

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Köprülerde Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı ve Köprü Deprem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, her aşamada gerek bilgi gerek tecrübelerini gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen ve tez çalışmamı başından beri takip ederek inceleyen ve değerli görüşleriyle bilgilerini benimle paylaşan Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren Annem Bayan NIYETBAYEVA'a ve ablam Ulpetay NIYETBAYEVA'a teşekkürlerimi bir borç olarak bilirim. Bununla birlikte tüm desteğiyle yanımda olan Madina BEKTASSOVA'a, Dauren ALIMZHANOV'a teşekkür eder ve bu çalışmanın yeni yapılacak çalışmalar için faydalı olmasını ümit ederim.

Yersaiyn BEXULTAN  
Trabzon 2021

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Köprülerde Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı ve Köprü Deprem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmaya baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili programda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığımı metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/09/2021

Yersaiyn BEXULTAN

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Tez Çalışması ile İlgili Literatür Taraması .....	2
1.3. Sismik Yalıtım Kavramı .....	5
1.3.1. Esneklik .....	6
1.3.2. Enerji Sönümleme .....	7
1.3.3. Yeterli Rijitlik .....	8
1.4. Sismik Yalıtım Mesnetleri.....	9
1.4.1. Elastomer Sismik Yalıtım Mesnetleri.....	9
1.4.1.1. Düşük Sönümlü Elastomer Mesnetler .....	10
1.4.1.2. Yüksek Sönümlü Elastomer Mesnetler .....	12
1.4.1.3. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetler .....	13
1.5. Elastomer Mesnet Mekanik Özellikleri.....	15
1.5.1. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Nominal Değerleri.....	16
1.5.2. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Alt ve Üst Sınır Değerleri .....	17
1.6. Sismik Yalıtımlı Köprülerin Analiz Yöntemleri .....	17
1.6.1. Tek Modlu Analiz.....	18
1.6.2. Çok Modlu Analiz .....	22
1.6.3. Zaman Tanım Alanında Analiz .....	24
1.7. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı .....	24

1.7.1.	Gerekli Yükler .....	24
1.7.1.1.	Sabit Yük .....	24
1.7.1.2.	Hareketli Yük.....	25
1.7.1.2.1.	Tasarım Şerit Sayısı.....	25
1.7.1.2.2.	Tasarım Araç Hareketli Yükü.....	25
1.7.1.2.2.1.	Tasarım Kamyonu .....	26
1.7.1.2.2.2.	Tasarım Tandemi.....	26
1.7.1.2.2.3.	Tasarım Şerit Yükü.....	27
1.7.1.2.3.	Çoklu Hareketli Yük Faktörü .....	27
1.7.1.2.4.	Dinamik Yük Payı .....	27
1.7.1.2.5.	Frenleme Kuvveti .....	28
1.7.1.3.	Tasarım ve Maksimum Deprem Yükü .....	28
1.7.2.	Tasarım Isıl Hareketi .....	29
1.7.3.	Elastomer Mesnet Boyut ve Özelliklerinin Seçimi .....	29
1.7.4.	Alt ve Üst Sınır Analizi .....	31
1.7.5.	Elastomer Mesnet Düşey Rijitlik.....	32
1.7.6.	Tek ve Çok Modlu Analiz Karşılaştırması .....	33
1.7.7.	Mesnet Çekme Kuvveti Kontrolü.....	33
1.7.8.	Merkezlenme Özelliği Kontrolü.....	34
1.7.9.	Altyapı Esneklik Etkisi Kontrolü.....	35
1.7.10.	Mesnet Yeterlilik Değerlendirmeleri.....	36
1.7.10.1.	Servis Yük Kontrolü .....	37
1.7.10.2.	Tasarım Deprem Kontrolü.....	39
1.7.10.3.	Maksimum Deprem Kontrolü.....	41
1.7.11.	Mesnet Çelik Plaka ve Civata Kontrolü .....	43
1.7.11.1.	Dış Çelik Bağlantı Plakası Kalınlık Kontrolü .....	43
1.7.11.2.	İç Çelik Plaka Kalınlık Kontrolü.....	44
1.7.11.3.	Ankraj Civatalarında Çekme Gerilmesi Kontrolü .....	46
1.8.	CSiBridge Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI).....	47
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	49
2.1.	Köprü Geometrisi ve Malzeme Özellikleri.....	49

2.2.	Deprem Yer Hareketinin Tanımlanması.....	52
2.3.	Köprü Sonlu Elaman Modeli .....	53
2.4.	Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı .....	55
2.5.	Kolon Yüksekliğinin Köprü Tepkilerine Etkisi.....	61
2.6.	Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Özelliklerinin Köprü Tepkilerine Etkisi ....	67
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
4.	KAYNAKLAR .....	79

## ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans

ÖZET

KÖPRÜLERDE KURŞUN ÇEKİRDEKLİ ELASTOMER MESNET TASARIMI VE  
KÖPRÜ DEPREM DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yersaiyn BEXULTAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KARAKAŞ  
2021, 81 sayfa

Bu çalışmada üç açıklıklı kutu kesitli bir karayolu köprüsünün sismik yalıtımı için kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elastomer mesnetin ve köprü kolon yüksekliğinin köprü deprem tepkileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla ankastre ve elastomer mesnetli köprülerin yatay tasarım tepki spektrumu etkisinde elde edilen periyot, yerdeğiştirme ve kolon kesit tesirleri farklı kolon yükseklikleri için karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak elastomer mesnetin davranışını etkileyen sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ve ikincil rijitlik özelliklerinin köprü tepkileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada çok sayıda parametrik yapısal analize ihtiyaç duyulması sebebiyle CSiBridge ticari köprü programının Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI) özelliğinden yararlanılarak MATLAB programlama dili aracılığıyla bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile tüm analizler otomatikleştirilmiş ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen tasarımlar ve yapısal analizler sonucunda elastomer mesnet tasarımında alt ve üst sınır mesnet özelliklerinin köprü tepkileri üzerindeki etkileri görülmüştür. Ayrıca elastomer mesnetin mesnetsiz duruma göre köprü tepkilerini önemli ölçüde azalttığı ve kısa kolonlu köprülerde daha da etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak elastomer mesnet tasarımında mesnet dayanım kuvveti ve ikincil rijitlik değerlerinin seçiminin köprü tepkilerini azaltmadaki önemi fark edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karayolu köprüsü, Sismik yalıtım, Kurşun çekirdekli elastomer mesnet, Açık uygulama programlama arayüzü.



Master Thesis

SUMMARY

DESIGN OF LEAD RUBBER BEARINGS FOR BRIDGES AND  
THEIR EFFECTS ON BRIDGE EARTHQUAKE BEHAVIORS

Yersaiyn BEXULTAN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assist. Prof. Ali İhsan KARAKAŞ  
2021, 81 Pages

A lead rubber bearing for seismic isolation of a three-span highway bridge with box girders was designed in this study. Also, the effects of lead rubber bearings and bridge column height on the bridge earthquake responses were investigated. For this purpose, a fixed based and an isolated bridge were analyzed using horizontal design response spectrum and the period, displacement and column internal forces were compared for different column heights. Additionally, the effects of characteristic strength and post-elastic stiffness, which determine the behavior of an elastomer bearing, on the bridge responses were investigated. An hand-made program was developed through the MATLAB programming language by utilizing the Open Application Programming Interface (OAPI) feature of the CSiBridge commercial bridge program in order to be able to conduct a large number of structural analyses parametrically. All the required analyzes were performed automatically and quickly with the help of this program.

As a result of the conducted designs and structural analyses, the effects of the lower and upper bearing properties on the bridge responses in bearing design were observed. In addition, it was concluded that the lead rubber bearings significantly reduce the bridge responses compared to the fixed base and they are even more effective in bridges with short columns. Finally, the importance of careful selection of the bearing characteristic strength and post-elastic stiffness values in the bearing design was realized for decreasing the bridge responses.

**Key Words:** Highway bridge, Seismic isolation, Lead rubber bearing, Open application programming interface

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. a) Geleneksel yalıtımsız ve b) sismik yalıtımlı köprü davranışı .....	5
Şekil 2. Sismik yalıtım mesnet esnekliğinin spektral ivme üzerindeki etkisi .....	6
Şekil 3. Elastomer mesnet çift doğrusal histeretik döngü .....	7
Şekil 4. Histeretik sönümlemenin spektral ivme üzerindeki etkisi .....	8
Şekil 5. a) Kurşun çekirdekli elastomer mesnet ve b) sürtülmeli sarkaç mesnet .....	9
Şekil 6. Düşük sönümlü elastomer mesnet .....	10
Şekil 7. Düşük sönümlü elastomer mesnete ait histeretik eğri .....	11
Şekil 8. Yüksek sönümlü elastomer mesnet histeretik eğrileri .....	13
Şekil 9. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet (Constantinou vd., 2007) .....	13
Şekil 10. Kurşun çekirdekli elastomer mesnete ait çift doğrusal histeretik döngü .....	14
Şekil 11. Tek modlu analiz için tek serbestlik dereceli köprü modeli .....	19
Şekil 12. Yatay deprem ve mesnetlerde oluşan aksenal kuvvetler .....	21
Şekil 13. Çok modlu analiz için azaltılmış tepki spektrumu .....	23
Şekil 14. Tasarım kamyonu özellikleri .....	26
Şekil 15. Tasarım tandem özellikleri .....	26
Şekil 16. Tasarım şerit yükü .....	27
Şekil 17. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet enkesit görünüşü .....	31
Şekil 18. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarım akış şeması .....	48
Şekil 19. Köprü boyuna kesiti .....	50
Şekil 20. Köprü üstyapı enkesiti .....	50
Şekil 21. Köprü enkesiti .....	51
Şekil 22. a) Yatay ve b) düşey tasarım spektrumları .....	53
Şekil 23. Köprü üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	54
Şekil 24. Köprü basitleştirilmiş sonlu eleman modeli .....	54
Şekil 25. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet a) enkesiti ve b) üst görünüşü .....	60
Şekil 26. Ankastre ve elastomer mesnetli köprü mod şekilleri .....	62

Şekil 27. Farklı kolon yükseklikleri için köprü hakim periyot değerleri.....	63
Şekil 28. Farklı kolon yükseklikleri için köprü üstyapı yatay yerdeğiştirmeleri.....	64
Şekil 29. Farklı kolon yükseklikleri için kolon normal kuvvetleri.....	65
Şekil 30. Farklı kolon yükseklikleri için kolon kesme kuvvetleri.....	66
Şekil 31. Farklı kolon yükseklikleri için kolon eğilme momentleri.....	67
Şekil 32. Farklı $Qd/W$ oranları ve $Td$ değerleri için köprü hakim periyot değerleri.....	68
Şekil 33. Farklı $Qd/W$ oranları ve $Td$ değerleri için köprü yatay yerdeğiştirme değerleri.....	69
Şekil 34. Farklı $Qd/W$ oranları ve $Td$ değerleri için kolon normal kuvvet değerleri.....	70
Şekil 35. Farklı $Qd/W$ oranları ve $Td$ değerleri için kolon kesme kuvvet değerleri.....	71
Şekil 36. Farklı $Qd/W$ oranları ve $Td$ değerleri için kolon eğilme moment değerleri.....	71
Şekil 37. Farklı $Td$ değerleri ve $Qd/W$ oranları için köprü hakim periyot değerleri.....	72
Şekil 38. Farklı $Td$ değerleri ve $Qd/W$ oranları için köprü yatay yerdeğiştirme değerleri.....	73
Şekil 39. Farklı $Td$ değerleri ve $Qd/W$ oranları için kolon normal kuvvet değerleri.....	74
Şekil 40. Farklı $Td$ değerleri ve $Qd/W$ oranları için kolon kesme kuvvet değerleri.....	74
Şekil 41. Farklı $Td$ değerleri ve $Qd/W$ oranları için kolon eğilme moment değerleri.....	75

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Çoklu hareketli yük faktörü .....	27
Tablo 2. Köprü geometrik özellikleri .....	51
Tablo 3. Malzeme özellikleri.....	52
Tablo 4. Deprem hesabında dikkate alınan özellikleri .....	52
Tablo 5. Tek modlu analiz parametreleri.....	55
Tablo 6. Tek modlu analizlerden elde edilen köprü tepkileri.....	55
Tablo 7. Başlangıç kurşun çekirdekli elastomer mesnet boyutları.....	56
Tablo 8. Çok modlu analizden elde edilen köprü tepkileri.....	61
Tablo 9. TMA ve ÇMA'den elde edilen köprü tepkileri.....	61

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_a$	Basınç gerilmesinin yayılma alanı
$A_L$	Elastomer mesnetindeki kurşun çekirdeğin kesit alanı
$A_r$	Kurşun çekirdeğin kesit alanı çıkartılmamış elastomer malzemenin kesit alanı
$A_{ra}$	Elastomer kaplama kalınlığını dikkate almayan elastomer malzemenin kesit alanı
$A_{rr}$	Elastomer malzemenin azaltılmış kesit alanı
$B$	Elastomer mesnetinin bağlantı çelik plakasının plandaki uzunluğu
$B_L$	Elastomer mesnetinin etkin sönüm oranı için hesaplanan spektrum azaltma katsayısı
$b$	Eşdeğer dikdörtgen azaltılmış alanın kısa kenar uzunluğu
$b_l$	Beton basınç dayanımının etki ettiği alanının kenar uzunluğu
$D_B$	Elastomer malzemenin kesit alanının çapı
$D_c$	Kolon ayağının kesit alanının çapı
$D_{cr}^u$	Elastomer mesnetinin devrilmesi durumunda meydana gelen kritik yerdeğiştirme
$D_D$	Tasarım deprem yerdeğiştirmesi
$D_L$	Kurşun çekirdeğin çapı
$D_y$	Elastomer mesnetinin akma yerdeğiştirmesi
$E_c$	Betonun elastisite modülü
$E_e$	Elastomer mesnetin basınç elastisite modülü
$F$	Yatay depremin etkisinden elastomer mesnette oluşan aksenal kuvveti
$F_H$	Elastomer mesnetinin maksimum deprem durumundaki depremesel yanal yerdeğiştirmesi için yanal kuvveti
$F_y$	Elastomer mesnetinin ara çelik plaka malzemesinin akma dayanımı
$F_{ye}$	Elastomer mesnetinin ara çelik plaka malzemesinin beklenen akma dayanımı
$F_u$	Elastomer mesnetinin akma kuvveti
$f_b$	Beton tasarım basınç dayanımı
$f_c'$	28 günlük beton basınç dayanımı

$f_t$	Elastomer mesnetindeki aksenal kuvvetlerden meydana gelen beton basınç gerilmesi
$f_1$	Eksenal kuvvetlerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesini hesaplamada gerekli olan katsayı
$f_2$	Dönmelerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesini hesaplamada gerekli olan katsayı
$G$	Elastomer malzemeye ait kesme elastisite modülü
$G_1$	Deprem hareketinin ilk döngüsündeki elastomer malzemeye ait ortalama kesme elastisite modülü
$G_3$	Deprem hareketinin ilk üç döngüsündeki elastomer malzemeye ait ortalama kesme elastisite modülü
$g$	Yerçekimi ivmesi
$H_c$	Köprü kolon ayağının temel üstünden uzunluğu
$h_c$	Üstyapı enkesit ağırlık merkezinin mesnet üst yüzeyine olan mesafesi
$h_{cb}$	Kolon ayakları üstündeki başlık kirişinin derinliği
$h_s$	Köprü üstyapı derinliği
$h_t$	Elastomer mesnetinin toplam yüksekliği
$I$	Köprü kolon ayağına ait kesitin atalet momenti
$K_d$	Elastomer mesnetinin ikincil rijitliği (elastik-ötesi rijitliği)
$K$	Elastomer mesnetinde kullanılan elastomer malzemeye ait hacim modülü
$K_c$	Kolon ayağının rijitliği
$K_{eff}$	Sistemin etkin rijitliği
$K_{eff.abut}$	Kenar ayaklarının etkin toplam rijitliği
$K_{eff.pier}$	Orta ayaklarının etkin toplam rijitliği
$K_{is}$	Elastomer mesnetinin etkin rijitliği
$K_{eff.sis}$	Altyapı esnekliği kontrolü için sistemin etkin toplam rijitliği
$K_u$	Elastomer mesnetinin başlangıç rijitliği
$K_v$	Elastomer mesnetinin düşey rijitliği
$L$	Genleşme uzunluğu
$L_b$	Kolon ayaklarının merkezden merkeze mesafesi
$L_e$	Köprü üstyapı kenarından ilk kutuya olan mesafesi

$L_t$	Köprü toplam uzunluğu
$L_1, L_2, L_3$	Köprü açıklık uzunlukları
$M_a$	Elastomer mesnetinin ankraj civataları gerilme kontrolünde hesaplanan eğilme momenti
$M_{ex}$	Elastomer mesnetinin çelik bağlantı plaka kalınlığı kontrolünde hesaplanan eğilme momenti
$M_u$	Elastomer mesnetinin çelik plaka kontrolünde hesaplanan eğilme momenti
$n_r$	Elastomer mesnetindeki ara elastomer katmanların sayısı
$n_s$	Elastomer mesnetindeki ara çelik plakaların sayısı
$P$	Elastomer mesnetinin eksenel çekme kuvveti
$P_{cr}$	Elastomer mesnetinin yatay yerdeğiştirme olmadan hesaplanan burkulma eksenel kuvveti
$P'_{crMCE}$	Elastomer mesnetinin maksimum deprem için yatay yerdeğiştirme durumunda hesaplanan burkulma eksenel kuvveti
$P'_{crs}$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumunda hesaplanan burkulma eksenel kuvveti
$P_D$	Sabit yükleri altında elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvveti
$P_{EDE}$	Tasarım deprem yükü altında elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvveti
$P_{EMCE}$	Maksimum deprem yükü altında elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvveti
$P_L$	Hareketli yüklerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvveti
$P_{Lcy}$	Hareketli yüklerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvvetinin döngüsel bileşeni
$P_{Lst}$	Hareketli yüklerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan eksenel kuvvetinin statik bileşeni
$P_{SLDE}$	Tasarım deprem durumundaki hareketli yüklerden dolayı oluşan eksenel kuvvet
$P_{SLMCE}$	Maksimum deprem durumundaki hareketli yüklerden dolayı oluşan eksenel kuvvet
$P_u$	Faktörlü eksenel kuvvet
$Q_d$	Elastomer mesnetinin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti
$R_y$	Elastomer mesnetindeki ara çelik plakaların akma dayanımını büyütme katsayısı
$r$	Eğilme momenti hesaplamasında gerekli yükleme kolu uzunluğu

$S$	Elastomer mesnetindeki tipik bir elastomer katmanına ait şekil katsayısı
$S_{ae}$	Yerçekimi (g) cinsinden elastik tasarım spektral ivme
$S_{DI}$	1.0 saniyelik periyottaki tasarım spektral ivme katsayısı
$T$	Köprü titreşim periyodu
$T_d$	Elastomer mesnetinin ikincil rijitliğine göre hesaplanan periyodu
$T_{eff}$	Sistemin etkin periyodu
$T_{eff.sis}$	Altyapı esnekliği kontrolü için sistemin etkin periyodu
$T_{max}$	Maksimum periyot
$T_{MaxDesign}$	Maksimum tasarım sıcaklığı
$T_{MinDesign}$	Minimum tasarım sıcaklığı
$T_r$	Elastomer mesnetinin ara elastomer katmanların kalınlıklarının toplamı
$t_c$	Elastomer mesnetinin kaplama kalınlığı
$t_{ex}$	Elastomer mesnetinin çelik bağlantı plaka kalınlığı
$t_{ie}$	Köprü üstyapısındaki kutuların iç kenar kalınlığı
$t_{in}$	Elastomer mesnetinin çelik plaka kalınlığı
$t_p$	Minimum çelik plaka kalınlığı
$t_r$	Elastomer mesnetinin ara elastomer katman kalınlığı
$t_s$	Elastomer mesnetinin ara çelik plaka kalınlığı
$t_{ts}$	Köprünün üstyapısındaki üst tabliye kalınlığı
$W$	Üstyapının toplam ağırlığı
$W_t$	Köprü üstyapı toplam genişliği
$W_1, W_2, W_3$	Köprü üstyapı kutu genişlikleri
$w_c$	Beton birim hacim ağırlığı
$\alpha$	Elastomer mesnetinin ara çelik plaklarının mesnet yeterlilik değerlendirmesinde kullanılan katsayı
$\alpha_a$	Elastomer mesnetinin alt ve üst sınır özellikleri için deprem ivmesi
$\alpha_T$	Beton ısı genleşme katsayısı
$\beta_{eff}$	Elastomer mesnetinin etkin sönüm oranı
$\Delta_{EDE}$	Elastomer mesnetinin tasarım deprem durumundaki depremsel yanal yerdeğiştirmesi



$\Delta_{EMCE}$	Elastomer mesnetinin maksimum deprem durumundaki depremsel yanal yerdeğiştirmesi
$\Delta_{max}$	Elastomer mesnetinin maximum yatay yerdeğiştirmesi
$\Delta_S$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumundaki servis yanal yerdeğiştirmesi
$\Delta_{Scy}$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumundaki servis yanal yerdeğiştirmesinin döngüsel bileşeni
$\Delta_{Sst}$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumundaki servis yanal yerdeğiştirmesinin statik bileşeni
$\Delta_T$	Tasarım ısıl hareketi
$\gamma$	Yük faktörü
$\gamma_{CDE}^u$	Tasarım deprem durumundaki eksenel kuvvetlerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_{MCE}^u$	Maksimum deprem durumundaki eksenel kuvvetlerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_{Cs}^u$	Depremsiz durumundaki eksenel kuvvetlerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birimi şekil değiştirmesi
$\gamma_{rs}^u$	Depremsiz durumdaki dönmelerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_{SDE}^u$	Tasarım deprem durumundaki yanal yerdeğiştirmelerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_{SMCE}^u$	Maksimum deprem durumundaki yanal yerdeğiştirmelerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_{Ss}^u$	Depremsiz durumdaki yanal yerdeğiştirmelerden dolayı elastomer mesnetinde oluşan kesme birim şekil değiştirmesi
$\gamma_D$	Sabit yük faktörü
$\gamma_L$	Hareketli yük faktörü
$\delta$	Elastomer mesnetinin azaltılmış alanının hesabında kullanılan katsayı
$\theta_{Scy}$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumdaki servis dönmesinin döngüsel bileşeni
$\theta_{Sst}$	Elastomer mesnetinin depremsiz durumdaki servis dönmesinin statik bileşeni
$\phi_b$	Elastomer mesnetinin elik plakalarının eğilme direnci azaltma katsayısı
$\phi_c$	Beton dayanımı azaltma katsayısı

$\lambda_a$	Yaşlanma etkisi nedeni ile kullanılacak olan özellik değiştirme katsayısı
$\lambda_{tr}$	İşletme etkisi nedeni ile kullanılacak olan özellik değiştirme katsayısı
$\mu_d$	Elastomer mesnetinin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvvetinin köprü üst yapı ağırlığına oranı
$\mu_{qs}$	Elastomer mesnetin quasi-statik durumundaki sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvvetinin köprü üst yapı ağırlığına oranı
$\sigma_L$	Kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı
$\sigma_{L3}$	Deprem hareketinin ilk üç döngüsündeki kurşun malzemeye ait ortalama kayma akma dayanımı
$\sigma_{L1}$	Deprem hareketinin ilk döngüsündeki kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Medeniyet tarihi boyunca köprüler ulaşım, ticaret ve savaş amaçlı kullanılmakla birlikte şehirlerin, bölgelerin ve ülkelerin simgeleri olarak da yer almışlardır. Bu tür yapıların deprem gibi doğal afetlerden sonra kullanılmaması birçok alanda aksamaya neden olabilmektedir. Bu nedenle deprem sırasında köprülerin depreme karşı dayanıklılığı büyük ölçüde önem taşımaktadır.

Deprem, önceden tahmin edilemeyen ve günümüz teknolojisiyle tahmin edilmesi durumunda bile önlem almak için yeterli zamanın olmadığı bir doğal afet türüdür. Günümüzde bu doğal afete karşı dayanıklı yapılar tasarlayarak önlem alınması zorunlu hale gelmiştir. Uzun yıllardır mühendis ve mimarlar tarafından çeşitli yapıların deprem yer hareketlerine verdiği tepkilerin azaltılması için uygulanabilir yöntemlerin bulunması adına çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların sonucu olarak çeşitli sismik yalıtım ve enerji sönmüleyici yöntemler geliştirilmiştir. Son yıllarda ise bu yöntemlerden özellikle sismik yalıtım yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

Sismik yalıtım, köprü ve diğer yapıların deprem etkilerini azaltmak için geliştirilen bir yöntemdir. Sismik yalıtım köprü üstyapısını depremin yatay doğrultudaki yer hareketinden ayırarak depremden dolayı oluşan iç kuvvetlerin azalmasını sağlamaktadır. Ayırma işlemi için köprü üstyapısı ile altyapısı arasında yatay rijitliği düşük çeşitli yalıtım cihazları yerleştirilmektedir. Bu cihazlar genel olarak *sismik yalıtım mesnetleri* olarak adlandırılmaktadır. Sismik yalıtım mesnetleri elastomer esaslı ve sürtünme esaslı olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Son 20-30 yıl içerisinde dünya genelindeki köprülerde elastomer esaslı sismik yalıtım mesnetlerinin kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Bu sebeple bu çalışmada köprülerde sıklıkla kullanılan elastomer esaslı sismik yalıtım mesnetlerinden biri olan kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Tasarımda dikkate alınacak yükler, mesnet mekanik özellikleri, analiz yöntemleri ve yapılması gereken tasarım kontrollerinden söz edilecektir. Ayrıca farklı kolon yükseklikleri için köprü tepkileri ankastre mesnetli köprü

tepkileriyle kıyaslanacaktır ve değişen elastomer mesnet özelliklerinin köprü deprem davranışı üzerindeki etkileri incelenecektir.

Elastomer mesnet tasarımı ve parametrik köprü yapısal analizleri tekrarlı çözümler gerektirdiğinden mesnet tasarımları ve yapısal analizler CSiBridge sonlu eleman köprü analiz programının açık uygulama programlama arayüzü (OAPI) özelliğinden yararlanılarak yapılacaktır. OAPI özelliği MATLAB, Visual C++ gibi çeşitli programlama dilleri yardımıyla CSiBridge sonlu eleman programının işleyişine müdahale etme imkânı sunmaktadır. Bu çalışmada programlama dili olarak MATLAB dili kullanılacak ve özel geliştirilen yazılım ile elastomer mesnetli köprülerin analizleri ve mesnet tasarımları bilgisayar destekli olarak elde edilecektir.

## **1.2. Tez Çalışması ile İlgili Literatür Taraması**

Uzun yıllardır mühendisler sismik yalıtımlı köprüler üzerine çeşitli araştırmalar yapmışlardır ve literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Akoğul (2007) çalışmasında elastomer mesnetli prekast kirişli betonarme köprülerin depreme dayanıklı tasarımlarını gerçekleştirmiştir. Bir başka çalışmasında Akoğul (2008) iki açıklıklı prekast kirişli bir köprüyü elastomer mesnetli ve elastomer mesnetsiz olarak incelemiş ve farklı tasarım parametrelerinin köprü iç kuvvetlerine etkilerini irdelemiştir. Reyhanoğulları (2010) çalışmasında depremin düşey bileşeninin sismik olarak yalıtımlı ve yalıtımsız bir kompozit çelik köprü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Köprü çelik kirişleri altına yerleştirilen farklı özelliklere sahip kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin doğrusal olmayan davranışlarını incelemek amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda depremin düşey bileşeninin sismik yalıtımlı köprü kolon ve elastomer mesnet eksenel kuvvetlerini etkilediği görülmüştür. Altun (2012) çalışmasında çok açıklıklı betonarme kutu kesitli bir köprünün sismik yalıtımlı ve yalıtımsız olarak doğrusal elastik ve doğrusal olmayan yöntemlerle performans değerlendirmesini yapmıştır. Sonuçlara göre sismik yalıtımsız köprünün enine ve boyuna doğrultularında doğrusal elastik hesap yöntemlerine göre daha büyük sonuçlar elde edilmiştir. Aksine sismik yalıtımlı köprülerde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yöntemlere göre oluşan hasar durumunun minimum düzeyde olduğu görülmüştür.

Sismik yalıtımlı köprülerin çeşitli yönetmeliklere göre sismik tasarımını yapan çalışmalarda mevcuttur. Yılmaz (2015) çalışmasında bir demiryolu köprüsünün AASHTO, Eurocode ve DLH yönetmeliklerine göre tasarımlarını ve analizlerini yapmıştır. Toplam uzunluğu 92.5 m ve 9 adet prekast kirişten oluşan köprünün üstyapısı ile altyapısı arasına elastomer mesnetler yerleştirilmiş ve mesnetler doğrusal olarak modellenmiştir. Analizler sonucunda farklı yönetmeliklere göre kenar ve orta ayaklarda oluşan kuvvet, yerdeğiştirme ve gerilme değerlerinin farklı olduğu görülmüş ve köprü tasarımı için DLH yönetmeliğinin kullanılması önerilmiştir. Arı (2019) tarafından 155 m uzunluğunda 3 açıklıklı kutu kesitli karayolu köprüsünün AASHTO'ya göre sismik tasarımı yapılmıştır. Köprü tabliyesi altında 2 adet kurşun çekirdekli elastomer mesnet olduğu varsayılmıştır. Köprü analizinde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerin yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Rahmani (2020) çalışmasında yerinde dökme bir betonarme köprünün analiz modelini ve AASHTO'ya göre sismik tasarımını gerçekleştirmiştir. Toplam uzunluğu 92 m ve 4 açıklıktan oluşan köprünün üstyapısı ile altyapısı arasına elastomer mesnetler konulmaktadır. Tasarımda talep kapasite oranı yanında mesnetlerde oluşan çekme ve basınç gerilmelerinin kritik değeri dikkate alınmıştır.

