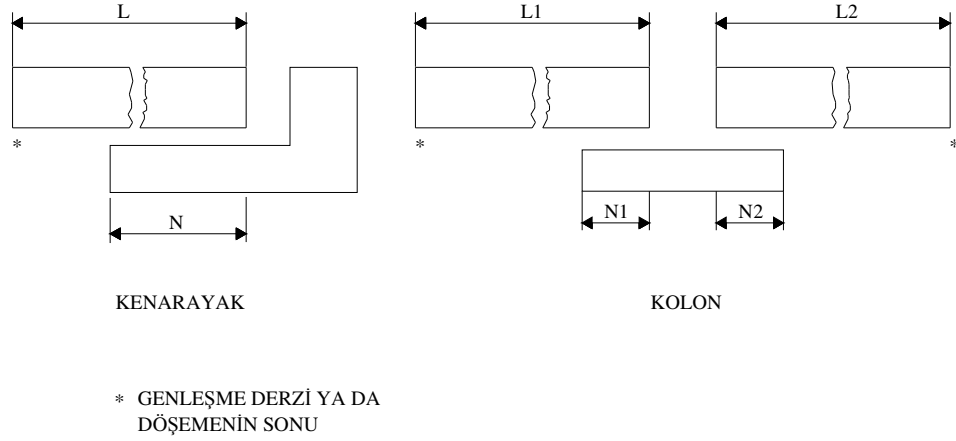
Burada,

N: Kolon ya da kenar ayak mesnet yüzünden ölçülen gerekli mesnet genişliği,

L: İki genişleme derzi arasındaki köprü döşemesinin uzunluğu,

S: Verevlik açısıdır

H: Kenar ayaklarda, bir sonraki genişleme derzine kadar olan kolonların ortalama boyudur. Kolon ve ayaklarda, kolon ya da ayak boyu alınmaktadır.



Şekil 2.6: Minimum Mesnet Genişlikleri

2.13 Hesap Esasları

Köprülerin deprem yükü altındaki hesabında dört farklı çözüm yöntemi verilmektedir:

1. Düzgün yayılı yük yöntemi
2. Tek modlu spektrum çözüm yöntemi (SMSM)
3. Çok modlu spektrum çözüm yöntemi (MMSM)
4. Zaman tanım alanında çözüm yöntemi

Her yöntemde ayakların, kolonların ve kenarayak mesnetlerinin aynı zamanda aynı yer hareketine maruz kaldığı kabul edilmiştir. Hesaplar sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinde, Bölüm 2.9'de tanımlanan deprem yükü azaltma

katsayıları kullanılmayacak ve Bölüm 2.12’de DPK B, C, D için hesaplanacak minimum mesnet genişlikleriyle karşılaştırılacaktır.

2.13.1 Çözüm yönteminin seçilmesi

Tek açıklıklı köprülerde ivme katsayısına bağlı olmaksızın ve DPK A’daki tüm köprülerde dinamik hesaba gerek olmadığı belirtilmiştir. Düzenli ya da düzensiz olması fark etmeksizin iki ya da daha fazla açıklığa sahip diğer tüm köprülerde, tek modlu spektrum çözüm yöntemi (SMSM) ya da çok modlu spektrum çözüm yönteminden (MMSM) biri uygulanabilir. SMSM, SPC B, C ve D’deki düzenli köprüler için minimum hesap olarak tayin edilmiştir. Bununla birlikte MMSM, aynı kategorilerde düzensiz köprüler için minimumdur, Tablo 2.5. Tabloda verilen minimum hesaplar yerine daha ayrıntılı sonuç veren zaman tanım alanında çözüm yapılabilir.

Tablo 2.5: Minimum Gerekli Hesap

Deprem Performans Kategorisi	2-6 açıklıklı düzenli köprüler	2 ya da daha çok açıklı düzensiz köprüler
A	Gerekmez	Gerekmez
B, C, D	Düzgün Yayılı ya da SMSM	MMSM

Düzensiz köprü, iki kenarayak arasında kütlede, rijitlikte ve/ya da geometride ani ve olağandışı bir değişiklik olan köprüye verilmiş tanımdır. Düzenli köprü ise düzensiz köprü tanımı dışındaki köprülerdir. Tablo 2.6’de düzenli köprülerin koşulları verilmiştir.

Tablo 2.6: Düzenli Köprü Koşulları

Açıklık sayısı	2	3	4	5	6
En büyük kapsam açısı (eğri eksenli köprü)	90 ⁰	90 ⁰	90 ⁰	90 ⁰	90 ⁰
Bir açıklıktan diğerine en büyük açıklık oranı	3	2	2	1.5	1.5
Bir açıklıktan diğerine en büyük ayak rijitliği oranı	-	4	4	3	2

2.13.2 Düzgün yayılı yük yöntemi

Bir eşdeğer statik çözüm şekli olan bu yöntem, boyuna ve enine yönde deprem kuvvetinin bulunması için kullanılmaktadır. Bu yöntem deprem davranışında esas olarak birinci titreşim modunun etkili olduğu düzenli köprüler için uygundur. İç

kuvvet ve yerdeğiştirmeler yeter doğrulukta hesaplanmaktadır. Köprü doğal periyodu (T), köprünün tüm ağırlığı (W) ve genel rijitlik (K) ile hesaplanmaktadır:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (2.12)$$

Elastik deprem katsayısı C_{sm} (2.9) yardımıyla bulunur. Köprüye etkitilecek eşdeğer statik deprem yükü (p_e), aşağıdaki denklemlerle bulunmaktadır (L: Köprü boyu).

$$p_e = \frac{C_s W}{L} \quad (2.13)$$

Bu yöntem sonucunda kenarayaklarda enine kesme kuvvetleri %100'e yakın daha büyük çıkabilmektedir. Bu durum istenmediği halde tek modlu spektrum çözümü önerilmektedir, [18].

2.13.3 Tek modlu spektrum çözüm yöntemi

Düzgün köprülerin hesabında kullanılan ve her iki doğrultudaki ilk modu göze alan Rayleigh analizine dayanan bir yöntemdir. Bağıntılar genel rijitlik, kütle ve mod şekillerindeki kütle katılımlarına göre verilmektedir. SMSM ile düzgün yayılı yük yöntemine göre daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.

2.13.4 Çok modlu spektrum çözüm yöntemi

Çok modlu spektrum hesabı tüm düzensiz köprülerde yapılmalıdır. Geometrisi düzgün olmayan köprülerde, modları basitleştirmek mümkün olmadığı gibi, toplam etkiyi elde etmek için birden fazla titreşim modunun hesaba katılması gerekmektedir. Enine ve boyuna titreşim modlarının etkileşimini göz önüne alabilecek üç boyutlu çerçeve çözümüne dayalı bir bilgisayar programı kullanılmalıdır, [15, 18].

Köprü taşıyıcı sistemi, yapının tüm rijitlikleri ve atalet etkileri göz önüne alınarak üç boyutlu olarak modellenmelidir. Her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi olmalıdır. Yapı kütlesi en az üç öteleme yönünde tanımlanmalıdır. Yapıya ilişkin tüm elemanların kütlesi hesaba katılmalıdır. Genellikle hareketli yüklerin atalet etkileri hesapta alınmamaktadır. Ancak yoğun trafiğin olduğu büyük şehirlerde hareketli

yükün zati yüklere oranı yüksek olmaktadır. Bu durumlarda hareketli yük dahil edilebilir, [15].

Üstyapı çubuk elemanları, birleşim ve mesnet noktaları dışında en az dörtte bir noktalarında tanımlı düğüm noktaları ile modellenmelidir, [18]. Derzler ve deprem takozları uygun rijitlikteki birkaç elemanla temsil edilebilir.

Orta kolon ve ayaklar da çubuk eleman olarak modellenmelidir. Kısa ve rijit ayaklarda orta düğüm noktaları gerekmektedir. Uzun ve esnek ayakların üçte bir noktalarında düğüm noktaları tanımlanmalıdır. Modelde kolonların üstyapıya göre dışmerkezliliği oluşturulmalıdır. Temel zemini koşulları istenirse ayak altlarında ve kenarayaklarda eşdeğer doğrusal yaylarla tanımlanabilir.

Periyodlar ve mod şekilleri, mesnetli taşıyıcı sistemin kütle ve elastik rijitliği kullanılarak bulunmaktadır. En az açıklık katsayısının 3 katı ve en çok 25 mod göz önüne alınarak çözüm yapılmalıdır. Eleman iç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri, mod etkilerinin Tam Karesel Birleştirme Kuralıyla (CQC) birleştirilmesiyle bulunmaktadır.

2.13.5 Zaman tanım alanında çözüm yöntemi

Deprem kayıtları kullanılarak zaman artımı ile çözüm yapılabilir. Yerel kayıt yoksa, yerel spektruma uyumlu en az beş deprem kaydı kullanılmalıdır. Yere özel spektrum bulunmadığı durumlarda (2.9)'da verilen deprem katsayısı ile bu spektrumlar oluşturabilir.

Zaman tanım alanında hesabın inelastik yapılması durumunda Bölüm 2.9'de verilen azaltma katsayısı R elemanlar ve bağlantılar için 1.0 değerini almaktadır.

3 ELASTOMER MESNETLER

3.1 Giriş

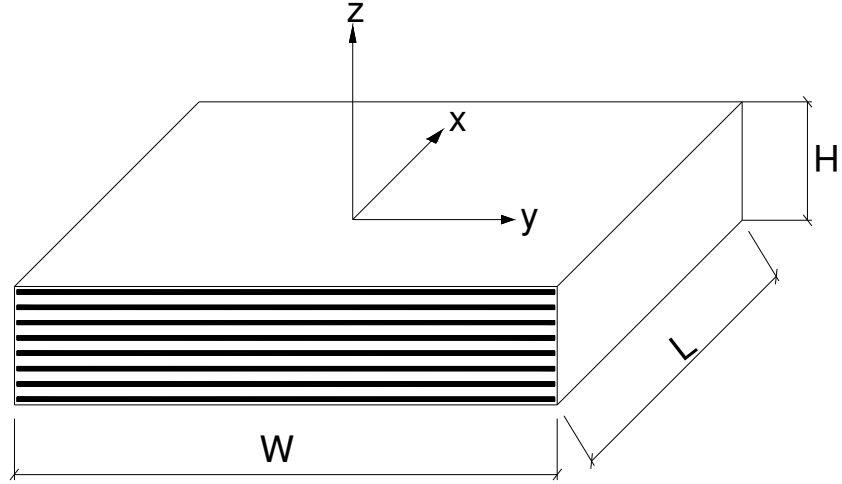
Köprü tasarımında üstyapı ve köprü ayakları arasındaki bağlantı moment aktaracak biçimde ya da basit mesnetli olabilir. Türkiye’de çoğunlukla prekast kirişli betonarme köprülerin üstyapıları elastomer mesnetli olarak tasarlanmaktadır. Bu sistemler ABD’de 1960 yılından beri yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Bu çalışmada bu tip köprüler üzerine uluslararası şartnameler ve kaynaklar yardımıyla bir tasarım özeti hazırlanmış, Türkiye’ye uyarlanmaya çalışılmıştır.

Elastomer köprü mesnetleri, kısmen ya da tamamen elastomerden üretilmiş, köprüyle ona mesnetlik yapan yapı arasında yüklerin iletilmesi ve yerdeğiştirmelerin sınırlandırılması/kontrol edilmesi amacıyla geliştirilmiş araçlardır. AASHTO şartnamesinde 14. bölüm, yalnız elastomerden oluşan yastık mesnetlerin ve çelik plakayla güçlendirilmiş mesnetlerin tasarımını kapsamaktadır. Güçlendirilmiş mesnetler çelik plakaların tabakalı olarak elastomer katmanları arasına yapıştırılmasıyla üretilmektedir, Şekil 3.1. Vulkanizasyon adı verilen bu işlem özel kurutma dolaplarında yüksek ısı ve basınç altında yapılmaktadır. Birleşen elastomerlerin maddesi doğal kauçuk (polyisoprene) ya da neopren (polychloroprene) adı verilen sentetik kauçuktur. İç plakalara ek olarak, mesnetlerin altına ve üstüne çelik yük plakaları eklenebilir, [2, 3, 16], Şekil 3.2.

3.2 Elastomer Mesnetlerin Üstünlükleri

Elastomer mesnet en basit ve ekonomik mesnet tiplerinden biridir. Çelik plakalarla güçlendirilmiş elastomerler, öngerilmeli kirişli köprü sistemlerinde ekonomi ve kolay üretim üstünlükleriyle tercih edilmektedirler.

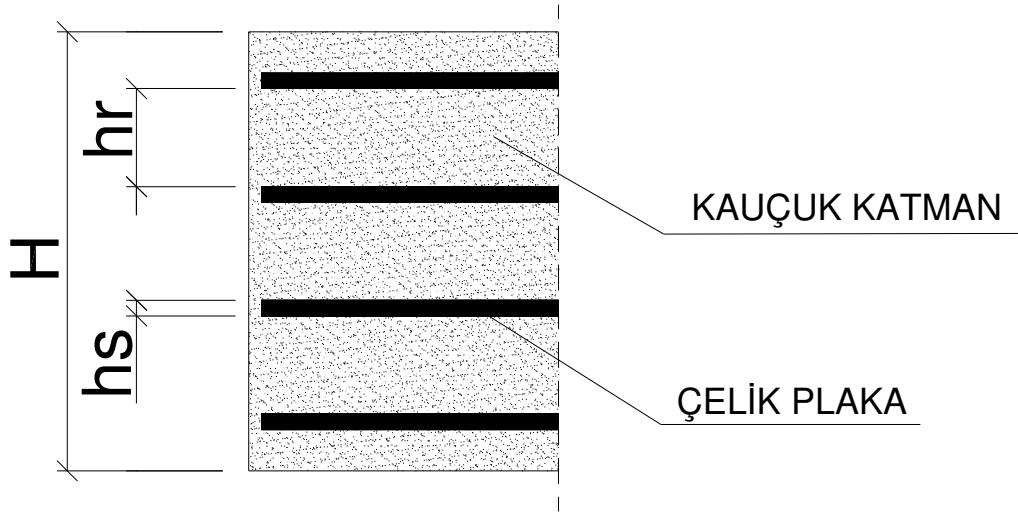
Çelik plakalı elastomer mesnet, elastomerin iç kayma esnekliğı sayesinde yatay doğrultuda köprü hareketlerine izin vermektedir. Kayma esnekliğı, dönmeye karşı da elastomeri esnek yapmaktadır.



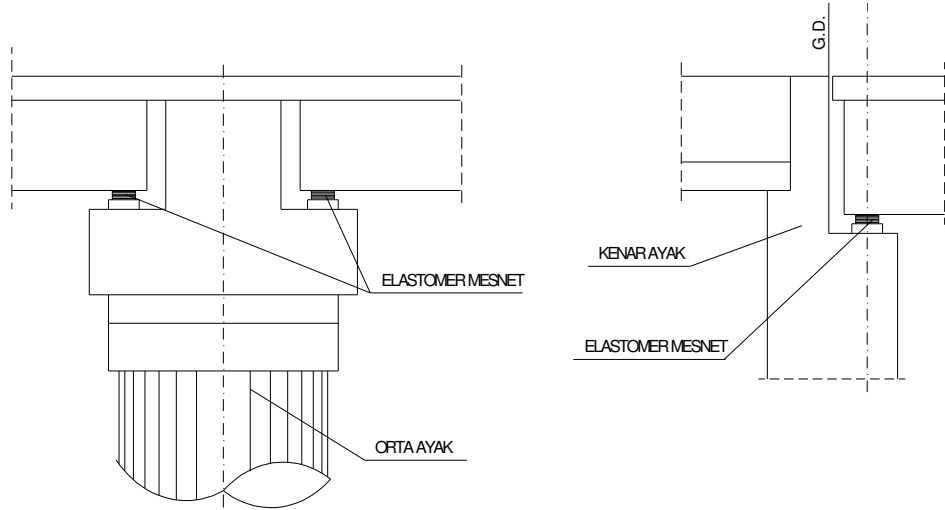
ELASTOMER MESNET DETAYI

x: Köprü boyuna eksen
y: Köprü enine eksen
z: Düşey eksen

Şekil 3.1: Elastomer Mesnet



Şekil 3.2: Elastomer Mesnet Kesiti



Şekil 3.3: Üstyapı ile Altyapı Arasındaki Bağlantı

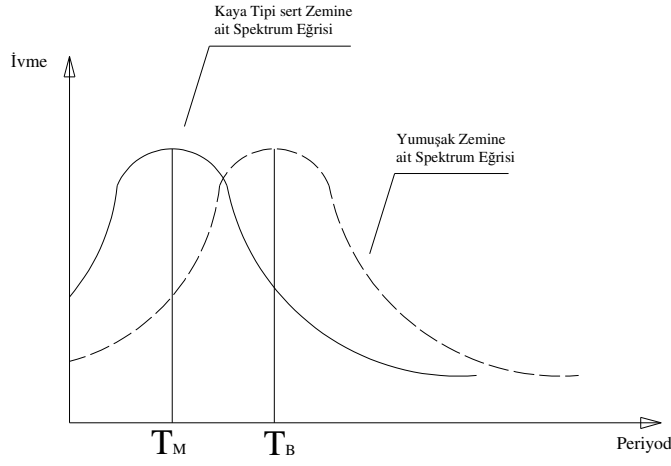
Çelik plakalar, elastomer katmanların yanlara doğru yayılmasını sınırlandırır. Güçlendirilmiş mesnetler, diğer köprü mesnetlerine göre yüksek gerilmelere karşı koyabilmektedirler. Bu özelliğin sağlanması için üretim sırasında yeterli sayıda testin yapılması gerekmektedir, [4].

Mesnetler yardımıyla altyapıya aktarılan yatay kuvvet miktarı, mesnet tasarımına ve enine doğrultuda yerdeğiştirmelerin takozlarla engellenmesine bağlıdır, Şekil3.3. Elastomer mesnetlerde, yerdeğiştirmeyle orantılı olarak mesnet kuvveti oluşur. Mesnetin rijitliği, mesnet boyutları ve kauçuk kalınlığı değiştirilerek istenilen şekilde ayarlanabilir. Mesnetlerle ilgili detaylar üreticilerden ve araştırma sonuçlarından elde edilebilir.

Elastomer mesnetli köprülerin en büyük üstünlüğü, üstyapının deprem durumunda kolonlardan aktarılan momentlere maruz kalmamasıdır. Basit kiriş-döşeme üstyapıları bu tipe örnektir. Basit kiriş, prekast kirişlerin her açıklıkta ayaklar üstünde serbestçe oturduğu taşıyıcı sistemdir. Betonarme döşeme, prekast kirişlerin üstünde sürekli ve gerekli yerlerde derzlerle oluşturulmaktadır.

Üstyapı ve altyapının, esnek mesnetlerle birbirinden ayrılması yapı doğal periyodunun uzamasına neden olur, Şekil3.4. T_M , monolitik yapıya ait periyodu, T_B ise elastomer mesnetli yapının periyodunu simgeler. Şekil 3.4’de elastik ivme değerlerinde önemli bir düşüş görülmektedir. İvmedeki azalışın oluşması için

başlangıç periyodunun düşük ve artan periyodlarda spektrum eğrisinde hızlı bir azalışın olması gerekmektedir. Bu durum kaya tipi zeminlerde oluşmaktadır, [23].



Şekil 3.4: Farklı Zemin Spektrum Eğrileri

Altyapı sistemi olarak tekil kolon seçilirse, boyuna ve enine doğrultularda düşey konsol davranışı oluşmaktadır. Dairesel kesit kullanılırsa yatay kuvvete karşı dayanım, deprem yönünden bağımsız bir şekilde belirlenebilir. Bu durum optimum kolon tasarımını sağlamaktadır.

Elastomer mesnet kullanımı, depremde oluşan kuvvetlerin karşılanma yerini ve miktarını belirleme seçeneğini sunmaktadır. Kısa ve rijit ayaklara gelen büyük yatay kuvvetler, üstyapıyla kolon arasına elastomer mesnet konarak azaltılabilir. Elastomer mesnetlerden yararlanılması durumunda, ayaklara etkiyen yatay kuvvetlerin farklı rijitlikteki elastomerlerle dengelenmesi mümkündür. Diğer bir deyişle, esnek ayaklarda daha rijit mesnetler kullanılarak deprem kuvvetleri ayaklara istenilen şekilde dağıtılabilir.

