

**ÖNGERİLMELİ BETONARME I KESİTLİ HIZLI TREN
KÖPRÜLERİN SİSMİK ANALİZİ**

İnş. Müh. Aykut ÖZPOLAT

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Muhammet KARATON
ŞUBAT-2016**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERİLMELİ BETONARME I KESİTLİ HIZLI TREN KÖPRÜLERİN SİSMİK
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aykut ÖZPOLAT

111115101

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Mekanik

Danışman : Doç. Dr. Muhammet KARATON
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 Şubat 2016

ŞUBAT-2016

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNGERİLMELİ BETONARME I KESİTLİ HIZLI TREN KÖPRÜLERİN SİSMİK
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aykut ÖZPOLAT

111115101

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 Şubat 2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Şubat 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhammet KARATON

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ömer KELEŞOĞLU

: Yrd. Doç. Dr. Ahmet BENLİ

ŞUBAT-2016

ÖNSÖZ

Hızlı trenin ülkemiz gündemine girmesi ve artan ulaşım talebine bağlı olarak her geçen gün demiryollarının öneminin artması; buna bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu hatlarına ve bunların bir parçası olan köprü ve viyadüklere duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bu durum hızlı demiryolu köprülerinin tasarım, güvenlik ve ekonomi açısından daha iyi irdelenme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yapılarda büyük açıklıkları ekonomik olarak geçilebilmesi, kesitin tümünü çalıştırarak narin elemanlar elde edilmesi ve iç kuvvetleri istenildiği gibi tutarak sehim ve çatlamların önüne geçilebilmesi gibi büyük avantajlar sağlamasından dolayı ön gerilmeli prefabrike köprü kirişleri ve elastomer mesnetlerin demiryolu köprülerinde kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bu tez çalışmasında, deprem bölgesinde yer alan hızlı demiryolu köprülerinin elastomer mesnetlerinin dinamik etkiler altında davranışı incelenmiştir. Sadece deprem durumunda ve deprem meydana geldiği esnada köprü üzerinden hızlı trenin geçmesi durumunda elastomer mesnetlerin davranışına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışma köprü tasarımında ihmal edilen, deprem esnasında köprü üzerinden hızlı trenin geçmesi durumunun köprü elemanları üzerinde etkilerini göstermek amacı ile yapılmıştır. Yapmış olduğum bu tez çalışmasında tüm yoğunluğuna rağmen bilgisini, desteğini ve yardımını benden esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Muhammet KARATON' a teşekkür ederim.

Aykut ÖZPOLAT

Elazığ-2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET.....	I
ABSTRACT	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	I
KISALTMALAR	I
SEMBOLLER LİSTESİ.....	I
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Önemi.....	1
1.2. Önceki Çalışmalar.....	1
1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı.....	3
2. DEMİRYOLU KÖPRÜLERİ.....	5
2.1. Demiryolu Köprülerine Etkiyen Yükler.....	5
2.1.1. Demiryolu köprüsü zati yükleri.....	5
2.1.2. Demiryolu köprüsü hareketli yükleri	6
2.1.3. Demiryolu köprüsü sismik yükleri	12
2.2. Demiryolu Köprülerinin Sismik Tasarımı	14
2.2.1. Dayanıma Göre Tasarım (DGT) Yöntemleri	15
2.2.2. Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım (ŞGT) Yöntemleri	15
3. DEMİRYOLU KÖPRÜLERİNİN SİSMİK İZOLASYONU	18
3.1.Sismik İzolatörlerin Temel Tasarım Prensipleri	21
3.2. Demiryolu Köprülerinde Kullanılan İzolatör Tipleri.....	23
3.2.1. Kauçuk Malzeme ile Tasarlanmış Sismik İzolatörler	24
3.2.2. Sürtünme Esaslı Sismik İzolatörler	28
3.2.3. Sönümleyici Cihazlar (Damper Sistemler)	31
3.3. Elastomer Mesnet Tasarımı	32
4. ÖNGERİLMELİ BETONARME KİRİŞLERİN HESAPLAMA ESASLARI	35
4.1. Genel.....	35
4.2. Öngerme Yöntemleri.....	38
4.3. Öngermeli Kirişlerinin Betonarme Malzemesi	39

4.4. Öngerilmeli Betonarme Köprülerin Hesap Ve Yapım Kuralları	41
4.4.1. Öngerilme Kayıplarının Hesabı.....	42
5.SAYISAL ANALİZ.....	48
5.1. Köprünün Sonlu Eleman Modeli ve Statik Analizi.....	52
5.2. Köprünün Dinamik ve Sismik Yükler Altındaki Analizi.....	53
5.2.1. Köprüye sadece sismik yüklerinin etki etmesi durumu	54
5.2.2. Sismik yüklerin yükler altında köprünün bir şeridinin tren katarı LM71 ile yüklü olması durumu	62
5.2.3. Sismik yüklerin yükler altında köprünün iki şeridinin tren katarı LM71 ile yüklü olması durumu	70
6. SONUÇLAR.....	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	81