Elastomer mesnetlerin köprülerin sismik tepkilerine olan etkilerini incelemeye yönelik çeşitli çalışmalar da literatürde mevcuttur. Ghobarah (1987), Turkington vd. (1989 a, b) çalışmalarında kurşun çekirdekli elastomer mesnetle sismik yalıtımı yapılmış bir köprünün deprem yer hareketine karşı tepkilerini incelemiştir ve mesnetlerin sismik tepkilerin azaltılmasında etkili olduğu gösterilmiştir. Jangid (2004), kurşun çekirdekli elastomer mesnetle yalıtımı yapılmış bir köprünün deprem etkisindeki tepkilerini incelemiştir ve köprü tepkileri yalıtımı yapılmayan köprü tepkileriyle kıyaslanmıştır. Mesnetin doğrusal olmayan özellikleri köprü tepkilerini etkilediği ve göz önüne alınmadığı sürece tasarım için kritik olabileceği sonucuna varılmıştır.

Elastomer mesnetin ve deprem yer hareketlerinin köprü tepkilerine olan etkilerini inceleyen parametrik çalışmalar da mevcuttur. Dai vd. (2006) çalışmasında elastomer mesnetlerin köprülerin dinamik davranışlarına olan etkilerini incelemiştir. Mesnetlerin farklı kayma modülü değerleri için köprü periyotları yalıtımsız köprü periyotları ile kıyaslanmıştır. Kayma modülünün artmasıyla köprü boyuna doğrultusunda oluşan periyotların ve üstyapı yerdeğiştirmelerinin azaldığı gösterilmiştir. Hameed vd. (2008), kurşun çekirdekli elastomer

mesnetin ve deprem yer hareketlerinin köprü tepkilerine olan etkilerini inceleyen bir parametrik çalışma sunmuştur. Çalışmada farklı deprem yer hareketleri altında sismik yalıtımlı köprünün minimum tepkilerini elde etmek için kurşun çekirdekli elastomer mesnetin en yagun parametreleri araştırılmıştır. Haque vd. (2010), düşük sönümlü ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerle yalıtımlı karayolu köprülerinin sismik tepkilerini incelemiştir. Elastomer mesnetlerin rijit köprülerde daha etkili olduğu ve güvenli köprü tasarımı için etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Köprülerin depreme karşı tepkilerini etkileyen birçok çevresel, malzeme ve geometrik parametreler Farag vd. (2019) tarafından incelenmiştir. Parametre belirsizliğinin yalıtımlı köprüler için önemli bir konu olduğu ve doğru değerlendirme için uygun şekilde dikkate alınması gerektiği sonucuna varmıştır.

Elastomer mesnetlerin mekanik özellikleri ve çeşitlerinin (düşük sönümlü, yüksek sönümlü, kurşun çekirdekli) karşılaştırılmasına yönelik Kumar vd. (2014) ve Tubaldi vd. (2016, 2018) tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Parry vd. (2017) ve Ishac ve Mehanny (2017) çalışmalarında farklı kolon yükseklikleri için elastomer mesnetli kutu kesitli köprülerin deprem altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Shaker ve Rahai (2019) çalışmasında servis yükleri altında çeşitli üç boyutlu köprü modellerinin kolon ayak davranışlarını incelemişlerdir. Farklı mesnet durumlarının ve kolon ayak yüksekliklerinin köprü tepkilerine etkilerini araştırmak için parametrik bir çalışma sunmuşlardır. Sonuçlara göre kolon ayak yüksekliklerinin artışı yerdeğıştirmelerde önemli artışlara neden olmuştur. Kolon uzunlukları yüksek olan köprülere odaklanan Chen ve Li (2020) çalışmalarında farklı yalıtım cihazlarının köprülerin sismik tepkilerini hafifletmedeki etkinliğini incelemişlerdir.

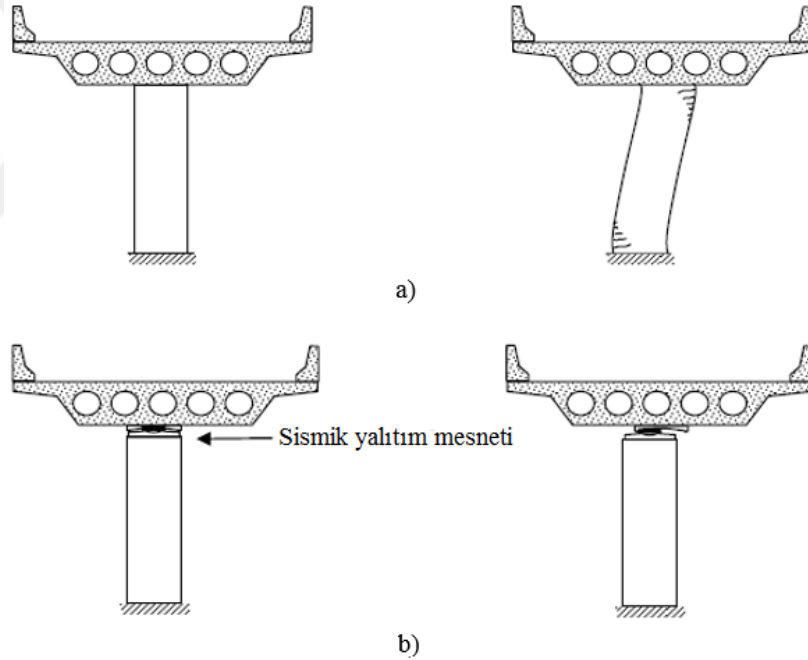
Neethu (2019) çalışmasında yapı zemin etkileşiminin yalıtımlı köprü tepkileri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapı zemin etkileşiminin dikkate alınması daha gerçekçi bir yapısal modellemeye ve yapıların ekonomik tasarımına yol açabileceği sonucuna varmıştır.

Quanani vd. (2020) çalışmasında kurşun çekirdekli elastomer mesnet ve çelik sınırlayıcılarla yalıtımı yapılan çok açıklıklı öngerilmeli betonarme köprülerin dinamik özelliklerini incelemiştir. Şiddetli depremler altında boyuna yerdeğıştirmeler köprü üstyapısının birbiriyle çarpışmasına ve genleşme derzlerinde üstyapının yerinden çıkmasına neden olabileceğini öne sürmüştür. Üstyapının yerinden çıkmasını önlemek amacıyla mesnetlerin ve

sınırlayıcıların doğrusal olmayan özelliklerinin uygun tasarımına özellikle dikkat edilmesi gerektiği sonucuna varmıştır.

### 1.3. Sismik Yalıtım Kavramı

Sismik yalıtımlı köprüler deprem yer hareketine maruz bırakıldığında yerdeğiştirmeler köprü altyapı elamanlarında oluşmadan yalıtım mesnetlerinde meydana gelmektedir (Şekil 1). Bu durum köprü üstyapısından altyapısına iletilen sismik kuvvetlerin ve yerdeğiştirmelerin azalmasına sebep olmaktadır (Buckle vd., 2006).



Şekil 1. a) Geleneksel yalıtımsız ve b) sismik yalıtımlı köprü davranışı

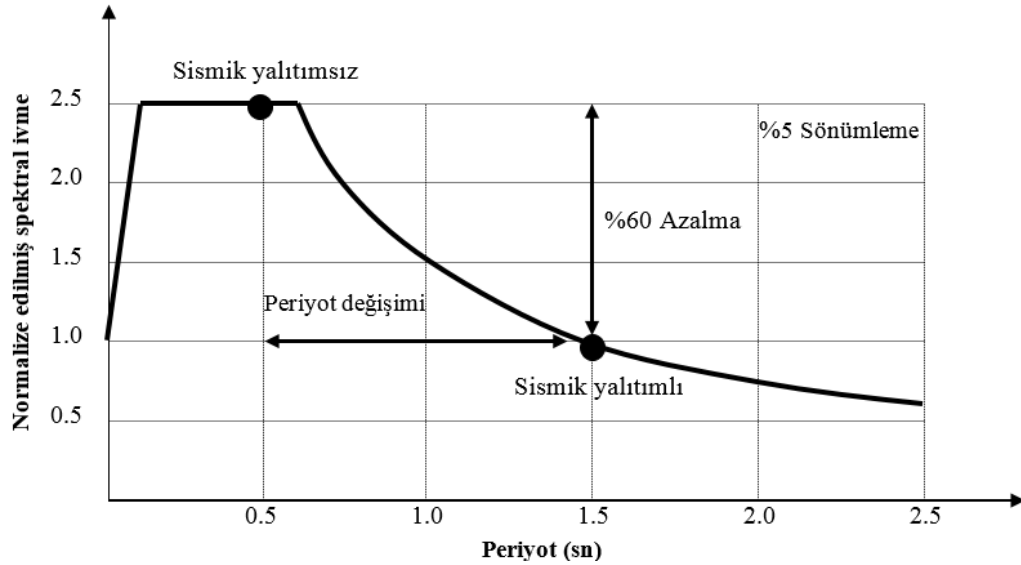
Sismik yalıtım, depreme dayanıklı geleneksel tasarıma göre alternatif bir çözümdür ve köprü türü yapıların sismik riskini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Bunun yanı sıra, sismik yalıtım geleneksel depremden korunma yöntemlerine ekonomik alternatifler sundukları için yapı mühendisleri tarafından giderek daha fazla kullanılmaktadır (Mendez-Galindo vd., 2016).

Sismik yalıtım mesnetleri köprülerde ve diğer yapı türlerinde etkili bir şekilde kullanılabilmeleri için en az aşağıdaki üç özelliğe sahip olmaları gerekir (Buckle vd., 2006):

- Esneklik
- Enerji sönmleme
- Yeterli rijitlik

### 1.3.1. Esneklik

Sismik yalıtım mesnetlerinin düşük rijitliği köprünün doğal titreşim periyodunun uzamasını sağlamaktadır. Bu artan periyodun deprem periyodundan daha büyük olması köprünün depreme karşı tepkilerini azaltmaktadır. Sismik yalıtım mesnet esnekliğinin örnek bir spektral ivme spektrumundaki etkisi Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2’ye göre sismik yalıtım mesnetlerinin esnekliği köprünün doğal periyodunu 0.5 sn’den 1.5 sn’ye kadar uzatmakta ve sismik kuvvetleri yaklaşık %60 oranında azaltmaktadır (normalize edilmiş spektral ivme değeri 2.5’ten 1’e kadar azalmaktadır).



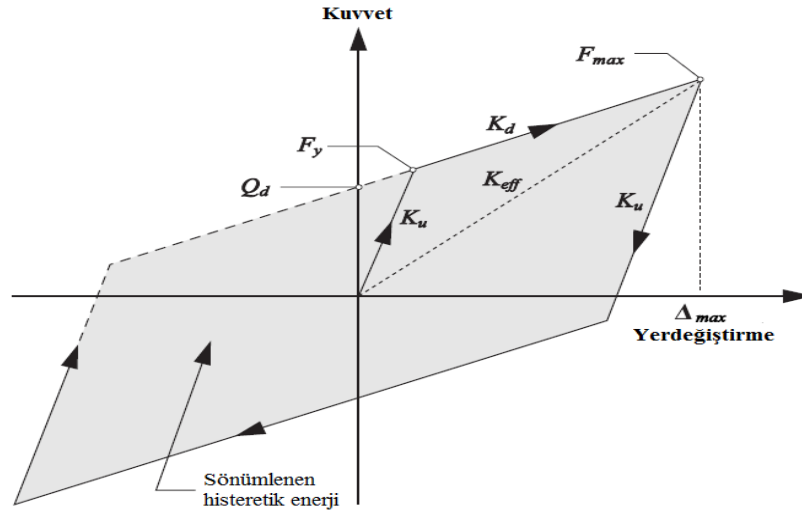
Şekil 2. Sismik yalıtım mesnet esnekliğinin spektral ivme üzerindeki etkisi



### 1.3.2. Enerji Sönümleme

Sismik yalıtım mesnetlerinin düşük yatay rijitliğine sahip olması köprülerde oluşan sismik tepkileri azaltmakta fakat köprü üstyapısında oluşan yerdeğiştirmelerin daha büyük değerlere ulaşmasına yol açmaktadır. Değerleri büyümüş yerdeğiştirmeleri karşılamak için daha büyük genleşme derzlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, çoğu sismik yalıtım mesnetleri bu yerdeğiştirmeleri makul bir seviyede tutabilmek için enerji sönümleme mekanizmasını içermektedir ve köprüye önemli ölçüde sönüm sunmaktadır. Bu mekanizmalar çoğu kez histeretik bir davranış sergilemektedir.

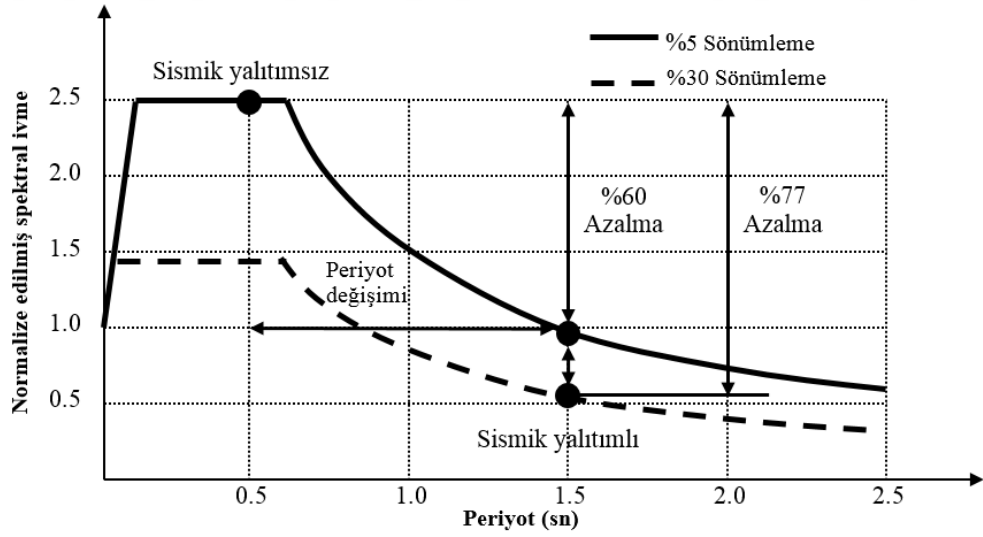
Genelde sismik yalıtım mesnetleri doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Sismik yalıtım mesnetlerinin bu gerçek davranışlarını inceleyebilmek için zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözümler gereklidir. Ancak, zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözümler karmaşıktır ve genelde tasarım için pek uygun olmamaktadır. Bu nedenle, sismik yalıtım mesnetlerinin etkin elastik özelliklerini ve etkin sönüm oranını kullanan basitleştirilmiş yöntemler kullanılmaktadır. Bu basitleştirilmiş yöntemler sismik yalıtım mesnetlerinin davranışını çift doğrusal histeretik olarak tanımlamaktadır. Tipik bir sismik yalıtım mesnetine ait çift doğrusal histeretik davranış Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Elastomer mesnet çift doğrusal histeretik döngü

Etkin sönüm oranı  $\beta_{eff}$  histeretik sönümleyici cihazlardaki gibi her bir hareket döngüsünde enerjinin sönümlenmesini sağlamaktadır. Şekil 3'te  $K_{eff}$  sismik yalıtım mesnetinin etkin rijitliğini,  $K_d$  ikincil rijitliğini,  $K_u$  başlangıç rijitliğini,  $F_u$  akma kuvvetini,  $Q_d$  sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvvetini ve  $\Delta_{max}$  maksimum yatay yerdeğiştirmesini göstermektedir.

Sönümün artmasıyla sadece yerdeğiştirmelerin değil sismik tepkilerin de azalması söz konusudur. Örneğin, Şekil 4'de sürekli ve kesik çizgilerle ifade edilen % 5 ve % 30 sönüm oranları için kaya tipi sert bir zemin durumunda ivme tepki spektrumu gösterilmektedir. Şekil 4'e göre sönümün artması tepki spektrumundaki ivme değerlerinin azalmasına yol açmaktadır. Sismik yalıtım mesnetlerinin % 5'lik sönüm oranında köprü periyodunu 0.5 sn'den 1.5 sn'ye uzatması tepki ivmelerini %60'lık oranda azaltırken sönüm oranının %5'ten %30'a kadar artması tepki ivmelerinin yaklaşık %17'lik bir oranda azalmasını sağlamaktadır (Buckle vd., 2006).



Şekil 4. Histeretik sönümlemenin spektral ivme üzerindeki etkisi

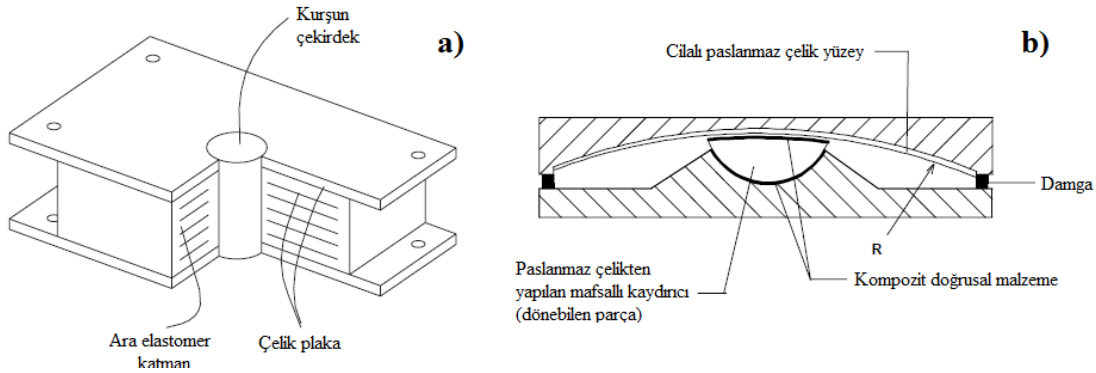
### 1.3.3. Yeterli Rijitlik

Sismik yalıtım mesnetlerinin düşük yatay rijitliği rüzgâr ve frenleme gibi servis yükleri altında köprü üstyapısının makul olmayan hareketlerine izin vermektedir. Bu nedenle sismik

yalıtım mesnetlerinin servis yükleri altında yeterli rijitliğe sahip olması önem taşımaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için sismik yalıtım mesnetleri çeşitli yollarla köprünün servis yüklerine karşı rijit fakat deprem yüklerine karşı esnek davranış gösterebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Örneğin rüzgâr yükleri için elastik ve deprem yükleri için akma sınırını aşan sismik yalıtım mesnetleri tasarlanmaktadır.

#### 1.4. Sismik Yalıtım Mesnetleri

Köprülerde genellikle sismik yalıtım için elastomer mesnetler veya sürtünme esaslı mesnetler kullanılmaktadır. Bu mesnet tiplerinden en yaygın kullanılanları kurşun çekirdekli elastomer mesnet (KÇEM) ve sürtünlü sarkaç mesnetlerdir (SSM) (Şekil 5). Sürtünlü sarkaç mesnetlerde enerji sönmülmesini sürtünme sağlarken elastomer mesnetlerde kurşun çekirdeğin plastik şekil değiştirmesi sağlamaktadır (Buckle vd., 2006). Bu çalışma kapsamında köprü türü yapılarda daha sıklıkla tercih edilen elastomer sismik mesnetler detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 5. a) Kurşun çekirdekli elastomer mesnet ve b) sürtünlü sarkaç mesnet

##### 1.4.1. Elastomer Sismik Yalıtım Mesnetleri

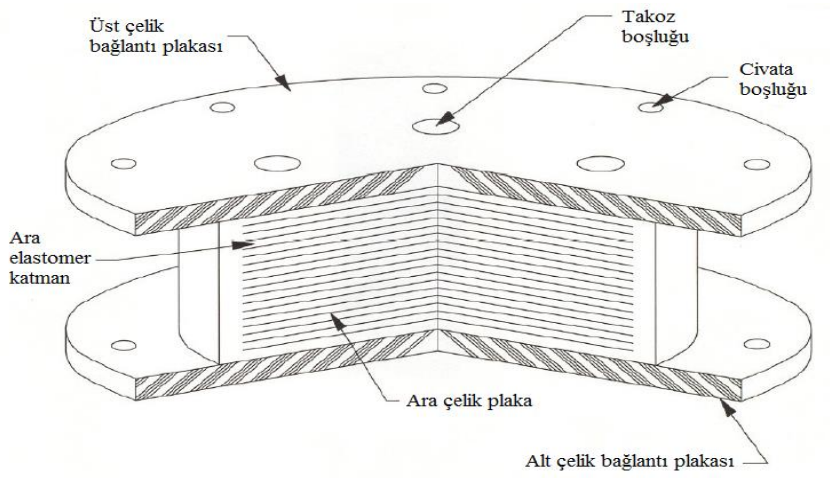
Köprüler için elastomer sismik yalıtım mesnetlerinin uygulanması ikinci dünya savaşı sonrasında artış göstermiştir. Geleneksel sismik yalıtımsız köprülerde kullanılan çelik plakasız elastomer mesnetlerin görevi sünme ve termal genişleme gibi etkileri karşılamaktı. 1950 ve

1960'lı yıllarda büyük karayolu köprülerinin inşaa edilmesi daha büyük düşey yüklerin oluşmasına ve böylece mesnetler üzerine gelen büyük gerilmeleri karşılamak amacıyla çelik plakalı elastomer mesnetlerin üretilmesine başlandı. Böylece yatay rijitliğinin birkaç katı büyüklüğünde düşey rijitliğe sahip mesnetler elde edilmiştir. Bu tür mesnetler hastaneler ve köprüler gibi birçok yapı türünde yaygınca kullanılmıştır (Naiem ve Kelly, 1999). Yaygın olarak kullanılan elastomer sismik yalıtım mesnetleri genel olarak üç çeşide ayrılmaktadır:

- Düşük sönümlü elastomer mesnetler
- Yüksek sönümlü elastomer mesnetler
- Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler

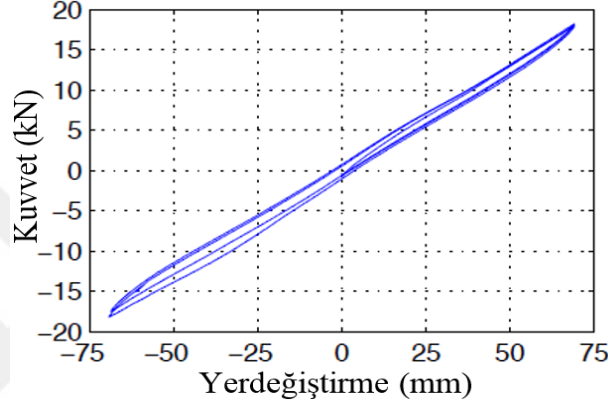
#### 1.4.1.1. Düşük Sönümlü Elastomer Mesnetler

Düşük sönümlü elastomer mesnetler üst ve alt tarafında bulunan çelik bağlantı plakalarından, ara elastomer katmanlardan ve ince ara çelik plakalardan oluşmaktadır (Şekil 6). Genelde mesnetler vulkanizasyon işlemine tabi tutulur. Bu işlem elastomer katmanların bir kalıp içerisine sokularak basınç ve sıcaklık altında çelik plakalara yapıştırılmasıyla gerçekleşir. Ara çelik plakalar kauçuğun şişmesini önlemekte ve yüksek düşey rijitlik sağlamaktadır. Fakat, yatay rijitliğe herhangi bir katkısı olmamaktadır. Elastomer mesnetin yatay rijitliği tamamen elastomer malzemesinin kayma elastisite modülüne bağlı kalmaktadır (Constantinou vd., 2007).



Şekil 6. Düşük sönümlü elastomer mesnet

Düşük sönümlü elastomer mesnetlerinin döngüsel kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi oldukça ince bir histeretik döngüye sahip olmaktadır. Bu nedenle bu tür mesnetlerin kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin doğrusal elastik olduğu varsayılmaktadır. Düşük sönümlü bir elastomer mesnete ait histeretik eğri Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Düşük sönümlü elastomer mesnete ait histeretik eğri

Elastomer malzemenin kesmedeki davranışı sönüm oranının %2-3'e ve kayma birim şekil değiştirmesinin %100'e ulaştığında oldukça doğrusal bir davranış göstermektedir. Elastomer malzemede sünme oluşmamakta ve kayma elastisite modülü uzun süreli dayanıklığa sahip olmaktadır. Düşük sönümlü elastomer mesnetlerin diğer mesnet türlerine göre birkaç üstünlüğü bulunmaktadır:

- Kolay bir şekilde üretilir
- Modellemesi daha basittir
- Mekanik özellikleri sıcaklık, yükleme geçmişi ve yaşlanma gibi koşullardan etkilenmemektedir.

Bu tür mesnetlerin dezavantajı ise sönüm oranlarının düşük olması sebebiyle ilave sönümleyici cihazlara ihtiyaç duymalarıdır (Naiem ve Kelly, 1999).

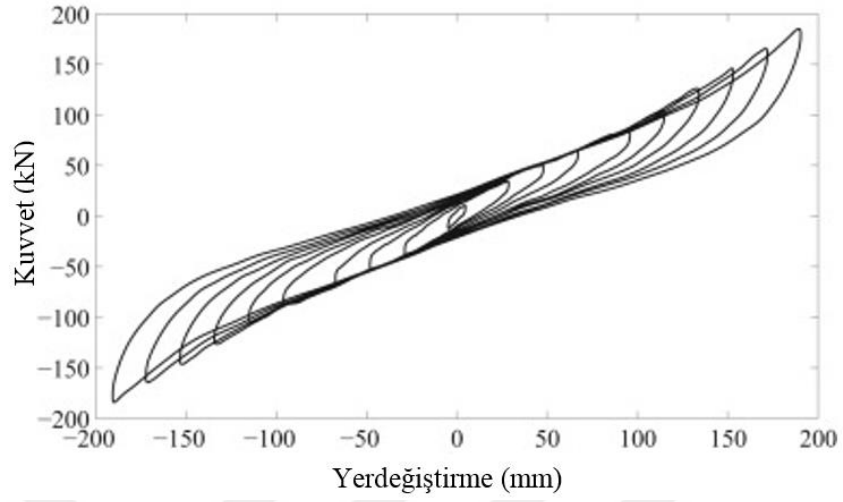
### 1.4.1.2. Yüksek Sönümlü Elastomer Mesnetler

İlave sönümleyici cihazlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmak için yeterli iç sönüme sahip elastomer bileşiğin geliştirilmesiyle elastomer mesnetlerin kayma birim şekil değiştirmeleri %100'e ulaştığında sönüm oranları %10 ile %20 oranlarına artış göstermiştir. Bu tür mesnetler kayma birim şekil değiştirmesi %20'den küçük olduğunda yatay rijitlik ve sönümün yüksek olması dolayısıyla doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Bu özellik rüzgar veya düşük seviyeli sismik kuvvetlere karşı yapı tepkilerini azaltmaktadır.

Kayma birim şekil değiştirmesinin %20 ile %120 aralığında olması elastomer malzemenin kayma elastisite modülünü küçük ve sabit değerlerde tutmaktadır. Kayma birim şekil değiştirmesinin %120'den daha büyük olması durumunda ise elastomer malzemesinde kristalleşme olayı meydana gelmektedir. Bu kristalleşme sürecinden dolayı elastomer malzemesinin kayma elastisite modülü artış göstermektedir. Büyük kayma birim şekil değiştirme değerlerinde mesnetlerin yatay rijitlik ve sönüm oranlarının artması:

- Düşük seviyeli etkiler için rijit bir sistem
- Tasarım seviyesi etkiler için oldukça doğrusal ve esnek bir sistem
- Tasarım seviyesini geçen beklenmeyen etkiler için yerdeğişimleri sınırlayan bir sistem sunmaktadır (Naiem ve Kelly, 1999).

Yüksek sönümlü elastomer mesnete ait histeretik kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Yüksek sönümlü elastomer mesnetlerin mekanik özellikleri elastomer malzemesinin bileşimi, vulkanizasyon sırasındaki koşullar ve mesnetlerin geometrisi dahil olmak üzere birçok faktörlere bağlıdır. Bu nedenle öncelikle tasarımda kullanılacak mesnetlerin tam davranışı belirlenmeli ve test edilerek doğrulanmalıdır (Kammerer vd. 2019).