3.3 Elastomer Mesnetlerin Sakıncaları

Elastomer mesnetlere oturan üstyapılı köprüler, deprem sonucu ortaya çıkan yatay yerdeğiştirmelere karşı monolitik köprülere göre daha hassastır. Maksimum yerdeğiştirme değeri yapıdaki rijitlik kaybı nedeniyle önemli şekilde artmaktadır. Çerçeve tipi ayaklar enine yük etkisinde çerçeve olarak çalışmalarına karşın boyuna doğrultuda monolitik bağlantının aksine düşey konsol davranışı göstermektedirler.

Temellere etkiyen deprem momentlerinin azaltılması amacıyla kolon alt uçlarında oluşturulan mafsal detayı bu sınıftaki yapılarda yasaktır.

Zayıf zeminlerde spektral ivmenin en büyük değeri uzun periyotlarda oluşmaktadır. Böyle bir durumda monolitik tasarımda elde edilen ivme değeri, elastomer mesnetli üstyapı seçimine göre daha düşük olabilmektedir, Şekil 3.4.

Tasarım düzeyinden daha büyük depremlerde, altyapıyla üstyapının ayrılmasından kaynaklanan labil sistem davranışı, köprüyü hasara ve göçmeye karşı daha yatkın hale getirmektedir.

3.4 Elastomer Mesnet Tasarımı

3.4.1 Elastomer mesnet özellikleri

AASHTO'ya göre elastomer mesnetlerin en önemli özelliği kayma modülüdür (G) [3]. Bu yüzden elastomerin tanımlanması için kayma modülü tercih edilmektedir. Sertlik testinin hızlı ve basit olmasından dolayı eski uygulamalarda elastomerler sertliklerine göre sınıflandırmaktaydı, [4, 15].

AASHTO'da elastomerlerin farklı sertlik derecelerine göre kayma modülleri tanımlanmıştır, Tablo3.1. 23⁰C'deki kayma modülü, tasarım için uygundur. Bu derecedeki elastomerin, 0.68~1.43MPa arasında kayma modülüne ve 50~60 değerleri arasında sertliğe sahip olması gerekmektedir.

Tablo 3.1: Farklı Sertliklerde Elastomer Özellikleri

Sertlik	50	60	70
23 ⁰ C'deki Kayma Modülü (G) (MPa)	0.68~0.93	0.93~1.43	1.43~2.14
<u>25 yıllık Sünme sehim</u> Ani sehim	%25	%35	%45
Sertliğe bağlı sabit (\bar{k})	0.75	0.6	0.55

Kayma modülü ve şekil katsayısı (S), elastomerin basınç gerilmesi-şekil değiştirme özelliklerini belirlemektedir. Dikdörtgen elastomer mesnetlerin tek bir katmanının şekil katsayısı aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir:

$$S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)} \quad (3.1)$$

Burada, L köprü boyuna yönüne paralel mesnet uzunluğu, W köprü boyuna yönüne dik mesnet genişliği ve h_{ri} tek bir elastomer katmanın kalınlığıdır. Bağıntının paydası, yayılmaya yatkın olan elastomer katmanının dış çeper alanını göstermektedir. Genel şekil katsayısı, her elastomer katmanın ve kalınlığın ağırlıklı ortalamasının alınmasıyla hesaplanmaktadır:

$$S_{ov} = \frac{\sum_i h_{ri} S_i}{\sum_i h_{ri}} \quad (3.2)$$

Köprü mesnetlerindeki rijitliği tanımlamak güçtür. Elastomer mesnetler için tasarım şartnameleri basitleştirilmiş ifadeler vermektedir. Yayılmaya karşı mesnetlenmeyi göz önüne alan basınç elastisite modülü (E_c) Denklem 3a ve 3b'de verilmektedir, [2, 3]:

$$E_c = 3G(1 + 2\bar{k}S_{ov}^2) \quad (3.3a)$$

$$E_c = 6GS^2 \quad (3.3b)$$

Elastomer mesnetler kauçuk ve çelik katmanlardan oluşması nedeniyle, görel olarak yüksek aksel rijitlik (K_V) ve düşük kayma rijitliğine (K_H) sahiptir, Denklem 4a, 4b. Elastomerlerin bu özelliklerini modellemek için elastisite modülü ve kayma modülüne bağlı olarak mesnet rijitlikleri tanımlanmaktadır. Kauçuğun ve çeliğin davranışı elastik kabul edilirse aksel ve kayma rijitlikleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$K_V = \frac{EA}{H} \quad (3.4)$$

$$K_H = \frac{GA_s}{H_r} \quad (3.5)$$

Burada A mesnet plan alanı, A_s tüm alandan koruyucu kauçuğun çıkarılmasıyla bulunan kayma yüzeyi, H mesnet yüksekliği, H_r elastomer katmanların toplam kalınlığıdır, [2, 10, 11].

Basit kiriş davranışı sonucu mesnette oluşan dönme rijitliği, elastisite modülü, atalet momenti (I) ve elastomer toplam kalınlığına bağlı olarak bulunmaktadır, [10]:

$$K_R = \frac{EI}{H_r} \quad (3.6)$$

Burada:

$$I = \frac{WL^3}{12}, \text{dir} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki değerler ve bağıntılar bir örnek üzerinde açıklanabilir. Bu amaçla Florida Ulaştırma Bölümünün (FDOT) kullandığı elastomer mesnet tipi (II) seçilmiştir:

Tablo 3.2: FDOT mesneti için fiziksel parametreler

Parametre	II/II tipi
Uzunluk L (mm)	204
Genişlik W (mm)	356
Alan A (mm ²)	72625
Elastomer kalınlığı h_r (mm)	
İç katman (2 adet)	8.75
Dış katman (2 adet)	6.00
Tüm kalınlık H	29.5
Şekil katsayısı S	
İç katman	7.4
Dış katman	10.8
Genel Şekil katsayısı S_{ov}	8.8

Tablo 3.2’de verilen değerler kullanılarak elastomer rijitlikleri hesaplanmıştır, Tablo 3.3. Tablodaki değerler AASHTO şartnamesindeki bağıntılara göre hesaplanmıştır. Elastisite modülünün (E_c) hesabı için (3.3a) kullanılmıştır. Bağıntıda 50 sertliğe denk gelen kayma modülü için 0.76MPa ve sertliğe bağlı sabit \bar{k} için 0.75 öngörülmüştür.

Tablo 3.3: FDOT mesnet rijitlik değerleri

Rijitlik ve diğer parametreler	II/II tipi
I (mm ⁴)	$2.52 \cdot 10^8$
G (MPa)	0.76
E_c (MPa)	267
K_v (kN/mm)	656
K_H (kN/mm)	1.87
K_R (kN/mm)	$2.28 \cdot 10^6$

3.4.2 Kullanma yükleri altında tasarım

AASHTO şartnamesinde elastomerin kullanma yükleri altında tasarımı için farklı yüklemelere göre sınırlandırmalar getirmiştir.

- Elastomer mesnete etkiyen düşey yükler aşağıdaki bağıntıyla hesaplanan basınç gerilmelerini oluşturmaktadır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.8a)$$

Zati ve hareketli yüklerden mesnette oluşan ortalama basınç gerilmesi aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

$$\sigma_{TY} \leq 11.0MPa \quad (3.8b)$$

$$\sigma_{TY} \leq 1.66GS \quad (3.8c)$$

$$\sigma_H \leq 0.66GS \quad (3.8d)$$

Burada

σ_H : Hareketli yükten oluşan ortalama basınç gerilmesi

σ_{TY} : Zati ve hareketli yükün beraber mesnette yarattığı ortalama basınç gerilmesi

Zati ve hareketli yükten dolayı mesnette oluşan ani sehimler sınır değerleri aşmaması gerekmektedir. Bu değerler elastomer test sonuçlarından elde edilebilir. Test sonuçlarının eksikliği durumunda AASHTO'da yer alan diyagramlar kullanılmaktadır.

- Köprü üstyapısının servis durumunda yataydaki hareketi, rötne, sünme, ard germe ve ısı etkileri sonucunda oluşmaktadır. Üstyapıdaki hareket sonucunda elastomerde kaymadan dolayı yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Elastomerin kayma durumundaki yerdeğiştirmesi elastomer mesnet kalınlığı ile sınırlandırılmıştır.

$$H_r \geq 2\Delta_s \quad (3.9)$$

Burada H_r elastomerlerin toplam kalınlığı, Δ_s servis durumundaki en büyük kayma yerdeğiştirmesidir.

- Elastomer, yüklerden ve yerdeğiştirmelerden dolayı kiriş ucunda oluşan dönme için kontrol edilmelidir. Mesnette çekme kuvveti oluşmayacak (3.10a) ve köşelerde sınır basınç gerilme değerleri aşılmayacak (3.10b) şekilde mesnet tasarımı yapılmalıdır.

$$\sigma_{TY} \geq 1.0GS \left(\frac{\theta_m}{n} \right) \left(\frac{B}{h_{ri}} \right)^2 \quad (3.10a)$$

$$\sigma_{TY} \leq 1.875GS \left(1 - 0.20 \left(\frac{\theta_m}{n} \right) \left(\frac{B}{h_{ri}} \right)^2 \right) \quad (3.10b)$$

Burada θ_m toplam düşey servis yükünden oluşan maksimum dönme, B dönme köprü boyuna ekseninde oluştuğu için mesnet genişliği, n elastomer iç katman sayısıdır.

- Kullanma yükleri altında elastomerin stabilite kontrolleri yapılmalıdır.

$$2A \leq B \quad (3.11a)$$

Burada

$$A = \frac{1.92 \frac{Hr}{L}}{S \sqrt{1 + \frac{2.0L}{W}}} \quad (3.11b)$$

$$B = \frac{2.67}{S(S + 2.0) \left(1 + \frac{L}{4.0W} \right)} \quad (3.11c)$$

Mesnetin boyu (L), genişliğinden (W) büyükse 2 ve 3 denklemdeki L ve W yerdeğiştirecektir.

Köprü üstyapısının yatay doğrultudaki hareketi engellenmemişe toplam düşey yükten oluşan basınç gerilme aşağıdaki şekilde sınırlandırılmıştır:

$$\sigma_{TY} \leq \frac{G}{2A - B} \quad (3.12)$$

- İç elastomer katmanlarının hepsi aynı kalınlıkta olmalıdır. En dıştaki katmanlar, iç katmanların %70'inden daha kalın seçilemez. Çelik plakalı elastomer mesnetlerde delik tavsiye edilmemektedir.

Elastomer basınç altındayken çelik plakalarda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Plaka kalınlıkları bu gerilmeleri karşılayacak şekilde seçilmelidir. Yukarıda verilen yük sınırlandırılmaları sayesinde çelik plaka kalınlıkları yeterli olmaktadır. Çelik plakanın minimum kalınlığı

$$h_s > \frac{3.0h_r\sigma_{TL}}{f_y} \quad (3.13)$$

olarak verilmiştir.

Burada h_r elastomer katman kalınlığı, f_y çelik karakteristik akma dayanımıdır.

Yukarıda sözü edilen koşulların sağlanmasından sonra elastomer mesnetlerin AASHTO Bölüm 18'e göre test edilmesi gerekmektedir. Bu test aşamaları çalışmanın kapsamı dışındadır.

3.5 İzolatör Olarak Elastomer Mesnet

3.5.1 Giriş

Her büyük depremde köprü ayaklarının taşıma gücünü kaybetmesinden dolayı köprülerin göçtüğü gözlenmiştir. 17 Ocak 1995 Kobe depreminden sonra köprülerin güvenliğinin yalnızca dayanım artımıyla sağlanamayacağı anlaşılmıştır. Araştırmalar büyük depremlerde oluşabilecek hasarlardan köprülerin akılcı şekilde korunmasına odaklanmıştır. İzolasyonun amacı, deprem anında oluşan kuvvetleri yapı elemanlarının elastik kapasitelerine kadar azaltmaktır. Böylece elastik olmayan şekil değiştirmeler ortadan kaldırılmış ya da azaltılmış olmaktadır. İzolasyonun ana kavramı deprem anında yapı doğal titreşim frekansını depremin enerji içeren hakim frekanslarının altına çekmektir. İzolasyonun diğer amacı ise enerji sönümlenmesidir. Deprem sırasında ayaklara gelen taban kesme kuvvetinin çoğu köprü üstyapı kütlesi nedeniyle oluşmaktadır. Elastomer mesnet üstyapıyı köprü altyapısından izole ederek ivmeleri ve bunun sonucu olarak ayaklara gelen kuvvetleri önemli ölçüde azaltır, [12]. Deprem izolasyonu doğal titreşim periyodunu uzatarak yapıya etkiyen deprem kuvvetlerini azaltır. Ancak kuvvetlerin azaltılmasıyla birlikte yerdeğiştirmelerde artış olmaktadır. Bu artışın esneklik sınırları içerisinde tutulması gerekmektedir. Esnekliği yüksek elastomerler seçildiğinde köprü üstyapısı kullanım yükleri altında hareketli hale gelebilmektedir.

Deprem izolasyonunda üç temel eleman kullanılmaktadır, [9]:

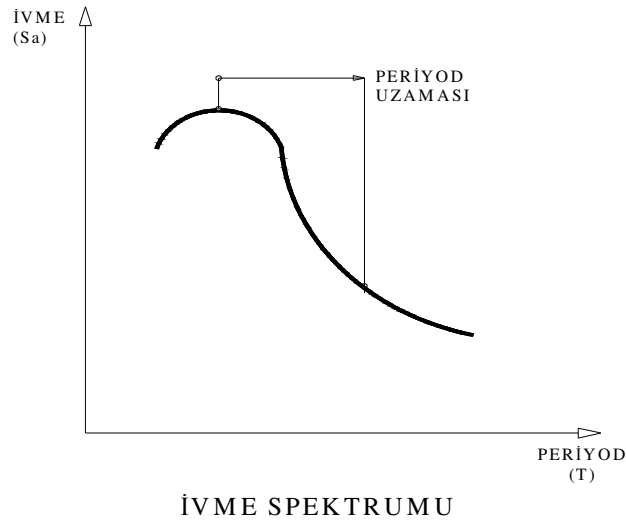
- 1- Düşey yükleri taşıyan, yatayda esnekliği sayesinde titreşim periyodunu yeterince arttırarak yatay kuvvetleri azaltan bir araç.
- 2- Enerji sönmüleyici. Bu sayede görelî yerdeğıştirmeler esnek tasarım düzeylerinde sınırlandırılmaktadır.
- 3- Rüzgâr ve fren kuvvetleri gibi düşük kullanma yüklerinde rijitliği sağlayan bir araç.

3.5.2 Esneklik

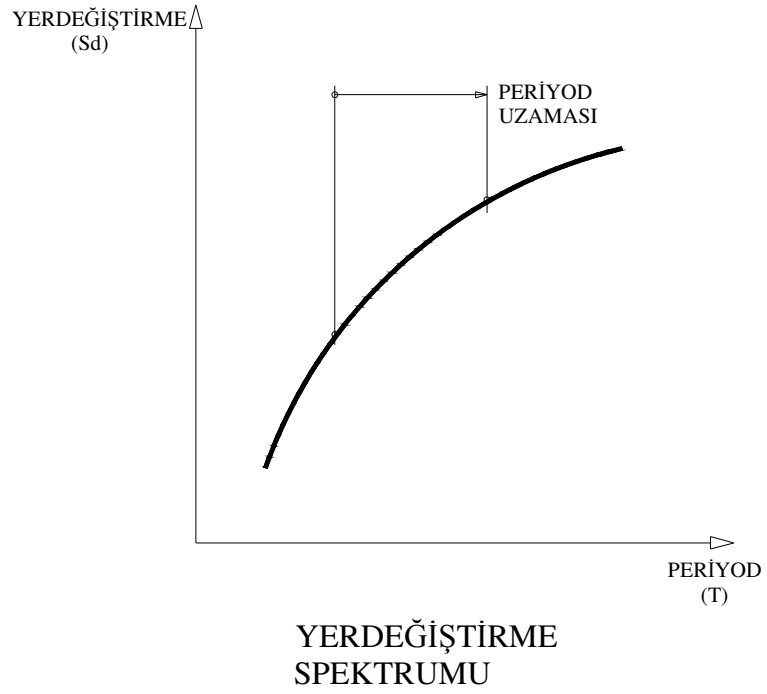
Elastomer mesnetler yapıya esneklik kazandıran elemanlardır. Artan periyodlardaki tipik kuvvet davranışı Şekil 3.5’de tipik ivme spektrum eğrisiyle gösterilmiştir. Taban kesme kuvvetlerindeki azalma doğal titreşim periyodunun uzamasıyla ortaya çıkmaktadır. Azalan kuvvetlerin büyüklüğü deprem yer hareketine ve yapının periyoduna bağlıdır. Yukarıda sözü edildiği gibi periyodun uzaması için gereken esneklik yapıda görelî yerdeğıştirmelerin artmasına neden olmaktadır. Şekil 3.6’de tipik yerdeğıştirme davranış eğrisinde, büyük periyodlarda yerdeğıştirmenin arttığı görülmektedir.

3.5.3 Enerji sönmüleme

Sönmülendirici araçların izolasyon seviyesine konmasıyla görelî yerdeğıştirmeler kontrol edilmektedir, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8.



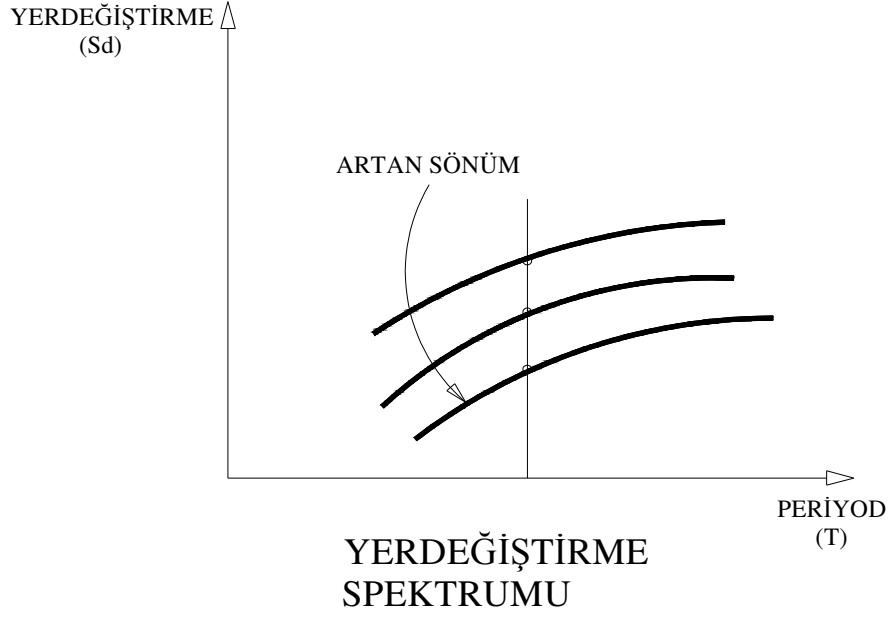
Şekil 3.5: Elastomerin Mesnetin İvme Spektrumuna Etkisi



Şekil 3.6: Elastomerin Mesnetin Yerdeğiştirme Spektrumuna Etkisi

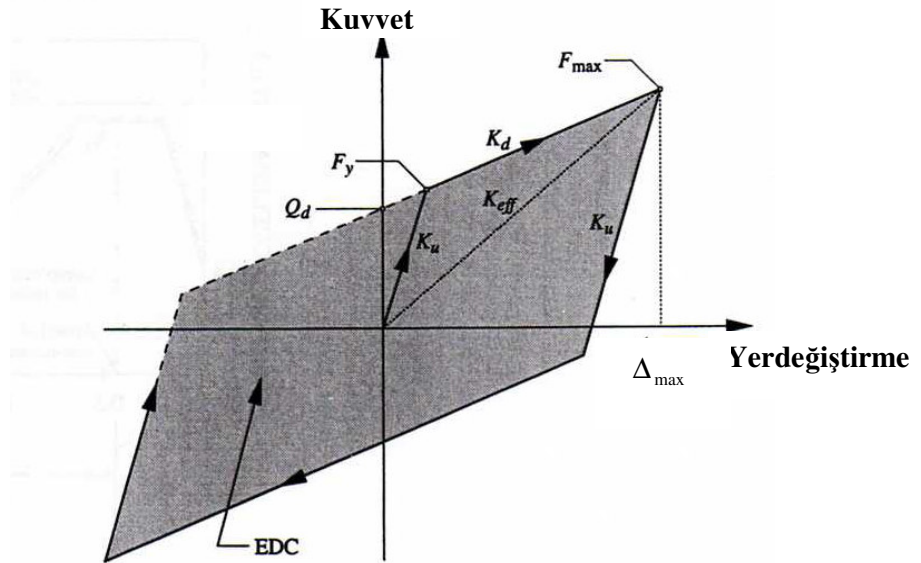


Şekil 3.7: İzolatörün Enerji Sönümlemesi



Şekil 3.8: Artan Sönüm

Enerji sönümlemenin çevrimsel sönüm ve viskoz sönüm olmak üzere iki türü vardır. Viskoz sönüm hızla orantılıdır. Çevrimsel sönüm yükün yön değiştiren türden etkimesi durumunda meydana gelir, [18]. Şekil 3.9’de gösterilen kuvvet-yerdeğiştirme eksenlerinde bir çevrim yapılmasıyla, çevrim içinde kalan alana karşı gelen enerji yutulur.



Şekil 3.9: İzolatörün Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı

Burada:

Q_d = Karakteristik dayanım

F_y = Akma yükü

F_{max} = Maksimum kuvvet

K_d = Elastik ötesi rijitlik

K_u = Elastik (boşaltma) rijitlik

K_{eff} = Efektif/etkin rijitlik

Δ_{max} = Maksimum mesnet yerdeğiştirmesi

EDC = Bir çevrimde sönümlenen enerji = Çevrimsel Sönüm Alanı (taralı bölge)

3.5.4 Düşük yatay yükler altında rijitlik

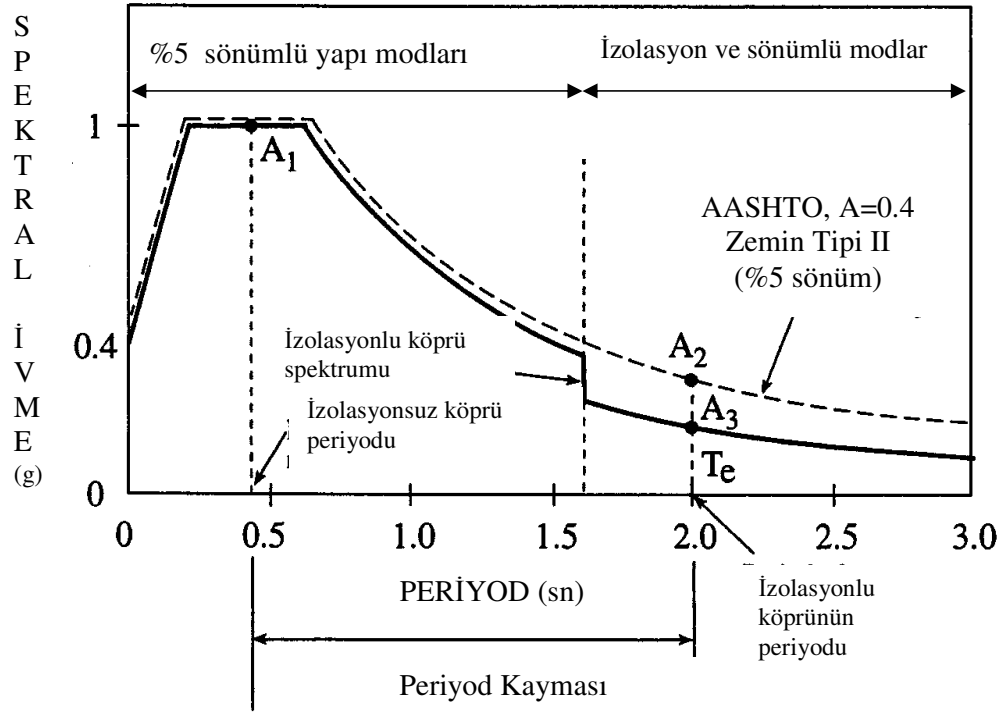
Deprem sırasında yatay esneklik istense de sıklıkla oluşan rüzgar ve fren gibi yüklerde köprünün sürekli titreşmesi istenmeyen bir durumdur. Dış sönümleyici aletler ve rijitliği arttırılmış elastomerler kullanılarak servis yüklerinde yeterli rijitlik sağlanabilir.

3.5.5 İzolasyonun etkileri

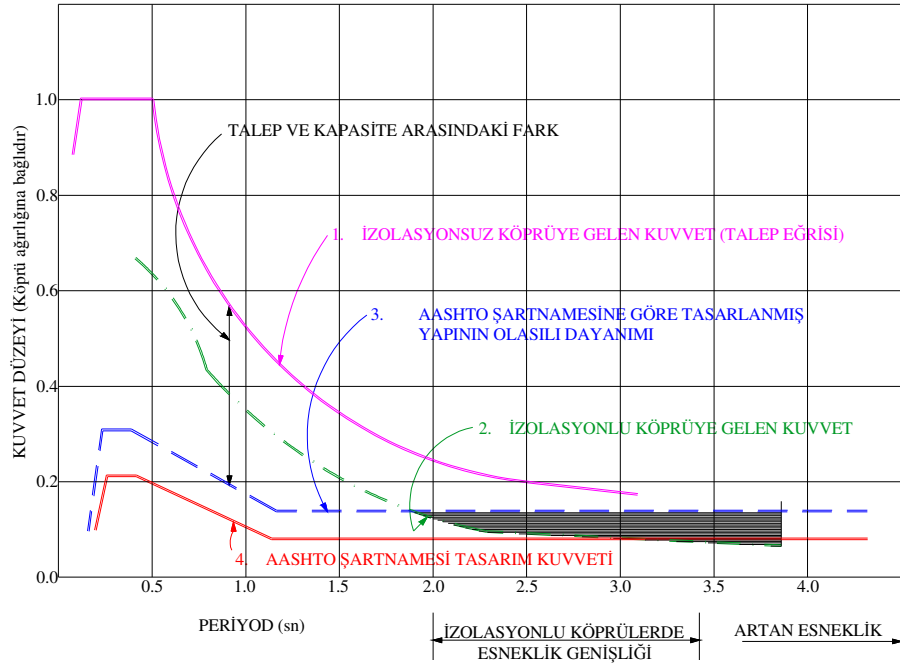
Yukarda sözü edilen ilkeler spektral Periyod-İvme diyagramları üzerinde açıklanacaktır:

Örnek 1 [9]: Sismik İzolasyon ilkeleri Şekil 3.10'da bir arada gösterilmiştir. Kesikli çizgi, AASHTO Standart Şartname'deki ivme katsayısı $A=0.4$ olan deprem bölgesine ilişkin elastik davranış spektrumudur. Kalın çizgiyle tanımlanan spektrum izolasyonlu köprüye ilişkin davranış spektrumunu göstermektedir. İzolasyon sisteminin esnekliğiyle sağlanan "periyod uzaması", spektral ivmeyi $A1$ 'den $A2$ 'ye düşürür. Buna ek olarak arttırılmış sönüm nedeniyle ivme değeri $A2$ 'den $A3$ 'e iner. $A1$ ve $A3$ değerleri sırasıyla geleneksel ve izolasyonlu köprülerin tasarımında kullanılmaktadır.

$A1$ ile $A3$ arasındaki oran grafik üzerinde görülmektedir. Elastik kuvvetlerin azalması anlamına gelen bu oran 3 ile 8 arasında değişebilmektedir. Bu oran izolasyonlu köprünün periyoduna, zemin tipine (sert zeminlerde daha yüksek oranlar) ve izolasyon sisteminin sönümüne (artan sönüm değerlerinde daha yüksek oranlar) bağlıdır.



Şekil 3.10: İzolasyonlu Köprünün Davranış Spektrumu



Şekil 3.11: İzolasyonlu Köprülerin Tasarımı

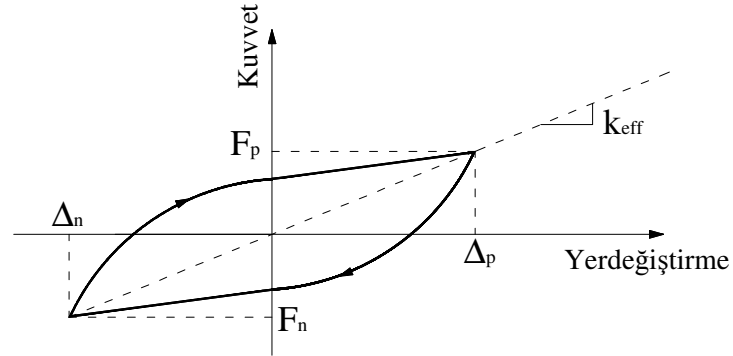
Örnek 2 [19]: Şekil 3.11’de “Eğri 1” kaya zeminde olan izolasyonsuz bir köprüye etkiyen elastik kuvvetleri göstermektedir. “Eğri 4” elastik kuvvetlerin AASHTO şartnamesinde çerçeve tipi ayaklar için tanımlanan azaltma katsayısı R’ye bölünmüş durumunu göstermektedir. “Eğri 3” yapının AASHTO’daki hükümlere uyularak tasarlanması durumundaki olası dayanımı göstermektedir. Olası dayanım, tasarım dayanımından yük katsayıları, malzeme katsayıları, yapısal tasarımdaki konservatiflik ve diğer faktörlerden dolayı yaklaşık 1.5~2 kat daha büyüktür. Maksimum elastik kuvvet ile olası dayanım arasındaki fark, yapı elemanlarının sünekliğiyle yutulması gereken enerjinin yaklaşık göstergesidir. Ancak köprünün izole edilmesi durumunda maksimum kuvvetler azalmaktadır (Eğri 2). Eğer köprü 1.5-3sn arasındaki periyot aralığındaki kuvvetlerle hesaplanırsa, izolasyonlu köprünün olası dayanımı köprüye etkiyen kuvvetlerle aynı değerleri alacaktır. Bu yüzden izolasyonlu taşıyıcı sistemde süneklik istemi/talebi çok küçük olacaktır ya da hiç gerekmeyecektir.

3.5.6 Tasarım

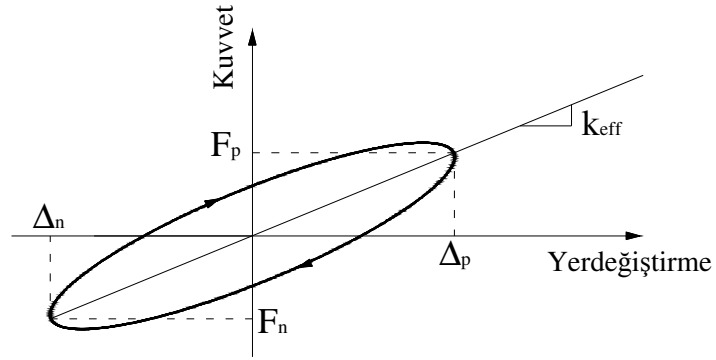
İzolasyon sisteminin Kuvvet-Yerdeğiştirme karakteristikleri tam çevrim yükleme testlerinden elde edilmektedir. İzolatörün efektif rijitliği (k_{eff}) her çevrim yükleme sonucu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$k_{eff} = \frac{F_p - F_n}{\Delta_p - \Delta_n} \quad (3.14)$$

Burada Δ_p ve Δ_n deney sırasında elde edilen maksimum pozitif ve maksimum negatif yerdeğiştirme, F_p ve F_n bu yerdeğiştirmelerdeki maksimum pozitif ve maksimum negatif kuvvetlerdir, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13.



Şekil 3.12: Çevrimsel Davranış



Şekil 3.13: Viskoz Davranış

Elastomerin doğrusal olmayan davranışı deprem yükleri altında oluşmaktadır. Elastomerin kayma modülü G yerdeğiştirmelerin büyüklüğüne bağlıdır [11]. Kayma modülünün doğrusal davranış altındaki fiziksel tanımı aşağıdaki gibidir [6]:

$$G = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta}{H}} = \frac{FH}{A\Delta} \quad (3.15)$$

Deprem anındaki doğrusal olmayan davranışı gösteren efektif kayma modülü çevrimsel davranış eğrileri Şekil 3.12 yardımıyla (3.16)'daki gibi açıklanabilir:

$$G_{eff} = \frac{\frac{F_p - F_n}{A}}{\frac{\Delta_p - \Delta_n}{H}} = \frac{(F_p - F_n)A}{(\Delta_p - \Delta_n)H} \quad (3.16)$$

Efektif rijitlik, (3.16)'da yerine konursa:

$$G_{eff} = k_{eff} \frac{A}{H} \quad (3.17)$$

Görüldüğü üzere elastomerin rijitliği, kayma modülüne bağlı olarak doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir.

Elastomer mesnet üzerinde yapılan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir, [20]:

- Artan düşey yüklerde, elastomerin efektif rijitliği azalmaktadır.

- Elastomerin rijitliği artan frekanslarda artmaktadır. Başka bir deyişle uzayan periyotlarda rijitlik azalmaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda rijitlik önemli ölçüde artmaktadır.
- Tasarım yerdeğiştirmelerinin sürekli olarak elastomere uygulanması sonucu rijitlik azalmaktadır.

Üretici firmalar elastomeri farklı şekil değiştirmeler altında test ederek efektif kayma modülü ve buna bağlı rijitlikleri belirlemektedir, [9, 21].

İzolatör olarak tasarlanan elastomer mesnetin çelik plakalarla güçlendirilmesi gerekmektedir. Elastomer mesnetler depremde oluşan yerdeğiştirme anında düşey yükleri güvenle taşıyabilmelidir [9]. Bölüm 3.3.2’de servis koşullarına ek olarak elastomer mesnetler deprem etkilerine dayanıklı olmalıdır. Deprem yüklerinin büyük ama oluşma olasılığının küçük olması farklı güvenlik koşullarını beraberinde getirir.

İngiliz şartnamesi BS 5400 [22] elastomerdeki kayma şekil değiştirmelerinin basınç, dönme ve kayma yerdeğiştirmelerinden oluştuğunu kabul etmektedir. Toplam şekil değiştirme için sınır değerler belirlenmiştir.

Toplam kayma şekil değiştirmesinin bileşenleri aşağıdaki bağıntılarla tanımlanmıştır:

- Düşey yüklerin yarattığı basınç nedeniyle oluşan kayma şekil değiştirmesi

$$\gamma_c = \frac{3SP}{2A_r G(1 + 2kS^2)} \quad (3.18)$$

olarak verilmiştir

- Kullanma durumundaki yatay yerdeğiştirmelerden oluşan kayma şekil değiştirmesi ise

$$\gamma_{s,s} = \frac{\Delta_s}{H_r} \quad (3.19)$$

biçiminde yazılabilir.

- Deprem anındaki yatay yerdeğiştirmelere bağlı oluşan kayma şekil değiştirmesi:

$$\gamma_{s,eq} = \frac{d_t}{H_r} \quad (3.20)$$

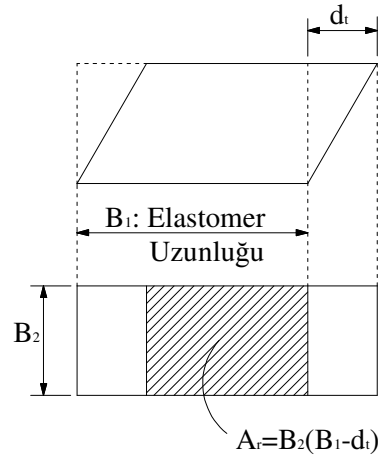
Elastomer mesnetlerin güç tükenmesinden önce $\pm\%150$ şekil değiştirme yapabildiği hesaplanmıştır. Laboratuvar testlerinde elde edilen sonuçlara göre elastomer kalınlığının $\pm\%100$ 'ündeki yerdeğıştirmelerde ihmal edilebilecek hasarlar oluştuğu ortaya konmuştur [6].

- Dönmeden dolayı oluşan kayma şekil değıştirmesi:

$$\gamma_r = \frac{B^2 \theta}{2h_r H_r} \quad (3.21)$$

Tasarım dönme değeri zati yük ve hareketli yük altında ve imalat sırasında oluşan dönme etkilerini içermelidir.

Burada A_r alt ve üst alanların kesişim alanı, B mesnetin oturduğu alanın boyutları, d_t toplam yerdeğıştirmedir, Şekil 3.14.



Şekil 3.14: Kesişim Alanı (A_r)

Yukarıda verilen kayma şekil değıştirmelerin birleştirilmesi aşağıda tanımlanan sınır değerlerle karşılaştırılmalıdır:

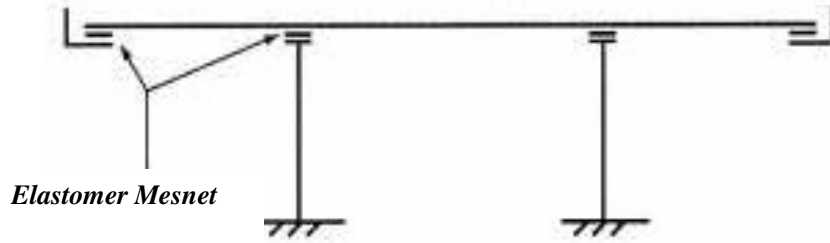
$$\gamma_c \leq 2.5 \quad (3.22a)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,s} + \gamma_r \leq 5.0 \quad (3.22b)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r \leq 5.5 \quad (3.22c)$$

3.5.7 Hesap yöntemi

Düzgün köprülerde çok modlu hesap ve üç boyutlu modelleme (Şekil 3.15) yapılmadan tek modlu çözüm yöntemi kullanılabilir. Elastomer mesnetin boyuna doğrultudaki hareket serbestliği göz önünde bulundurularak köprü, Şekil 3.16'deki gibi temsil edilebilir.



Şekil 3.15: Elastomerli Üç Boyutlu Köprü Modeli

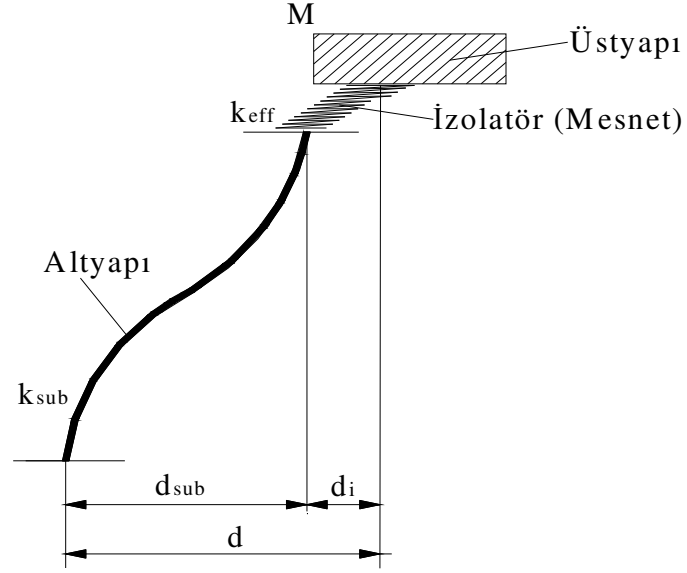
Elastomer mesnet ile ayağın birlikte çalışması nedeniyle sistemin efektif doğrusal rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanır, [9].

$$K_{eff} = \sum_j \left(\frac{k_{sub} k_{eff}}{k_{sub} + k_{eff}} \right) \quad (3.23)$$

Üstyapının rijit diyafram davranışı nedeniyle tüm kütesinin altyapının üst ucunda toplandığı varsayılabilir.

Bu basitleştirilmiş modelin periyodu kütle ve efektif doğrusal rijitlik ile hesaplanır

$$T = \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (3.24)$$



Şekil 3.16: İzolatörlü Köprünün Tek Modlu Basit Hesap Yöntemi

Burada:

M : Üstyapı kütlesi

k_{sub} : Ayak rijitliği

k_{eff} : Elastomer mesnet rijitliği

d_{sub} : Altyapı uç yerdeğiştirmesi

d_i : Elastomer mesnet yerdeğiştirmesi

d : Sistemin toplam yerdeğiştirmesidir.

4 TÜRKİYE’DE YAYGIN BİÇİMDE UYGULANAN KARAYOLU KÖPRÜ TİPLERİ

4.1 Giriş

Köprülerde açıklıkların prekast öngerilmeli kirişler ile geçilmesi Türkiye’de yaygın bir şekilde kullanılan bir sistemdir. Bu sistemde her açıklıkta prekast kirişler elastomer mesnetler üzerine serbestçe oturur ve kirişlerin üstündeki döşeme yerinde dökülerek araçlar ve yayalar için düz kullanma yüzeyi oluşturulur.