Şekil 8. Yüksek sönümlü elastomer mesnet histeretik eğrileri

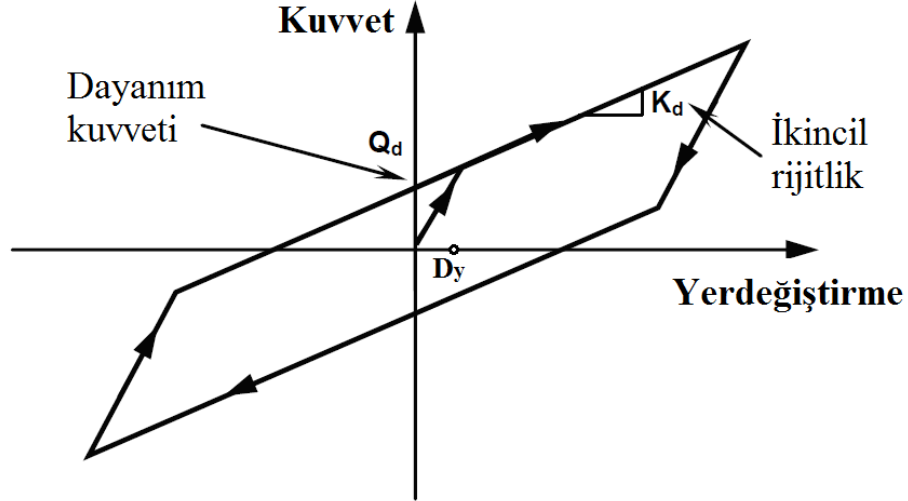
#### 1.4.1.3. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetler

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler düşük sönümlü elastomer mesnetlere benzer bir şekilde yapılmakta fakat mesnet boşluklarına yerleştirilen bir veya birkaç kurşun malzemesini içermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet (Constantinou vd., 2007)

Kurşun malzemesi mesnetin içerisine sıkı bir şekilde yerleştirilmelidir. Bunun için kurşun boyutları yerleştirileceği boşluk boyutlarından biraz daha büyük seçilerek mesnet içerisine itilmektedir. Mesnetin elastomer katman aralarındaki çelik plakalar kurşun malzemesinin kayma birim şekil değiştirmesinde düşey rijitlik sağlamaktadır. Boşluklara yerleştirilen kurşun malzemesinin akma gerilmesi 10 Mpa civarına ulaştığında mesnetlerde şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu durum mesnetlerin çift doğrusal histeretik davranış göstermesini sağlamaktadır (Naiem ve Kelly, 1999). Kurşun çekirdekli elastomer mesnete ait çift doğrusal histeretik döngü Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Kurşun çekirdekli elastomer mesnete ait çift doğrusal histeretik döngü

Mesnetin iç çelik plakaları civatalar vasıtasıyla dış çelik bağlantı plakalarına monte edilir. Bu durum kurşun çekirdeğin mesnetin merkezine sıkı bir şekilde yerleşmesine izin verir. Kurşun çekirdek yüksekliği mesnetin ara elastomer katman toplam yüksekliğinden biraz daha uzun yapılıdır (%5'ten daha az bir oranda). Dolayısıyla iç çelik plakalar ile dış çelik bağlantı plakaları civatalandığında kurşun çekirdek iyice sıkıştırılır. Sıkıştırılan çekirdek yanal olarak genişler ve ara çelik plakalar ile ara elastomer katmanların daha iyi yapışmasına imkan sunar. Böylece bu tür sınırlı koşullar altında kurşun çekirdek daha iyi enerji sönmleme kapasitesine ulaşır.



Kurşun çekirdeğin çapı genelde elastomer mesnet çapının %15-33'ünü oluşturacak şekilde tasarlanmaktadır ve mesnetin enerji sönümlemesini artırmaktadır. Açığa çıkan enerji miktarı kurşun çekirdeğin boyutuna ve mesnetin yatay hareketini sınırlama seviyesine bağlı olmaktadır.

Kurşun malzemesi akmadan önce yüksek yatay rijitliğe sahiptir ve akma sonrası elastik ötesi davranış gösterir. Ayrıca, kurşun malzemesi oda sıcaklığında aynı anda geri kazanım, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi süreçlerinin gerçekleştiği tek yaygın malzemedir. Bu nedenle doğrusal olmayan davranış sonrası başlangıç mekanik özelliklerini geri kazanabilmektedir (Kammerer vd. 2019).

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetin mekanik davranışı aşağıdaki parametreler ile ifade edilmektedir:

1. Sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti  $Q_d$ . Dayanım kuvveti kurşun çekirdeğin kesit alanı  $A_L$  ve kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı  $\sigma_L$  ile ilişkilidir. Mesnetin dayanım kuvveti birçok parametreye bağlı kalmaktadır. Bu parametreler mesnet üzerindeki aksenal yükü, hareket genliğini, kurşun çekirdek boyutunu ve mesnet imalat detaylarını içermektedir.
2. İkincil rijitlik  $K_d$  elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü  $G$ , elastomer malzemenin kesit alanı  $A_r$  ve ara elastomer katman kalınlıklarının toplamı  $T_r$  ile ilişkilidir.  $A_r$  kesit alanının hesaplamasında elastomer kaplamanın dikkate alınması önerilir. Kayma elastisite modülü elastomer malzemenin bileşenlerine, yükleme koşullarına, hareket genliğine ve frekansına bağlı kalmaktadır.
3. Akma yerdeğiştirmesi  $D_y$ . Bu parametre elastomer mesnetin etkin sönüm oranının hesaplanmasında ve zaman tanım alanı için modellenmesinde kullanılır. Akma yerdeğiştirmesi mesnetin kuvvet yerdeğiştirme döngüsünden elde edilmektedir ve 6 ile 25 mm arasında değişim göstermektedir.

### 1.5. Elastomer Mesnet Mekanik Özellikleri

Sismik yalıtımlı köprülerin analizi tasarım depremi için mesnetlerin alt ve üst sınır mekanik özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Alt sınır değerler normal sıcaklık ve yeni mesnet davranışını tanımlar. Genelde mesnetin alt sınır özellikleri üst yapıda oluşabilecek en

büyük yerdeğiştirmeyi bulmak için kullanılır. Üst sınır özellikleri ise yaşlanma, kirlenme, sıcaklık ve yükleme geçmişi gibi etkileri dikkate almaktadır. Genelde mesnetin üst sınır özellikleri altyapı elemanlarında oluşabilecek en büyük kuvvetleri bulmak için kullanılır.

Mesnetin mekanik özelliklerinin alt ve üst sınır değerleri mesnet özelliklerinin nominal değerlerinden elde edilir. Nominal özellikler gerçek mesnetlerle aynı prototip mesnetlerin test edilmesinden veya önceki projelerdeki benzer mesnetlerin test verilerinden ve belirsizliği hesaba katmak için uygun varsayımların kullanımından elde edilir. Genelde, yalıtımı yapılan köprünün analiz ve tasarımı, benzer mesnetlerin geçmiş testlerinden elde edilen mevcut verilere dayanmaktadır. Mesnetlerin mekanik özellik aralığını tespit etmek için yapılan varsayımlar daha sonra prototip testi uygulanarak doğrulanır. Mekanik özellik aralığının seçimi uygun şekilde yapılırsa prototip mesnet testi yapılan varsayımın ve dolayısıyla analiz ile tasarımın geçerliliğini teyit edecektir. Böylece tasarımın değiştirilmesi gerekli olmayacaktır. Bu sebeple mühendis, mesnet davranışı hakkında bilgi için mesnet üreticilerine danışmalıdır. Benzer yükleme ve hareket koşulları altında benzer mesnetlerin test sonuçları mesnetlerin nominal mekanik özelliklerinin seçiminde bir kılavuz görevi görmektedir.

### 1.5.1. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Nominal Değerleri

Elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü  $G$  için deprem hareketinin ilk üç döngüsü sırasında ortalama kayma modülü olarak belirlenen  $G_3$  değeri alınır. Bu değer tipik sismik yalıtım mesnetlerinde 0.41 ile 0.48 MPa aralığında değişmektedir ve genelde 0.45 MPa olarak dikkate alınmaktadır. Deprem hareketinin ilk döngüsünde geçerli değer  $G_1$  ise  $1.1G_3$  olarak hesaplanır ve  $G_1$  değerinin bulunmasında  $G_3$  değerinin en büyüğü dikkate alınmalıdır.

Kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı  $\sigma_L$  için deprem hareketinin ilk üç döngüsü sırasında ortalama kayma akma dayanımı olarak belirlenen  $\sigma_{L3}$  değeri alınır. Bu değer 10 ile 12 MPa arasında değişim göstermektedir ve kurşun çekirdek çapına, mesnet boyutuna, yükleme ve imalat detaylarına bağlıdır. Genelde, bu değer 10 MPa olarak dikkate alınmaktadır. Deprem hareketinin ilk döngüsünde geçerli değer  $\sigma_{L1}$  ise  $1.35\sigma_{L3}$  olarak hesaplanmaktadır.  $\sigma_{L1}$  hesabında  $\sigma_{L3}$  değerinin en büyüğü dikkate alınmalıdır.

### 1.5.2. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Alt ve Üst Sınır Değerleri

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ve ikincil rijitliğinin alt sınır değerleri deprem hareketinin ilk üç döngüsü (ortalama üç döngü) sırasındaki nominal özellikleri olmalıdır. Bu özelliklerin normal sıcaklık ve yeni mesnetler için geçerli olduğuna dikkat edilmelidir. Buna göre:

- Elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü  $G = G_{3|min} = 0.41$  MPa (alt sınır için elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü nominal değerlerin en küçüğü olarak dikkate alınır).
- Kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı  $\sigma_{L1} = \sigma_{L3|min} = 10$  MPa olarak dikkate alınır.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ve ikincil rijitliğinin üst sınır değerleri deprem hareketinin ilk döngüsü sırasındaki nominal özellikler olmalı ve yaşlanma ile işletme etkileri için özellik değiştirme katsayıları ile çarpılmalıdır. Bu etkiler AASHTO'da verilmektedir. Buna göre:

- Elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü  $G = G_I * \lambda_a$
- Kurşun malzemeye ait kayma akma dayanımı  $\sigma_L = \sigma_{L1|max} * \lambda_{tr}$

olarak hesaplanır ve burada  $\lambda_a = 1.1$  yaşlanma etkisi,  $\lambda_{tr} = 1.2$  işletme etkisi katsayılarıdır (Constantinou vd., 2011).

### 1.6. Sismik Yalıtımlı Köprülerin Analiz Yöntemleri

Çoğu sismik yalıtım mesnetleri doğrusal olmayan davranış göstermektedir ve bu mesnetlerin tasarımı için sadece doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi gerekebilir. Fakat, yalıtım mesnetlerinin doğrusal olmayan özellikleri doğrusallaştırılırsa eşdeğer doğrusal (elastik) yöntemler kullanılabilir. Bu bağlamda, çoğu doğrusal yöntemler köprü analizi için uygun olmaktadır. Köprü yapısal analizi için uygulanabilecek yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Tek Modlu Analiz
- Çok Modlu Analiz
- Zaman Tanım Alanında Analiz

İlk iki yöntem eşdeğer doğrusal yöntemlerdir. Zaman tanım alanında çözüm yöntemi ise hem doğrusal hem de doğrusal olmayan çözümlere ayrılabilir. Zaman tanım alanında çözüm yöntemi karmaşık yapılar için veya yalıtım cihazlarının yüksek sönümlü olarak modellenmesini gerektiren (etkin sönüm oranı %30'dan büyük) durumlarda kullanılmaktadır (AASHTO, 2017). Bu çalışma kapsamında tek ve çok modlu analiz yöntemleri detaylı olarak incelenmektedir.

### **1.6.1. Tek Modlu Analiz**

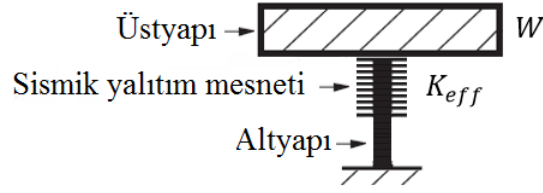
Tek modlu analiz yöntemi köprü üst ve altyapısının rijit kabuline dayanarak gerçekleştirilmektedir ancak bu analiz yöntemi her zaman geçerli olmamaktadır. Özellikle altyapının esnek olduğu durumlarda bu yöntem köprü periyodunu uzatmakta ve sönümü azaltmaktadır. Altyapı esnekliğinin dikkate alınması gereken durumlarda diğer analiz yöntemleri kullanılmalıdır.

Tek modlu analiz yöntemi sismik yalıtım mesnetlerinin ön tasarımı ve uygunluğunun kontrolü amacıyla yapılmaktadır. Tasarım için bu yöntem bir başlangıç noktası olarak kullanılabilir.

Tek modlu analiz yönteminin kullanılmasında bazı varsayımlar yapılmaktadır. Bu varsayımlar aşağıdaki gibidir:

1. Köprü üstyapısı ve altyapısı rijit davranmaktadır.
2. Köprü tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenmektedir.
3. Yerdeğiştirme tepki spektrumu doğrusal bir şekilde periyotlara bağlı olmaktadır.
4. Sismik yalıtım mesnetlerinin yatay kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi çift doğrusal histeretik döngü ile tanımlanmaktadır ve etkin rijitlik ile ifade edilmektedir.
5. Histeretik enerji sönümlenmesi etkin sönüm oranı ile tanımlanmaktadır.
6. Tasarım tepki spektrumu farklı etkin sönüm oranları için spektrum azaltma katsayıları ile ölçeklenebilmektedir.

Tek modlu analiz için sismik yalıtımlı köprünün tek serbestlik dereceli modeli Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Tek modlu analiz için tek serbestlik dereceli köprü modeli

Şekil 11'den görüldüğü üzere tek modlu analiz için tek serbestlik dereceli köprü modelinde üstyapı toplam ağırlığı  $W$  ile temsil edilmektedir. Köprü altyapısı ise rijit bir mesnet olarak düşünülür. Sismik yalıtım mesnetleri ise üstyapı ile altyapı arasına yerleştirilir. Üstyapıyı destekleyen tüm sismik yalıtım mesnetlerinin aynı yerdeğiştirmeyi yapması durumunda tek bir sismik yalıtım mesnetin özellikleri sistemin etkin mesnet özelliklerine dönüştürülebilir. Bu durum birinci titreşim modunun hakim olduğu ve altyapısı rijit köprüler için geçerli olmaktadır. Sistemin etkin rijitliği  $K_{eff}$ , aşağıdaki denklemlerle elde edilir:

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q_d}{D_D} \quad (1)$$

Burada,  $D_D$  tasarım deprem yerdeğiştirmesi,  $Q_d$  sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ve  $K_d$  ikincil mesnet rijitliğidir. Sistemin etkin periyodu  $T_{eff}$ , köprü üstyapı toplam ağırlığına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{W/(gK_{eff})} \quad (2)$$

Burada,  $g$  yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Elastomer mesnetinin etkin sönüm oranı  $\beta_{eff}$ :

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d(D_D - D_y)}{2\pi K_{eff} D_D^2} \quad (3)$$

Burada,  $D_y$  elastomer mesnetinin akma yerdeğiştirmesidir. Tek serbestlik dereceli sistemin tasarım deprem yerdeğiştirmesi  $D_D$ , etkin period  $T_{eff}$  ve etkin sönüm oranı  $\beta_{eff}$  için:

$$D_D = (g/4\pi^2)(S_{D1}T_{eff}/B_L) \quad (4)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada,  $S_{D1}$  1.0 saniyelik periyottaki tasarım spektral ivme katsayısını ve  $B_L$  elastomer mesnetin etkin sönüm oranı için hesaplanan spektrum azaltma katsayısını ifade etmektedir. Spektrum azaltma katsayısı sönüm oranının %30'un altında kalması koşuluyla:

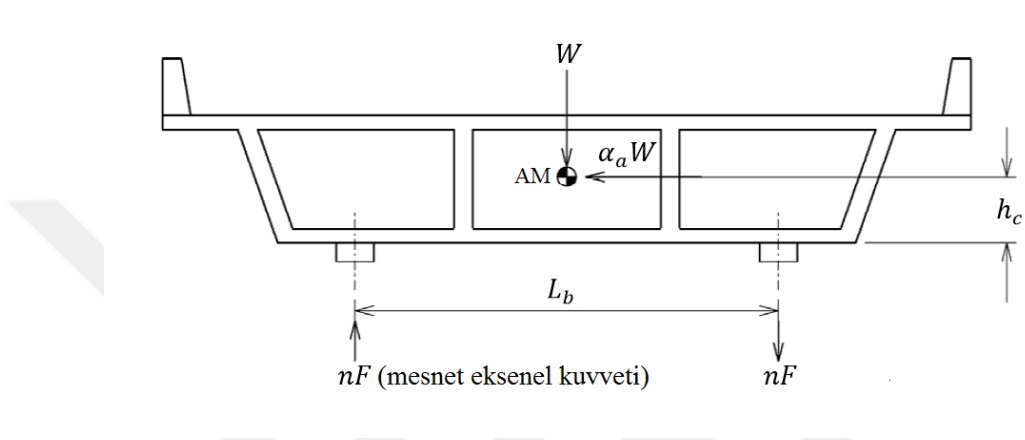
$$B_L = (\beta_{eff}/0.05)^{0.3} \quad (5)$$

olarak hesaplanmaktadır. Sönüm oranının %30'dan büyük olması durumunda ise spektrum azaltma katsayısı 1.70 olarak kabul edilebilmektedir.

Köprü tasarım deprem yerdeğiştirmesinin ilk adımda belli olmaması ve köprü özelliklerinin ( $K_{eff}$ ,  $T_{eff}$  ve  $\beta_{eff}$ ) bu yerdeğiştirme değerine bağlı olması sebebiyle tek modlu analiz yöntemi iteratif bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Yöntemin ilk adımında tasarım deprem yerdeğiştirme değeri için bir varsayım yapılır ve yakınsama elde edilene kadar değiştirilir. Bu yöntemin adımları aşağıdaki gibidir:

1. Tasarım deprem yerdeğiştirmesi,  $D_D$ , için bir varsayımda bulunulur
2. Etkin rijitlik,  $K_{eff}$ , hesaplanır, Denklem (1)
3. Etkin periyot,  $T_{eff}$ , hesaplanır, Denklem (2)
4. Etkin sönüm oranını,  $\beta_{eff}$ , hesaplanır, Denklem (3)
5. Spektrum azaltma katsayısı,  $B_L$ , elde edilir, Denklem (5)
6. Yeni yerdeğiştirme,  $D_D$ , hesaplanır, Denklem (4)
7. Varsayılan yerdeğiştirme değeri ile hesaplanan yerdeğiştirme değeri kıyaslanır. Değerler yakınsa hesaplama durdurulur. Değerler yakın değilse Adım 6'da bulunan yerdeğiştirme değeri ile Adım 2'den tekrar çözüme gidilir.

Tasarım deprem yerdeğiştirmesinin elde edilmesinden sonra yatay depremin etkisinden dolayı mesnetlerde oluşan aksenal basınç kuvvetleri analitik olarak elde edilir. Şekil 12’de yatay deprem kuvveti ve mesnetlerde oluşan aksenal kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 12. Yatay deprem ve mesnetlerde oluşan aksenal kuvvetler

Şekil 12’ye göre yatay deprem köprü üstyapı ağırlık merkezine (AM) etki etmekte ve sadece bu kuvvet dolayısıyla tek bir mesnette oluşan  $F$  aksenal kuvvet değeri aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$F = \frac{h_c \alpha_a W}{n L_b} \quad (6)$$

Burada,  $h_c$  üstyapı enkesit ağırlık merkezinin mesnet üst yüzeyine olan mesafesini,  $\alpha_a$  yatay deprem ivmesini,  $W$  toplam üstyapı ağırlığını,  $n$  mesnet sayısını ve  $L_b$  mesnetlerin merkezden merkeze mesafesini ifade etmektedir.  $\alpha_a$  deprem ivmesi tepki spektrum eğrisinden ilgili periyot değerine göre elde edilmektedir.

Tek modlu analiz yöntemi iki ortogonal doğrultuda etki ettirilmeli ve yerdeğiştirmeler bir doğrultu için %100 ve diğer doğrultu için %30 oranlarını dikkate alan yk birleşimi ile elde edilmelidir. Çoğunlukla iki ortogonal doğrultu olarak köprü boyuna ve enine doğrultuları tercih edilmektedir. Düşey doğrultunun etkisi de dikkate alınması durumunda katkısı %30 olarak yük

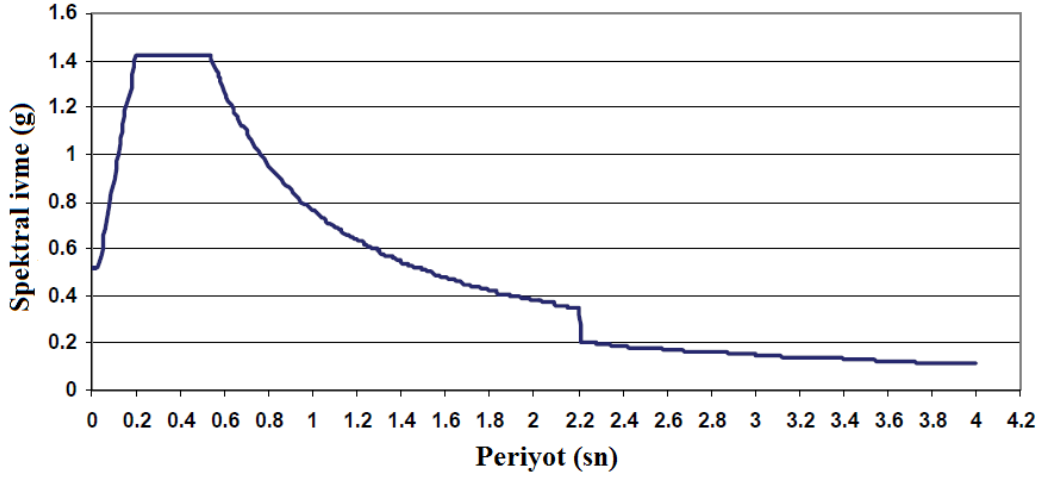
birleşimlerine eklenmektedir. Düşey depremin dikkate alınması için düşey doğrultuda bilgisayar ortamında çok modlu analiz yapılır. Çok modlu analiz sonrasında mesnet eksenel kuvvet değerleri kenar ve orta ayaklar için elde edilir. Mesnette oluşan eksenel kuvveti değerleri yük kombinasyonu 30% Enine Yatay Deprem ve 100% Düşey Deprem ve 100% Enine Yatay Deprem ve 30% Düşey Depremi dikkate alınarak hesaplanır. Hesaplamalar hem tasarım hem de maksimum deprem durumları için yapılır. Maksimum deprem durumu için tasarım deprem durumunda elde edilen sonuçlar 1.5 katsayısıyla çarpılarak elde edilebilir.

### 1.6.2. Çok Modlu Analiz

Çok modlu analiz yöntemi tepki spektrum analizlerini gerçekleştirebilen bilgisayar programları vasıtasıyla yapılmaktadır. Çok modlu analizden tek modlu analizden farkı köprü altyapı ve üstyapı rijitliklerini ve kütlelerini yansıtabilen farklı köprü modlarını dikkate alarak doğrusal olmayan tepkilerin bulunmasıyla çözümün elde edilmesidir. Böylece daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Bunun yanı sıra çok modlu analiz kenar ve orta ayaklar üzerindeki mesnetlerde oluşan eksenel basınç kuvvetleri ve yerdeğiştirmelerin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Tek modlu analizde ise köprü ayakları sadece bir elemana indirgenerek mesnet yerdeğiştirme ve kuvvetleri için tek bir değer elde edilmektedir.

Çok modlu analizde bilgisayar programları yardımıyla yapının üç boyutlu serbest titreşim analizi gerçekleştirilir ve yapı periyotları ile modları elde edilir. Çok modlu analizde köprü açıklığının en az üç katı kadar asgari mod sayısı dikkate alınmalıdır ve toplam kütle katılım payı %95'in altında olmamalıdır. Analizde her bir yalıtım mesneti etkin rijitlikleriyle ifade edilmektedir. Analizlerde yüksek sönüm oranları için değiştirilen %5 sönüm oranlı spektrumlar kullanılmaktadır. %5 sönüm oranlı tepki spektrum ordinatları,  $0.8T_{eff}$  değerinden büyük periyodlar için, spektrum azaltma katsayısı  $B_L$  ile bölünmektedir. Böylece, yüksek periyodlarda yalıtım mesnetlerinin sağladığı sönüm dikkate alınmakta ve düşük periyodlarda ise ihmal edilmektedir. Şekil 13'te çok modlu analizde kullanılan örnek bir tepki spektrum grafiği gösterilmektedir. Şekil 13'e göre etkin periyot değeri  $T_{eff} = 2.75$  sn, etkin sönüm oranı  $\beta_{eff} = 0.30$  ve spektrum azaltma katsayısı  $B_L = 1.8$ 'dir. Tepki spektrum ordinatları,  $0.8 \cdot 2.75 = 2.2$  sn değerinden büyük periyodlar için 1.8 sayısıyla bölünmüştür.





Şekil 13. Çok modlu analiz için azaltılmış tepki spektrumu

Analiz için gerekli asgari mod sayısı dikkate alınarak tepki spektrum eğrilerinden her bir moda ait titreşim periyotlarına karşılık gelen deprem ivmeleri bulunur. Bu deprem ivmeleri yapıya etki ettirilerek yapının spektrum analizi gerçekleştirilir ve yapıda oluşan yerdeğiştirmeler ile iç kuvvet bileşenleri her mod için hesaplanır. Bu hesaplanan değerler ise uygun birleştirme yöntemi ile birleştirilerek gerçek yerdeğiştirmeler ile iç kuvvetler elde edilir. Bu çalışmada mod katkılarının birleştirmesinde kareleri toplamının karekökü yöntemi kullanılmaktadır.

Çok modlu analiz yöntemi, tek modlu analiz yöntemine benzer şekilde iki ortogonal doğrultuda etki ettirilmeli ve sonuçlar bir doğrultu için %100 ve diğer doğrultu için %30 oranlarını dikkate alan yük birleşimleri ile elde edilmelidir. Çoğunlukla iki ortogonal doğrultu olarak köprü boyuna ve enine doğrultuları tercih edilmektedir. Düşey doğrultunun etkisi de dikkate alınabilmekte ve katkısı %30 olarak yük birleşimlerine eklenmektedir. Hesaplamalar hem tasarım hem maksimum deprem durumları için yapılır. Maksimum deprem durumu için tasarım deprem sonucu elde edilen sonuçlar 1.5 katsayısıyla çarpılabilir (Constantinou vd., 2011).

### 1.6.3. Zaman Tanım Alanında Analiz

Zaman tanım alanında analiz yöntemi doğrusal olmayan veya eşdeğer doğrusal özelliklere sahip yalıtım mesnetler için kullanılabilir. Bununla birlikte doğrusal yöntemlerin uygun olmadığı geometrisi karmaşık köprüler için veya yüksek sönümlü ( $\beta_{eff} > \%30$ ) yalıtım sistemlerini daha doğru temsil etmek için tercih edilmektedir. Analizi gerçekleştirmek için en az üç deprem kaydı seçilmelidir. Bu kayıtlar deprem bölgesinin depremselliğine uygun olmalıdır. Her bir kayıt eşzamanlı olarak köprü üç boyutlu modeline uygulanmalıdır ve yerdeğiştirme değerleri her zaman adımı için hesaplanmalıdır. Kayıt takım sayısının üç seçilmesi durumunda tasarım için köprü tepkilerinin (kesit tesirleri, yerdeğiştirme) en büyüğü dikkate alınmalıdır. Çözüm için yedi ve daha fazla kayıt takımı seçilmesi durumunda ise ortalama değerler kullanılmalıdır (Constantinou vd., 2011).

## 1.7. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı

Bu bölümde kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Tasarım için gerekli yükler, ısıl hareketler, mesnet boyut ve mekanik özellikleri adım adım ifade edilmektedir. Bununla birlikte dikkate alınan analiz yöntemlerinden de bahsedilmektedir. Son olarak mesnet tasarımının servis ve deprem yükleri altındaki kontrollerine yer verilmektedir

### 1.7.1. Gerekli Yükler

Elastomer mesnet tasarımında dikkate alınması gereken yükler: sabit ve hareketli servis yükleri yanında tasarım ve maksimum deprem yükleridir.

#### 1.7.1.1. Sabit Yük

Sabit yük, köprü üstyapısının tüm bileşenlerinin ağırlığını, bunlara bağlı donanımları, toprak örtüsünü, aşınma yüzeyini, gelecekteki kaplamaları ve planlanan genişlemeleri içermektedir.

### 1.7.1.2. Hareketli Yük

Köprüye etki ettirilecek hareketli yüklerin tanımlanması tasarım şerit sayısının belirlenmesine bağlıdır. Tasarım şeritleri üzerine tasarım araç hareketli yükleri etki ettirilecek ve araç tekerleklerinin etkisini hesaba katmak için dinamik yük payı dikkate alınacaktır. Ayrıca araç frenleme kuvveti de hesaba katılacaktır.

#### 1.7.1.2.1. Tasarım Şerit Sayısı

Genel olarak, tasarım şerit sayısı  $w/3600$  oranı ile belirlenmelidir. Bu oranın tamsayı kısmı dikkate alınır. Burada  $w$ , bordürler veya bariyer arasındaki mm cinsinden net yol genişliğidir. 3600 ise mm cinsinden bir tasarım şeridinin genişliğidir ve genelde tasarım şeridi genişliği olarak bu değer seçilir.