Açıklıkların belirlenmesinde aşağıdaki ölçütler göz önünde bulundurularak en uygun çözüm üretilmektedir, [24]:

- Güvenlik ve dayanıklılık
- Estetik ve çevreye uyum
- Yapım ve bakım maliyeti
- Yapım olanağı ve süresi
- Yerel yapım teknolojileri

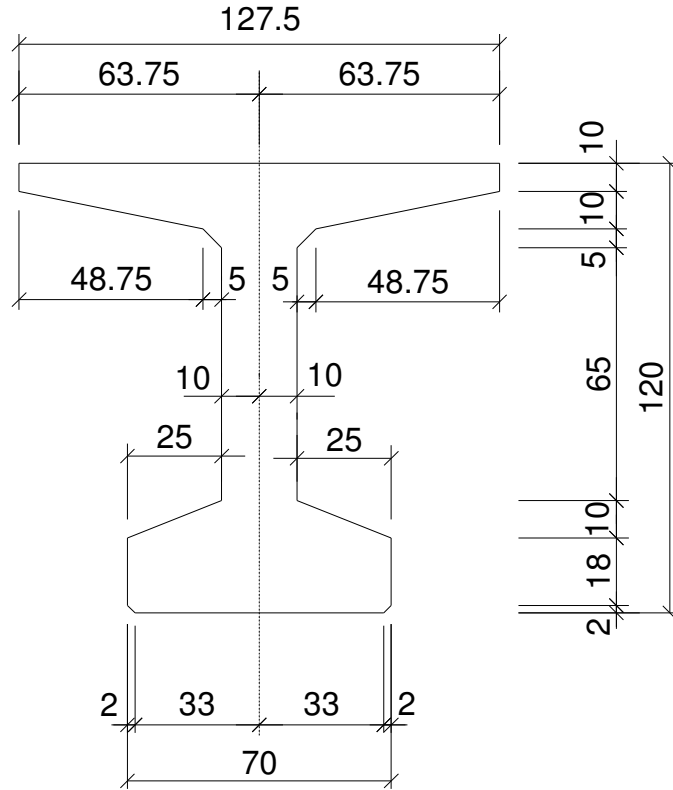
Bu ölçütler dikkate alınarak basit açıklıklı, prekast kiriş ve yerinde dökme tabliyelili sistem uygulanmaktadır. Bir çok açıklığın geçildiği köprü inşaatlarında ekonomi sağlanmaktadır [25]. Basit kirişli öngerilmeli kirişli sistemlerin üstünlüğü altyapı inşaatı ile eş zamanlı olarak üstyapı prekast kiriş imalatlarının yapılabilmesidir. Ayrıca kirişlerin açıklıkta yerine konması basit inşaat teknikleri ile yapılabilmektedir.

4.2 Prekast Kiriş Tipleri

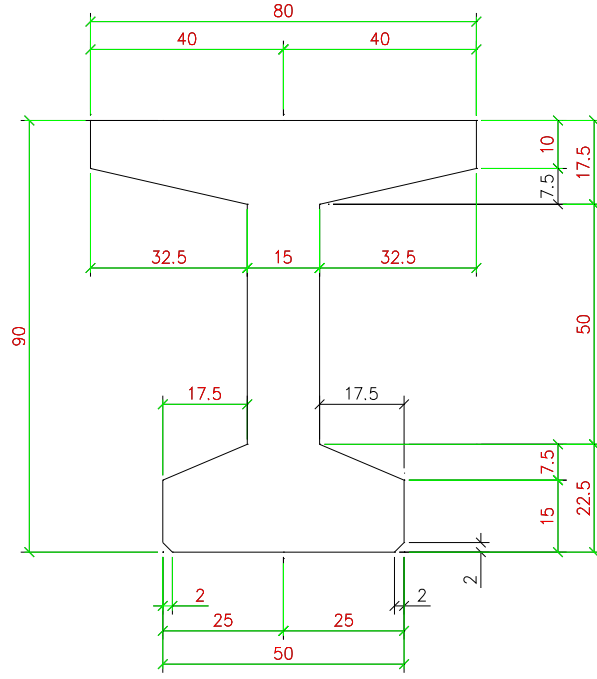
Prekast kiriş kesiti olarak I, T ya da U kesitler seçilmektedir. Geçilecek açıklığın artmasıyla göre kesit yüksekliklerinde artışlar olmaktadır. Kullanılan kesit tiplerinden bazıları Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4’de verilmiştir.

Genellikle 30m'lik açıklıklar optimum olduğundan dolayı orta ayaklar da bu mesafe ile konumlandırılır. Daha uzun açıklıklarda prekast kirişin yüksekliğini arttırmanın yanında çelik profilden yapma kirişler de düşünölmektedir.

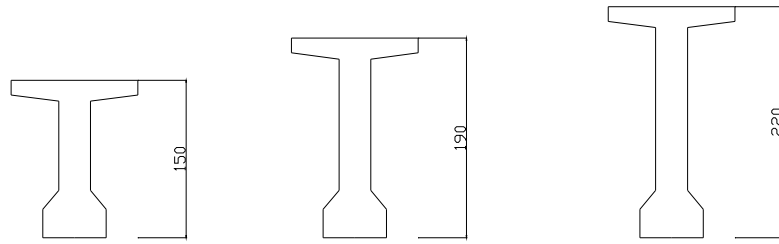
Prekast beton sınıfı olarak C40 ve gerekirse üzeri sınıflar seçilmektedir. Öngerilme donatısı ASTM-A 416'ya uygun olarak 270-K düşük gevşemeli tel kullanılmaktadır. Anma çapı 12.7mm ya da 15.24mm olan öngerme telleri sıklıkla uygulanmaktadır. Tabliye ve prekast kiriş, uygulanan kayma elemanları yardımıyla (örneğin genelde $\Phi 12/25$) dış yükler altında kompozit kesit olarak çalışmaktadır.



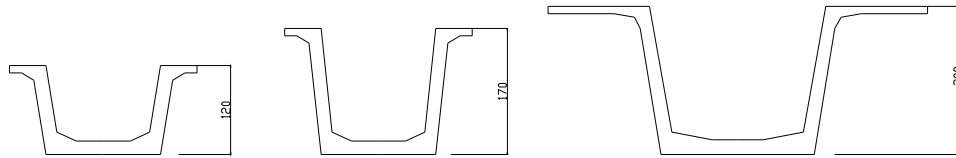
Şekil 4.1: 120cm'lik Prekast Kirişte Tipik Kesit



Şekil 4.2: 90cm'lik Prekast Kirişte Tipik Kesit



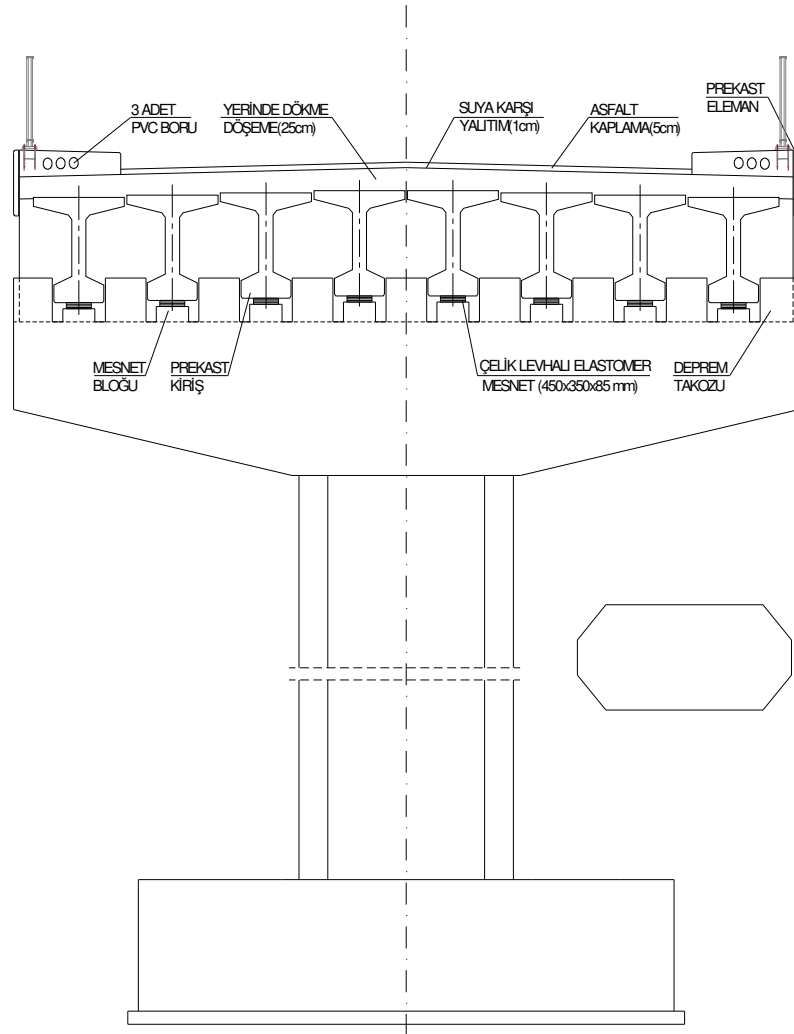
Şekil 4.3: Farklı Yüksekliklerde "T" tipi Prekast Kirişler



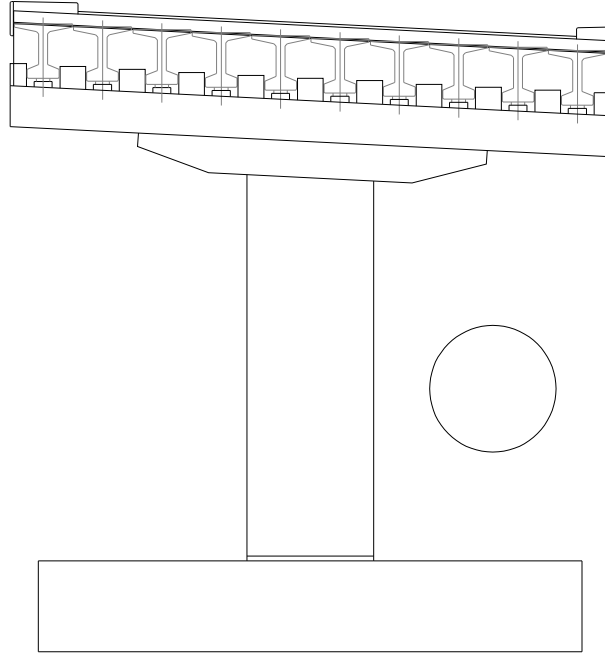
Şekil 4.4: Farklı Yüksekliklerde "U" tipi Prekast Kirişler

4.3 Altyapı Tipleri

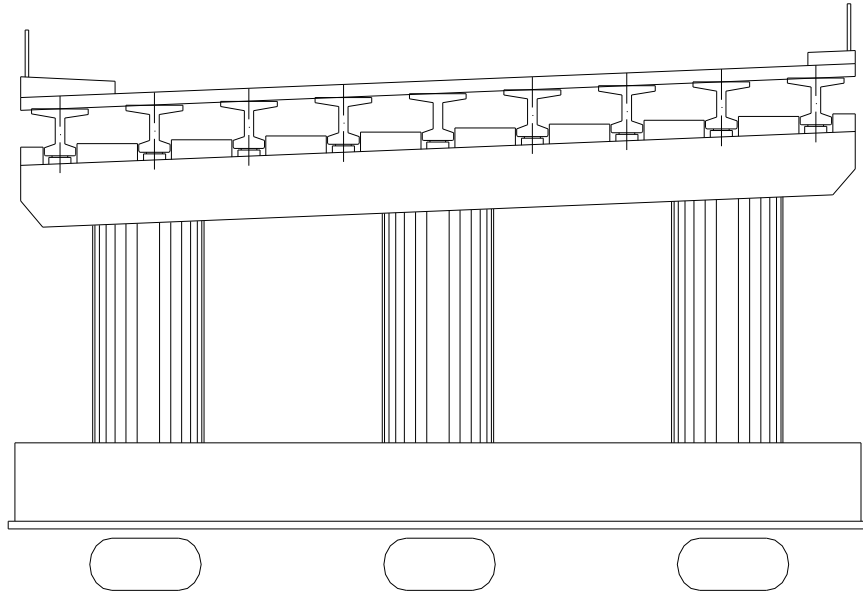
Köprü altyapıları orta ayak ve kenar ayaklardır. Orta ayaklar için kesit seçiminde fazla seçenek bulunmamaktadır. Betonarme ayak olarak tekil kolon, çerçeve ya da perde ayak olmak üzere üç tip üzerine yoğunlaşmıştır. Tekil kolonların ve çerçeve ayakların kesitleri dairesel, dikdörtgen ya da eliptik olabilmektedir. Perde ayaklarda ise perde uzun boyu genellikle üstyapı genişliğiyle aynı yapılmaktadır. Bazı altyapı düzenleme tiplerine örnekler verilmiştir, Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9.



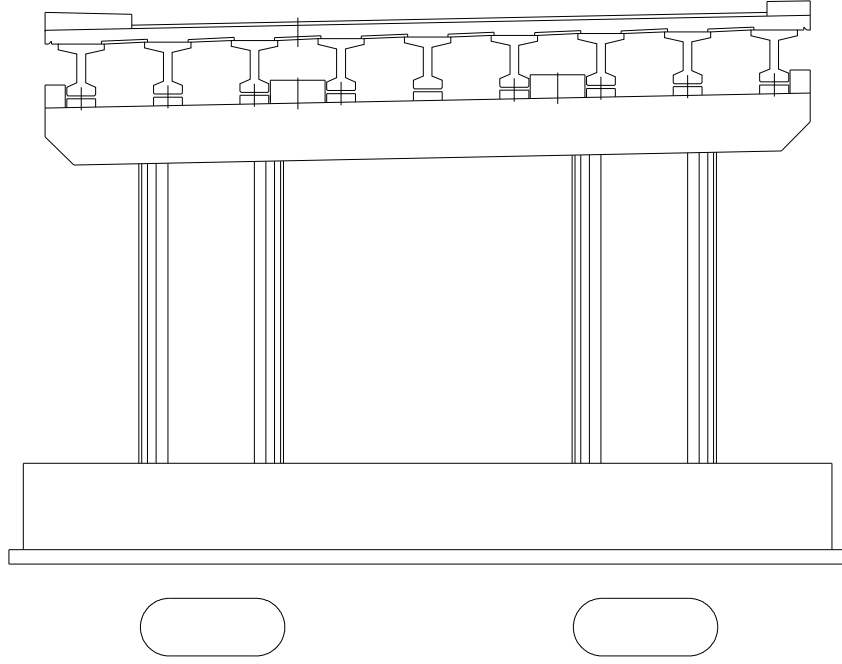
Şekil 4.5: Sekizgen Kesitli Tekil Kolon



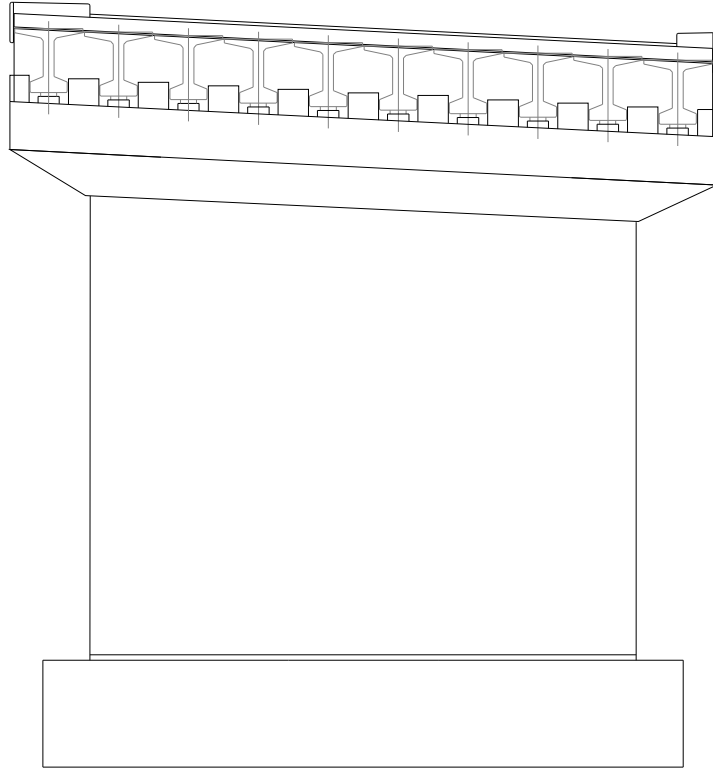
Şekil 4.6: Dairesel Kesitli Tekil Kolon



Şekil 4.7: Eliptik Kesitli Üç Kolonlu Çerçeve Ayak



Şekil 4.8: Eliptik Kesitli İki Kolonlu Çerçeve Ayak



Şekil 4.9: Perde Ayak

4.4 Türkiye’de İnşa Edilen Köprülerden Örnekler

Son 15 yılda inşa edilmiş 24 köprünün özellikleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Köprüye ilişkin özelliklerin yıllar içindeki değişimleri tablo üzerinden incelenirse bu süre içinde prekast kiriş kesitlerindeki değişim dikkat çekmektedir. 1990’ların ilk yıllarında “U” kesitli kirişler tercih edilirken 2000 yılından sonra “T” ya da “T” kesitlerin kullanıldığı görülmektedir. Türkiye’de karayollarında inşa edilmiş bazı köprülerin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.10: Köprü Fotoğrafı-1



Şekil 4.11: Köprü Fotoğrafı-2

Tablo 4.1: Türkiye'de İnşa Edilen Köprü Örnekleri

Köprü Adı	Yeri	Açıklık	Uzunluk	Verev	Kiriş Tipi - Adedi	Orta Ayak Tipi	Temel	Kenar Ayak	Platform Genişliği	B.A. Döşeme	Enine Yol Eğimi	Yapım Yılı
(V1) KIRKGEÇİT -15 VİYADÜĞÜ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	8 (İki Platform)	37.5*6 + 35.85*2= 296.7 m	0	1 - kiriş 9 adet (180 cm)	Dairesel (400 cm)	Kazıklı	Yüzeysel	17.5 m Sağ ve Sol	-	%Değ.	2002
(V10) ÇAKIT - 7 VİYADÜĞÜ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	8 (İki Platform)	37.5*6 + 35.6*2= 296.2 m	0	1 - kiriş 9 adet (180 cm)	Dairesel (300 cm)	Kazıklı	Yüzeysel	17.5 m Sağ ve Sol	-	%Değ.	2002
(V11) ÇAKIR DERESİ (ÇAKIR 1)	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	8 (İki Platform)	Sağ: 37.37*6+ 35.475*2= 295.17m Sol:37.63*6+ 35.725*2= 297.23m	0	1 - kiriş 9 adet (180 cm)	Dairesel (300 cm)	Yüzeysel ve Kazıklı	Yüzeysel	17.5 m Sağ ve Sol	-	%2.8	2002
(V12) ÇAKIT - 8	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	13 (İki Platform)	37.5*11 + 35.85*2 = 484.2 m	0	1 - kiriş 9 adet (180 cm)	Dairesel (400 cm)	Kazıklı	Yüzeysel ve Kazıklı	17.7 m Sağ ve Sol	-	6%	2002
(V13) POZANTI KAVŞAĞI ÇAKIR DERESİ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	5 (İki Platform)	30.60*3 + 29.05*2 = 149.9 m	0	1 - kiriş 12 adet (120 cm)	Dairesel (300 cm)	Yüzeysel ve Kazıklı	Yüzeysel ve Kazıklı	13.75 Sağ ve Sol	-	%2.5	2002
(V14) POZANTI KAVŞAĞI POZANTI ÇAYI KÖPRÜSÜ (ÇAKIT)	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	4 (İki Platform)	30.60*2 + 29.05*2 = 119.3 m	0	1 - kiriş 12 adet (120 cm)	Dairesel (300 cm)	Kazıklı	Kazıklı	13.75 Sağ ve Sol	-	%2.5	2002
(BSY-1) ALPU ALTGEÇİT KÖPRÜSÜ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	1 (İki Platform)	30 m (verev)		1 - kiriş 18 adet (120 cm)	-	-	Yüzeysel	17.5 m Sağ ve Sol	-	%Değ.	2002
(BSY-2) POZANTI KAVŞAĞI ALTGEÇİT KÖPRÜSÜ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	3 (İki Platform)	20.30*2 + 25.6 = 66.2 m (verev)		1 -kiriş (120 cm) 19 adet(Sol) 16 adet (Sağ)	Üç kolonlu çerçeve Eliptik (300*100)	Kazıklı (27 m)	Kazıklı (27 m)	17.5 Sağ 21.25 Sol	-	%2.5	2002
(BSY-3) POZANTI KAVŞAĞI BAĞLANTI YOLU ALTGEÇİT	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	2 (Tek Platform)	25.3*2 = 50.6 m		1 -kiriş 15 adet (120 cm)	İki kolonlu çerçeve - Eliptik (300*100)	Yüzeysel	Yüzeysel	20 m	-	%2.5	2002
(BYS-4) DEVLET YOLU DEPLASMANI KÖPRÜSÜ	ANKARA-POZANTI KARAYOLU ÇİFTEHAN-POZANTI KESİMİ	2 (Tek Platform)	25.40*2 = 50.8 m (verev)		1 -kiriş 13 adet (120 cm)	Perde (120*2050)	Yüzeysel	Yüzeysel	14.5 m	-	%Değ.	2002
ACIDERE KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	2 (Tek Platform)	14.0*2= 28 m	45	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	Üç kolon çerçeve Eliptik (250*100)	Kazıklı	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
ADALAR(KEÇİBORLU) KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	3 (Tek Platform)	15.7*3= 47.1 m	0	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	İki kolon çerçeve Eliptik (250*100)	Kazıklı	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
ÇARŞAK KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	1 (Tek Platform)	15.7 m	0	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	-	-	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
ÇERÇİN-I KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	1 (Tek Platform)	14 m	10	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	-	-	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
ÇERÇİN-II KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	2 (Tek Platform)	14*2= 28 m	20	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	İki kolon çerçeve Eliptik (250*100)	Yüzeysel	Yüzeysel	13.25	24.5 cm	2%	2005
ÇERÇİNÇAY KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	2 (Tek Platform)	14*2= 28 m	20	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	İki kolon çerçeve Eliptik (250*100)	Kazıklı	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
ESKİYERE KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	1 (Tek Platform)	24 m	0	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	-	-	Kazıklı	14	24.5 cm	2%	2004
ŞAR DERESİ KÖPRÜSÜ	KEÇİBORLU - BURDUR DEVLET YOLU	3 (Tek Platform)	14*3= 42 m	0	1 -kiriş 9 adet (90 cm)	-	-	Kazıklı	13.25	24.5 cm	2%	2005
İNÖNÜ KAVŞAĞI ALTGEÇİT KÖPRÜSÜ	MERSİN II. ÇEVRE YOLU	2 (Tek Platform)	18.5*2= 37 m	3.6	U -kiriş 8 adet (170)	Perde (120*1900)	Yüzeysel	Yüzeysel	19	25 cm	2%	1993
GOZNE-I KAVŞAĞI ÜSTGEÇİT KÖPRÜSÜ	MERSİN II. ÇEVRE YOLU	1 (Sağ ve sol aynı)	20.11 m	9.9	U -kiriş 5 adet (170)	-	-	Yüzeysel	11.9	25 cm	-	1994
ÇİFTÇİLER KAVŞAĞI ALTGEÇİT KÖPRÜSÜ	MERSİN II. ÇEVRE YOLU	2 (Tek Platform)	18.665*2= 37.33 m	25	U -kiriş 8 adet (170)	Perde (132*1900)	Yüzeysel	Yüzeysel	19	25 cm	6%	1993
YENİKAVŞAK ALTGEÇİT KÖPRÜSÜ	MERSİN II. ÇEVRE YOLU	2 (Tek Platform)	18.5*2= 37 m	14.4	U -kiriş 8 adet (170)	Perde (124*1900)	Yüzeysel	Yüzeysel	19	25 cm	2%	1993
BAHÇEŞEHİR KONUTLARI A1 YOLU	İSTANBUL BAHÇEŞEHİR	4(Tek Platform)	34.925+36.5+27+34.925 = 133.35m	8.243	U -kiriş 10 adet (170)	Dairesel x 2 (300 cm)	Kazıklı	Kazıklı	25 (derzli)	25	2%	1996
AYAZAGA-MASLAK KAVŞAK KÖPRÜSÜ	İSTANBUL MASLAK	5(Tek Platform)	28+35+41+35+28= 167 m	kurba (yatay)	Delikli tabliye(165)	Dairesel (300 cm) Kulaklı	Yüzeysel	Yüzeysel	10	-	2%	1997
AKÇAOVA 5 KÖPRÜSÜ	UNYE - PIRAZIZ DEVLET YOLU	3(Tek Platform)	28.7+30+28.7= 87.4 m	0	1 -kiriş 10 adet (120 cm)	Dairesel (280 cm)	Yüzeysel	Yüzeysel	13.25	25 cm	5%	2.005



Şekil 4.12: Köprü Fotoğrafi-3



Şekil 4.13: Köprü Fotoğrafi-4



Şekil 4.14: Köprü Fotoğrafi-5



Şekil 4.15: Köprü Fotoğrafi-6



Şekil 4.16: Köprü Fotoğrafi-7



Şekil 4.17: Köprü Fotoğrafi-8

5 SAYISAL İNCELEME

Bu bölümde, mevcut bir köprünün elastomersiz ve elastomerli olarak çubuk elemanlar ile modellenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilecektir; böylece bu çalışmanın odaklandığı konu olan elastomerin deprem davranışına etkisi belirlenmeye çalışılacaktır. Üç boyutlu olarak modellenen köprü bir sonraki aşamada tek serbestlik dereceli sisteme indirgenen basitleştirilmiş bir model ile hesaplanacaktır. Köprünün bu üç modeli deprem yükleri altında incelenecektir. Son olarak köprünün iç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeleri Bölüm 3’de verilen köprü efektif rijitliği kullanılarak sunulan bağıntılar yardımıyla tekrar hesaplanacaktır ve modellemedeki sonuçlarla yakınsaklığı belirlenecektir.

Aynı işlemler köprünün daha kısa ve rijit ayaklara sahip olması durumu için tekrarlanacaktır; böylece elastomer mesnetin deprem davranışına etkisinin köprü geometrik özelliklerinin değişmesiyle birlikte ne şekilde etkilendiği ortaya konacaktır.

Köprünün modellenmesinde SAP2000 kullanılmıştır, [27]. Köprü elemanları gerçeğe en yakın biçimde modelde göz önüne alınacaktır. Tezin amacı elastomerin deprem davranışına etkisi olduğu için öncelikle köprü elemanlarının modellenme kriterleri kısaca verilmiştir.

Örnekte kullanılan köprü, Ünye-Piraziz devlet yolu arasında yer alan Akçaova köprülerinden biridir. Üç açıklıklı ve dairesel kolonları olan köprünün konumu Şekil 5.1’de, boy kesiti Şekil 5.2’de, üstü yapısı en kesiti Şekil 5.3’de verilmiştir. Bu bölümün amacı Türkiye’de benzerleri çok olan bir köprü örneği kullanılarak elastomer mesnetlerin hesaplarda dikkate alınmasıyla deprem anında davranışta ve iç kuvvetlerdeki değişimleri açıklamaktır. Hesaplarda AASHTO’nun belirttiği tasarım koşulları izlenmiştir. Bu koşullar önceki bölümlerde açıklanmıştır.

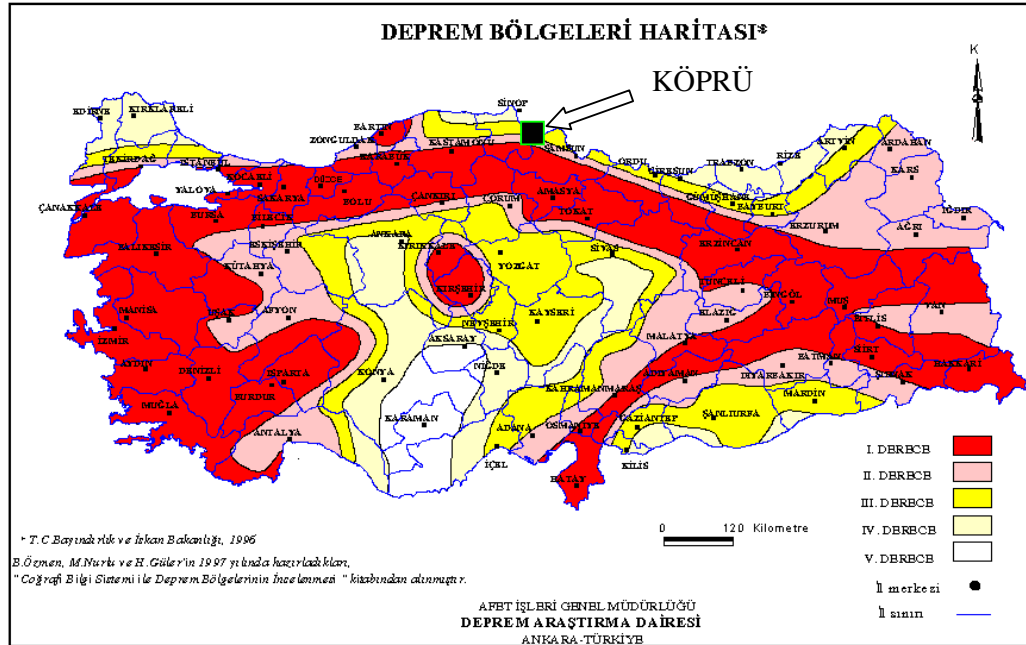
5.1 Köprü Elemanları

Üstyapı, her açıklıkta 10 adet prekast kiriş ve 25cm kalınlığında yerinde dökme döşemeden oluşmaktadır. Yüksekliği 120cm olan prekast kirişin kesiti Şekil 5.4'de verilmiştir. Prekast kiriş ve betonarme döşemenin kompozit kesit davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Beton sınıflarının farklı olmasından dolayı eşdeğer kesite dönüştürülürken bu durum dikkate alınmıştır.

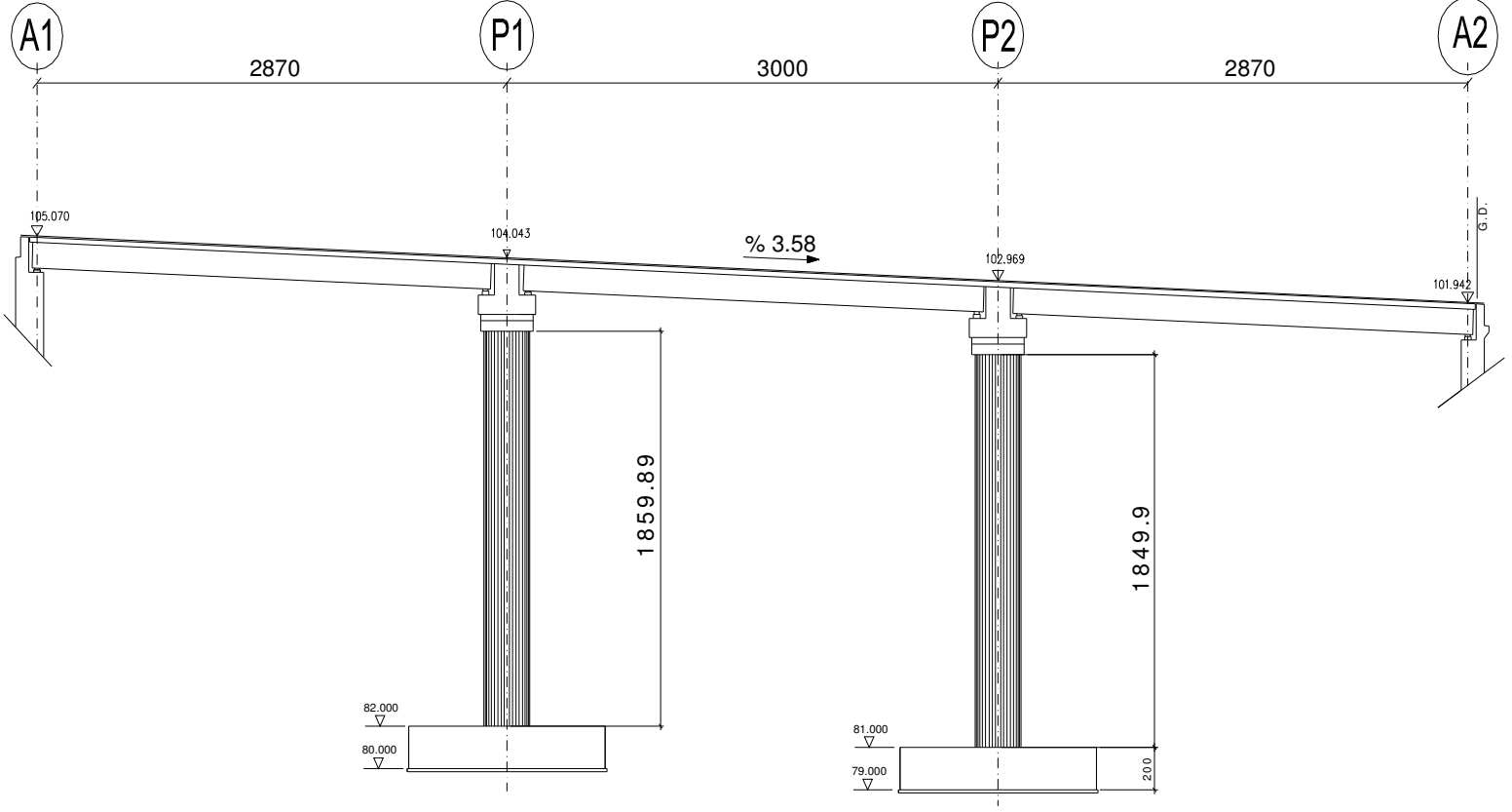
Köprünün altyapısı tekil dairesel kolonlarla oluşturulmuştur. Dairesel betonarme kolonun çapı 280cm'dir. Kesit özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Köprü Elemanları Kesit Özellikleri

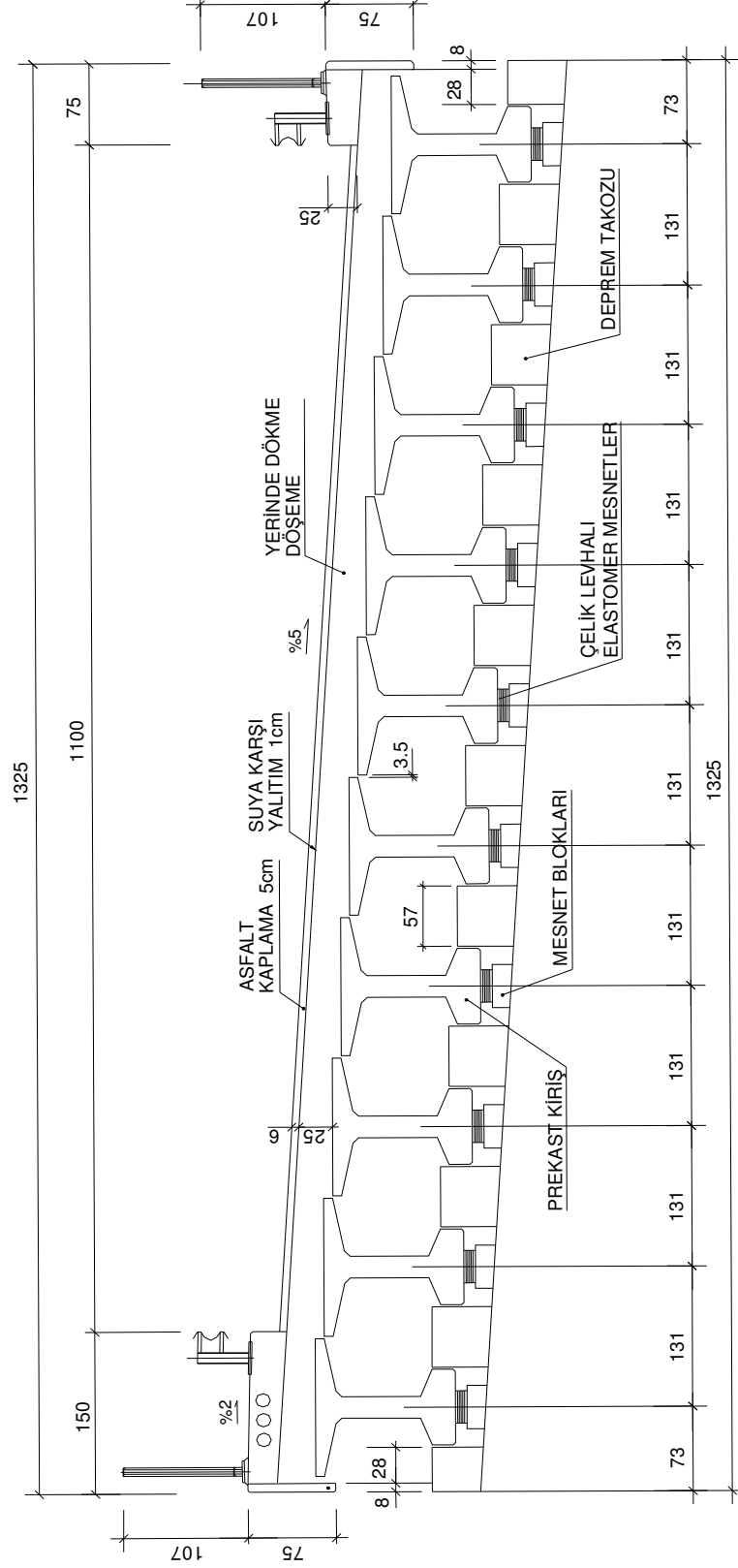
Kesit Özellikleri	Orta Ayak	Üstyapı
Alan (m ²)	6.1575	7.921
Atalet Momenti (m ⁴)	3.0172	1.815
Kayma Alanı (m ²)	5.5418	2



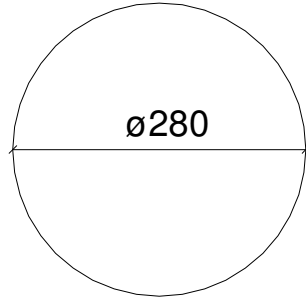
Şekil 5.1: Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası [1]



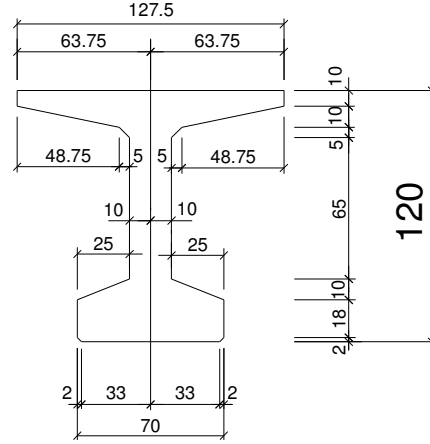
Şekil 5.2: Köprü Boy Kesiti



Şekil 5.3: Üstyapı En kesiti



KOLON KESİTİ



PREKAST KİRİŞ KESİTİ

Şekil 5.4: Kolon ve Prekast Kiriş Kesiti

5.2 Malzeme Sınıfları

Prekast kiriş dışında köprüde C25 sınıfı beton kullanılmıştır. Prekast kirişlerin beton sınıfı C40'tır. Donatı çeliği olarak S420 seçilmiştir ve prekast kirişte kullanılan öngerilme donatısı 270-K düşük gevşemeli tiptir. Türk standartlarının belirttiği malzeme özellikleri programda tanımlanmıştır, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3.