#### 1.7.1.2.2. Tasarım Araç Hareketli Yüğü

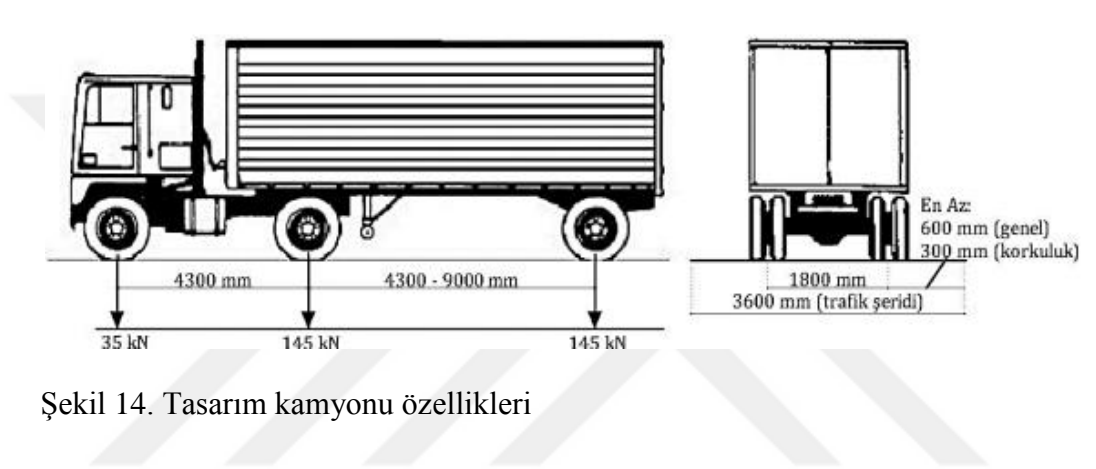
Köprü yolları için tasarım araç hareketli yükleri HL-93 (Highway Loading adopted in 1993) araçları olarak tanımlanmaktadır. AASHTO'ya göre HL-93, kamyon veya tandem yüğü ile şerit yüğü kombinasyonlarından oluşmaktadır. Her bir tasarım şeridi üzerine tasarım kamyonu veya tasarım tandemi, tasarım şerit yüğü ile birlikte etki ettirilir. Bu yükler tasarım şeridi genişliğinin 3000 mm'sini kaplayacak şekilde uygulanır.

Tasarım araç hareketli yükünün uygulanmasında elverişsiz kuvvet etkisi için aşağıdaki durumlardan en büyük olanı dikkate alınır:

- Tasarım tandemi etkisiyle birlikte tasarım şerit yüğü etkisi
- Değişken aks aralığına sahip bir tasarım kamyonunun etkisiyle birlikte tasarım şerit yüğü etkisi
- Ard arda dizilen iki tasarım kamyon etkisinin %90'ı ile birlikte tasarım şerit yüğü etkisinin %90'ı. Bir kamyonun ön aks ile diğer kamyonun arka aksı arasındaki minimum aralık 15000 mm olmalıdır. İki kamyonun 145000 N'luk dingilleri arası mesafesi 4300 mm olarak dikkate alınmalıdır.

### 1.7.1.2.2.1. Tasarım Kamyonu

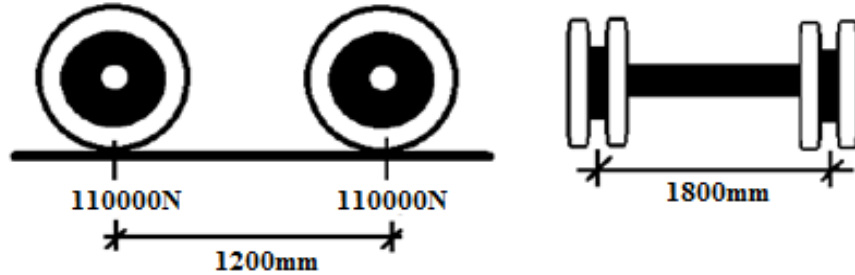
Tasarım kamyonu için dingiller ile tekerleklerin ağırlık ve aralıkları AASHTO'ya göre belirlenmektedir. Şekil 14'te gösterilen tasarım kamyonunun en büyük kuvvet etkisini elde edebilmek için 145000 N'luk dingiller arası mesafe 4300 ile 9000 mm arasında değişim göstererek tanımlanmaktadır.



Şekil 14. Tasarım kamyonu özellikleri

### 1.7.1.2.2.2. Tasarım Tandemi

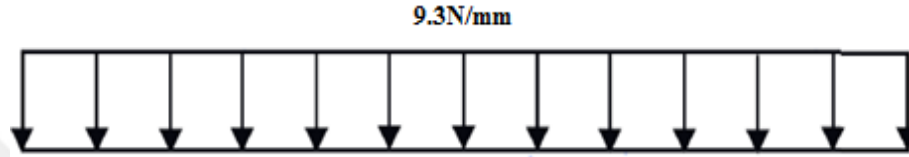
Tasarım tandemi 1200 mm aralıkla yerleştirilmiş bir çift 110000 N'luk dingilden oluşmaktadır. Tekerleklerin enine aralığı ise 1800 mm olarak alınmaktadır. Şekil 15'te tasarım tandemi gösterilmektedir.



Şekil 15. Tasarım tandem özellikleri

### 1.7.1.2.2.3. Tasarım Şerit Yüğü

Tasarım şerit yüğü 9.3 N/mm'lik bir yaylı yüğü olarak tanımlanmaktadır. Boyuna yönde bu yüğü tüm kiriş uzunluğu için enine yönde ise 3000 mm genişliği için etki ettirilmektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Tasarım şerit yüğü

### 1.7.1.2.3. Çoklu Hareketli Yüğü Faktörü

İstisnai hareketli yüğü kuvveti etkisi yüklenen şerit sayısının her olası kombinasyonu dikkate alınarak belirlenir. HL-93 tasarım hareketli yükünün tamamen şeritlere yüklenmesi olasılığını hesaba katmak için her tasarım şeridi çoklu hareketli yüğü faktörü ile çarpılır. Çoklu hareketli yüğü faktörü Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çoklu hareketli yüğü faktörü

Yüklenen şerit sayısı	Çoklu hareketli yüğü faktörü
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

### 1.7.1.2.4. Dinamik Yüğü Payı

Dinamik yüğü payı hareketli araçların tekerleklerinin dinamik etkisini hesaba katmak için statik tekerlek yüküne uygulanacak bir artış payıdır. Hareket halindeki araçların dinamik etkileri

iki nedenden oluşabilir. Bunların ilki tekerleklerin çatlaklar, çukurlar ve delaminasyonlar gibi sürüş yüzeyi süreksizliklerinden dolayı dinamik tepkisidir. İkincisi tüm araçların bir bütün olarak geçmesi halindeki köprünün araçlara dinamik tepkisidir. Bu tepki, yol kaplamasındaki uzun titreşimlerden veya köprü ile araç arasındaki benzer titreşim frekanslarının bir sonucu olarak rezonans olayından kaynaklanabilir.

Merkezkaç ve frenleme kuvvetleri dışındaki tasarım kamyonunun veya tandem statik etkileri %33 oranında artırılacaktır (AASHTO, 2010).

#### **1.7.1.2.5. Frenleme Kuvveti**

Frenleme kuvveti, tüm tasarım şeritlerine uygulanacaktır ve aşağıdakilerden büyük olanı dikkate alınacaktır:

- Tasarım kamyonu veya tandem dingil ağırlığının %25'i veya
- Tasarım kamyonu yükünün %5'i ile tasarım şerit yükü veya tasarım tandemi yükünün %5'i ile tasarım şerit yükü.

#### **1.7.1.3. Tasarım ve Maksimum Deprem Yükü**

Tasarım deprem yükü, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için farklı yerel zemin sınıfı ve köprü konum bilgilerine göre elde edilen yatay ve düşey tasarım spektrum eğrileri dikkate alınarak köprüye etki ettirilmektedir. Maksimum deprem yükü ise DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için benzer şekilde elde edilebileceği gibi, tasarım depreminin birden büyük bir katsayı ile çarpımı olarak da tanımlanabilmektedir (Constantinou vd., 2011). Bu katsayının değeri maksimum depremin sismik yalıtım sistemi üzerindeki maksimum etkilerine, tasarım deprem etkilerini hesaplamak için kullanılan metodolojiye ve kabul edilebilir güvenlik payını dikkate alarak belirlenmektedir. Genel olarak, bu katsayı değeri, yalıtım sisteminin özelliklerine ve sahanın konumuna bağlı olarak 1 ile 1.5 arasında değişim göstermektedir. Bu çalışmada maksimum deprem yükü için 1.5 katsayısı dikkate alınmıştır.

### 1.7.2. Tasarım Isıl Hareketi

Elastomer mesnet tasarımında sıcaklık değişiminden kaynaklanan ısı hareketler dikkate alınır. Tasarım ısı hareketi,  $\Delta_T$ , AASHTO'da tanımlanan köprü tasarım sıcaklıklarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\Delta_T = \alpha_T L (T_{MaxDesign} - T_{MinDesign}) \quad (7)$$

Burada,  $\alpha_T$  betonun ısı genleşme katsayısı,  $L$  genleşme uzunluğu,  $T_{MaxDesign}$  ve  $T_{MinDesign}$  sırasıyla maksimum ve minimum tasarım sıcaklıklarıdır. Tasarım ısı hareketleri kenar ve orta ayaklar için hesaplanmalıdır. Kenar ayaklar için genleşme uzunluğu köprü uzunluğunun yarısı ve orta ayaklar için ise ilgili orta ayağın köprü orta noktasına olan mesafesi olarak dikkate alınır.

### 1.7.3. Elastomer Mesnet Boyut ve Özelliklerinin Seçimi

Elastomer mesnet için kritik durum mesnetin en büyük yerdeğiştirme yaptığı anda meydana gelir. Bu durumda kayma birim şekil değiştirmesinin ve mesnet stabilitesinin kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle mesnetin kabul edilebilir boyutları alt sınır özelliklerine dayanır. Kurşun malzemesinin alt sınır özellikleri için kayma akma dayanımı 10 MPa'dır. Elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü ise 0.41-0.48 MPa arasında değişim gösterir.

Mesnetlerin yerdeğiştirme yapmamış durumda (sıfır yerdeğiştirme) dayanım kuvveti  $Q_d$ , kurşun çekirdeğin alanına  $A_L$  ve kayma akma dayanımına  $\sigma_L$  bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilmektedir:

$$Q_d = \sum_{i=1}^n A_L \sigma_L = \sum_{i=1}^n \frac{\pi D_L^2}{4} \sigma_L \quad (8)$$

burada,  $D_L$  kurşun çekirdeğin çapı,  $n$  toplam mesnet sayısını göstermektedir.

Elastomer mesnetin ikincil rijitliği  $K_d$ , kayma modülü  $G$ , elastomer katmanların kalınlıklarının toplamı  $T_r$  ve öntasarım için kurşun çekirdeğin kesit alanı çıkartılmamış elastomer malzemenin kesit alanına  $A_r$  bağlı olarak, aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilmektedir:

$$K_d = \sum_{i=1}^n \frac{GA_r}{T_r} = \sum_{i=1}^n \frac{G\pi D_B^2}{4T_r} \quad (9)$$

burada,  $D_B$  elastomer malzemenin kesit alanının çapıdır.

Elastomer mesnet tasarımında ilk adım kurşun çekirdek çapının seçilmesidir. Sismik yalıtım mesnetinin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti  $Q_d$ , toplam üstyapı ağırlığının ( $W$ ) istenilen bir kısmı olarak seçilebilmektedir. Genelde bu oran  $\mu_d = Q_d/W$  şeklinde ifade edilmektedir. Bu oran 0.05 veya daha büyük bir değer olarak seçilebilmektedir. Denklem (8)  $Q_d = \mu_d W$  oranına eşitlenerek gerekli minimum kurşun çekirdek çapı  $D_L$  bulunabilmektedir.

Bulunan kurşun çekirdek çapına bağlı olarak elastomer malzemenin kesit alanının çapı  $D_B$  ve elastomer katmanların kalınlıklarının toplamı  $T_r$  bulunur. Bu boyutlar aşağıdaki kurallara uygun olmalıdır (AASHTO, 2010):

- $3D_L \leq D_B \leq 6D_L$
- $T_r \geq D_L$

Ayrıca  $D_B$  değeri için mesnette oluşan basıncın 5.5 ile 9 MPa arasında olması makul görülmektedir.

Daha sonra kurşun çekirdekli elastomer mesnetin diğer özellikleri seçilir. Bunlar ara elastomer katman kalınlığı  $t_r$ , ara elastomer katmanların sayısı  $n_r$ , ara çelik plaka kalınlığı  $t_s$ , ara çelik plakaların sayısı  $n_s$  ve kaplama kalınlığı  $t_c$ 'dir. Ara elastomer katman kalınlığı genelde  $t_r \leq 10$  mm olacak şekilde seçilmektedir. Buna göre ara elastomer katman sayısı  $n_r$ :

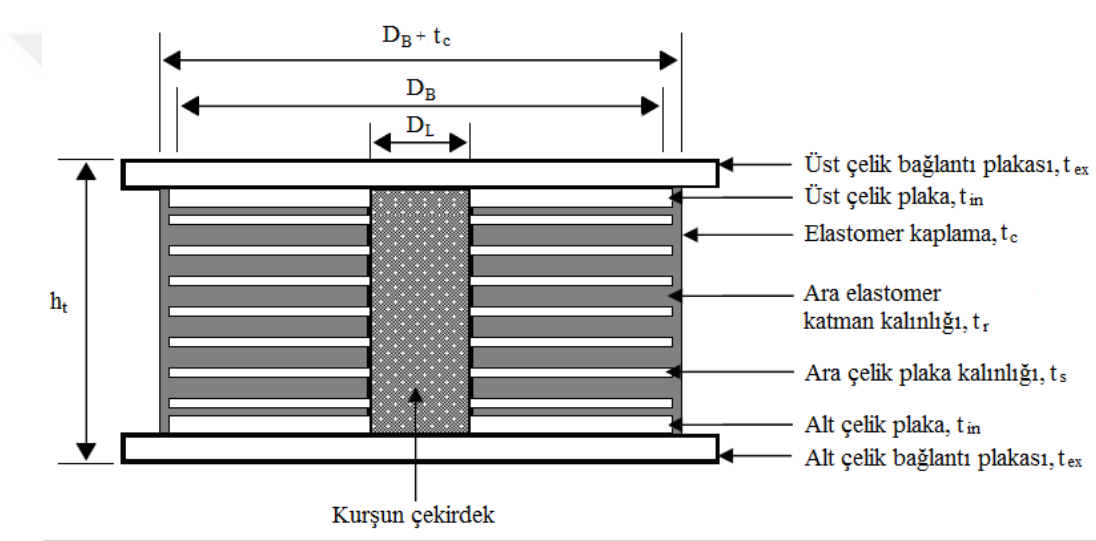
$$n_r = T_r / t_r \quad (10)$$

ifadesiyle bulunur. Ara çelik plaka kalınlığı  $t_s$  genelde 1 ile 5 mm arasında seçilmektedir. Ara çelik plakalar sayısı:



$$n_s = n_r - 1 \quad (11)$$

bağıntısıyla bulunmaktadır. Genelde ara çelik plaka malzemesi ASTM A572 ve akma dayanımı  $F_y = 345 \text{ MPa}$ 'dır. Beklenen akma dayanımı  $F_{ye}$  ise  $F_y$  akma dayanımının 1.1 katı olarak dikkate alınmaktadır. Şekil 17'de kurşun çekirdekli elastomer mesnetin enkesit bileşenleri gösterilmektedir. Şekil 17'deki  $h_t$  toplam mesnet yüksekliğidir.



Şekil 17. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet enkesit görünüşü

#### 1.7.4. Alt ve Üst Sınır Analizi

Alt sınır analizi tasarım yerdeğiştirmesini bulmak için tek modlu analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Hesap kolaylığı açısından köprü altyapı esnekliği ihmal edilir fakat daha sonra kontrol edilir. Analizde yalıtım sisteminin davranışını temsil etmek için çift doğrusal histeretik model kullanılır.

Alt sınır analizinde alt sınır mesnet malzeme özellikleri kullanılır. Hesaplar orta ayak ve kenar ayak mesnetleri için ayrı ayrı yapılır. Öncelikle tek bir mesnetin özellikleri bulunur. Toplam mesnet özellikleri ise orta ve kenar ayaklarda bulunan mesnet sayılarıyla çarpılarak bulunur.

Hesap adımları orta ayak ve kenar ayak mesnetleri için Denklem (9) kullanılarak  $K_d$  değerlerinin bulunmasıyla başlar. Denklem (9)'daki elastomer alanı:

$$A_r = ((D_B + t_c)^2 - D_L^2)/4 \quad (12)$$

bağıntısıyla belirlenir. Tek bir mesnetin sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ise Denklem (8) ile hesaplanır.

Kenar ayak mesnet için sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvvetinin %75'lik kısmı dikkate alınır. Bunun nedeni kenar ayakların orta ayaklara göre daha az basınca maruz kalması ve mesnet özelliklerindeki belirsizliklerdir. Bu azaltma sadece alt sınır analizinde dikkate alınmaktadır. Daha sonra tek modlu analiz yönteminde bahsedilen adımlar izlenerek tasarım yerdeğiştirmesi bulunur. Boyuna ve enine doğrultudaki tasarım deprem yerdeğiştirmeleri %100 boyuna yerdeğiştirme ve %30 enine yerdeğiştirme olacak şekilde karelerinin karekökü işleminde birleştirilir. Maksimum deprem için yerdeğiştirme değeri bulunan tasarım yerdeğiştirme değerin 1.5 katsayısıyla çarpılmasıyla elde edilir.

Üst sınır analizinde üst sınır mesnet malzeme özellikleri kullanılır. Üst sınır analizinde alt sınır analizindeki gibi adımları izlenir. Yerdeğiştirme artımına gidilmez. Ayrıca orta ve kenar ayaklar için ayrı ayrı hesap yapılmaz.

Yatay depremin etkisinden dolayı mesnetlerde oluşan aksel kuvvetler ise hem alt hem üst sınır değerleri için elde edilir. Mesnette oluşan aksel basınç kuvveti alt ve üst sınır analizleri için %30 enine yatay deprem ve %100 düşey deprem aksel basınç kuvvetleri birleşimi veya %100 enine yatay deprem ve %30 düşey deprem aksel basınç kuvvet birleşimi olarak dikkate alınarak hesaplanır. Hesaplamalar hem tasarım depremi hem de maksimum deprem için yapılır. Maksimum deprem durumu için tasarım depreminde elde edilen aksel kuvvetler 1.5 katsayısıyla çarpılarak elde edilebilir.

### 1.7.5. Elastomer Mesnet Düşey Rijitlik

Elastomer mesnetin düşey rijitliği çok modlu analiz için gereklidir. Alt ve üst sınır analizleri için sadece bir düşey rijitlik kullanılabilir. Rijitliğin değeri kayma modülünün nominal

değerinin azaltılmasıyla hesaplanır. Buna göre elastomer malzemeye ait kayma elastisite modülü  $G = 0.8G_3$  olarak dikkate alınır. Düşey rijitlik  $K_V$ :

$$K_V = \frac{A_r}{T_r} \left( \frac{1}{E_c} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (13)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada,  $K$  elastomer malzemeye ait hacim modülüdür ve genelde 2000 MPa değerinin alınması tavsiye edilir. Elastisite basınç modülü  $E_c$ :

$$E_c = 6GS^2 \quad (14)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada,  $S$  şekil katsayısıdır ve dairesel kesitler için:

$$S = \frac{A_{ra}}{\pi D_B t_r} \quad (15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $A_{ra}$  elastomer kaplama kalınlığını dikkate almayan elastomer malzemenin kesit alanıdır ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$A_{ra} = (D_B^2 - D_L^2)/4 \quad (16)$$

### 1.7.6. Tek ve Çok Modlu Analiz Karşılaştırması

Sismik yalıtımlı köprünün tek ve çok modlu analizleri yapıldıktan sonra mesnet üzerindeki yatay kuvvetler ve yerdeğiştirmeler karşılaştırılır. Büyük olan değerler kontrol ve mesnet yeterlilik değerlendirmesinde kullanılır.

### 1.7.7. Mesnet Çekme Kuvveti Kontrolü

Maksimum yerdeğiştirme durumunda mesnette çekme kuvvetinin oluşması istenmemektedir. Bu durum için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekmektedir:

$$P > 0 \quad (17)$$

Burada  $P$  aşağıdaki yük birleşiminden elde edilen eksenel kuvvet değeridir.

$$P = 0.9SY - 1.5(100\%DD + 30\%ED + 30\%BD) \quad (18)$$

Burada,  $SY$  mesnet üzerindeki sabit yükten,  $DD$  düşey,  $ED$  enine ve  $BD$  boyuna deprem yüklerinden oluşan eksenel kuvvetleri ifade etmektedir. Hesaplanan bu değerin sıfırdan büyük olması mesnette herhangi bir çekme kuvvetinin oluşmadığı anlamına gelmektedir. Aksi durumda mesnette oluşan çekme gerilmesinin kontrol edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kontrol:

$$\frac{P}{A_r} \leq 3G \quad (19)$$

ifadesinin sağlanması gerekmektedir. Burada,  $G$  alt sınır kayma modülü değeridir. Denklem (19)'in sağlanması mesnette oluşan çekme gerilmesinin makul seviyede olduğunu göstermektedir.

### 1.7.8. Merkezlenme Özelliği Kontrolü

Merkezlenme özelliği sismik yalıtım mesnetlerinin deprem etkisinden sonra başlangıç özelliğini geri kazanma yeteneğini temsil etmektedir. Genelde depremden dolayı sismik yalıtım mesnetlerinde birikerek artan yerdeğiştirmeler meydana gelmektedir. Ancak merkezlenme özelliği bu artan yerdeğiştirmeleri önlemektedir.

Merkezleme özelliği, özellikle düşük geri yükleme kuvvetlerine sahip sismik yalıtım mesnetlerinde dikkate alınmalıdır çünkü bazı durumlarda merkezleme özelliğinin olmaması aşırı birikmiş yerdeğiştirmeler nedeniyle ciddi hasarlara ve yapısal çökmelere neden olabilmektedir.

Merkezlenme özelliği kontrolü elastomer mesnetin üst sınır özellikleri için yapılır. Merkezlenme özelliğinin yeterli olması için:

$$T_d \leq T_{max} \quad (20)$$

bağıntısının sağlanması gerekir. Burada  $T_d$  sismik yalıtım sisteminin ikincil rijitliğine göre hesaplanan periyodu,  $T_{max}$  ise maksimum periyot değerini ifade etmektedir. İkincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değeri:

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_d g}} \quad (21)$$

denklemleriyle hesaplanmaktadır. Burada  $K_d$  elastomer mesnetinin üst sınır özelliği için ikincil rijitliği ifade etmektedir. Maksimum periyodun hesaplanması için ise öncelikle:

$$\mu_d = \frac{Q_d}{W} \quad (22)$$

değeri bulunur. Bu değere göre:

$$\mu_{qs} \leq \mu_d/2 \quad (23)$$

hesaplanır. Bulunan  $\mu_{qs}$  ve üst sınır analizinde hesaplanan tasarım yerdeğiştirmesi  $D_D$ 'ye bağlı olarak maksimum periyot  $T_{max}$  değeri aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir:

$$T_{max} = 28 \left( \frac{0.05}{\mu_{qs}} \right)^{0.25} \sqrt{\frac{D_D}{g}} \quad (24)$$

### 1.7.9. Altyapı Esneklik Etkisi Kontrolü

Esneklik etkisi köprü altyapısının esnek olması durumunda dikkate alınmaktadır. Bu amaçla köprü ayakları birer çubuk eleman olarak düşünülerek rijitlikleri hesaplanır. Böylece sistemin etkin toplam rijitliği:

$$K_{eff.sis} = \left( \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{is}} \right)^{-1} \quad (25)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada,  $K_c$  kolon ayağının rijitliği,  $K_{is}$  kolon ayak üzerindeki elastomer mesnetlerin toplam etkin rijitliğidir. Kolon rijitliği:

$$K_c = \frac{3E_c I}{H_c^3} \quad (26)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada  $E_c$  betonun elastisite modülü,  $I$  kolon ayağına ait kesitin atalet momenti ve  $H_c$  kolon ayağının uzunluğudur. Altyapı esnekliğinin maksimum etkisini görebilmek için elastomer mesnet rijitlikleri üst sınır etkin rijitlikleri olarak dikkate alınır. Orta ve kenar ayak toplam etkin rijitlikleri bulunduktan sonra sistemin etkin periyot değeri  $T_{eff.sis}$  aşağıdaki şekilde bulunur:

$$T_{eff.sis} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{(K_{eff.pier} + K_{eff.abut})g}} \quad (27)$$

Burada,  $K_{eff.pier}$  orta ve  $K_{eff.abut}$  kenar ayak etkin toplam rijitlikleridir. Etkin periyot değeri hesaplandıktan sonra bu değer üst sınır için Denklem (2) ile hesaplanan etkin periyot değeri ile bölünür. Elde edilen oranın 1.1'den küçük olması durumunda esneklik etkisi ihmal edilebilir.

### 1.7.10. Mesnet Yeterlilik Değerlendirmeleri

Sismik yalıtımlı bir köprünün servis ve deprem yükleri (tasarım depremi ve maksimum deprem) için yapısal analizleri gerçekleştirilir. Yapısal analizler sonucu mesnet tepkileri ve yerdeğiştirmeleri bulunur. Mesnet yeterliliği için elde edilen bu sonuçların çeşitli kontrolleri sağlanması gerekmektedir.

### 1.7.10.1. Servis Yük Kontrolü

Servis yük kontrolü için mesnette oluşan aksenal kuvvet ve yanal yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

- Sabit yükten oluşan aksenal kuvvet,  $P_D$ , elde edilir.
- Hareketli yükten oluşan aksenal kuvvet,  $P_L$ , elde edilir. Bu aksenal kuvvet statik bileşen  $P_{Lst}$  ve dögüsel bileşen  $P_{Lcy}$  olarak ikiye ayrılarak dikkate alınır. Hareketli yük analizinde statik ve dögüsel bileşen için ayırım yapılmıyorsa dögüsel bileşen toplam hareketli yükün en az %80 'lik kısmına eşit olacak şekilde dikkate alınmalıdır.
- Faktörlü aksenal kuvvet,  $P_u$ , aşağıdaki yük kombinasyonu ile hesaplanır:

$$P_u = \gamma_D P_D + \gamma_L P_{Lst} + 1.75 \gamma_L P_{Lcy} \quad (28)$$

Burada,  $\gamma_D$  ve  $\gamma_L$  yük faktörleridir ve değerleri AASHTO'ya göre sırasıyla 1.25 ve 1.75 olarak dikkate alınır.

- Depremsiz durumundaki mesnetin servis yanal yerdeğiştirmesinin,  $\Delta_{Sst}$  statik bileşeni ve  $\Delta_{Scy}$  dögüsel bileşeni elde edilir.
- Depremsiz durumundaki mesnetin servis dönmesinin,  $\theta_{Sst}$  statik bileşeni ve  $\theta_{Scy}$  dögüsel bileşeni elde edilir.

Mesnet yanal yerdeğiştirmesinin statik bileşeni, betonun sünme ve büzülmeden oluşan yerdeğiştirmelerini ve montaj hatalarını hesaba katmak için ısı hareketlerinden dolayı meydana gelen yerdeğiştirmelerin üç katı olarak dikkate alınabilir. Mesnet yanal yerdeğiştirmesinin dögüsel bileşeni ise sıfır olarak kabul edilebilir.

Mesnet dönmesinin statik bileşeni sabit ve hareketli yüklerden gelen dönmeye ek olarak 0.005 rad minimum montaj dönmesini de içermesi gerekmektedir. Mesnet dögüsel bileşeni ise en az 0.001 rad olarak dikkate alınması gerekmektedir.

Eksenal kuvvet, yanal yerdeğiştirmeler ve dönmelerden kaynaklanan kayma birim şekil değiştirmeleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

- Eksenal kuvvet için:

$$\gamma_{Cs}^u = \frac{P_u}{A_r G S} f_1 \quad (29)$$

- Yanal yerdeğiştirme için:

$$\gamma_{Ss}^u = \frac{\Delta_{Sst} + 1.75 \Delta_{Scy}}{T_r} \quad (30)$$

- Dönme için:

$$\gamma_{rs}^u = \frac{L^2 (\theta_{Sst} + 1.75 \theta_{Scy})}{t_r T_r} f_2 \quad (31)$$

Burada,  $f_1$  ve  $f_2$  mesnet şekli, elastomer malzemenin sıkışabilme etkisini ve kayma birim şekil değiştirmesinin hesaplandığı noktanın konumunu hesaba katmak için kullanılan katsayılardır. Dairesel kesitli mesnetler için  $f_1$  katsayısı 1 ile 1.6 ve  $f_2$  katsayısı 0.23 ile 0.37 değerleri arasında değişir. Dairesel kesitli mesnetler için  $L = D_B$  eşit olarak dikkate alınmaktadır.

- Servis yanal yerdeğiştirmesi  $\Delta_S$  için burkulma eksenel kuvveti:

$$P'_{crs} = P_{cr} \frac{A_{rr}}{A_{ra}} \quad (32)$$

Burada,  $P_{cr}$  aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD_B^4 \left(1 - \frac{D_L}{D_B}\right) \left(1 - \frac{D_L^2}{D_B^2}\right)}{t_r T_r \left(1 + \frac{D_L^2}{D_B^2}\right)} \quad (33)$$

Elastomer malzemenin azaltılmış kesit alanı  $A_{rr}$  aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:



$$A_{rr} = A_{ra} \frac{(\delta - \sin \delta)}{\pi} \quad (34)$$

Burada  $\delta$  değeri:

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left( \frac{\Delta_{Sst} + \Delta_{Scy}}{D_B} \right) \quad (35)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Elastomer mesnet tasarımında servis yükler için aşağıdaki koşulların sağlandığı kontrol edilmelidir:

$$\frac{\gamma_D P_D + \gamma_L P_{Lst}}{A_r G S} f_1 \leq 3.5 \quad (36)$$

$$\gamma_{Cs}^{\mu} + \gamma_{Ss}^{\mu} + \gamma_{rs}^{\mu} \leq 6.0 \quad (37)$$

$$t_s \geq \frac{\alpha t_r}{1.08 F_y \left( \frac{A_r}{(\gamma_D P_D + \gamma_L (P_{Lst} + P_{Lcy}))} \right)^{-2}} \geq 1.9 \text{ mm} \quad (38)$$

$$\frac{P'_{crs}}{\gamma_D P_D + \gamma_L (P_{Lst} + P_{Lcy})} \geq 2.0 \quad (39)$$

Denklem (38)'de  $\alpha = 3.0$  olarak dikkate alınmaktadır.

### 1.7.10.2. Tasarım Deprem Kontrolü

Tasarım deprem kontrolü için mesnette oluşan aksel kuvvet ve yanal yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

- Sabit yükten oluşan aksel kuvvet,  $P_D$ , elde edilir.

- Tasarım deprem durumundaki hareketli yükten oluşan eksenel kuvvet,  $P_{SLDE}$ , elde edilir. Bu yük hareketli yükün bir kısmı olarak etki ettirilmektedir. AASHTO'ya göre hareketli yükün %0 ile %50 kısmı olarak dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada %50'lik kısmı olarak dikkate alındı.
- Tasarım deprem yükünden oluşan eksenel kuvvet,  $P_{EDE}$ , elde edilir.
- Faktörlü eksenel kuvvet,  $P_u$ , aşağıdaki yük kombinasyonu ile hesaplanır:

$$P_u = \gamma_D P_D + P_{SLDE} + P_{EDE} \quad (40)$$

Burada,  $\gamma_D$  yük faktörüdür ve değeri AASHTO'ya göre 1.25 olarak dikkate alınmaktadır.

- Depremsiz durumundaki mesnetin servis dönmesinin,  $\theta_{Sst}$  statik bileşeni ve  $\theta_{Scy}$  döngüsel bileşeni elde edilir.
- Tasarım deprem durumundaki mesnetin depremsel yanal yerdeğiştirmesi,  $\Delta_{EDE}$  elde edilir.
- Depremsiz durumundaki mesnetin servis yanal yerdeğiştirmesi,  $\gamma \Delta_S$  hesaplanır. Burada servis yanal yerdeğiştirmesi,  $\Delta_S = \Delta_{Sst} + \Delta_{Scy}$  olarak hesaplanır ve  $\gamma = 0.5$  olarak dikkate alınır.

Eksenel kuvvet ve yanal yerdeğiştirmelerden kaynaklanan kayma birim şekil değiştirmeleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

- Eksenel kuvvet için:

$$\gamma_{CDE}^u = \frac{P_u}{A_r G S} f_l \quad (41)$$

- Yanal yerdeğiştirme için:

$$\gamma_{SDE}^u = \frac{\gamma \Delta_S + \Delta_{EDE}}{T_r} \quad (42)$$

Elastomer mesnet tasarımında tasarım depremi için aşağıdaki koşulların sağlandığı kontrol edilir:

$$\gamma_{CDE}^u + \gamma_{SDE}^u + 0.5\gamma_{rs}^u \leq 7.0 \quad (43)$$

$$t_s \geq \frac{\alpha t_r}{1.08 F_y \frac{A_r}{(\gamma_D P_D + P_{SLDE} + P_{EDE})} - 2} \geq 1.9 \text{ mm} \quad (44)$$

Denklem (44)'deki  $\alpha = 1.65$  olarak dikkate alınmaktadır.

### 1.7.10.3. Maksimum Deprem Kontrolü

Maksimum deprem kontrolü için mesnette oluşan aksel kuvvet ve yanal yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

- Sabit yükten oluşan aksel kuvvet,  $P_D$ , elde edilir.
- Maksimum deprem durumundaki hareketli yükten oluşan aksel kuvvet,  $P_{SLMCE}$ , elde edilir. Bu yük maksimum deprem yükü ile birlikte hareketli yükün bir kısmı olarak etki ettirilmektedir. Bu yük için tavsiye edilen değer tasarım depremi için hareketli yükten oluşan aksel kuvvetin yarısına eşit olur ve  $P_{SLMCE} = 0.5P_{SLDE}$  olarak dikkate alınır.
- Maksimum deprem yükünden oluşan aksel kuvvet,  $P_{EMCE}$ , elde edilir. Bu yük tasarım deprem yükünün bir katsayısıyla çarpılmasıyla elde edilir. Bu katsayı 1.0 ile 1.5 arasında öngörölür ve genelde 1.5 katsayısının kullanılması tavsiye edilir. Buna göre  $P_{EMCE} = 1.5P_{EDE}$  olarak dikkate alınır.
- Faktörlü aksel kuvvet,  $P_u$ , aşağıdaki yük kombinasyonu ile hesaplanır:

$$P_u = \gamma_D P_D + P_{SLMCE} + P_{EMCE} \quad (45)$$

- Depremsiz durumundaki mesnetin servis dönmesinin,  $\theta_{St}$  statik bileşeni ile  $\theta_{Scy}$  dögüsel bileşeni elde edilir.
- Maksimum deprem durumundaki depremsel yanal yerdeğiştirmesi,  $\Delta_{EMCE}$ , elde edilir. Bu yerdeğiştirme değeri tasarım yerdeğiştirmesinin bir katsayısıyla çarpılmasıyla hesaplanır. Genelde,  $\Delta_{EMCE} = 1.5\Delta_{EDE}$  olarak dikkate alınır.

- Depremsiz durumundaki servis yanal yerdeğiştirmesi,  $0.5.\gamma.\Delta_S$ , olarak hesaplanır. Bu değer tasarım depremi için hesaplanan mesnetin servis yanal yerdeğiştirmesinin yarısı olarak dikkate alınır.

Eksenel kuvvet ve yanal yerdeğiştirmelerden kaynaklanan kayma birim Şekil değiştirmeleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

- Eksenel kuvvet için:

$$\gamma_{C_{MCE}}^u = \frac{P_u}{A_r G S} f_l \quad (46)$$

- Yanal yerdeğiştirme için:

$$\gamma_{S_{MCE}}^u = \frac{0.5\gamma\Delta_S + \Delta_{E_{MCE}}}{T_r} \quad (47)$$

- Maksimum deprem için burkulma eksenel kuvveti:

$$P'_{cr_{MCE}} = P_{cr} \frac{A_{rr}}{A_{ra}} \geq 0.15 P_{cr} \quad (48)$$

Elastomer mesnet tasarımında maksimum depremi için aşağıdaki koşulların sağlandığı kontrol edilmelidir:

$$\gamma_{C_{MCE}}^u + \gamma_{S_{MCE}}^u + 0.25\gamma_{rs}^u \leq 9.0 \quad (49)$$

$$t_s \geq \frac{\alpha t_r}{1.08 F_{ye} \left( \frac{A_r}{\gamma_D P_D + P_{SL_{MCE}} + P_{E_{MCE}}} \right)^{-2}} \geq 1.9 \text{ mm} \quad (50)$$

Denklem (50)'de  $F_{ye} = R_y F_y$  olarak hesaplanmakta ve  $R_y = 1.1$  olarak dikkate alınmaktadır.

$$\frac{P'_{crMCE}}{P_u} \geq 1.1 \quad (51)$$

$$\frac{D_{cr}^u}{0.5\gamma\Delta_S + \Delta_{EMCE}} \geq 1.1 \quad (52)$$

Burada,  $D_{cr}^u$  mesnetin kritik yerdeğiştirmesidir ve aşağıdaki denklem kullanılarak bulunur:

$$D_{cr}^u = \frac{0.9P_D D_B - Q_d h_t}{K_d + 0.9P_D} \quad (53)$$

Burada  $h_t$  mesnet toplam yüksekliğidir.

### 1.7.11. Mesnet Çelik Plaka ve Civata Kontrolü

Çelik plakalar iç çelik plakalar ve dış çelik bağlantı plakalarından oluşur ve civatalar vasıtasıyla birleştirilir. İç ve dış plakaların birleştirmesinde kullanılan civata sayısının fazla olması nedeniyle civatalar yeterli kesme mukavemetine sahip olmakta ve iki plaka tek bir kompozit plaka olarak çalışmaktadır. Kompozit plaka kalınlığı iki plakanın toplam kalınlığı olarak dikkate alınmaktadır.

Elastomer mesnetlerin çelik plakaları için kritik durum alt ve üst plakalarda büyük momentlerin oluşması veya aksenal yükün küçük bir alana etkimesinden kaynaklanan deformasyon oluşmasıdır. Bu durumlara karşı mesnet çelik plaka kalınlıkları için yeterlilik kontrolleri yapılmalıdır.

#### 1.7.11.1. Dış Çelik Bağlantı Plakası Kalınlık Kontrolü

Hesaplamalar maksimum deprem için gerçekleştirilmektedir. Öncelikle, yükleme kolu  $r$  aşağıdaki bağıntıyla bulunur:

$$r = \frac{B - D_B}{2} \quad (54)$$

Eğilme momenti  $M_{ex}$  değeri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$M_{ex} = f_l \frac{r^2}{2} \quad (55)$$

Elde edilen moment değerine göre gerekli çelik bağlantı plaka kalınlığı aşağıdaki bağıntıyla bulunur:

$$t_{ex} \geq \sqrt{\frac{4M_{ex}}{\phi_b F_y}} \quad (56)$$

Denklem (56)'ın sağlanması durumunda seçilen mesnet çelik bağlantı plaka kalınlığı  $t_{ex}$  yeterli olmaktadır.

### 1.7.11.2. İç Çelik Plaka Kalınlık Kontrolü

Mesnet iç çelik plaka kalınlığı yeterlilik kontrolü faktörlü aksenal kuvvet  $P_u$  dikkate alınarak aşağıdaki adımlar izlenerek maksimum deprem için gerçekleştirilir:

- Elastomer malzemenin kesit alanı  $A_r$ , kurşun çekirdek alanı çıkartılmadan hesaplanır.
- Eşdeğer dikdörtgen azaltılmış alanın kısa kenar uzunluğu  $b$  hesaplanır:

$$b = \frac{A_r}{0.75D_B} \quad (57)$$

- Beton tasarım basınç dayanımı  $f_b$  hesaplanır:

$$f_b = 1.7\phi_c f'_c \quad (58)$$

Burada,  $f'_c$  beton basınç dayanımı,  $\phi_c$  beton dayanım azaltma katsayısıdır. Beton dayanım azaltma katsayısı  $\phi_c$  tasarım depremi için 0.65'e, maksimum deprem için 1'e eşit olmaktadır.

d) Beton basınç dayanımının etki ettiği alanın kenar uzunluğu  $b_l$  hesaplanır:

$$b_l = \frac{P_u}{0.75 D_B f_b} \quad (59)$$

e) Yükleme kolu uzunluğu  $r$  hesaplanır:

$$r = \frac{b_l - b}{2} \quad (60)$$

f) Eğilme momenti  $M_u$  hesaplanır:

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2} \quad (61)$$

g) Minimum çelik plaka kalınlığı hesaplanır:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_u}{\phi_b F_y}} \quad (62)$$

Burada,  $F_y$  tasarım depremi için çelik plaka minimum akma gerilmesi,  $\phi_b$  çelik plakalarının eğilme direnci azaltma katsayısıdır. Eğilme direnci azaltma katsayısı  $\phi_b$  tasarım depremi için 0.9'e, maksimum deprem için 1'e eşit olmaktadır. Denklem (62)'deki minimum çelik plaka kalınlığı  $t_p$ , mesnetin dış çelik bağlantı plaka kalınlığı  $t_{ex}$  ile iç çelik plaka kalınlığının  $t_{in}$  toplamı olarak dikkate alınır. Denklem (62)'in sağlanması durumunda seçilen mesnet dış çelik bağlantı plaka  $t_{ex}$  ve iç çelik plaka kalınlığı  $t_{in}$  yeterli olmaktadır.

### 1.7.11.3. Ankraj Civatalarında Çekme Gerilmesi Kontrolü

Gerilme kontrolü en büyük farktörlü yük  $P_u$  ile maksimum deprem için yatay yerdeğiştirme  $\Delta_S$  değerini dikkate alarak yapılır. Moment değeri aşağıdaki şekilde bulunur:

$$M_a = \frac{F_H h_t}{2} + \frac{P_u \Delta_S}{2} \quad (63)$$

Burada  $F_H$  alt sınır için mesnet yatay kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde bulunur:

$$F_H = Q_d + K_d \Delta_S \quad (64)$$

Burada  $Q_d$  ve  $K_d$  değerleri alt sınır için bulunan sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti ve ikincil rijitlik değerleridir. Basınç gerilmesinin yayılma uzunluğu  $A_a$ :

$$A_a = \frac{3}{2} B - 3 \frac{M_a}{P_u} \quad (65)$$

olarak hesaplanır. Burada,  $B$  çelik bağlantı plaka uzunluğudur. Buna göre çekme gerimesi  $f_t$ :

$$f_t = \frac{2P_u}{AB} \quad (66)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Ankraj civatalarının çekme kontrolü aşağıdaki bağıntıyla sağlanmaktadır:

$$f_t \leq f_b \quad (67)$$

Burada,  $f_b$  değeri maksimum deprem için Denklem (58) ile hesaplanmaktadır. Denklem (67) sağlanması durumunda ankraj civalarında çekme gerilmesi oluşmamaktadır.

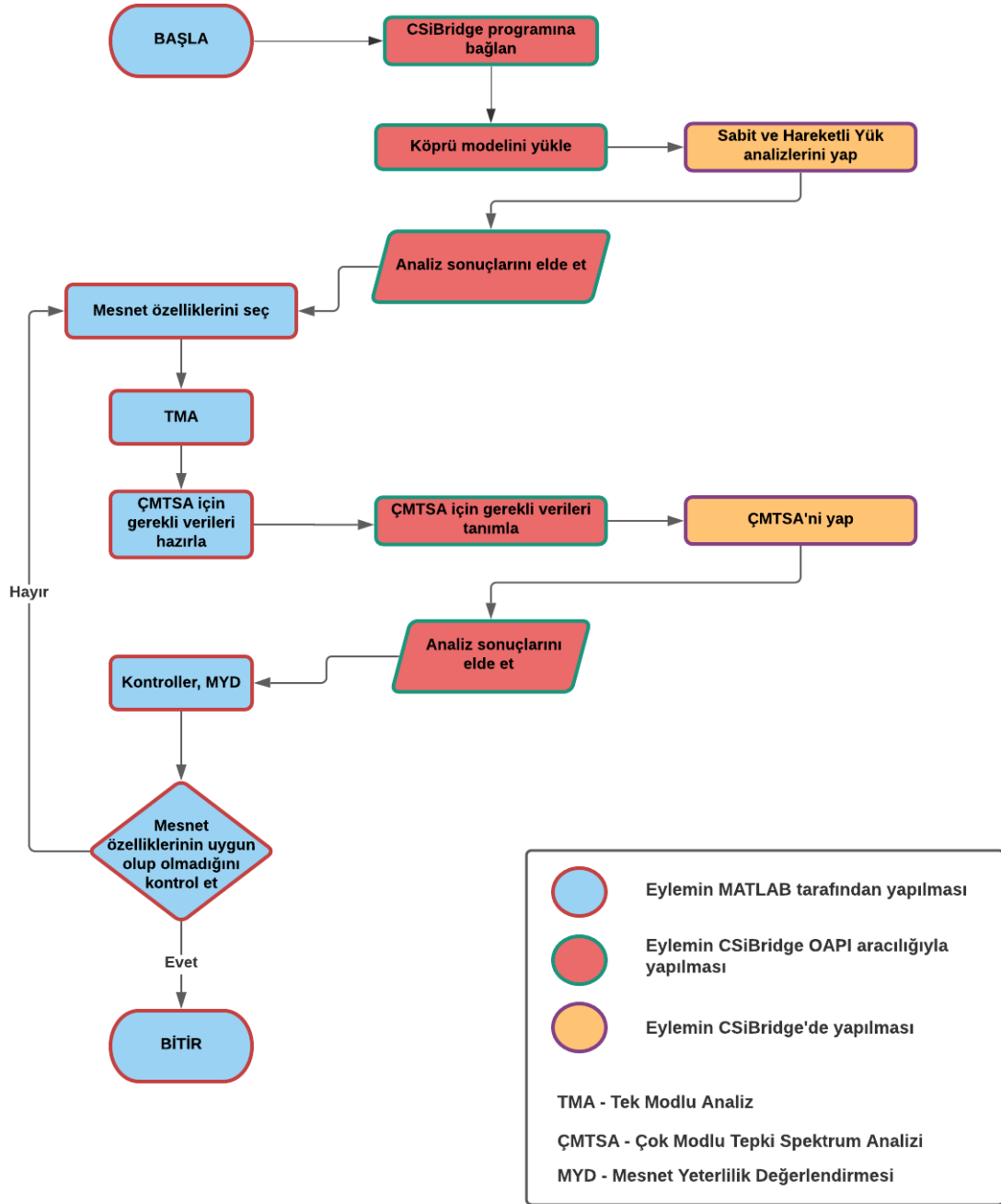


### **1.8. CSiBridge Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI)**

Günümüzde yapı ve deprem mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında yapay zeka ve optimizasyon yöntemlerini kullanarak çok sayıda araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmaların programlama sürecinde yapısal analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Araştırmacılar tarafından bu ihtiyacı gidermek amacıyla çeşitli çözümler sunulmaktadır. Bu çözümlerden etkili olanlarından biri MATLAB ve Visual C++ gibi program dilleri ile CSiBridge ve Sap2000 gibi güçlü yapısal analiz programaları arasında bir bağ oluşturmaktır. Bu bağ CSiBridge yapısal analiz programının bir aracı olan CSiBridge OAPI (Açık Uygulama Programlama Arayüzü) özelliği vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu özellik CSiBridge programının yapısal analiz dışında daha da kapsamlı araştırmalar için kullanımına imkan sağlamaktadır.

CSiBridge OAPI yapısal modelleri oluşturma, analiz ve tasarlamada gerekli çoğu işlemlerin otomatikleştirilmesine ve analiz sonuçlarının elde edilmesine büyük bir olanak sağlayan güçlü bir programlama aracıdır. Bu amaca ulaşmak amacıyla CSiBridge bir başka uygulama ile dışarıdan bir bağ oluşturur. Böylece programlar arası iki yönlü bilgi akışı sağlanır. Ayrıca, OAPI'nın kullanımını CSiBridge programına eklenti geliştirebilme imkânı da sağlayarak programın kullanılabilirliğini artırmaktadır.

CSiBridge ile bağlantı kurmada OAPI'in önemli özelliklerinden biri çeşitli yazılım dillerinin kullanılabilir olmasıdır. Bunlar Visual C#, Python, MATLAB, Visual C++, Visual Fortran ve Visual Basic Applications (VBA) gibi modern yazılım dilleridir. Adı geçen yazılım dillerinin kullanılması için yazılım bilgisine ve becerisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada CSiBridge OAPI özelliğini kullanmak amacıyla MATLAB yazılım dili kullanılmıştır. Bu bağlamda kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı Şekil 18'de gösterilen akış şemasıyla gerçekleştirilmiştir.



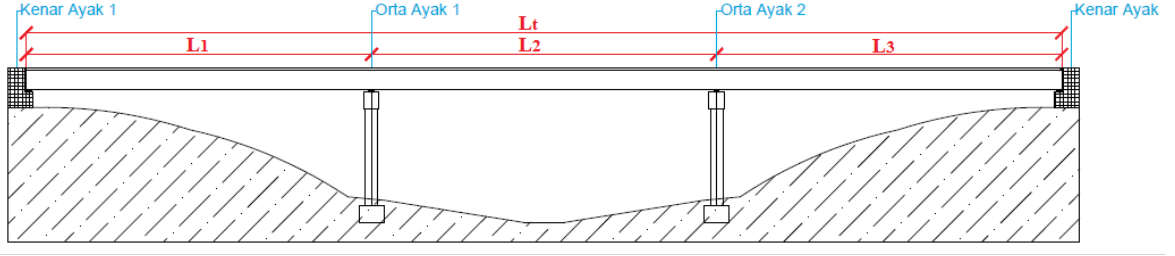
Şekil 18. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarım akış şeması

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde ilk olarak çalışma kapsamında deprem etkisi altındaki davranışı incelenecek olan karayolu köprüsünün malzeme ve geometrik özelliklerinden, sismik yalıtım için kullanılan elastomer mesnet özelliklerinden, köprü sonlu eleman modelinin özelliklerinden, köprüye etkiyen yüklerden ve dikkate alınan tasarım deprem değişkenlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra tek modlu ve çok modlu tepki spektrum analizleri yardımıyla gerçekleştirilen kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımlarına yer verilmiştir. Tasarım sonucu elde edilen mesnet özelliklerine sahip elastomer mesnet ve ankastre mesnet durumları için kolon yüksekliği değiştirilerek altyapı esnekliğinin köprü deprem tepkilerine etkisi incelenmiştir. Son olarak mesnet özelliklerinin köprü deprem davranışına etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımında tasarım yerdeğiştirmesi hesabı, farklı kolon yükseklikleri ve farklı mesnet özelliklerinin dikkate alınması çok sayıda yapısal analiz gerektirmesinden CSiBridge köprü analiz programının OAPI özelliğinden yararlanılarak MATLAB programı vasıtasıyla geliştirilen program kullanılarak analizler otomatik ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

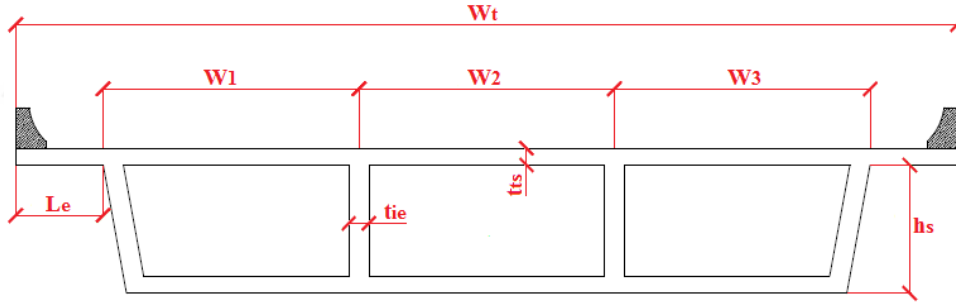
### 2.1. Köprü Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

Köprü bileşenleri köprü üstyapısını oluşturan yerinde dökme beton kutu kirişlerden ve köprü altyapısını oluşturan başlık kirişi, orta ve kenar ayaklardan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen köprünün boyuna kesiti Şekil 19’da, üstyapı enkesiti ve köprü enkesiti sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21’de gösterilmektedir. Köprü yapısı 3 açıklıdır ve toplam uzunluğu  $L_t$  ile gösterilmektedir. Açıklık uzunlukları  $L_1$ ,  $L_2$  ve  $L_3$  olarak gösterilmektedir.



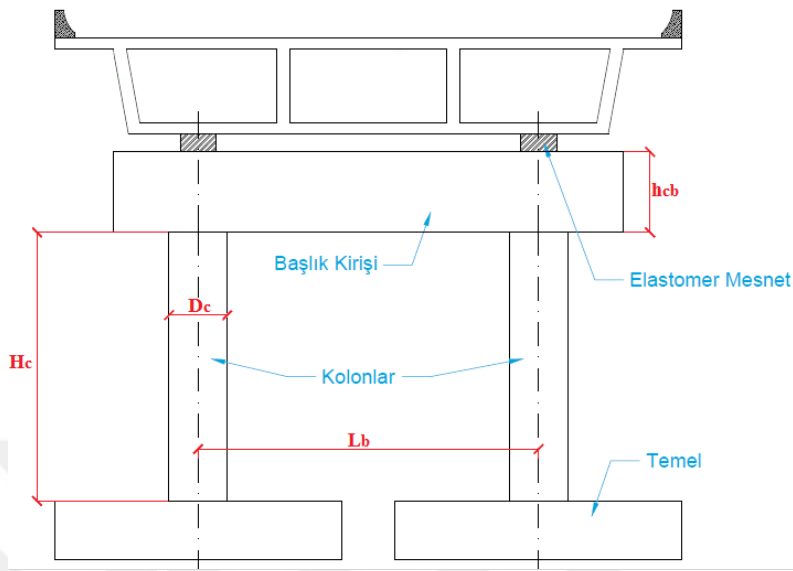
Şekil 19. Köprü boyunca kesiti

Köprü üstyapısı  $W_t$  genişliğinde kutu kirişlerden oluşmaktadır. Üstyapı kutu kiriş enkesiti Şekil 20’de gösterilen toplamda 3 kutudan meydana gelmektedir ve her kutu genişliği  $W_1$ ,  $W_2$  ve  $W_3$  uzunluğundadır. Üstyapı derinliği  $h_s$ , üst tabliye kalınlığı  $t_{ts}$ , iç kenar kalınlığı  $t_{ie}$ , üstyapı kenarından ilk kutuya olan mesafe  $L_e$  olarak ifade edilmektedir.



Şekil 20. Köprü üstyapı enkesiti

Köprü altyapısı köprü uçlarındaki kenar ayaklardan, başlık kirişlerinden, kolonlardan (orta ayaklardan) ve temellerden oluşmaktadır (Şekil 21). Çalışma kapsamında temeller ankastre mesnet olarak dikkate alınmaktadır. Orta ve kenar ayaklar köprü üstyapısından gelen yükleri temellere aktarmaktadır. Köprü üstyapısı iki adet kenar ayak ve ikişer adet kolondan oluşan iki orta ayak ile desteklenmektedir. Kolonlar  $D_c$  çapında dairesel enkesitli ve  $H_c$  yüksekliğindedir. Kolon ayakların üstünde yüksekliği  $h_{cb}$  olan başlık kirişi bulunmaktadır. Kolonların merkezden merkeze mesafesi  $L_b$  uzunluğundadır.



Şekil 21. Köprü enkesiti

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan köprünün üstyapı ve altyapı elemanlarının boyut ve mesafeleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Köprü geometrik özellikleri

Köprü toplam uzunluğu $L_t$ , (m)	95
Köprü kenar açıklık uzunluğu $L_1, L_3$ , (m)	30
Köprü orta açıklık uzunluğu $L_2$ , (m)	35
Üstyapı toplam genişliği $W_t$ , (m)	14
Üstyapı kutu genişlikleri $W_1, W_2, W_3$ , (m)	3.8
Üstyapı derinliği $h_s$ , (m)	1.9
Üst tabliye kalınlığı $t_{ts}$ , (m)	0.25
Kutu iç kenar kalınlığı $t_{ie}$ , (m)	0.30
Üstyapı kenarından ilk kutuya olan mesafesi $L_e$ , (m)	1.3
Kolon çapı $D_c$ , (m)	1.3
Kolon yüksekliği $H_c$ , (m)	6
Başlık kiriş kesit yüksekliği $h_{cb}$ , (m)	1.8
Kolonların merkezden merkeze mesafesi $L_b$ , (m)	7.6

Köprü üstyapı ve altyapı elemanlarında kullanılan beton malzemesinin özellikleri ise Tablo 3’te verilmektedir. Beton sınıfına göre elastisite modülleri  $E_c$ , AASHTO yönetmeliğine göre beton birim hacim ağırlığı  $w_c = 25 \text{ kN/m}^3$  alınarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$E_c = 0.043 * w_c^{1.5} * \sqrt{f'_c} \quad (68)$$

Burada,  $f'_c$  silindir beton numunenin 28 günlük MPa cinsinden basınç dayanımıdır. Tablo 3'e göre köprü üstyapı kutu kirişleri için C45 ve diğer tüm köprü bileşenleri için C30 sınıflı beton malzemesi kullanılmaktadır.