Tablo 5.2: Beton Özellikleri

Beton Sınıfı	C25	C40
Basınç Dayanımı (kN/m ²)	25000	40000
Elastisite Modülü (kNm ²)	23648850	29914000

Tablo 5.3: Donatı Özellikleri

Donatı Çeliği	S420	270-K
Akma Dayanımı (kN/m ²)	420000	1724000
Elastisite Modülü (kNm ²)	200000000	200000000

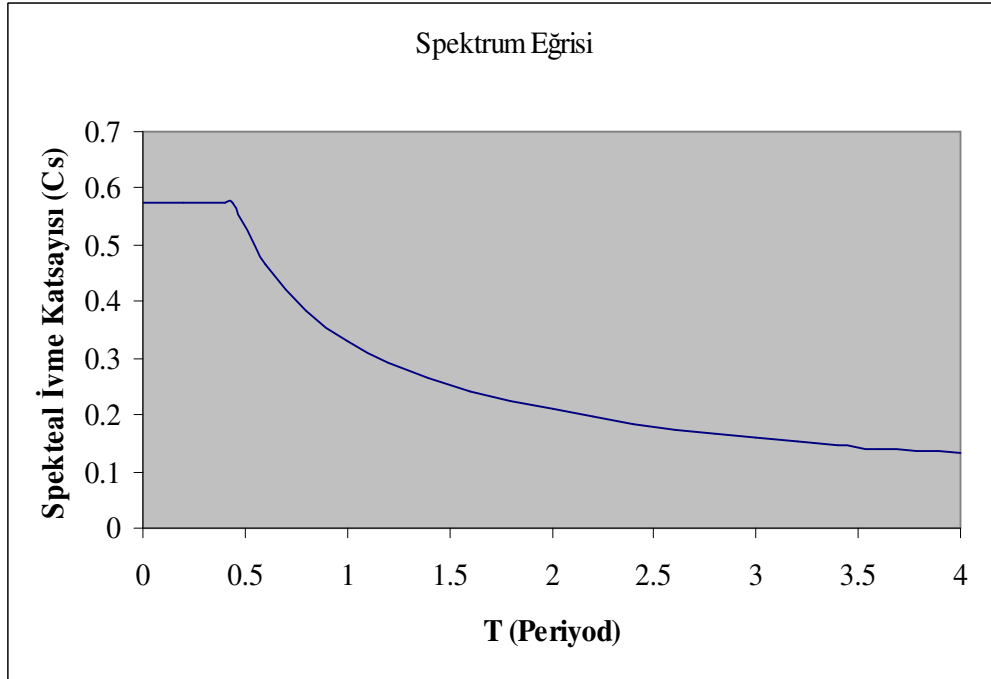
5.3 Deprem Parametreleri

Köprünün bulunduğu bölge 3. derece deprem bölgesidir. Hesaplarda ivme önerildiği şekliyle 0.23g alınacaktır. Zemin profil tipi II'dir ve yerel zemin koşullarına bağlı olarak deprem davranış katsayısı 1.2 ile artırılabacaktır, Tablo 2.2. Köprü önem sınıfı birincil olarak belirlenmiştir. İvme ve önem sınıfından köprü deprem performans kategorisi C olmaktadır, Tablo 2.1. Tekil kolonların deprem yükü azaltma katsayıları AASHTO'da R=3 olarak verilmiştir, Tablo 2.3.

5.3.1 Spektrum eğrisi

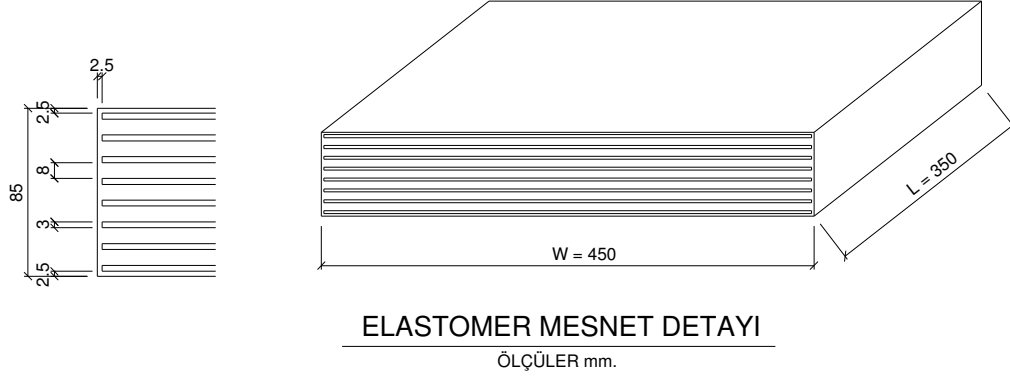
Spektrum eğrisi, AASHTO şartnamesinde belirtildiği gibi oluşturulmuştur, Şekil 5.4. Belirlenen ivme katsayısı ve zemin etkisi spektrumda göz önüne alınmıştır. Deprem davranış katsayısı (5.1) ile hesaplanmıştır.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{\frac{2}{3}}} = \frac{1.2 \times 0.23g \times 1.2}{T^{\frac{2}{3}}} \quad (5.1)$$



Şekil 5.5: AASHTO Spektrum Eğrisi

5.4 Elastomer Mesnet



Şekil 5.6: Kullanılan Elastomer Mesnetin Detayı

5.4.1 Elastomer mesnet özellikleri

Köprüde kullanılan elastomerin tipi Şekil 5.6'de ve özellikleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4: Elastomer Mesnet Özellikleri

Elastomer Mesnet Boyu L (cm)	35
Elastomer Mesnet Genişliği W (cm)	45
Elastomer Mesnet Yüksekliği H (cm)	8.5
Kauçuk toplam Kalınlığı h_r (cm)	6.1
Tek bir Kauçuk Katman Kalınlığı h_r (cm)	0.8
Çelik Plaka Kalınlığı h_s (cm)	0.3
Elastomer Alanı A (cm²)	1575
Elastomer Atalet Momenti I (cm⁴)	1600
Şekil Katsayısı S	12.3
Mesnet Adeti n (Kiriş ucunda)	10

Kayma modülü elastomerin şekil değiştirmesine bağlı olarak değişmektedir [20]. Örnekte elastomerin efektif kayma modülü AASHTO şartnamesinde tanımlanan değerlerden seçilmiştir.

$$G_{eff} = 0.68\text{MPa}=680\text{kN/m}^2$$

Köprü tasarımında elastomer mesnetin etkisi projenin başlangıcından sonuna kadar dikkatle incelenmelidir. Üretici firmanın elastomer mesnet üstünde uyguladığı test sonuçlarının kullanılması önemlidir. Başka bir deyişle elastomerin deprem davranışındaki etkisinin testlerle kanıtlanması gerekmektedir.

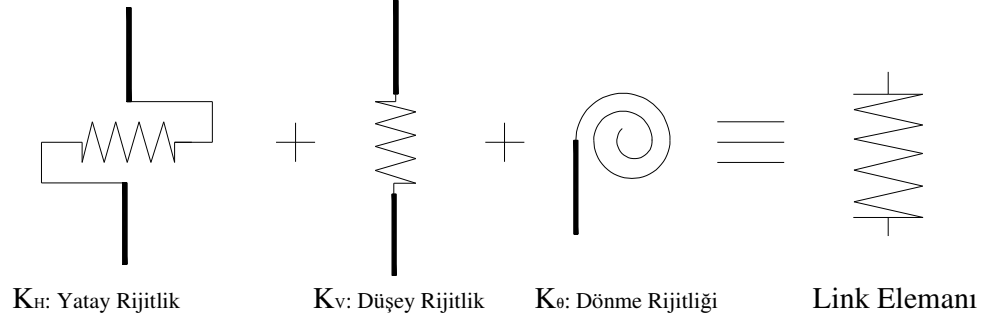
Programda link elemanı olarak modellenen elastomerin yatay (K_H), düşey (K_V) ve dönme (K_θ) rijitlikleri Tablo 5.4'de verilen özellik ve efektif kayma modülü kullanılarak Denklem 5.2a, 5.2b ve 5.2c'de hesaplanmıştır:

$$K_H = k_{eff} = \frac{G_{eff} A}{H_r} = \frac{680 \times 0.1575}{0.061} = 1755 \text{ kN / m} \quad (5.2a)$$

$$K_V = \frac{E_c A}{H} = \frac{617263 \times 0.1575}{0.085} = 1143752 \text{ kN / m} \quad (5.2b)$$

$$K_\theta = \frac{EI}{H_r} = \frac{617263 \times 0.0016}{0.061} = 16270 \text{ kNm / m} \quad (5.2c)$$

Elastomerin doğrusal olmayan davranışından dolayı yukarıda hesaplanan değerler efektif rijitliktir. SAP2000'de link elemanı 6 yöndeki serbestliği tek eleman ile tanımlanmaktadır. Elastomer, köprü boyuna doğrultusundaki ve düşeydeki yerdeğiştirmeye karşı (5.2a), (5.2b) ve (5.2c)'de verilen değerler doğrultusunda mesnetlik yapacaktır, Şekil5.6. Köprü, enine doğrultuda ise deprem takozları ile mesnetlidir. Bu etkiler link modelinde göz önüne alınacaktır.



Şekil 5.7: Link Elemanı

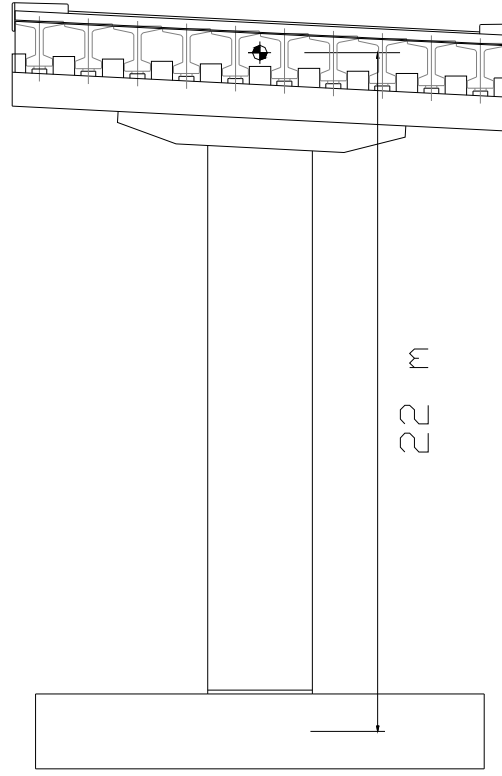
5.5 Köprünün Modellenmesi

Prekast kiriş ve betonarme döşemenin birlikte çalıştığı varsayılarak iki yapı elemanı tek bir kesitle çubuk olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer kesit özellikleri kompozit davranışına göre hesaplanmıştır. Köprü açıklıkları sırasıyla 28.7m, 30m ve 28.7m'dir. Modellemede bu açıklıklar kullanılmış, köprü kütesinin hesabı için üstyapı birim hacim kütleleri toplamda gerçek kütleleri verecek şekilde değiştirilmiştir.

Kolonların boyları temel kalınlığının orta noktası ile üstyapının eşdeğer kesitinin ağırlık merkezi arasında kalan uzunluk olarak seçilmiştir, Şekil 5.8. Her iki orta ayak 22m boyunda çubuk ile modellenmiştir. Kolonun temele bağlantısı ankastre mesnettir. Orta ayaklardaki başlık kirişinin kütlesi hesapta dikkate alınmıştır.

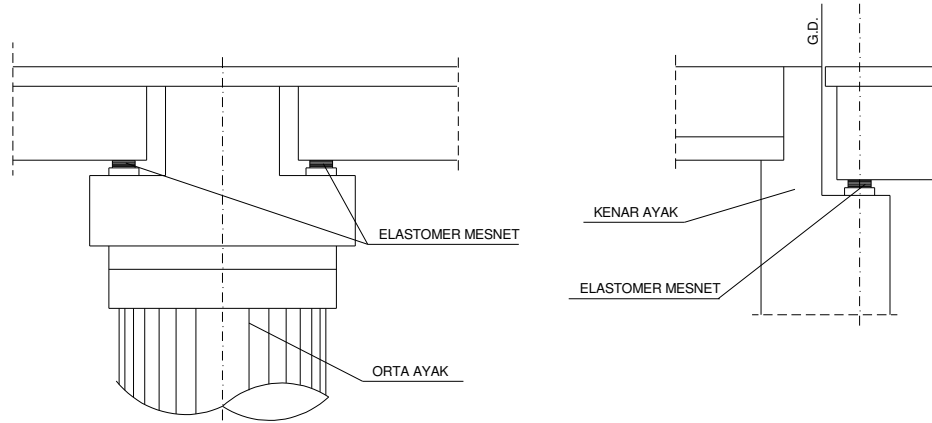
Prekast kirişlerin başlık kirişlerine serbestçe oturması nedeniyle kolon kiriş birleşimi mafsallı yapılmıştır. Bu sayede yatay deprem yükü etkisinde kolonda oluşan momentler üstyapıya aktarılmamış olacaktır, Şekil 5.9.

Genleşme derzlerinin yalnızca kenar ayaklarda olmasından dolayı köprü üstyapısı iki derz arasında sürekli kabul edilmiştir. Deprem anında üstyapının düzlemde rijit diyafram hareketi yapması sonucu üstyapıda şekil değiştirmeler oluşmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.8: Orta Ayak Görünüşü ve Ayak Hesap Boyu

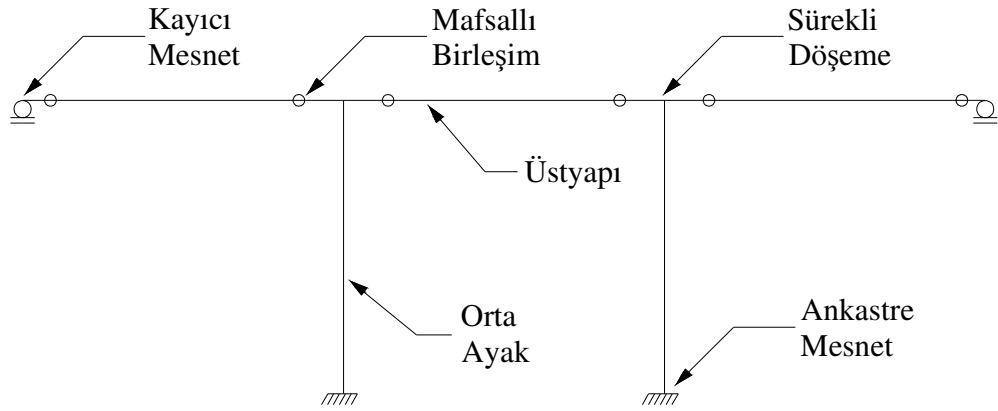
Elastomer mesnetlerin köprü boyuna doğrultuda hareketleri serbest bırakılmıştır. Enine doğrultuda ise her mesnet arasında betonarme deprem takozları konularak bu doğrultudaki hareketleri tutulmuştur. Bu mesnet koşulları modelde göz önüne alınmıştır.



Şekil 5.9: Üstyapı ile Altyapı Arasındaki Bağlantı

5.5.1 Elastomersiz model

Elastomer mesnetlerin deprem anında yırtılarak dayanımlarını kaybettiği varsayılarak oluşturulan model Şekil 5.10'da gösterilmiştir; Türkiye'de köprü tasarımında günümüzde yapılan temel varsayım budur. Modelde elastomerin deprem davranışına etkisinin olmadığı kabul edilmiştir. Altyapı ile üstyapının bağlantısı, kenar ayaklarda kayıcı mesnetlerle ve kolon uçlarında ise üstyapıya düğüm noktası ile bağlanmasıyla oluşturulmuştur.



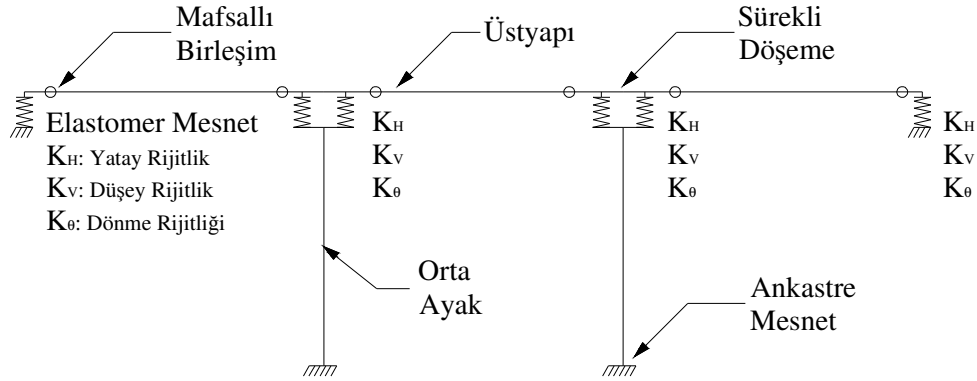
Şekil 5.10: Elastomersiz Modelleme

Kenar ayakların boyuna doğrultuda kayıcı mesnetle tanımlanması sonucu üstyapının yatayda hareketi yalnızca kolon ataletiyle karşılanır. Bu modelde kenar ayaklar yalnızca üstyapı ağırlığından gelen düşey yükleri taşımaktadır ve tasarımı kenar ayak perdesine etkiyen zemin yüklerine göre yapılmaktadır.

5.5.2 Elastomerli model

Köprünün üstyapısıyla altyapısının bağlantısı elastomer mesnetler ile sağlanmıştır. Prekast kirişler her açıklıkta kenar ayak ve başlık kirişleri üzerindeki elastomer mesnetlere serbestçe oturmaktadır, Şekil 5.9. Bu mesnetlerin rijitliklerinin modelde dikkate alınmasıyla yapının toplam rijitliğinde farklar oluşmaktadır. Elastomer mesnetler modelde kenar ayak ve orta ayakların üstyapıyla birleşimlerinde link elemanlar yardımıyla tanımlanmıştır, Şekil 5.11. Bu rijitlik değişimi öncelikle

yapının elastik titreşim periyodlarını, buna bağlı olarak yapıya etkiyen deprem yükünü ve sonuç olarak köprü tasarımını büyük ölçüde etkilemektedir.



Şekil 5.11: Elastomerli Modelleme

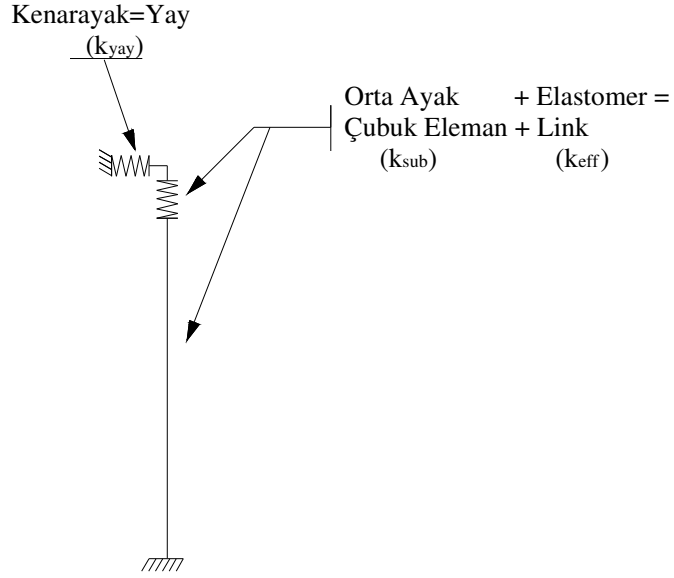
Kenar ayaklarda elastomer mesnetin rijitliğine bağlı oluşan kesme kuvvetleri kolonlardaki iç kuvvetleri değiştirmektedir.

5.5.3 Basit model ve kontrol hesabı

Hesabı yapılan köprünün geometrisi göz önüne alındığında “düzenli köprü” sınıfına girmektedir. AASHTO’nun hesap yöntemleri seçiminde 6’dan daha az açıklığa sahip olan ve köprü önem sınıfı C olan köprülerde tek modlu spektral çözüm yöntemine izin verilmektedir, Tablo 2.4.

Köprünün basitleştirilmiş tek serbestlik dereceli bir sistem ile çözümü yapılacaktır. Elastomerin depremde etkisini göz önüne alan sistem tek bir çubuk eleman ve mesnetleri temsil eden link ve yay elemanlarıyla oluşturulacaktır, Şekil 5.12.

Köprünün deprem anında kütle katılımının önemli bir kısmı üstyapıdan gelmektedir. Bu yüzden depremde diyafram davranışı gösteren üstyapının kütlesi kolon ucunda toplandığı varsayımı yapılmıştır.



Şekil 5.12: Basit Modelleme

Kolon boylarının aynı olması nedeniyle iki orta ayak tek bir kolona dönüştürülerek modelleneyecektir. Bu örnekte birleştirilmiş orta ayak kesit özellikleri, bir orta ayak kesit özelliğinin iki katı olmaktadır. Malzeme özellikleri değişmemektedir.

Orta ayak başlık kirişlerindeki elastomerler link elemanı, kenar ayaklardaki elastomer mesnetler ise yay elemanı olarak tanımlanmıştır. Link elemanı ve kolonun birlikte çalışması sonucu oluşan efektif doğrusal rijitlik

$$K_{eff} = \sum_j \left(\frac{k_{sub} k_{eff}}{k_{sub} + k_{eff}} \right) \quad (5.3)$$

ile bulunmaktadır.

Kenar ayaklar mesnetlerinin yatay doğrultudaki rijitliği ile efektif doğrusal rijitlik toplanarak yapının doğrusal rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sum K = \sum K_{eff} + k_{yay} \quad (5.4)$$

Son olarak yapının periyodu sayısal olarak hesaplanacaktır. Bu hesaba bu çalışmada kontrol hesabı denilmiştir. Hesapta elde edilen periyod değeri ile modellemelerden bulunan periyodlar karşılaştırılacaktır. Kontrol hesabında periyod (5.5) ile hesaplanmaktadır:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_T}{\sum K}} \quad (5.5)$$

Burada:

$\sum K$, yapının toplam rijitliğidir ve (5.4)'de hesaplanmıştır.

M_T , yapının depremde titreşime giren kütesidir. Benzer bir yaklaşım olarak üstyapı tüm kütesi ($M_{üst}$) ve orta ayak kütesinin (M_{alt}) yarısının toplamı alınmıştır:

$$M_T = M_{üst} + 0.5M_{alt} \quad (5.6)$$

5.6 Çözümler

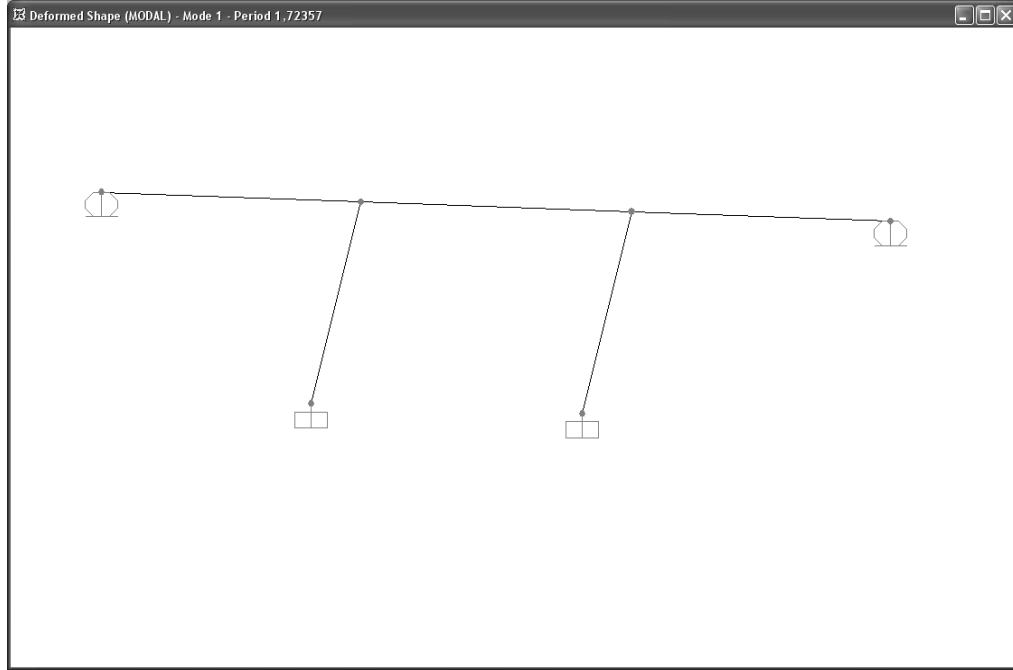
Oluşturulan üç köprü modeli SAP2000 ile çözülmüştür. Çözümde elde edilen periyod, eleman iç kuvvetleri ve yerdeğiştirmeler karşılaştırmalı olarak yorumlanacaktır. Bölüm 5.5'de anlatılan modellerin sırasına göre sonuçlar da aynı sırayla verilecektir.

5.6.1 Elastomersiz model çözümü

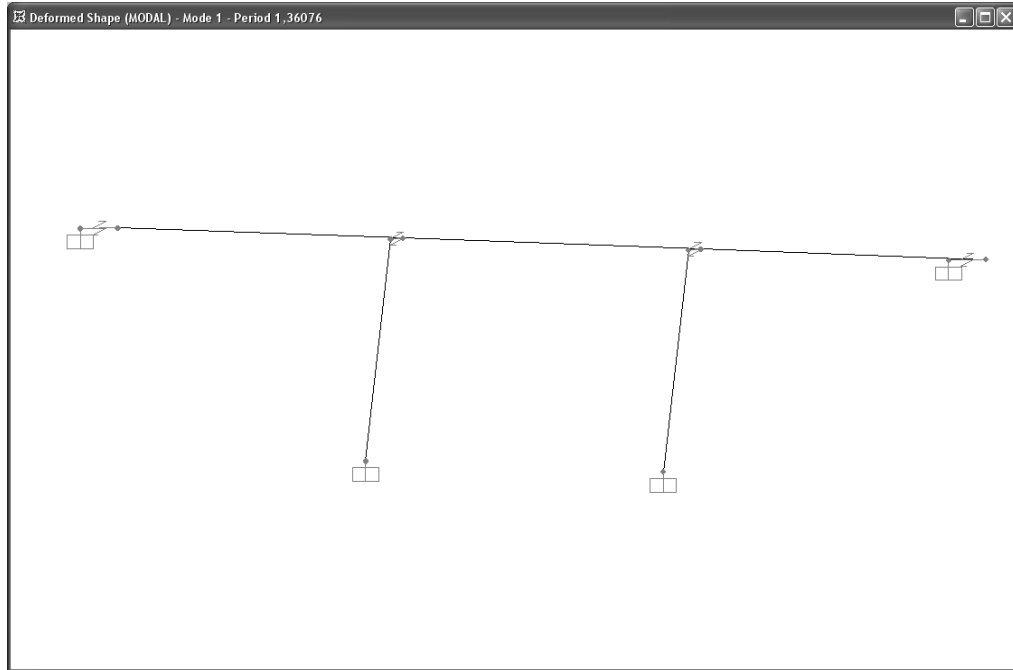
Elastomersiz model birinci elastik titreşim periyodu $T=1.72$ sn hesaplanmıştır. Şekil 5.13'de birinci titreşim periyodunun köprü boyuna doğrultusunda oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni boyuna doğrultudaki rijitliğin enine doğrultuya göre daha düşük olmasıdır. Birinci moddaki kütle katılım %100'dür.

5.6.2 Elastomerli model çözümü

Elastomer mesnetlerin köprü modellemesinde kullanılması sonucu köprünün birinci elastik titreşim periyodu $T_e=1.36$ sn olmaktadır, Şekil 5.14. Köprünün birinci modu boyuna doğrultuda oluşmuştur. Bu moddaki kütle katılım %99'dur.



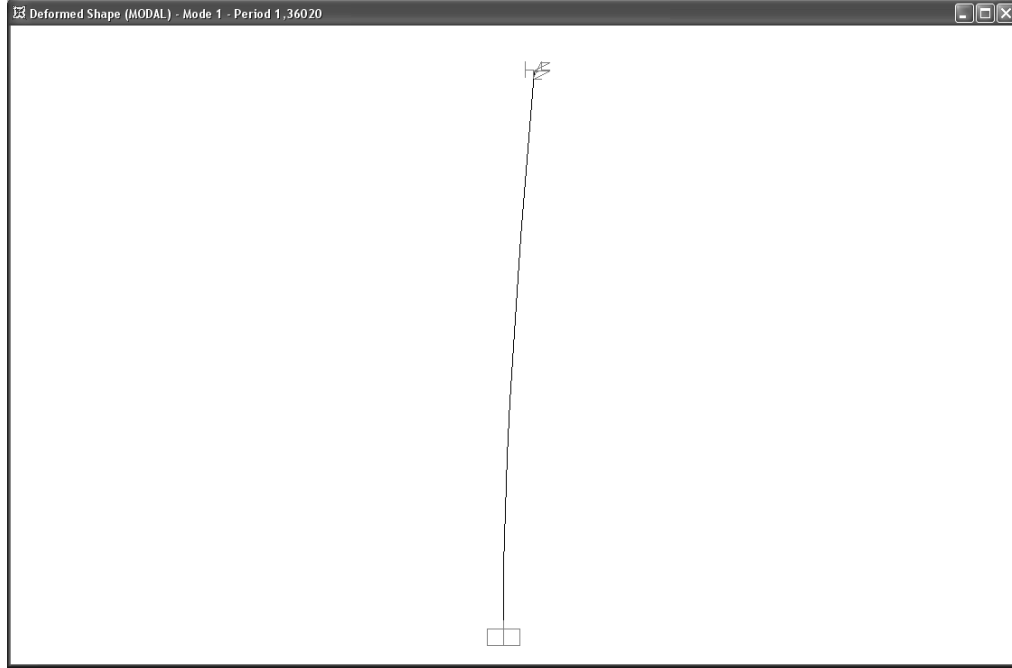
Şekil 5.13: Elastomersiz Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T = 1.72\text{sn}$



Şekil 5.14: Elastomerli Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_e = 1.36\text{sn}$

5.6.3 Basit model çözümü ve kontrol hesabı

Köprünün tek bir çubuk eleman ve elastomerler için doğrusal link ve yay elemanı seçilmesiyle kurulan basit modelde birinci elastik titreşim periyodu $T_b=1.36sn$ bulunmuştur, Şekil 5.15. Birinci moda boyuna doğrultudaki kütle katılımı %99'dur.



Şekil 5.15: Basit Model Birini Elastik Titreşim Periyodu $T_b = 1.36sn$

Köprünün modele bağlı kalmadan hesabı yapılarak elastomerli ve basit modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Köprünün periyodunun hesabı için yapı rijitliği ve kütlesi öncelikli olarak bulunmalıdır.

Köprü orta ayaklarının rijitliği

$$k_{sub} = \frac{3EI}{H^3} = \frac{3 \times 23648850 \times 3.0172}{22^3} = 20103.3kN / m \quad (5.7)$$

olarak hesaplanmıştır.

Orta ayak üzerinde bulunan elastomer mesnetlerin toplam rijitliği aşağıdaki gibidir:

$$nxk_{eff} = n \frac{G_{eff} A}{H_r} = 20 \frac{680 \times 0.1575}{0.061} = 35100kN / m \quad (5.8)$$

Orta ayak rijitliği ve elastomerlerin yatay rijitlikleri efektif doğrusal rijitlik (K_{eff}) ile tek bir değere indirilir:

$$K_{eff} = \frac{k_{sub}k_{eff}}{(k_{sub} + k_{eff})} = \frac{20103.3 \times 35100}{(20103.3 + 35100)} = 12782.3 \text{ kN / m} \quad (5.9)$$

Kenar ayaklardaki elastomerin yatay rijitliği tek elastomerin (k_{eff}) mesnet adediyle çarpılmasıyla bulunmuştur:

$$k_{yay} = nxk_{eff} = n \frac{G_{eff} A}{H_r} = 10 \frac{680 \times 0.1575}{0.061} = 17550 \text{ kN / m} \quad (5.10)$$

Yapıdaki toplam yatay rijitlik orta ayağın efektif doğrusal rijitliği ve kenar ayak mesnetlerinin rijitlikleri toplamıdır. Bu değer

$$\sum K = \sum (K_{eff} + k_{yay}) = 2(12782.3 + 17550) = 60664.6 \text{ kN / m} \quad (5.11)$$

olarak hesaplanır.

Üstyapı ve altyapının depremdeki kütleleri (5.12)'de verilmiştir

$$M_T = M_{üst} + 0.5M_{alt} = 2701.36 + 300.4 = 3001.76 \text{ ton} \quad (5.12)$$

Yukarıda hesaplanan kütle ve rijitlik yardımıyla yapı birinci elastik periyodu

$$T_k = 2\pi \sqrt{\frac{M_T}{\sum K}} = 2\pi \sqrt{\frac{3001.76}{60664.6}} = 1.398 \text{ sn} \quad (5.13)$$

olarak elde edilir.

5.6.4 Çözümlerin değerlendirilmesi

- Elastomerli köprünün periyodu (T_e), elastomersiz köprünün periyodundan (T) daha kısadır ($T_e = 1.36 \text{ sn} < T = 1.72 \text{ sn}$).

Bu durum şu şekilde açıklanabilir:

- 1- Köprü orta ayaklarının uzun ve buna bağlı yatay rijitlerinin düşük olması,
- 2- Elastomer mesnetlerin köprü orta ayaklarından daha rijit olması,
- 3- Elastomersiz modelde kenar ayaklar kayıcı mesnetken elastomerli modelde kenar ayaklardaki elastomerlerin yapıya ek rijitlik katmasıdır.

Yukarıda verilen nedenlerin daha iyi değerlendirilebilmesi için orta ayak boyu yarıya indirilmiş aynı üstyapıya sahip köprü modelleri Bölüm 5.7’de çözülmüştür.

- Elastomerli model ve basit modelin aynı periyod değerlerini verdiği görülmektedir ($T_e = T_b = 1.36sn$).

Üç boyutlu modelin çok modlu çözümü sonrasında sağlama için basit bir model oluşturularak sonuçlar kontrol edilebilmektedir.

- Modellemeden bağımsız yapılan kontrol hesabı sonucunda yakın periyod değeri elde edilmiştir ($T_e/T_k=0.98$).

İki periyod arasındaki fark, kütle ve rijitliğin daha kapsamlı hesaplar sonucunda elde edilmesiyle ortadan kalkmaktadır. Ancak kontrol hesabının kolay olması açısından en basit yaklaşımlar yapılmıştır.

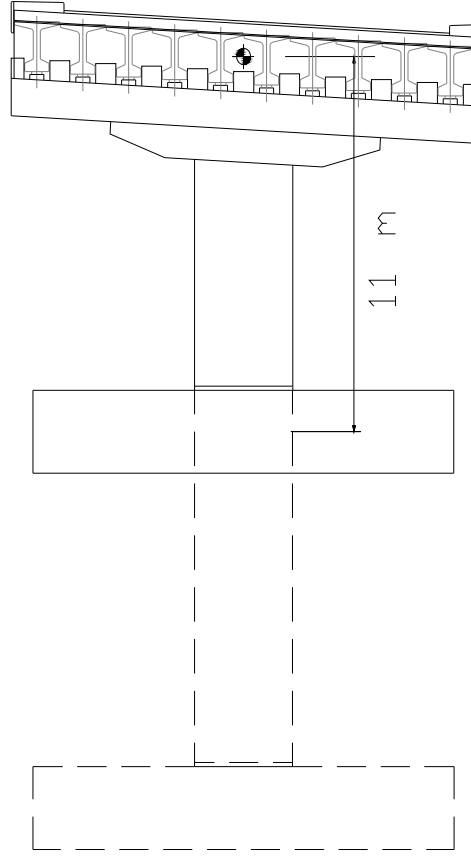
5.7 Kısa Kolonlu Köprünün Modellenmesi

Bölüm 5.5’de modelleme aşamaları ve Bölüm 5.6’da sonuçları verilen köprü daha kısa ($H_{kolon} = 11m$) ve rijit orta ayaklar ile modellenmiş ve çözülmüştür, Şekil 5.16.

Modelleme ve hesap aşamaları bu köprü için de geçerli olacaktır. Bu yüzden bu bölümler tekrarlanmadan çözüm sonuçlarına geçilecektir.

5.7.1 Elastomersiz model çözümü

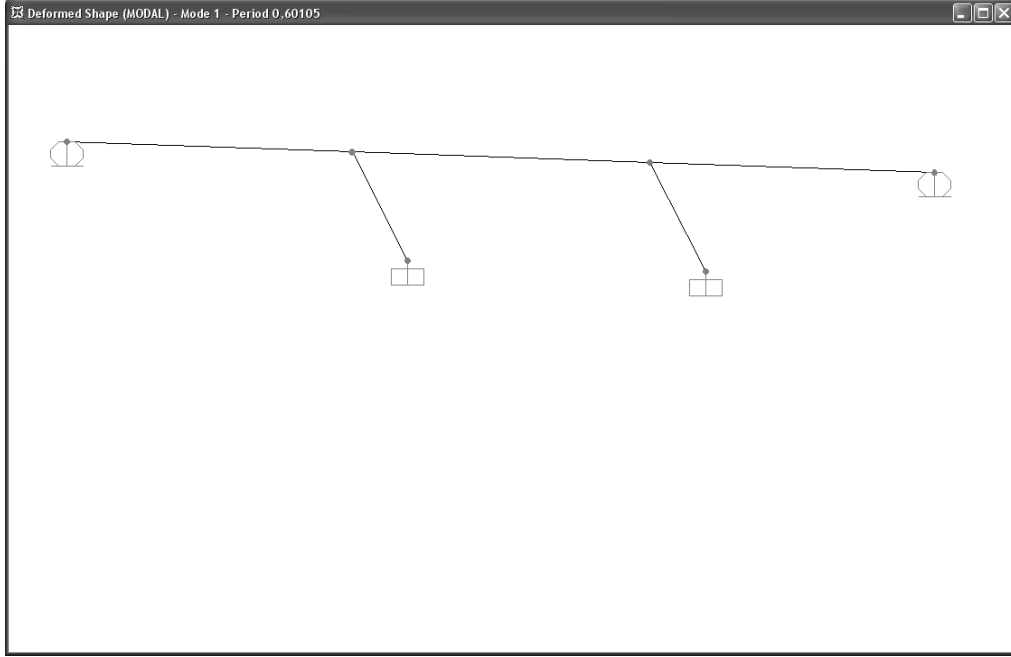
Elastomersiz köprünün birinci elastik titreşim periyodu $T=0.60sn$ bulunmuştur. Şekil 5.17’de birinci titreşim periyodunun köprü boyuna doğrultusunda olduğu görülmektedir. Bunun nedeni boyuna doğrultudaki rijitliğin enine doğrultuya göre daha düşük olmasıdır. Birinci moddaki kütle katılımı %100’dür.



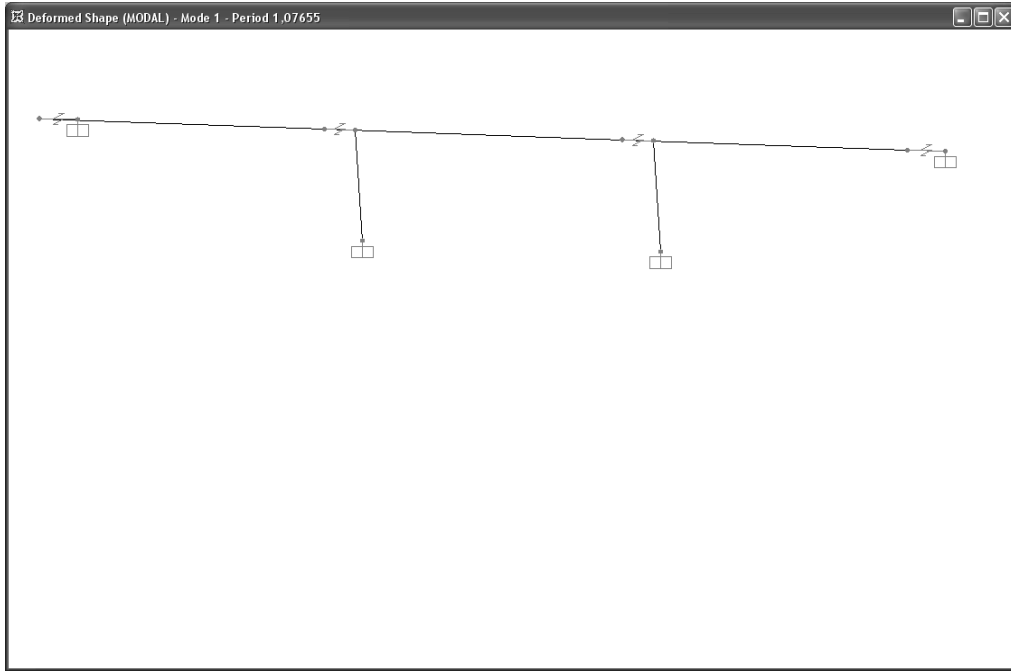
Şekil 5.16: Kısaltılan Orta Ayak Görüntüsü ve Ayak Hesap Boyu ($H = 11\text{m}$)

5.7.2 Elastomerli model çözümü

Elastomer mesnetlerin köprü modellemesinde kullanılması sonucu köprünün birinci elastik titreşim periyodu $T_e=1.08\text{sn}$ olmaktadır, Şekil 5.18. Köprünün birinci modu boyuna doğrultuda oluşmuştur. Bu moddaki kütle katılım %97'dur.