Tablo 3. Malzeme özellikleri

Köprü bileşenleri	Beton sınıfı	Elastisite modülü $E_c$ (Mpa)
Kutu kiriş	C45	36057
Başlık kirişi	C30	29440
Kolon	C30	29440

## 2.2. Deprem Yer Hareketinin Tanımlanması

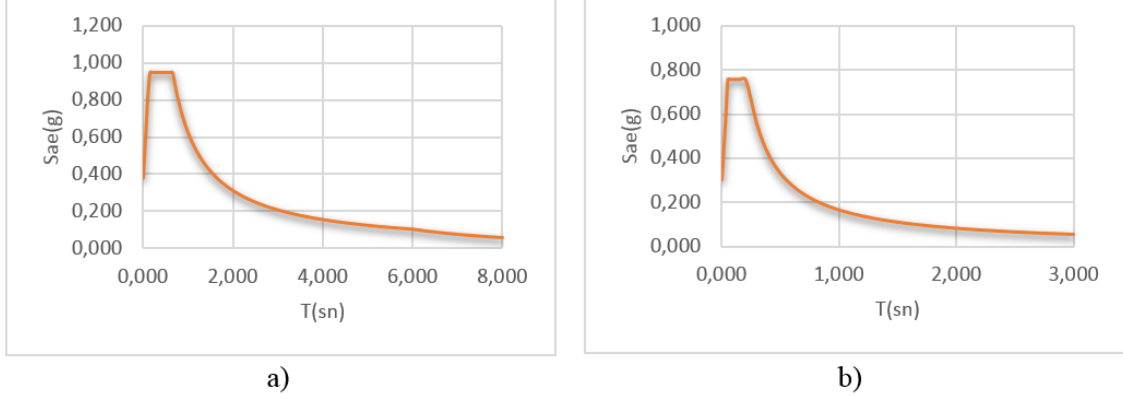
Köprüye etki edeceği düşünülen depremin yatay ve düşey tasarım tepki spektrumları 39.746453 enlem ve 39.49134 boylam için Tablo 4'de verilen deprem yer hareketi düzeyi, yerel zemin sınıfı, spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayılarına göre belirlenmiştir. Tablo 4'de gösterilen parametreler Türkiye Deprem Tehlike Haritaları arayüzü kullanılarak elde edilmiştir (TDTH, 2021).

Tablo 4. Deprem parametreleri

Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
Yerel zemin sınıfı	ZB
Kısa periyot için spektral ivme katsayısı $S_s$	1.051
1 saniye periyot için spektral ivme katsayısı $S_I$	0.776
Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı $F_s$	0.9
1 saniyelik periyot için yerel zemin etki katsayısı $F_I$	0.8

Tablo 4'te verilen özellikler dikkate alınarak elde edilen yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 22'de gösterilmektedir. Burada,  $S_{ae}$  yerçekimi ivmesi (g) cinsinden elastik

tasarım spektral ivme değerini,  $T(\text{sn})$  titreşim periyodunu göstermektedir. Bu spektrum eğrileri ilgili tek ve çok modlu tepki spektrum analizlerinde dikkate alınmıştır.



Şekil 22. a) Yatay ve b) düşey tasarım spektrumları

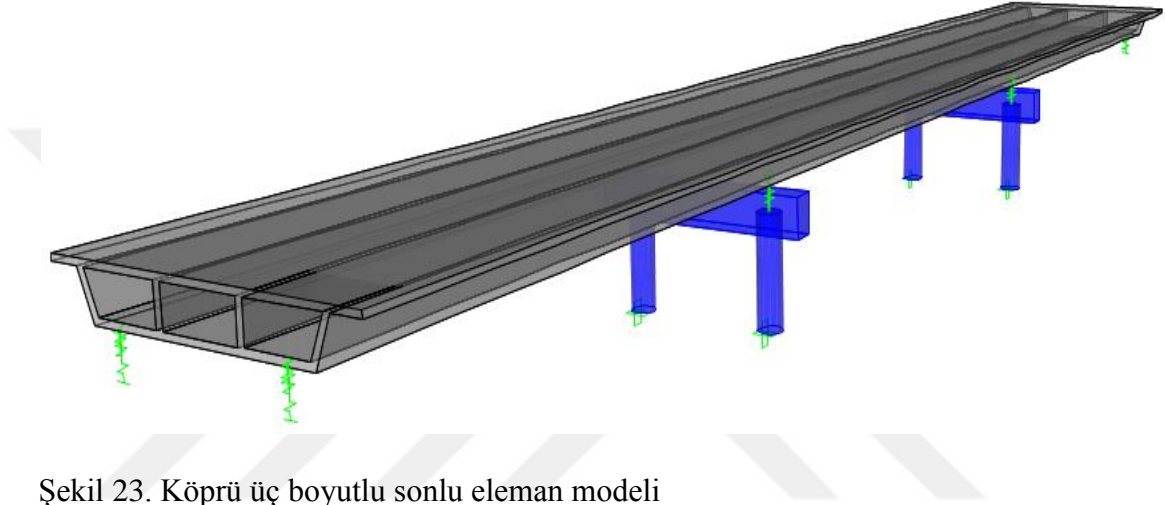
### 2.3. Köprü Sonlu Elaman Modeli

Köprü sonlu eleman modeli CSiBridge ticari yapısal analiz programını kullanılarak elde edilmektedir (CSi Bridge, 2017). Sonlu eleman modelinde köprü üstyapısı ve altyapısı çubuk elemanlar ile temsil edilmektedir. Üstyapıyı oluşturan kutu kirişler ve köprü altyapısını oluşturan başlık kirişi ve kolon ayakları 3 m uzunluklu çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Çubuk sonlu eleman düğüm noktalarında 3 dönme ve 3 yerdeğiştirme toplamda 6 serbestlik derecesine sahiptir. Köprü üstyapısı sürekli bir kiriş olarak kabul edilmiştir. Kenar ayaklar ise doğrudan mesnetlere oturtulmuştur. Kenar ayakların ve kolonların alt uçlarının temel bağlantıları sonsuz rijit kabulüne dayanmakta ve zemin etkileşimi dikkate alınmamaktadır.

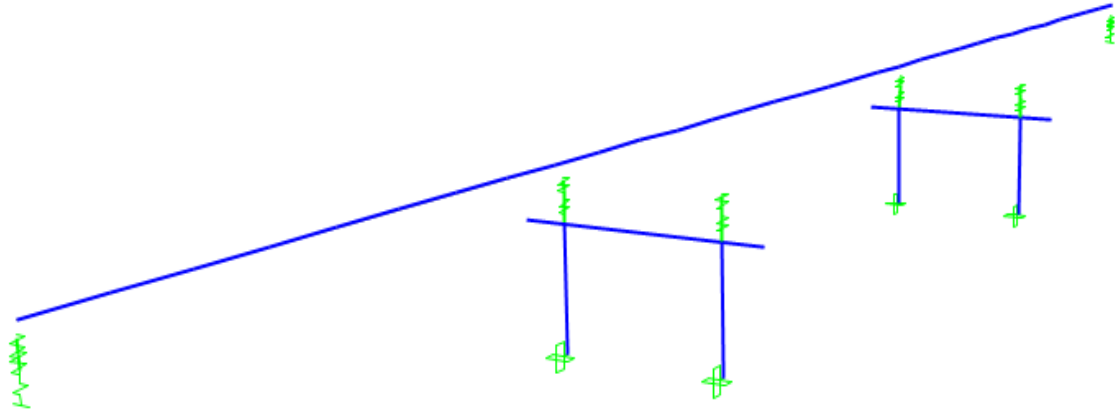
Köprünün ankastre mesnetli olarak kabul edildiği modellerde köprü altyapısı ile üstyapısı arasındaki bağlantı kenar ayaklarda kayıcı mesnetli ve orta ayaklarda ankastre mesnetli olarak kabul edilmektedir. Elastomer mesnetli modellerde ise köprü altyapısı ile üstyapısı arasındaki bağlantı kurşun çekirdekli elastomer mesnet vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu mesnetler köprü üstyapısını oluşturan kutu kirişler ile başlık kirişleri arasına yerleştirilmektedir.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler ilgili sonlu eleman programında “rubber isolator” link elemanları olarak tanımlanmaktadır. Bu link (yay) elemanlar da çubuk elemanlar gibi 3 yerdeğiştirme ve 3 dönme olmak üzere toplamda 6 serbestliğe sahiptir. Her bir serbestlik etkin

rijitlik ve sönüm oranı ile ifade edilmektedir. Ancak, bu çalışmada elastomer mesnetler sadece düşey ve iki yatay doğrultudaki yerdeğiştirme serbestlikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Köprüye ait üç boyutlu ve basitleştirilmiş çubuk ve yay elamanlardan oluşan sonlu eleman modelleri sırasıyla Şekil 23 ve 24’de gösterilmektedir.



Şekil 23. Köprü üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 24. Köprü basitleştirilmiş sonlu eleman modeli



## 2.4. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Tasarımı

Bu bölümde yukarıda detayları verilen köprü için kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı tek modlu analiz (TMA) ve çok modlu analiz (ÇMA) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hesaplanan parametreler ve köprü tepkileri tablolar yardımıyla sunulmuştur.

Köprünün tek modlu analizleri kurşun çekirdekli elastomer mesnetin alt ve üst sınır özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Bu kapsamda hesaplanan köprü ve mesnet parametreleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Tek modlu analiz parametreleri

	Alt sınır	Üst sınır
Kenar ayak mesnet etkin rijitliği, $K_{eff}$ , kN/m	1603	3838
Orta ayak mesnet etkin rijitliği, $K_{eff}$ , kN/m	1788	3838
Etkin sönüm oranı $B_{eff}$	0.221	0.335
Spektrum azaltma katsayısı $B_L$	1.563	1.700

Tablo 5’te verilen değerler dikkate alınarak tek modlu analizler sonrası elde edilen köprü tepkileri Tablo 6’da sunulmuştur. Tablo 6’da TD tasarım depremini ve MD maksimum depremi ifade etmektedir. Tablodaki değerlere göre elastomer mesnet maksimum yerdeğiştirmesinin ve köprü etkin periyodunun mesnet alt sınır özellikleri kullanıldığında elde edildiği görülmektedir. Üst sınır özellikleri dikkate alındığında ise mesnet eksenel basınç kuvveti ve deprem ivme değerlerinin maksimum değerler aldığı görülmektedir.

Tablo 6. Tek modlu analizlerden elde edilen köprü tepkileri

	Alt sınır	Üst sınır
Tasarım yerdeğiştirmesi $D_D$ , mm	230	140
Deprem ivmesi $\alpha_a$ , g	0.171	0.236
Eksenel basınç kuvveti, kN (TD)	2303	2315
Eksenel basınç kuvveti, kN (MD)	3454	3473
Etkin periyot $T_{eff}$ , sn	2.33	1.55

Köprünün çok modlu tepki spektrum analizleri kurşun çekirdekli elastomer mesnetin alt ve üst sınır özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Çok modlu analizlerde dikkate alınan başlangıç kurşun çekirdekli elastomer mesnet boyutları Tablo 7’de verilmektedir. Toplam kütle katılım oranının %95’in altında olmaması dikkate alınarak analizlerde toplam 24 mod sayısı dikkate alınmıştır.

Tablo 7. Başlangıç kurşun çekirdekli elastomer mesnet boyutları

Kurşun çekirdek çapı $D_L$ , (mm)	163
Mesnet çapı $D_B$ , (mm)	820
Elastomer katmanların toplam kalınlığı $T_r$ , (mm)	182
Elastomer kaplama kalınlığı $t_c$ , (mm)	20
Ara elastomer katman kalınlığı $t_r$ , (mm)	7
Ara çelik plaka kalınlığı $t_s$ , (mm)	3.5
Çelik plaka kalınlığı $t_{in}$ , (mm)	30
Çelik bağlantı plaka kalınlığı $t_{ex}$ , (mm)	25
Mesnet toplam yüksekliği $h_t$ , (mm)	379
Akma yerdeğiştirmesi $D_y$ , (mm)	20

Tasarımı gerçekleştirilen kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerde oluşan çekme kuvveti kontrolü için Denklem (17)’nin sağlanması gerekmektedir. Çok modlu analizler sonrası kenar ve orta ayak üzerindeki elastomer mesnetler için sırasıyla -95387 N ve -357689 N’lık kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu değerler sıfırdan küçük olduğundan Denklem (17)’nin sağlanmadığı ve mesnetlerde çekme kuvvetinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu durumda Denklem (19)’un sağlanması gerekmektedir. Buna göre:

$$\frac{-95387}{460858} = 0.21 < 3 * 0.41 = 1.23 \quad \checkmark$$

$$\frac{-357689}{460858} = 0.78 < 3 * 0.41 = 1.23 \quad \checkmark$$

olduğundan mesnetlerde oluşan çekme gerilmeleri ihmal edilebilir düzeydedir.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler için merkezlenme özelliğini kontrol etmek için Denklem (20)’de verilen eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir. Buna göre:

$$2\pi \sqrt{\frac{18284000}{11896*9810}} = 2.49 \text{ sn} < 28 * \left(\frac{0.05}{0.072}\right)^{0.25} \sqrt{\frac{140}{9810}} = 3.05 \text{ sn} \quad \checkmark$$

olduğundan mesnetler merkezlenme özelliğini sağlamıştır.

Altyapı esneklik kontrolü için Denklem (27) ile hesaplanan etkin periyot değeri Denklem (2) ile hesaplanan etkin periyot değeri ile bölünür. Elde edilen oranın 1.1 küçük olması durumunda esneklik etkisi ihmal edilebilir. Bu bağlamda:

$$2\pi \sqrt{\frac{18284000}{(13557+15378)*9810}} = 1.59 \text{ sn}$$

$$\frac{1.59}{1.55} = 1.03 < 1.1 \quad \checkmark$$

olduğundan bu köprü boyutları için altyapı esneklik etkisi ihmal edilebilir. Ancak bu çalışmada altyapı etkisi de dikkate alınmıştır.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımında mesnet yeterlilik değerlendirmesi servis yükleri, tasarım depremi ve maksimum deprem durumları için kontrol edilmiştir. Servis yükleri için Denklem (36)-(39) ile verilen koşulların sağlandığı görülmüştür.

$$\frac{1.25*3461000+1.75*259800}{364184*0.36*30} * 1.3 = 1.58 < 3.5, \text{ Denklem (36)} \quad \checkmark$$

$$2.63+0.47+1.10 = 4.19 < 6.0, \text{ Denklem (37)} \quad \checkmark$$

$$\frac{3*6}{1.08*345 * \left(\frac{364184}{1.25*3461000+1.75*(259800+1039200)}\right)^{-2}} = 0.97 \text{ mm}$$

$$t_s = 3 \text{ mm} > 0.97 \text{ mm} \text{ ve } t_s = 3 \text{ mm} > 1.9 \text{ mm}, \text{ Denklem (38)} \quad \checkmark$$

$$\frac{14673991}{1.25*3461000+1.75*(259800+1039200)} = 2.22 > 2.0, \text{ Denklem (39)} \quad \checkmark$$

Tasarım deprem durumu için Denklem (43)-(44) ile verilen koşulların sağlanması görülmüştür.

$$2.45+1.47+0.5*1.10 = 4.37 < 7.0, \text{ Denklem (43)} \quad \checkmark$$

$$\frac{1.65*6}{1.08*345*\left(\frac{237819}{1.25*3461000+649500+2315059}\right)^{-2}} = 0.98 \text{ mm}$$

$$t_s = 3 \text{ mm} > 0.98 \text{ mm}, \text{ Denklem (44)} \quad \checkmark$$

Maksimum deprem durumu için Denklem (49)-(52) ile verilen koşullar aşağıdaki gibi sağlanmıştır.

$$3.25+2.01+0.25*1.10 = 5.54 < 9.0, \text{ Denklem (49)} \quad \checkmark$$

$$\frac{1.65*6}{1.08*380*\left(\frac{174390}{1.25*3461000+324750+3472589}\right)^{-2}} = 1.46 \text{ mm},$$

$$t_s = 3 \text{ mm} > 1.46 \text{ mm}, \text{ Denklem (50)} \quad \checkmark$$

$$\frac{8783335}{1.25*3461000+324750+1246333} = 1.49 > 1.1, \text{ Denklem (51)} \quad \checkmark$$

$$\frac{647}{0.5*0+1.052*1.5*229} = 1.79 > 1.1, \text{ Denklem (52)} \quad \checkmark$$

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetin dış çelik bağlantı plaka kalınlığının yeterli olduğu Denklem (56) koşulunun sağlanmasıyla kontrol edilmiştir.

$$\sqrt{\frac{4*34426}{0.9*345}} = 21 \text{ mm}$$

$$t_{ex} = 25 \text{ mm} > 21 \text{ mm} \quad \checkmark$$

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetin iç çelik plaka kalınlığının yeterli olduğu Denklem (62) koşulunun sağlanmasıyla kontrol edilmiştir.

$$\sqrt{\frac{4*65397}{0.9*345}} = 29 \text{ mm}$$

$$t_p = 30 + 25 = 55 \text{ mm} > 29 \text{ mm}$$

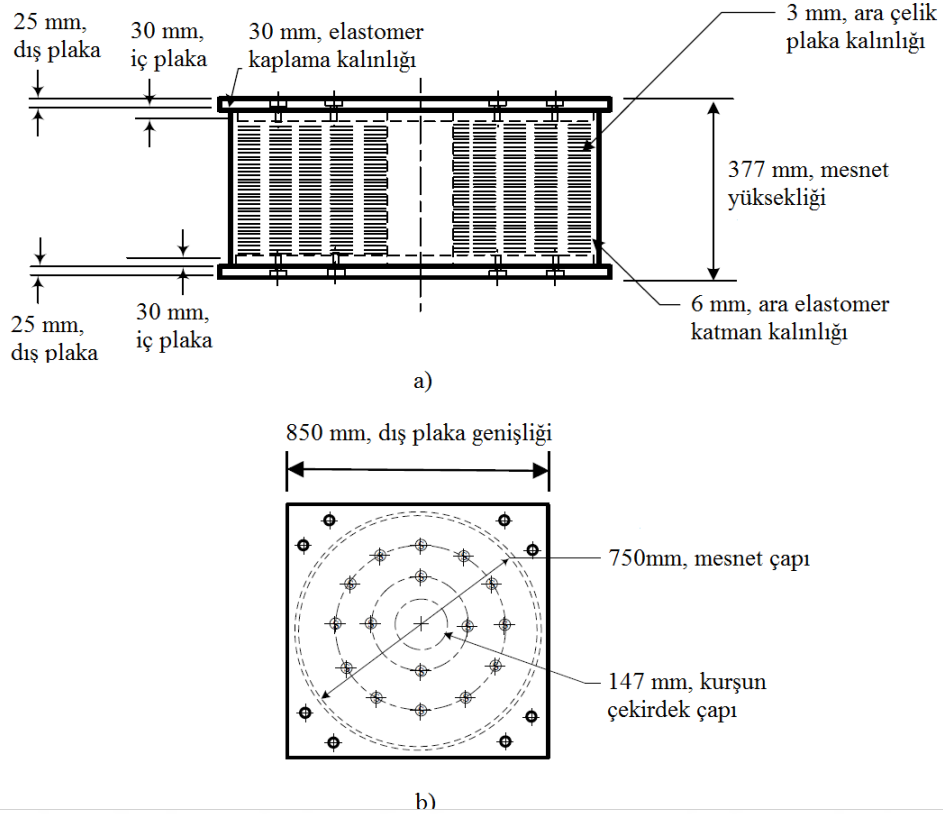
✓

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetin ankraj civatalarındaki çekme gerilme kontrolü için Denklem (67) ile ifade edilen koşulun aşağıdaki gibi yerine getirilmesiyle sağlanmıştır.

$$f_t = \frac{2*8123589}{694*850} = 28 \text{ MPa} < f_b = 51 \text{ MPa}$$

✓

Mesnet yeterlilik değerlendirmeleri ve kontrolleri sonucunda Şekil 25'te gösterilen kurşun çekirdekli elastomer mesnet boyutlarının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 25. Kurşun çekirdekli elastomer mesnet a) enkesiti ve b) üst görünüşü

Tasarım sonucu elde edilen elastomer mesnet boyutları dikkate alınarak gerçekleştirilen çok modlu analizlerden kenar ayak (KA) ve orta ayak (OA) mesnet yatay yerdeğiştirmeleri, kesme ve eksenel basınç kuvvetleri alt ve üst sınır mesnet özellikleri için elde edilmiş ve Tablo 8’de sunulmuştur. Tablo 8’e göre mesnetlerin yatay yerdeğiştirmeleri alt sınır özelliklerinde, basınç kuvvetleri ise üst sınır özelliklerinde en büyük değerlere ulaşmıştır.

Tablo 9’da tek modlu analizlerden ve çok modlu tepki spektrum analizlerinden elde edilen köprü tepkileri karşılaştırılmıştır. Tablo incelendiğinde iki analiz yöntemi ile hesaplanan mesnet yatay yerdeğiştirmelerinin, deprem ivmelerinin ve etkin periyot değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Buna göre ele alınan köprü için tek modlu analiz elastomer mesnet tasarımda iyi sonuçlar verdiği ve çok modlu analiz ile yapılan çözümlerin doğru bir şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Tablo 9’da BD boyuna ve ED enine doğrultuyu ifade etmektedir.

Tablo 8. Tasarım sonrası çok modlu analizlerden elde edilen köprü tepkileri

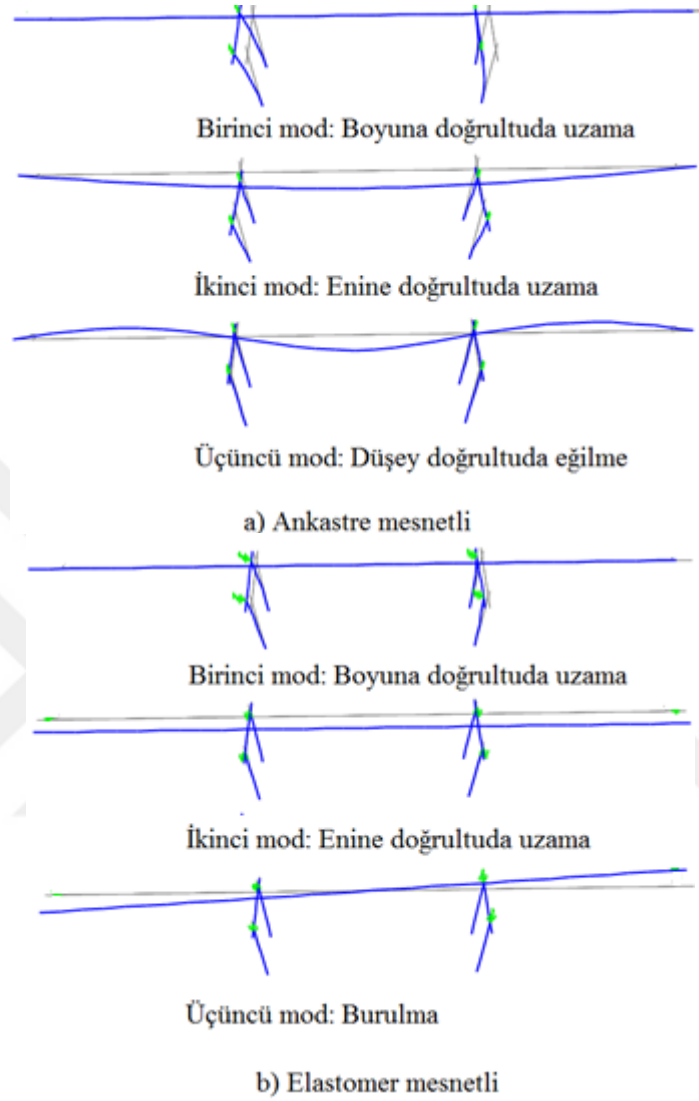
	Mesnet konumu	Deprem doğrultusu		
		Boyuna	Enine	Düşey
Alt sınır				
Tasarım yerdeğiştirmesi $D_D$ , mm	KA	232	228	-
	OA	223	229	-
Mesnet eksenel basınç kuvveti, kN	KA	372	367	203
	OA	400	410	237
Deprem ivmesi $\alpha_a$ , g		0.184	0.179	-
Üst sınır				
Tasarım yerdeğiştirmesi $D_D$ , mm	KA	143	139	-
	OA	133	140	-
Mesnet eksenel basınç kuvveti, kN	KA	551	533	286
	OA	511	539	320
Deprem ivmesi $\alpha_a$ , g		0.243	0.241	-

Tablo 9. TMA ve ÇMA'den elde edilen köprü tepkileri

		Alt sınır		Üst sınır	
		TMA	ÇMA	TMA	ÇMA
Tasarım yerdeğiştirmesi $D_D$ , mm	KA	230	232	174	173
	OA	230	223	174	142
Deprem ivmesi $\alpha_a$ , g	BD	0.171	0.184	0.249	0.238
	ED	0.171	0.179	0.249	0.243
Eksenel basınç kuvveti, kN	TD	2303	2341	2315	2366
Eksenel basınç kuvveti, kN	MD	3454	3511	3473	3549
Etkin periyot $T_{eff}$ , sn	1. Mod	2.33	2.35	1.55	1.57

## 2.5. Kolon Yüksekliğinin Köprü Tepkilerine Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak farklı mesnet durumları için köprü serbest titreşim davranışları köprü kolon yükseklikleri 5 m ile 75 m arasında değiştirilerek incelenmiştir. Kenar ayaklarda kayıcı ve orta ayaklarda ankastre olarak kabul edilen ankastre mesnetli ve etkin rijitlikleri ile tanımlanan elastomer mesnetli mesnetler bu bölümde dikkate alınan iki farklı mesnet durumudur. Ankastre ve elastomer mesnetli durumlar için 6 m kolon yüksekliğine sahip köprünün ilk üç mod şekli Şekil 26'da gösterilmiştir.



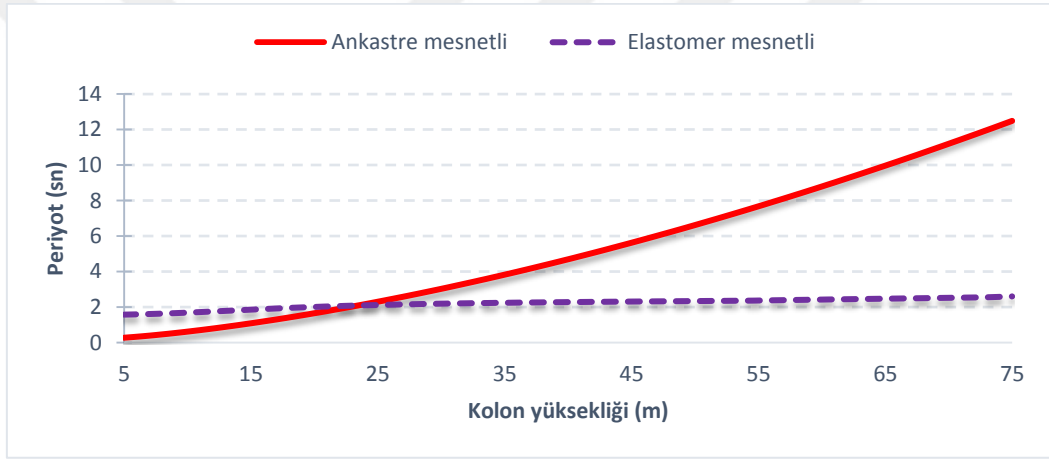
Şekil 26. Ankastre ve elastomer mesnetli köprü mod şekilleri

Mod şekilleri incelendiğinde ankastre ve elastomer mesnetli durumda ilk iki mod boyuna ve enine uzama modlarıdır. Uzama mod şekillerinde ankastre mesnetli durumda ötelenmenin orta ayaklarda, elastomer mesnetli durumda hem kenar hem de orta ayaklarda olduğu görülmektedir. Üçüncü mod şeklinde ise ankastre mesnetli durumda eğilme modu iken elastomer mesnetli durumda burulma modu olarak meydana gelmektedir.

Serbest titreşim analizlerinden elde edilen hakim periyot değerleri farklı mesnet durumları ve kolon yükseklikleri için Şekil 27’de verilmiştir. Şekil 27 incelendiğinde ankastre mesnetli köprülerde periyotlar kolon yüksekliğinin artmasıyla önemli oranda artış göstermekte iken



elastomer mesnetli köprülerde periyotlarda küçük artışların meydana geldiği görülmüştür. Kolon yüksekliği 23 m'yi geçtikten sonra ankastre mesnetli köprülerin periyot değerleri elastomer mesnetli köprülere göre daha da büyük değerler almıştır. Elastomer mesnetler periyot değerlerini 75 m'lik kolon yüksekliği için 12 sn'den 2.6 sn'ye kadar düşürmektedir. Bu ise %78'lik bir azalmaya denk gelmektedir. Buradan elastomer mesnetlerin kısa kolonlu köprülerin hakim periyotlarını artırdığı ve belli bir kolon yüksekliğinden sonra köprüye ek rijitlik katarak periyotları azalttığı sonucuna varılmıştır.