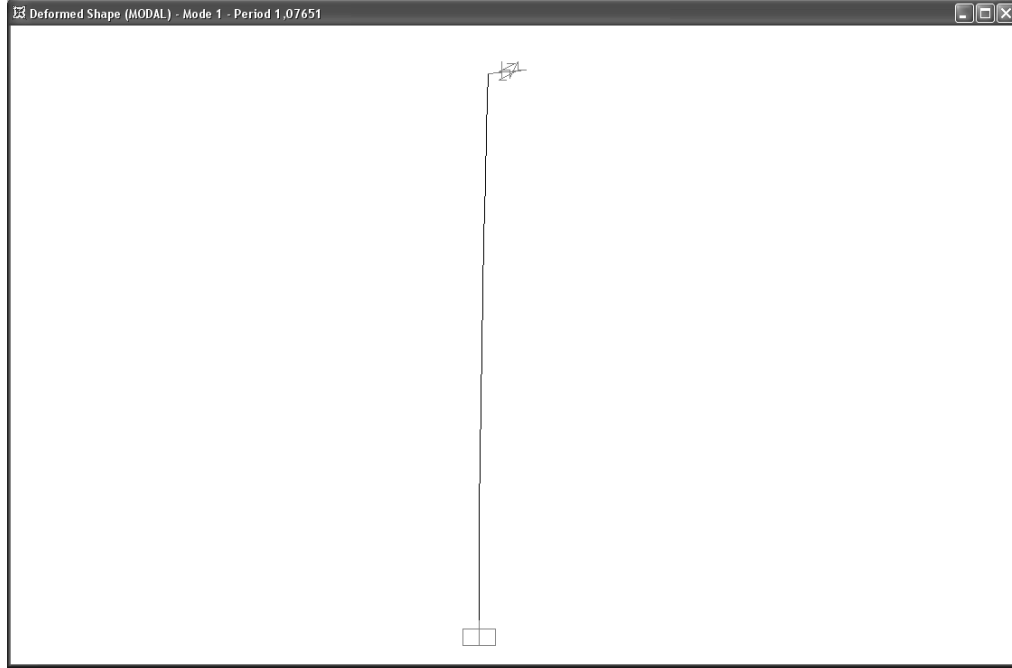
Şekil 5.17: Elastomersiz Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T = 0.60\text{sn}$



Şekil 5.18: Elastomerli Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_e = 1.08\text{sn}$

5.7.3 Basit model çözümü ve kontrol hesabı

Köprünün tek bir çubuk eleman ve elastomerler için doğrusal link ve yay elemanı seçilmesiyle kurulan basit modelde birinci elastik titreşim periyodu $T_b=1.08$ sn bulunmuştur, Şekil 5.19. Birinci moda boyuna doğrultudaki kütle katılımı %97'dir.



Şekil 5.19: Basit Model Birinci Elastik Titreşim Periyodu $T_b = 1.08$ sn

Köprünün modele bağlı kalmadan hesabı yapılarak elastomerli ve basit modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırması yapılacaktır. Köprünün periyodunun hesabı için yapı rijitliği ve kütlesi öncelikli olarak bulunmalıdır.

Köprü orta ayaklarının rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$k_{sub} = \frac{3EI}{H^3} = \frac{3 \times 23648850 \times 3.0172}{11^3} = 160826.4 \text{ kN / m} \quad (5.14)$$

Orta ayak üzerinde bulunan elastomer mesnetlerin toplam rijitliği

$$n \times k_{eff} = n \frac{G_{eff} A}{H_r} = 20 \frac{680 \times 0.1575}{0.061} = 35100 \text{ kN / m} \quad (5.15)$$

olarak elde edilir.

Orta ayak rijitliği ve elastomerlerin yatay rijitlikleri efektif doğrusal rijitlik (K_{eff}) ile tek bir değere indirilir. Bu değer

$$K_{eff} = \frac{k_{sub}k_{eff}}{(k_{sub} + k_{eff})} = \frac{160826.4 \times 35100}{(160826.4 + 35100)} = 28811.9kN / m \quad (5.16)$$

olur.

Kenar ayaklardaki elastomerin yatay rijitliği tek elastomerin (k_{eff}) mesnet adediyle çarpılmasıyla

$$k_{yay} = nxk_{eff} = n \frac{G_{eff} A}{H_r} = 10 \frac{680 \times 0.1575}{0.061} = 17550kN / m \quad (5.17)$$

elde edilir.

Yapıdaki toplam yatay rijitlik orta ayağın efektif doğrusal rijitliği ve kenar ayak mesnetlerinin rijitlikleri toplamıdır:

$$\sum K = \sum (K_{eff} + k_{yay}) = 2(28811.9 + 17550) = 92723.7kN / m \quad (5.18)$$

Üstyapı ve altyapının depremdeki kütleleri

$$M_T = M_{Üst} + 0.5M_{Alt} = 2701.36 + 300.4 = 3001.76ton \quad (5.19)$$

olur

Yukarıda hesaplanan kütle ve rijitlik yardımıyla yapı birinci elastik periyodu (5.20)'de hesaplanmıştır:

$$T_k = 2\pi \sqrt{\frac{M_T}{\sum K}} = 2\pi \sqrt{\frac{3001.76}{92723.7}} = 1.13sn \quad (5.20)$$

5.7.4 Çözümlerin Değerlendirilmesi

- Elastomerli köprünün periyodu (T_e), elastomersiz köprünün periyodundan (T) daha uzundur ($T_e = 1.08sn < T = 0.60sn$).

Elastomerin yapıya kattığı esneklikten dolayı periyotta uzama olmuştur. Elastomerin esnekliği kısa ve rijit ayaklı köprülerde etkisini göstermektedir.

- Elastomerli model ve basit modelin aynı periyod değerlerini verdiği görülmektedir ($T_e = T_b = 1.08\text{sn}$).

Üç boyutlu modelin çok modlu çözümü sonrasında sağlama için basit bir model oluşturularak sonuçlar kontrol edilebilmektedir.

- Modellemeden bağımsız yapılan kontrol hesabı sonucunda yakın periyod değeri elde edilmiştir ($T_e / T_k = 0.96$).

İki periyod arasındaki fark, kütle ve rijitliğin daha kapsamlı hesaplar sonucunda elde edilmesiyle ortadan kalkmaktadır. Ancak kontrol hesabının kolay olması açısından en basit yaklaşımlar yapılmıştır.

5.8 Sonuçların Karşılaştırması

Köprünün farklı orta ayak boylarıyla çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 5.5’de verilmiştir.

İlk köprü modelinde ($H_{\text{kolon}}=22\text{m}$) elastomerli modelin Elastomersiz modele göre daha rijit olduğu görülmektedir. Bundan dolayı elastomerli modeldeki toplam taban kesme kuvveti daha fazladır ($\Sigma V_e / \Sigma V = 1.16$). Ancak elastomerli modelde kesme kuvvetinin bir kısmının kenar ayaklara etkimesi sonucu orta ayaklardaki kesme kuvveti ($V_e / V = 0.5$) ve buna bağlı moment ($M_e / M = 0.5$) değerleri önemli ölçüde azalmıştır.

Kısa kolonlu köprü modelinde elastomerin esneklik özelliği daha iyi anlaşılabilir. Rijit ayakları olan köprünün periyodu elastomer mesnetin hesapta dikkate alınmasıyla uzamıştır ($T_e / T = 1.8$). Rijit ayaklı köprü modelinde elastomerin iç kuvvetlere olumlu etkisi daha belirginleşmiştir ($V_e / V = 0.41$).

Basit modelleme ve kontrol hesaplarında elde edilen değerlerin çok modlu çözüm ve üç boyutlu modellemeyle bulunan sonuçlarla çok yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 5.5: Köprü Modellerinin Karşılaştırılması

	Köprü ($H_{kolon} = 22m$)			Kısa Kolonlu Köprü ($H_{kolon} = 11m$)		
	Elastomer Mesnetsiz	Elastomer Mesnetli	Basit	Elastomer Mesnetsiz	Elastomer Mesnetli	Basit
T (sn)	1.72	1.36	1.36	0.60	1.08	1.08
M (kNm)	74795	37778	37720	71635	29630	29615
V (kN)	3400	1712	1709	6512	2675	2673
V_k (kN)	-	2234	2234	-	1613	1613
ΣV (kN)	6800	7892	7886	13024	8576	8572
d_{sub} (cm)	17	8.6	8.6	4.2	1.7	1.7
d_i	-	4.1	4.1	-	7.4	7.5
d	17	12.7	12.7	4.2	9.1	9.2

Burada:

T : Periyod

M : Kolon alt ucundaki Moment ($R=1$)

V: Bir Kolondaki Kesme Kuvveti

V_k : Bir Kenar ayaktaki Yatay Kuvvet

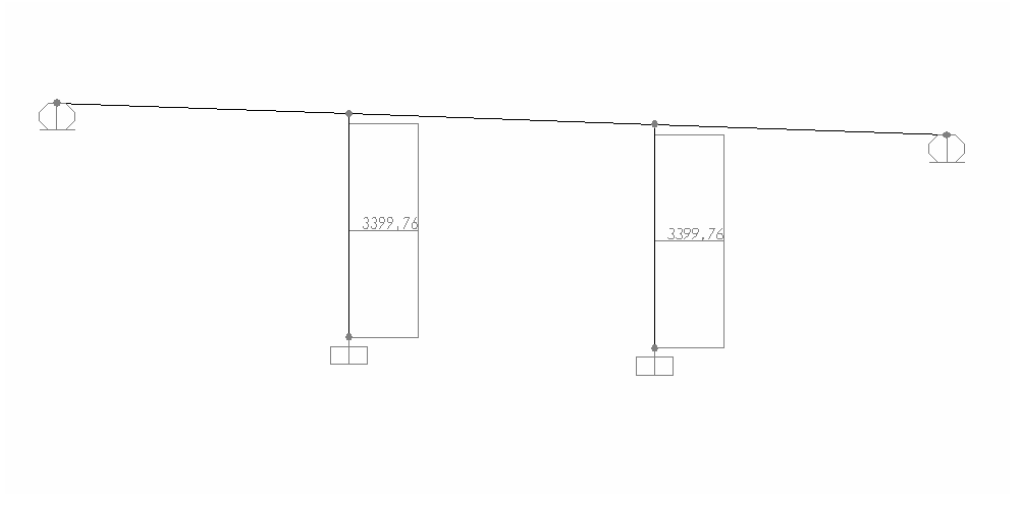
ΣV : Toplam Taban Kesme Kuvveti

d_{sub} :Altyapının uç Yerdeğiştirmesi

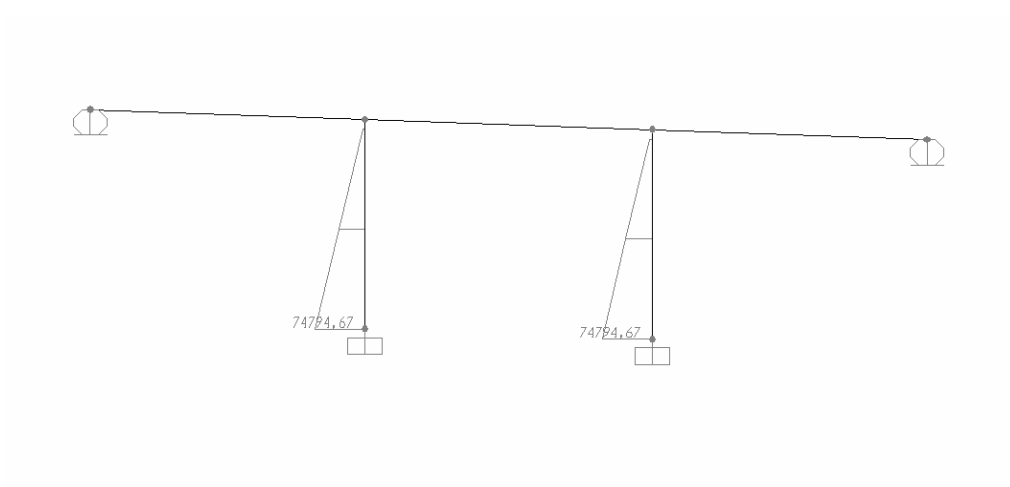
d_i :Elastomer Mesnet Yerdeğiştirmesi

d : Köprü toplam Yerdeğiştirmesi

Köprü modelinin kolonlarında oluşan tipik iç kuvvet diyagramları Şekil 5.20 ve 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.20: Orta Ayak Kesme Kuvveti Diyagramı



Şekil 5.21: Orta Ayak Moment Diyagramı

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Özet

Bu çalışmada, Türkiye’de yaygın olarak inşa edilen prekast öngerilmeli kirişli betonarme köprülerin depreme dayanıklı tasarımı özetlenmiştir. Ülkemizde köprülerin deprem tasarımına ilişkin bir yönetmelik bulunmaması nedeniyle uluslararası yönetmeliklerin en kapsamlı olanlarından AASHTO Şartnamesinin tasarım koşulları ülkemize uyarlanmaya çalışılmıştır. Elastomer mesnetlerin izolatör olarak kullanılması durumunda deprem davranışındaki değişim incelenmiştir.

6.2 Sonuçlar ve Öneriler

Prekast Kirişli Betonarme Köprülerin AASHTO’ya Göre Depreme Dayanıklı Tasarımı konulu bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Türkiye’de inşa edilen köprülerde deprem parametreleri Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikten (2007) alınarak sistem tasarımı AASHTO’ya göre yapılmaktadır; benzer performans düzeyleri ve tasarım ivme değerleri kullanıldığından bunda bir sakınca görülmemektedir.
2. Aynı parametreler alındığında bu iki yönetmelik uyarınca benzer tasarım spektrumları elde edilmektedir.
3. Deprem yükünün hesabında köprünün aktif fay hatlarına göre konumu, inşa edileceği bölgedeki zeminin tipi, köprünün dinamik karakteristikleri, yapının öngörülen kullanım ömrü ve deprem anında göstermesi beklenen performans gibi kriterler dikkate alınmalıdır.
4. Ayaklardaki elastik olmayan davranışı tasarımda hesaba katmak için seçilecek deprem yükü azaltma katsayıları iki yönetmelik arasında

birbirinden çok farklıdır. Çerçevesel için AASHTO'da $R=5$ iken DBYBHY'de sünelik düzeyi yüksek çerçevelerde $R=8$ 'dir.

5. İki yönetmelik arasındaki en önemli farkın yapı önem katsayısı olduğu görülmüştür. AASHTO'da böyle bir katsayı yoktur. Bu şartnamede köprünün önemine göre tasarım koşullarında değişiklikler olmaktadır. Köprü tasarımında güvenli tarafta kalmak için deprem yükünü önem katsayısı ile arttırmak mühendis yorumuna bırakılmıştır. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yere özel depremsellik incelemesi sonucunda belirlenecek spektrum eğrileri önemli köprüler için kullanılabilir.
6. Türkiye'de prekast kirişli betonarme köprüler ülke genelinde yaygın biçimde inşa edilmektedir. Son yıllarda prekast kiriş seçiminde "U" kesit bırakılarak "I" ya da "T" kesitlere geçilmiştir.
7. Elastomer mesnetlerin proje başlangıcından sonuna kadar dikkate alınması ve tasarımdan elde edilen sonuçların üretici firmanın test sonuçlarıyla ispatlanması gerekmektedir.
8. Elastomerin deprem davranışına olumlu etkisi vardır. Bu etki köprü taşıyıcı sisteminin geometrik özelliklerine, özellikle ayak rijitliklerine çok bağlıdır. Uzun ve esnek orta ayakları olan köprüde elastomerlerin modellenmesi köprüyü daha rijit hale getirirse de kolon kesme kuvvetlerinde %50 azalma olmuştur. Bunun nedeni kenar ayakların elastomerli modelde boyuna doğrultuda köprüye mesnetlik yaparak kesme kuvvetini orta ayaklarla paylaşmasıdır. Elastomerin esneklik etkisi kısa ve rijit orta ayakları olan köprüde belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Periyod elastomersiz modele göre %80 uzamıştır. Periyod uzaması ile birlikte köprüdeki tasarım yerdeğiştirmesi de %90 artmıştır. İç kuvvetlerde ise %60'a yakın azalma olmuştur.
9. Taşıyıcı sistemi düzenli köprülerde basitleştirilmiş model ve kontrol hesabı oldukça uygun sonuçlar vermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **DBYBHY**, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.*
- [2] **AASHTO**, 1996. Standard Specifications for Highway Bridges, Sixteenth Edition, *American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- [3] **AASHTO**, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges, Seventeenth Edition, *American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- [4] **AASHTO**, 1997. Commentary to Standard Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- [5] **AASHTO**, 1998. Commentary to Standard Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- [6] **CALTRANS**, 1994. Memo to Designers 7-1, Bridge Bearings, *California Transportation Office.*
- [7] **ATC-6**, 1981, Seismic Design Guidelines for Highway Bridges, *Applied Technology Council, Federal Highway Administration.*
- [8] **ATC-18**, 1997. Seismic Design Criteria for Bridges and Other Highway Structures: Current and Future, *Applied Technology Council, Federal Highway Administration.*
- [9] **AASHTO**, 2001. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washington, D.C.
- [10] **Yazdani, N., Eddy, S., Cai, C.S.**, 2000. Effect of Bearings on Precast Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Bridge Engineering* , **5(3)**, 224-232.

- [11] **Dai, W., Moroni, M.O., Roesset, J.M., Sarrazin, M.,** 2005. Effect of isolation pads and their stiffness on the dynamic characteristics of bridges, *Elsevier*.
- [12] **Jangid, R.S.,** 2002. Seismic Response of Bridges, *Journal of Engineering*, 9(2), 156-166.
- [13] **Dicleli, M. and Buddaram, S.,** 2006. Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect, *Elsevier*.
- [14] **Kikuchi M. and Aiken, I.D.,** 1996. An Analytical Hysteresis Model For Elastomeric Seismic Isolation Bearings, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, Vol.26, 215-231.
- [15] **Penzien, J.,** 2000. Seismic performance of transportation structures, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) Distinguished Lecture, Annual Meeting, St. Louis, US, June 3,2000.
- [16] **ACI 343R-95,** 2003. Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures, American Concrete Institute, Michigan
- [17] **Erol, Ş.,**1994. Karayolu Köprülerinin Sismik Boyutlandırmasıyla İlgili Bazı Yönetmeliklerin İncelenmesi, Karşılaştırılması ve Uygulamalar, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.,** 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [19] **ACI 341.2R-97,** 1998. Seismic Analysis and Design of Concrete Bridge Systems, American Concrete Institute, Michigan
- [20] **HITEC 98-11,** 1998. Evaluation Findings For Scougal Rubber Corporation High Damping Rubber Bearings, *Highway Innovative Technology Evaluation Center*.
- [21] **Kulak, K.H. and Hughes, T.H.,** 1994. Correlation of Elastomer Material Properties from Small Specimen Tests and Scale-Size Bearing Tests, *U.S. Department of Energy, Office of Technical Support Programs*.
- [22] **BS5400,** 1983. Steel, Concrete and Composite Bridges: Part 9, Bridge Bearings, *British Standards Institution*, London.

- [23] **Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.**, 1996. Seismic design and retrofit of bridges, Wiley, New York.
- [24] **Yeşil, B.A.**, 1998. Viyadük/Köprü ve Üst Geçitler İçin Alt Yapı ve Üst Yapı Sistemleri Karşılaştırma Raporu, Tefken Mühendislik A.Ş.
- [25] **Hewson, N.R.**, 2003. Prestressed Concrete Bridges : Design and Construction, Thomas Telford, London.
- [26] **Moon, B.Y., Kang, G.J., Kang, B.S., Kelly, J.M.**, 2002. Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation, *Journal of Materials Processing Technology* 130-131, 145-150.
- [27] **SAP 2000**, 2007. Structural Analysis Program, Computers and Structures INC., Berkeley, California.

ÖZGEÇMİŞ

Can AKOĞUL, 1981 yılında İstanbul'da doğmuştur. İlköğrenimini Etiler Hasan Ali Yücel ilköğretim ilkokulunda, orta ve lise öğrenimini İstanbul Özel Alman Lisesi'nde tamamlamış; Abitur diploması almıştır. 2000 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır. 2004 yılında lisans eğitimini iyi derece ile tamamlamış, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programına girmeye hak kazanmıştır. 2004 yılında özel bir şirkette proje mühendisi olarak göreve başlamıştır. Halen bu şirkette çalışmaktadır.