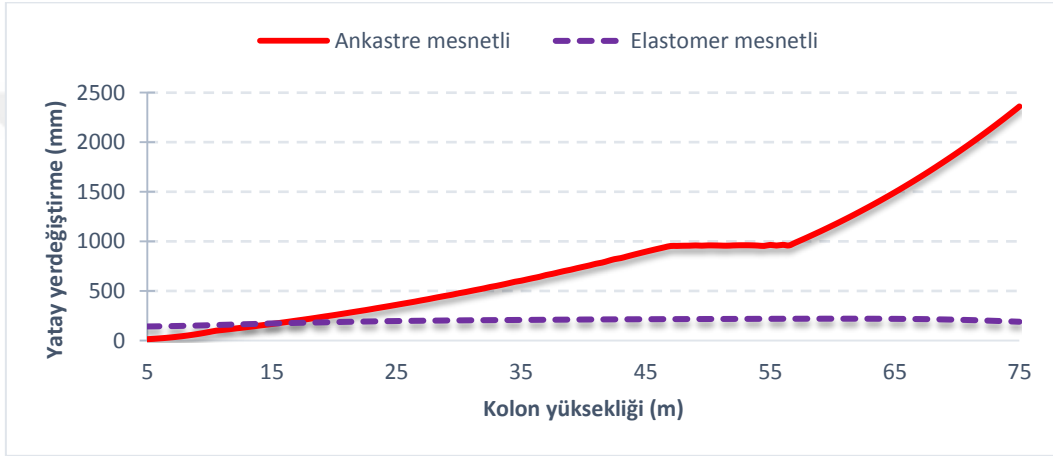


Şekil 27. Farklı kolon yükseklikleri için köprü hakim periyot değerleri

Serbest titreşim analizlerinden sonra tepki spektrum analizleri farklı mesnet durumları ve kolon yükseklikleri için yatay deprem tasarım ivme spektrumu dikkate alınarak yapılmıştır. Tasarım ivme spektrumu boyuna ve enine doğrultularda etki ettirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen üstyapı yatay yerdeğiştirmesi yanında kolon tabanında oluşan maksimum normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sunulmuştur.

Şekil 28'de ankastre ve elastomer mesnetli durumlar için kolon yüksekliğinin değişiminde elde edilen köprü üstyapı maksimum boyuna yatay yerdeğiştirmeleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde kolon yüksekliğinin artmasının daha çok ankastre mesnetli köprüleri etkilediği görülmüştür. Yüksekliğin artmasıyla yerdeğiştirmeler önemli oranda artmıştır. 5 m'de 14.8 mm'ye eşit olan yerdeğiştirme değeri 75 m'de 2361 mm'ye ulaşmıştır. Elastomer mesnetli köprülerde ise artan kolon yüksekliği ile yerdeğiştirmelerin çok az değiştiği görülmüştür.

Ankastre mesnetli duruma göre özellikle 15 m kolon yüksekliğinden sonra elastomer mesnetler yerdeğiştirmeleri artan oranlarda azaltmıştır. Bu oran 75 m'lik kolon yüksekliğinde %92'ye kadar ulaşmıştır. Buradan kısa kolonlu köprülerde elastomer mesnetler belli bir kolon yüksekliğine kadar köprüye esneklik katarak yerdeğiştirmeleri artırırken belli yükseklikten sonra ek rijitlik sağlayarak yerdeğiştirmeleri azaltmıştır.

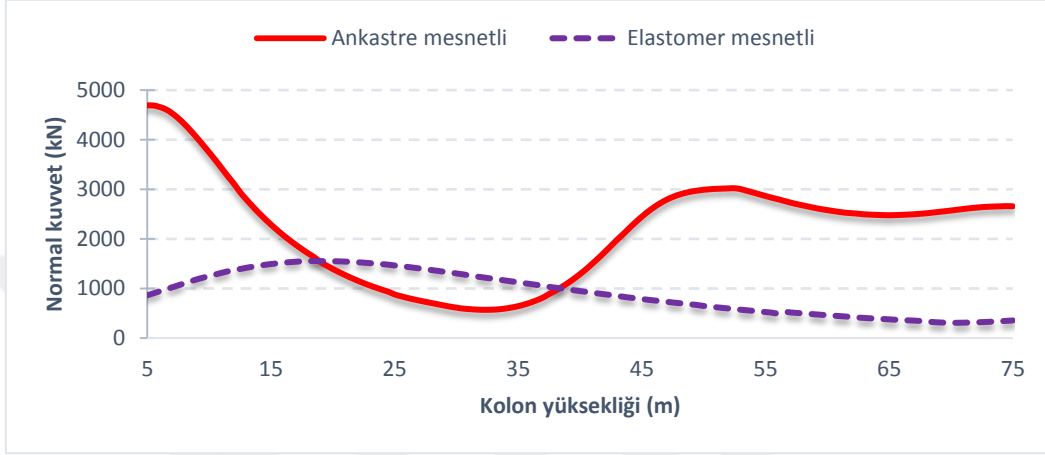


şekil 28. Farklı kolon yükseklikleri için köprü üstyapı yatay yerdeğiştirmeleri

Farklı mesnet durumları ve kolon yükseklikleri için kolon tabanında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sırasıyla şekil 29, şekil 30 ve şekil 31'de verilmiştir. Kesit tesirleri hesaplanırken yapının kendi ağırlığı dikkate alınmamıştır.

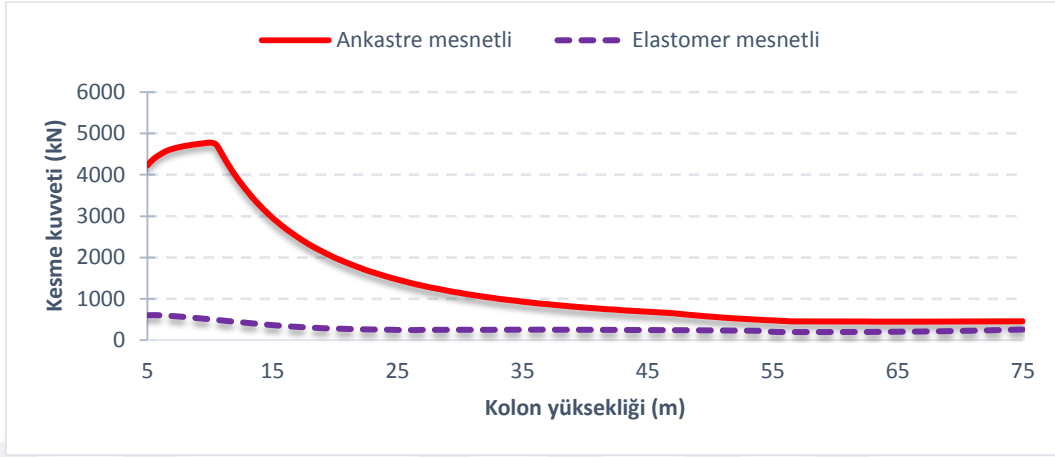
şekil 29 incelendiğinde ankastre mesnetli köprü kolon tabanında oluşan normal kuvvetlerin değişimlerinin düzgün bir eğilimde olmadığı görölmüştür. Ankastre mesnetli durum için normal kuvvetlerin maksimum değeri 5 m'lik kolon yüksekliğinde elde edilirken elastomer mesnetli köprülerde maksimum değere 20 m kolon yüksekliğinde ulaşılmıştır. 5 m'lik kolon yüksekliği için değerler kıyaslandığında elastomer mesnetsiz duruma nazaran elastomer mesnetler kolon tabanında oluşan normal kuvvet değerini 4693 kN'dan 863 kN'a kadar düşürmüştür. Bu ise yaklaşık %82'lik bir azalma oranına karşılık gelmektedir. Bu oran maksimum kolon yüksekliğinde hesaplandığında ise %87'lik bir azalma görölmüştür. Böylece

elastomer mesnetlerin kolon yüksekliğinin artmasıyla normal kuvvetleri önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır.



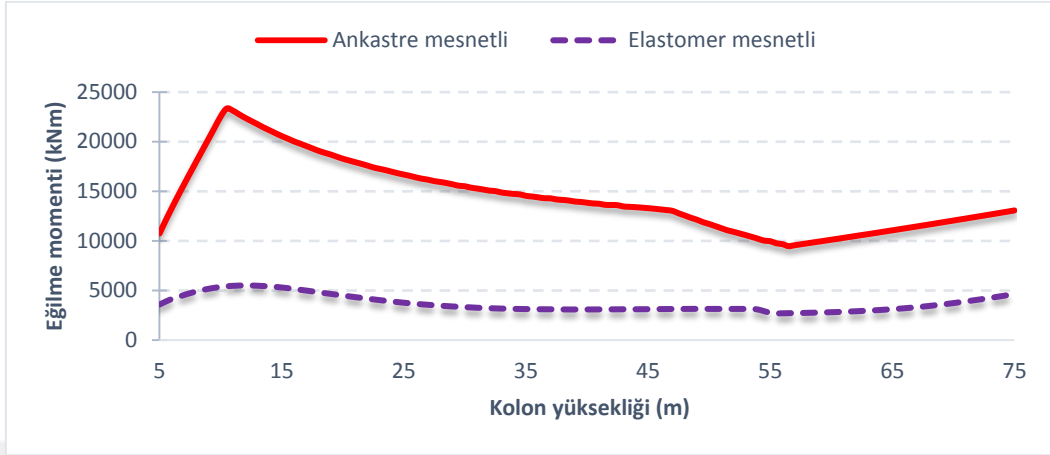
Şekil 29. Farklı kolon yükseklikleri için kolon normal kuvvetleri

Şekil 30'da farklı kolon yükseklikleri için ankastr ve elastomer mesnetli köprülerin kolon tabanında oluşan kesme kuvvetleri gösterilmiştir. Şekil 30'a göre kolon yüksekliğinin artması ankastr mesnetli köprülerde kesme kuvvetlerinin belli bir kolon yüksekliğine kadar artmasına daha sonrasında azalmasına sebep olmuştur. Ankastr mesnetli durum için kesme kuvveti 5 m'lik kolon yüksekliğinde 4230 kN'luk bir değerden 10m'lik kolon yüksekliğinde 4777 kN'luk bir değere kadar artmıştır ve bu kolon yüksekliğinden sonra kesme kuvvetleri kolon yüksekliğinin artmasıyla azalmıştır. 75 m'de bu değer 455 kN'a kadar düşmüştür. Elastomer mesnetli köprülerde ise kesme kuvvetleri kolon yüksekliğinin artmasıyla küçük oranlarda değişim göstererek azalmıştır. Elastomer mesnetlerin etkisi daha çok kısa kolonlu köprülerde görülmüştür. 5 m'lik kolon yüksekliğindeki 4230 kN'lık kesme kuvveti değeri 601 kN'a azalmıştır. 10 m'lik kolon yüksekliğinde ise 4777 kN'lık kesme kuvveti değeri 505 kN'a azalmıştır. Bu %89'lik bir oranda azalmaya denk gelmektedir. Bu oran maksimum kolon yüksekliği için hesaplandığında ise %44'lük bir azalma görülmüştür. Buna göre elastomer mesnetler kısa kolonlu köprüler üzerinde kolon kesme kuvveti açısından daha çok etkili olmaktadır.



Şekil 30. Farklı kolon yükseklikleri için kolon kesme kuvvetleri

Farklı kolon yüksekliklerinin kolon tabanındaki eğilme momenti üzerindeki etkisi Şekil 31 ile gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kolon yüksekliğinin artmasıyla ankastre mesnetli köprülerde moment değerlerinin düzgün bir eğilimde olmadığı görülmüştür. Bu düzgün olmayan eğilimin deprem yer hareketini tanımlayan tepki spektrumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kolon yüksekliğinin artmasıyla köprü hakim periyotları artmıştır ve dolayısıyla tepki spektrumundaki deprem ivmelerinin azalmasına yol açmıştır. Bu durum eğilme momentlerinin belli bir kolon yüksekliğinden sonra azalmasına neden olmuştur. Ankastre mesnetli köprüler için en büyük moment değerleri 5 m ile 11 m arasında elde edilmiştir. Elastomer mesnetli köprülerde ise moment dağılımı 12 m'ye kadar artmış ve sonrasında bir azalma eğilimi göstermiştir. Mesnet durumları dikkate alındığında elastomer mesnetlerin moment değerlerini önemli ölçüde azalttığı fark edilmiştir. Ankastre mesnetli köprüde 11 m kolon yüksekliği için 23136 kN.m'lik moment değeri elastomer mesnet vasıtasıyla 5495 kN.m'ye kadar düşürülerek yaklaşık %76'lık bir azalma sağlanmıştır. 75 m'lik kolon yüksekliğinde ise moment değeri %64 oranında bir azalma göstermiştir. Buna göre elastomer mesnetlerin artan kolon yüksekliği ile moment değeri üzerindeki etkisi azalmakla birlikte önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 31. Farklı kolon yükseklikleri için kolon eğilme momentleri

## 2.6. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnet Özelliklerinin Köprü Tepkilerine Etkisi

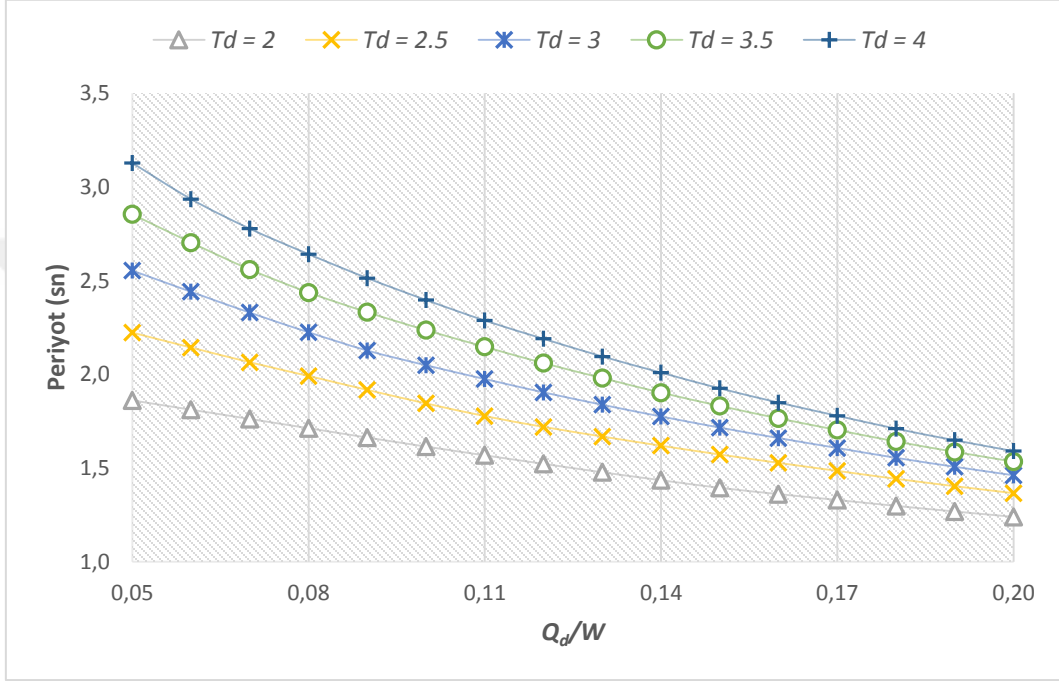
Kurşun çekirdekli elastomer mesnetin mekanik davranışını etkileyen parametrelerden en önemlileri sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti  $Q_d$  ve ikincil rijitlik  $K_d$  değerleridir. Bu bölümde bu iki elastomer mesnet özelliği değiştirilerek yalıtımlı köprü tepkileri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvveti kurşun çekirdeğin çapına doğrudan bağlıdır (Denklem (8)). Yani dayanım kuvvetinin artırılması kurşun çekirdek çapının artırılması anlamına gelmektedir. Çalışmada mesnetin ilk özelliği olarak  $Q_d$  sıfır yerdeğiştirmedeki dayanım kuvvetinin  $W$  üstyapı ağırlığına bölünerek normalize edilmiş hali  $Q_d/W$  dikkate alınmıştır ve değeri 0.05'ten 0.20'ye kadar değiştirilmiştir.

Mesnetin ikinci özelliği olarak ikincil rijitlik  $K_d$  değeri Denklem (21) ile verilen  $T_d$  ikincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değerinin değiştirilmesiyle dikkate alınmıştır. Denkleme göre ikincil rijitlik değerinin azaltılması  $T_d$  değerinin artmasına sebep olmaktadır.  $T_d$  değerinin artırılması elastomer mesnet çapının azaltılmasıyla benzer anlama gelmektedir. Burada  $T_d$  değeri 2 sn'den 4 sn'ye kadar değiştirilerek ikincil rijitlik etkisi incelenmiştir.

Farklı  $Q_d/W$  oranları için serbest titreşim analizleri sonrası elde edilen köprü hakim periyot değerleri Şekil 32'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde  $Q_d/W$  oranlarının artmasıyla köprü

hakim periyot değerlerinin düzgün bir eğilimle azaldığı görülmüştür.  $Q_d/W$  oranının artması kurşun çekirdekli elastomer mesnet yalıtım sisteminin daha rijit hale gelmesine neden olmuştur.

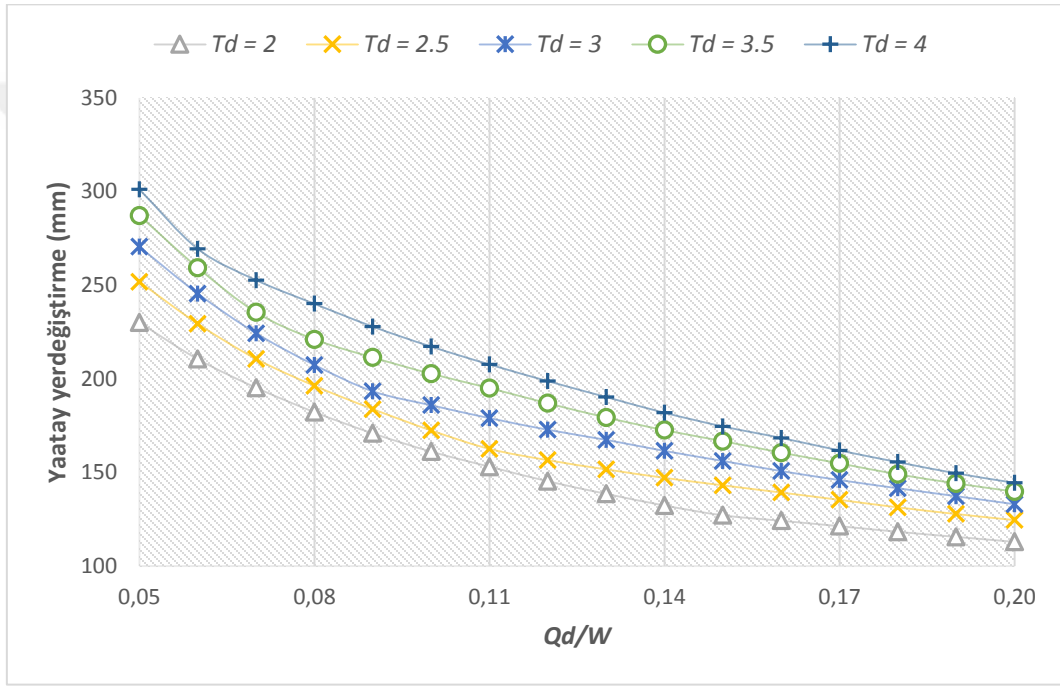


Şekil 32. Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için köprü hakim periyot değerleri

Farklı oranlar için çok modlu tepki spektrum analizlerinden elde edilen köprü maksimum yatay yerdeğiştirmeleri Şekil 33'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde köprü yatay yerdeğiştirmeleri köprü hakim periyot değerlerine benzer şekilde davranış göstermiştir.  $Q_d/W$  oranının artmasıyla yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Yerdeğiştirmelerin minimum değerleri  $Q_d/W$  oranının maksimum değerlerinde elde edilmiştir.  $T_d$  değerinin ve  $Q_d/W$  oranının minimum olduğu durumda yerdeğiştirme değeri 230 mm'den  $Q_d/W$  oranının maksimum değerinde 113 mm'ye kadar azalmıştır. Bu %51'lik bir azalma oranına denk gelmektedir.  $T_d$  değerinin 4 sn olması durumunda ise yerdeğiştirme değeri 301 mm'den 144 mm'ye kadar düşmüştür. Bu da %52'lik bir azalma oranına karşılık gelmektedir. Buna göre  $Q_d/W$  oranının artması yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde etkileyerek düzgün bir eğilimde

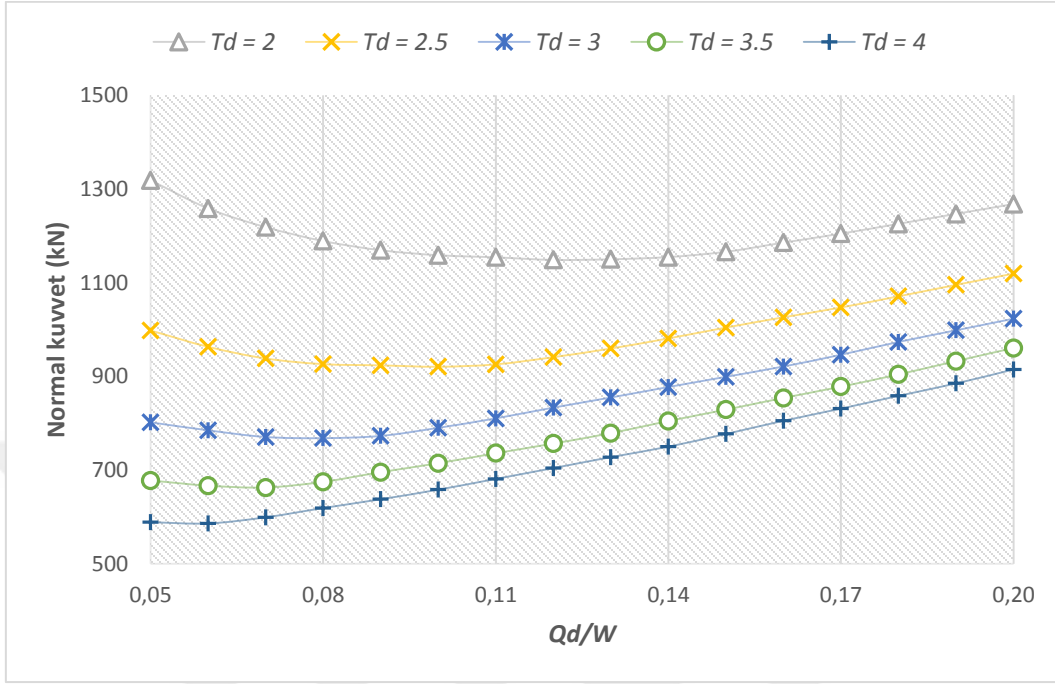
azalmasını sağlamaktadır. Farklı  $T_d$  değerleri için maksimum ve minimum  $Q_d/W$  oranları arasındaki azalış yerdęiřtirmelerin yaklaşık yarısı kadardır.

Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için çok modlu tepki spektrum analizlerinden elde edilen köprü kolon taban normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36'da gösterilmiştir.



Şekil 33. Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için köprü yatay yerdęiřtirme değerleri

Şekil 34 incelendiğinde kolon tabanındaki normal kuvvetlerin  $Q_d/W$  oranının belli bir değerlerine kadar azaldıktan sonra sürekli artış gösterdiği görölmüştür.  $T_d$  değeri 2 sn iken normal kuvvet değeri 1318 kN'dan 1149 kN'a kadar inerek sonrasında 1268 kN'a kadar yükselmiştir. Minimum değere  $Q_d/W$  oranının 0.12 değerinde ulaşılmıştır. Benzer Şekilde  $T_d$  değeri 4 sn iken normal kuvvet değeri 588 kN'dan 586 kN'a kadar inerek sonrasında 915 kN'a kadar artmıştır. Minimum değere  $Q_d/W$  oranının 0.06 değerinde ulaşılmıştır. Böylece normal kuvvetlerin minimum değerlere ulaşması farklı  $T_d$  değerleri için  $Q_d/W$  oranlarının 0.06 ile 0.12 oranları arasında meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

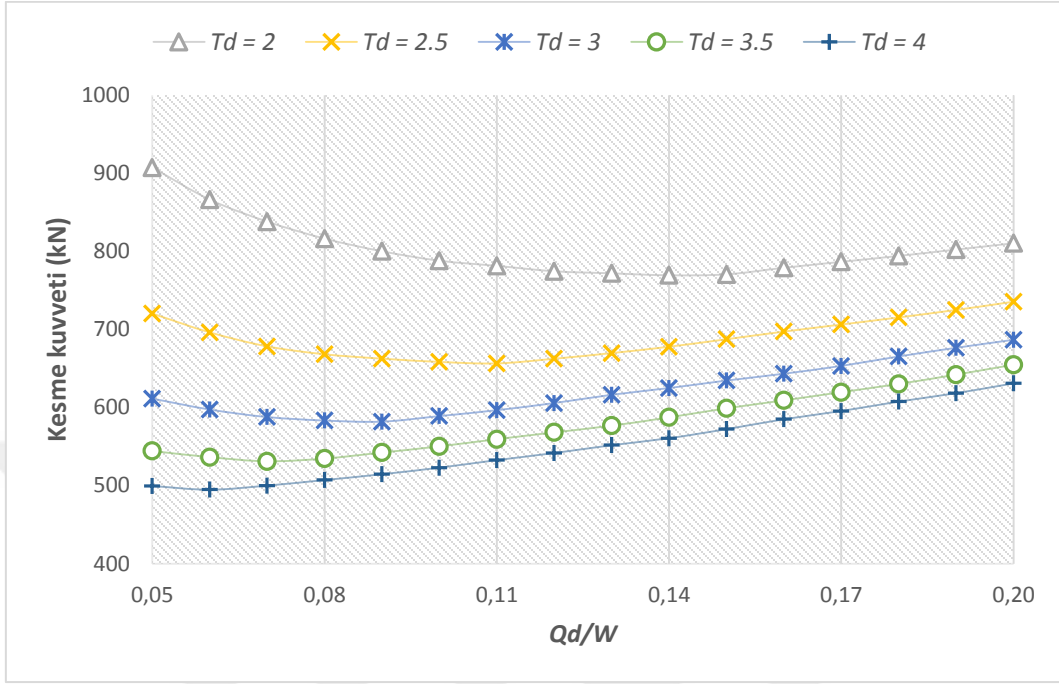


Şekil 34. Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için kolon normal kuvvet değerleri

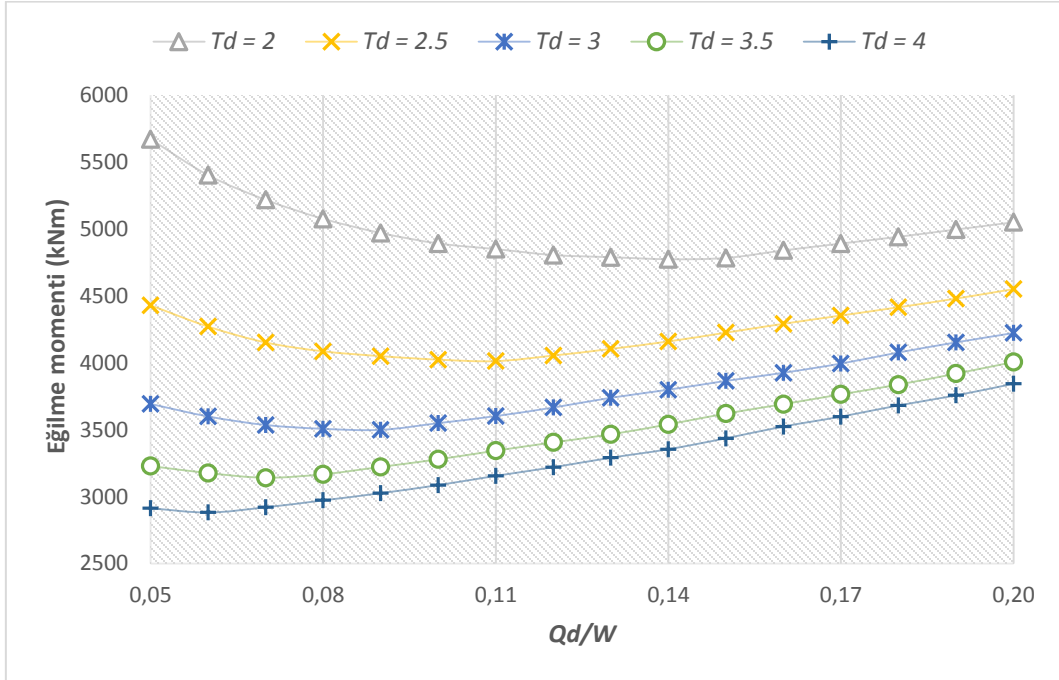
Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için sırasıyla kolon kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin gösterildiği Şekil 35 ve Şekil 36 incelendiğinde kolon tabanında oluşan kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin normal kuvvetlere benzer şekilde davrandıkları görülmüştür. Farklı  $T_d$  değerleri için kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri minimum değerlere  $Q_d/W$  oranının 0.06 ile 0.14 değerleri arasında ulaşmıştır.

Serbest titreşim analizleri sonrası elastomer mesnetinin farklı  $T_d$  ikincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değerleri için köprü birinci hakim periyot değerleri Şekil 37’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde  $T_d$  periyot değerlerinin artması sonucunda köprü birinci hakim periyot değerlerinde artış görülmüştür. Periyot değerleri maksimum değerlere  $T_d$  değerinin 4 sn ve  $Q_d/W$  oranının 0.05 olduğu durumda ulaşmıştır. Periyot değeri  $Q_d/W$  oranının 0.05 olduğu durumda 1.861 sn’den 3.128 sn’ kadar yükselirken  $Q_d/W$  oranının 0.20 olduğu durumda 1.239 sn’den 1.590 sn kadar artmıştır. Bu sırasıyla %68 ve %28 artış oranlarına karşılık gelmektedir. Buna göre  $T_d$  periyot değerinin artması köprüye esneklik katarak köprü hakim periyot değerlerini düşük  $Q_d/W$  oranı için daha fazla artırmıştır.

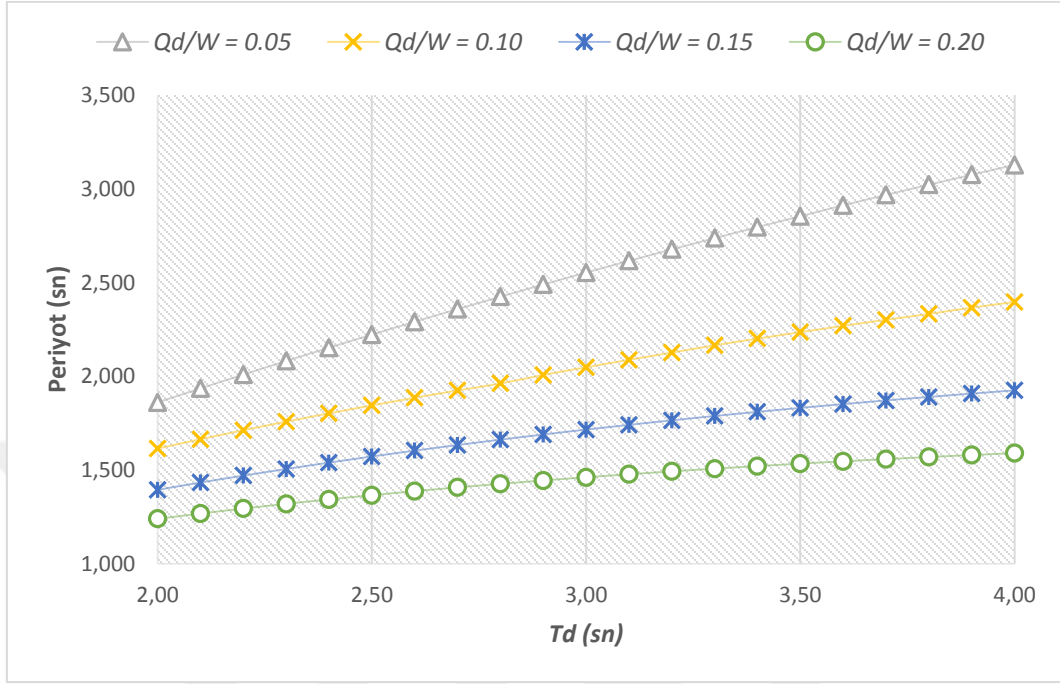




Şekil 35. Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için kolon kesme kuvvet değerleri



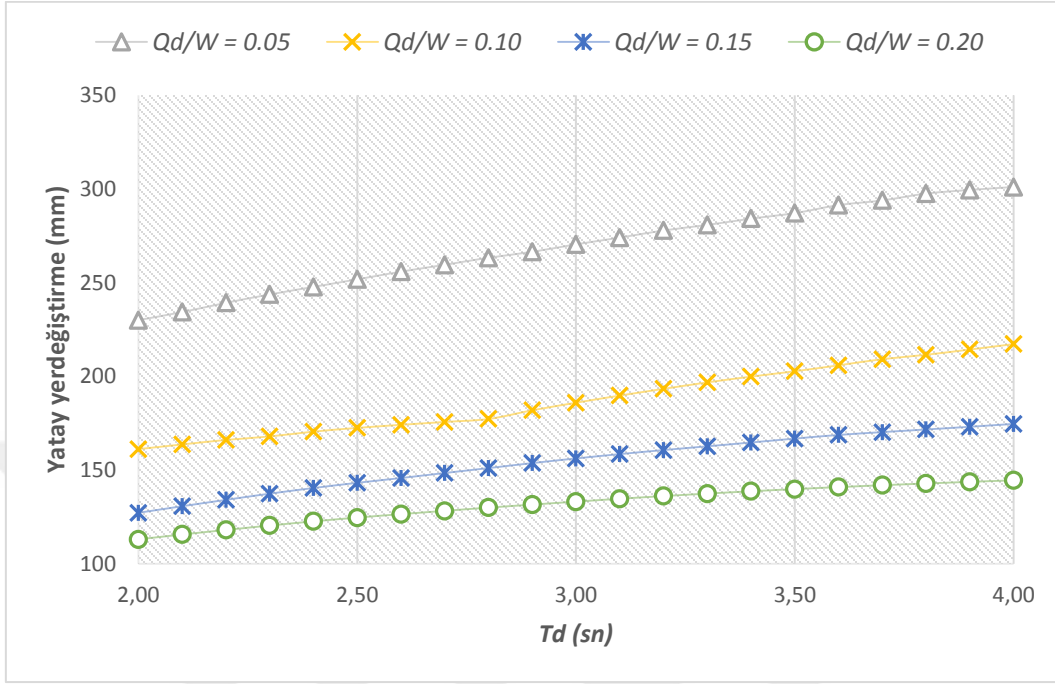
Şekil 36. Farklı  $Q_d/W$  oranları ve  $T_d$  değerleri için kolon eğilme moment değerleri



Şekil 37. Farklı  $T_d$  değerleri ve  $Q_d/W$  oranları için köprü hakim periyot değerleri

Şekil 38 farklı  $T_d$  değerlerini ve  $Q_d/W$  oranlarını dikkate alarak gerçekleştirilen çok modlu tepki spektrumu analizlerinden elde edilen köprü maksimum yatay yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Şekil 38'e göre  $T_d$  değerlerinin artmasıyla yatay yerdeğiştirmeler düzgün bir eğilimde artmaktadır. Örneğin,  $Q_d/W$  oranının 0.05 olduğu durum için yerdeğiştirme değeri 230 mm'den 301 mm'ye kadar artmıştır.  $Q_d/W$  oranı 0.20 için bu değerler 113 mm ile 144 mm'dir. Bu ise sırasıyla %30 ve %27'lik bir artış oranlarına denk gelmektedir. Buna göre artan  $T_d$  değerinin köprü yatay yerdeğiştirmeleri arttırdığı ve yerdeğiştirmelerin maksimum değerlerinin  $T_d$ 'nin en büyük ve  $Q_d/W$ 'nin en küçük değerinde elde edildiği sonucuna varılmıştır.

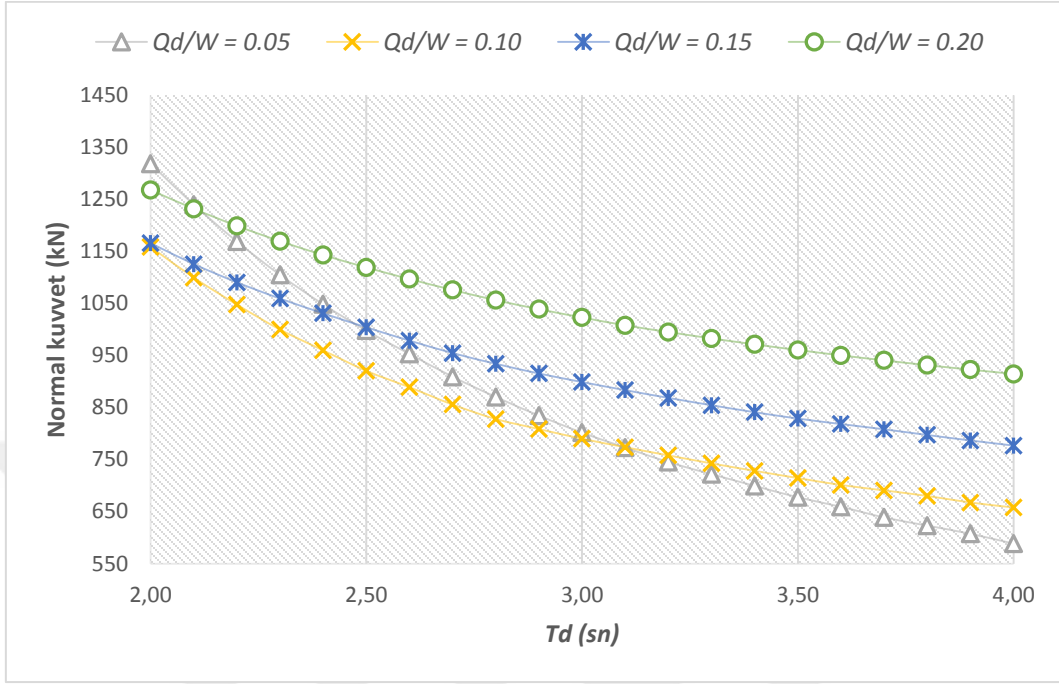
Elastomer mesnetin farklı  $T_d$  periyot değerlerinin köprü kolon iç kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla çok modlu tepki spektrumu analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kolon tabanındaki normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri Şekil 39, Şekil 40 ve Şekil 41'de verilmiştir.



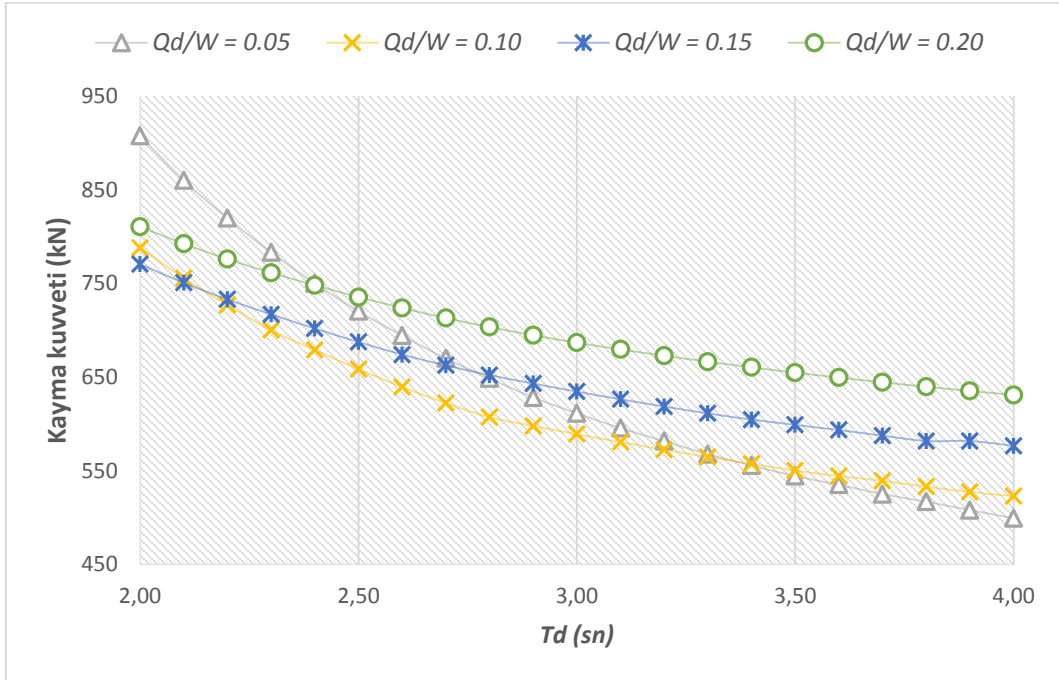
Şekil 38. Farklı  $T_d$  değerleri ve  $Q_d/W$  oranları için köprü yatay yerdeğiştirme değerleri

Şekil 39'a göre  $T_d$  periyot değerinin artmasıyla kolon tabanında oluşan normal kuvvetler azalma eğilimindedir.  $Q_d/W$  oranı 0.05 için normal kuvvet değeri 1318 kN'dan 588 kN'a kadar düşmüştür. Bu yaklaşık %55'lik bir azalma oranıdır.  $Q_d/W$  oranı 0.10, 0.15 ve 0.20 için ise bu azalma oranları %43, %33 ve %28'dir. Buradan artan  $T_d$  değeri ile normal kuvvette meydana gelen azalma oranı artan  $Q_d/W$  oranı ile azaldığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte normal kuvvetin minimum değerleri  $Q_d/W$  oranının en küçük ve  $T_d$  'nin en büyük değerinde elde edilmiştir.

Farklı  $T_d$  değerlerini için kolon tabanındaki kesme kuvvetlerinin değişimini gösteren Şekil 40'a göre  $T_d$ 'nin artması normal kuvvetlere benzer şekilde kesme kuvvetlerinin de azalmasına sebep olmuştur. Kesme kuvvetinin minimum ve maksimum değerleri  $Q_d/W$ 'nin 0.05 oranında sırasıyla  $T_d$ 'nin 2 sn ve 4 sn olduğu durumlarda elde edilmiştir. Kesme kuvveti 908 kN'dan 500 kN'a kadar inerek yaklaşık %45'lik bir azalma göstermiştir.  $Q_d/W$  oranının 0.10, 0.15 ve 0.20 olduğu durumlar için bu azalma oranları sırasıyla %34, %25 ve %22 değerlerindedir. Buna göre en büyük azalma  $Q_d/W$  oranının minimum değerinde meydana gelmiştir.

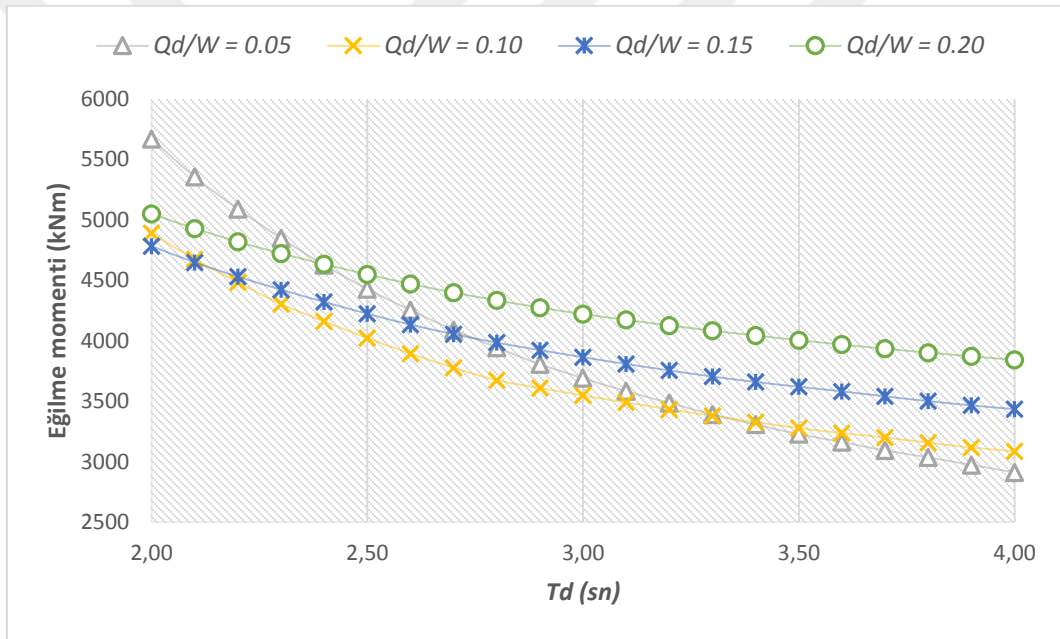


Şekil 39. Farklı  $T_d$  değerleri ve  $Q_d/W$  oranları için kolon normal kuvvet değerleri



Şekil 40. Farklı  $T_d$  değerleri ve  $Q_d/W$  oranları için kolon kesme kuvvet değerleri

Şekil 41'e göre  $T_d$  ikincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değerlerinin artması kolon tabanındaki eğilme momentlerinin düzgün bir eğilimde azalmasına yol açmıştır.  $T_d$  periyot değerinin artmasıyla eğilme momentleri  $Q_d/W = 0.05$  için en büyük ve en küçük değerlerine ulaşmıştır. Bu oran için kolon eğilme momenti değerleri  $T_d$  periyot değeri 2 sn iken 5670 kN.m ve 4 sn iken 2912 kN.m olarak elde edilmiştir.  $T_d$  periyot değerlerinin artması moment değerini %48'lik bir oranda azaltmıştır.  $Q_d/W$ 'nin 0.20 oranında ise moment değerindeki azalma oranı %24'tür. Buna göre en büyük azalma oranı  $Q_d/W = 0.05$  iken meydana gelmiştir.



Şekil 41. Farklı  $T_d$  değerleri ve  $Q_d/W$  oranları için kolon eğilme moment değerleri

Yukarıdaki şekillere göre  $Q_d/W$  oranının artması köprü yatay yerdeğiştirmelerini azaltırken köprü kolon tabanında oluşan iç kuvvetleri artırmıştır. Buna göre sismik yalıtımlı köprülerde kolon tabanında oluşan iç kuvvetleri azaltmak amacıyla yatay yerdeğiştirmeleri makul bir değerde tutarak düşük  $Q_d/W$  oranına sahip kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı yapılabilir.  $T_d$  değerinin artması ise yatay yerdeğiştirmeleri artırırken köprü kolon iç kuvvetlerini azaltmıştır. Buradan küçük değerli iç kuvvetlerin elde edilebilmesi adına  $T_d$  değerinin 2.5 sn ile 4 sn arasında seçilmesinin mesnet tasarımı için daha uygun olduğu görülmüştür.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ele alınan çalışmanın ilk bölümünde sismik yalıtım kavramına, sismik yalıtım için kullanılan elastomer mesnetlere, sismik yalıtımlı köprülerin analiz yöntemlerine değinilmiş ve kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı detaylı bir şekilde matematiksel ifadelerle anlatılmıştır. Ek olarak mesnet tasarımı ile köprü yapısal analizlerinin birleştirilmesine imkân sağlayan CSiBridge Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI) hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde detaylı olarak incelenecek olan karayolu köprüsünün geometrisi ve malzeme özellikleri verilmiştir. Ayrıca tasarım için gerekli yapısal analizler için oluşturulan köprü sonlu eleman modeli ve dikkate alınan deprem parametreleri sunulmuştur. Tasarım sonucu kurşun çekirdekli elastomer mesnetin boyutları elde edilmiştir. Yeterlilik değerlendirmesi ve plaka kontrolleri sonucunda mesnet özelliklerinin ele alınan köprü için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Altyapı esnekliğinin yapısal davranış üzerindeki etkisini görebilmek adına farklı kolon yükseklikleri için çözümler yapılmıştır. Farklı kolon yükseklikleri ankastre ve elastomer mesnetli durumlar için gerçekleştirilmiştir. Mesnet özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini görebilmek için ise mesnetin sıfır yerdeğiştirmek için dayanım kuvvetinin üstyapı ağırlığına oranı ve ikincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değeri değiştirilerek yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan mesnet tasarımları ve yapısal analizler CSiBridge programının OAPI özelliğinden yararlanılarak MATLAB programlama diliyle geliştirilen yazılım vasıtasıyla otomatikleştirilerek hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- ❖ Köprü analizleri elastomer mesnetin alt ve üst sınır malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Elastomer mesnetin alt sınır özellikleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda maksimum yerdeğiştirme ve periyot değerleri elde edilmiştir. Üst sınır özellikleri dikkate alındığında ise eksenel basınç ve deprem ivmesi değerlerinin maksimum değerler aldığı görülmüştür.
- ❖ Çalışma kapsamında incelenen köprü için tek modlu ve çok modlu tepki spektrum analizleri sonucunda elde edilen periyot, eksenel basınç kuvveti ve deprem ivmesi

değerlerinin oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum tek modlu analiz için yapılan varsayımların dikkate alınan köprü için doğruluğunu göstermiştir.

- ❖ Kısa kolonlu köprülerde elastomer mesnetler köprü üstyapısının yatay yerdeğiştirmesini artırmıştır. Ancak artan kolon yükseklikleri için elastomer mesnetler köprü üstyapısının büyük yerdeğiştirmeler yapmasını engellemiştir.
- ❖ Elastomer mesnet kolon yüksekliği arttıkça köprüye ilave rijitlik katarak birinci hakim periyot değerlerini azaltmıştır.
- ❖ Artan kolon yükseklikleri için ankastre mesnetli köprülerin birinci hakim periyotları artarak büyük farklılıklar göstermesine rağmen elastomer mesnetli köprülerde periyotlar az oranlarda değişmiştir.
- ❖ Köprü kolon ayağı tabanında oluşan kesit tesirleri ankastre mesnetli köprülere nazaran elastomer mesnetli köprülerde daha azdır. Kolon yüksekliklerinin artması ile ankastre ve elastomer mesnetli köprülerde deprem kaynaklı kesit tesirlerinde azalmalar görülmüştür.
- ❖  $Q_d/W$  oranının artmasıyla köprü birinci hakim periyot ve yatay yerdeğiştirme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni  $Q_d/W$  oranının artmasının köprüye ilave ek rijitlik katmasıdır.  $Q_d/W$  oranının 0.05'den 0.20'ye çıkartılmasıyla hakim periyot ve yerdeğiştirme değerlerinde sırasıyla %49'luk ile %52'lik oranlarda azalmalar görülmüştür.
- ❖  $Q_d/W$  değerinin belli bir orana kadar artması köprü kolon tabanında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerini azalttığı ve bu orandan sonra ise artırdığı görülmüştür. Farklı ikincil rijitlik değerleri için kolon iç kuvvetleri minimum değerlerine  $Q_d/W$  oranının 0.06 ile 0.14 değerleri arasında inmiştir. İç kuvvetlerin maksimum değerleri ise  $Q_d/W$  oranının en büyük değerlerinde elde edilmiştir.
- ❖  $T_d$  ikincil rijitliğe göre hesaplanan periyot değerlerinin değişimi köprü birinci hakim periyot ve yatay yerdeğiştirme değerlerini önemli ölçülerde artırmıştır.  $T_d$  değerinin 2 sn'den 4 sn'ye kadar artırılması köprü hakim periyodunda ve yatay yerdeğiştirmesinde sırasıyla %68'lik ve %30'luk artışlara sebep olmuştur.

- ❖  $T_d$  periyot değerlerinin 2 sn'den 4 sn'ye artırılması köprü kolon tabanında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerini önemli oranlarda azaltmıştır. Kesit tesirlerindeki azalma oranları normal kuvvetler için %55, kesme kuvvetleri için %45 ve eğilme momentleri için %48'dir.

Gelecek alışmalar için kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımında zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilebilir. Ayrıca farklı köprü türleri ve deprem etkileri için elastomer mesnet tasarımıdaki farklılıklar incelenebilir.





#### 4. KAYNAKLAR

- AASHTO., 2010. Guide Specification for Seismic Isolation Design, Third Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- AASHTO., 2017. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Eight Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Akoğul, C., 2007. Prekast Kirişli Betonarme Köprülerin AASHTO'ya göre Depreme Dayanıklı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Akogul, C. ve Celik, O., 2008. Effect of Elastomeric Bearing Modeling Parameters on the Seismic Design of RC Highway Bridges with Precast Concrete Bridges, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul.
- Altun, M., 2012. Sismik Yalıtımlı Betonarme Bir Köprünün Analizi ve Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Arı, S., 2019. AASHTO Rehber Teknik Şartnamesine (AASHTO-GSID) Göre Köprülerin Sismik Yalıtım Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Buckle, I., Constantinou, M., Dicleli, M. ve Ghasemi, H., 2006. Seismic Isolations of Highway Bridges, Special Report MCEER-06-SP07, Multidisciplinary Center Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, New York
- Chen, X. ve Li, C., 2020. Seismic Performance of Tall Pier Bridges Retrofitted with Lead Rubber Bearings and Rocking Foundation, Engineering Structures, 1-15.
- Constantinou, M., Kalpakidis, I., Filiatrault, A. ve Ecker Lay, R., 2011. LRFD- Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Technical Report MCEER-11-0004, University at Buffalo, New-York.
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D. ve Warn, G., 2007. Performance of Sismik Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, Technical Report MCEER 07-0012, University at Buffalo, New York:
- CSiBridge v 20.0.0., 2017. Computers and Structures Inc, USA.
- Dai, W., Moroni, M., Roeset, J. ve Sarrazin, M., 2006. Effect of Isolation Pads and Their Stiffness on the Dynamic Characteristics of Bridges, Engineering Structures, 1298-1306.
- Farag, M., Mehanny, S., Kohrangi, M., Vamvatsikos, D. ve Bakhoun, M., 2019. Precast Beam Bridges with a Buffer-Gap-Elastomeric Bearing System: Uncertainty in Design Parameters and Randomness in Ground Records, Journal of Bridge Engineering, 1-16.

- Ghobarah, A., 1988. Seismic Behaviour of Highway Bridges with Base Isolation, Journal of Civil Engineering, 72-78.
- Hameed, A., Koo, M., S., Do, T. ve Jeong, J., 2008. Effect of Lead Rubber Bearing Characteristics on the Response of Seismic-Isolated Bridges, KSCE Journal of Civil Engineering, 187-196.
- Haque, M., Bhuiyen, A. ve Alam, M., 2010. Seismic Response Analysis of Base Isolated Highway Bridges: Effectiveness of Using Laminated Rubber Bearings, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, 336-343.
- Ishac, M. ve Mehanny, S., 2017. Do Mixed Pier-to-Deck Connections Alleviate Irregularity of Seismic Response of Bridges with Unequal Height Piers, Bulletin of Earthquake Engineering, Springer, 97-121.
- Jangid, R., 2004. Seismic Response of Isolated Bridges, Journal of Bridge Engineering, 156-166.
- Kammerer, A., Whittaker, A. ve Constantinou, M., 2019. Technical Consideration for Seismic Isolation of Nuclear Facilities, Office of Nuclear Regulatory Research, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- Kumar, M., Whittaker, A. ve Constantinou, M. C., 2014. An Advanced Numerical Model of Elastomeric Seismic Isolation Bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1955-1974.
- Mendez-Galindo, C., Sanchez-Pire, C., Rodriguez-Bahena, J., Nieto-Hiquera, J. ve Duran-Perez, L., 2016. Seismic Isolation of Highway Bridges in Cold Climates Using Special Elastomeric Isolators, 1st Bridge Engineering Workshop, Mexico city, 8.
- Naiem, F. ve Kelly, J., 1999. Design of Seismic Isolated Structures From Theory To Practice, John Willey and SONS. INC., New York.
- Neethu, B., 2019. Effect of Dynamic Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Bridges with Elastomeric Bearings, Asian Journal of Civil Engineering, 197-207.
- Parry, I., Kulkarni, D. ve Gudadappanavar, B., 2017. Performance Evaluation of Elastomeric Pads as Bridge Bearings under Earthquake Loads, International Research Journal of Engineering and Technology, 869-873.
- Quanani, M., Sandjak, K. ve Tiliouine, B., 2020. Dynamic Analysis of Multi-Span Simply Supported Prestressed Concrete Bridge with Restrainer and Seismic Isolation Devices, Journal of Building Materials and Structures, 105-118.
- Rahmani, S., 2020. Yerinde Döküm Betonarme Köprü Tasarımı ve Bir Proje Örneği, Yüksek Lisans Tezi, MCBÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, Manisa.

- Reyhanoğulları, N., E., 2010. Vertical Ground Motion Influence on Seismically Isolated and Unisolated Bridges, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Shaker, F. ve Rahai, A., 2019. Substructure Responses of a Concrete Bridge with Different Deck-to-Pier Connections, International Journal of Civil Engineering, 1683-1695.
- TDTH., Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, <https://tdth.afad.gov.tr>, 12 Ocak 2021.
- Tubaldi, E., Mitoulis, S. ve Ahmadi, H., 2018. Comparisin of Different Models for High Damping Rubber Bearing in Seismically Isolated Bridges, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 329-345.
- Tubaldi, E., Mitoulis, S., Ahmadi, H. ve Muhr, A., 2016. A Parametric Study on the Axial Behaviour of Elastomeric Izolators in Multi-Span Bridges Subjected to Horizontal Seismic Excitations, Earthquake Engineering, 1285-1310.
- Turkington, D., Carr, A., Cooke, N. ve Moss, P., (1989 a). Design Method for Bridges on Lead-Rubber Bearings, Journal of Structural Engineering, 3017-3030.
- Turkington, D., Carr, A., Cooke, N., ve Moss, P., (1989 b). Seismic Design of Bridges on Lead-Rubber Bearings, Journal of Structural Engineering, 3000-3016.
- Yılmaz, T., 2015. Demiryolu Köprülerin Deprem Etkisi Altında Farklı Yönetmeliklere Göre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, GÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini 2002-2013 yılları arasında Almatı'da tamamladı. 2013 yılında Al-Farabi Kazak Devlet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü kazandı. 2015-2017 yıllarında makine mühendisliği bölümünde laboratuvar asistanı olarak çalıştı. 2017 yılında ise lisans eğitimini başarıyla tamamladı. Yüksek Lisans öğrenimine ara vermeden 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği bölümünde başladı. Yersaiyn BEXULTAN iyi derecede Rusça, Türkçe ve İngilizce bilmektedir.