ÖZET

Bu tez çalışmasında, bir demiryolu köprüsünün üzerine tren ve sismik yüklerin birlikte ve ayrı etki ettiği durumlar dikkate alınarak lineer olmayan dinamik analizler elde edilmiştir. Çözümlerde kullanılan köprü, iki açıklıklı ve her bir açıklığı 20 m olan öngerilmeli I en kesitine sahip kirişlerle inşa edilmiş bir demiryolu köprüsüdür. Analizler için sonlu elemanlar metodu kullanılarak yeni bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılan programın doğruluğunun kontrolü için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Çözümlerde, Kurşun Çekirdekli Kauçuk Elastomer mesnetler dikkate alınmıştır. Sismik yük olarak Devlet Limanlar ve Hava Meydanlarının önerdiği spektrum ivme grafiği kullanılarak üretilen yapay deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Tren dinamik yükü için LM71 yük katarı seçilmiş ve köprü'nün iki şeridi üzerinden etki etme durumu dikkate alınmıştır. Çözümlerde yer değiştirme-zaman grafikleri ile elastomer mesnetlere ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri birbirleri ile karşılaştırılarak depremin köprü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu köprüsü, Elastomer mesnet, LM71 yük katarı ve Yapay deprem.

ABSTRACT

SEISMIC ANALYSIS OF HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGE WITH PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE I-BEAM

In this study, non-linear dynamic analysis is obtained considering condition together train with seismic loads and separately on a railway bridge. The bridge used in the analysis is a railway bridge built with prestressed concrete I-beams. Bridge is a two-span that each of the spans is 20 m. A new computer software was written using the finite elements method for the analysis. SAP2000 is used to check the accuracy of the software. Lead rubber elastomeric bearings are used in the analysis. Artificial earthquake acceleration records produced using graphics acceleration spectrum proposed by DLH is used for seismic load. LM71 load rolling stock selected to train dynamic load and the bridge is considered to effect the situation over the two lanes. In analyzes displacement-time graphics with elastomeric bearings belonging to the force-displacement graph are compared with each other and in this way the effects of earthquakes on the bridge has been examined.

Keywords: Railway bridge, Elastomeric bearings, LM71 load rolling stock and artificial earthquake

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Tipik bir demiryolu en kesiti	5
Şekil 2.2. Demiryolu köprüsü yapı elemanları.	6
Şekil 2.3. Servis ve işletme durumlarında a) EN1991-2-2003 (Load Model 71) ve b) UIC 702 (Load Model 2000)'ye göre tren yük katarları.....	7
Şekil 2.4. İvmelenme ve fren kuvvetlerinin uygulanması.	8
Şekil 2.5. Merkezkaç kuvvetinin uygulanması.....	9
Şekil 2.6. Köprü üzerine rüzgar yükünün etki ettirilmesi.	9
Şekil 2.7. Tren üzerine rüzgâr yükünün etki ettirilmesi.....	10
Şekil 2.8. Yanal çarpma kuvvetlerinin ray üst seviyesinden dikkate alınması	11
Şekil 2.9. DLH-2007' ye göre deprem spektrum eğrisi.....	14
Şekil 3.1. İzostatik köprülerde var olan genel mesnet modeli.	20
Şekil 3.2. Kauçuk esaslı sismik izolatör ve laboratuvar ortamında yük deneyi	25
Şekil 3.3. Lamine edilmiş kauçuk taşıyıcının prensibi.....	26
Şekil 3.4. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör	27
Şekil 3.5. Kayıcı Tabakalı Kauçuk İzolatör (SLR)	28
Şekil 3.6. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi (CLB).....	28
Şekil 3.7. Sürtünme esaslı sismik izolatörler	29
Şekil 3.8. Sürtünme esaslı izolatörün, sarkaç prensibine dayanan çalışma sistemi.....	29
Şekil 3.9. Sürtünme esaslı izolatörün açık hâli.....	30
Şekil 3.10. Bir kolonun ortasında sürtünme esaslı sismik izolatör uygulaması	30
Şekil 3.11. Çelik Bilyalı İzolatör (SBB)	31
Şekil 3.12. Hidrolik Sönümleme cihazı.....	31
Şekil 3.13. Sırbistan' da köprü çelik kablolarında damper sistem uygulaması.....	32
Şekil 3.14. Kauçuk mesnet histerik çevrimi	33
Şekil 4.1. Öngerilmeli basit kiriş açıklık ortasında gerilme dağılımı	36
Şekil 4.2. Çeliğin gevşemesi sonucu çelikte gerilme kaybı	44
Şekil 4.3. Yalnızca ağırlık merkezinden öngerilme kuvvetinin uygulanma durumu ..	47
Şekil 5.1. Köprünün planı.....	49
Şekil 5.2. Köprünün en kesiti.....	49
Şekil 5.3. Köprünün ön gerilmeli kirişin a) en kesiti ve b) toron detayları.....	49
Şekil 5.4. D1 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği	50
Şekil 5.5. D2 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği	50
Şekil 5.6. D3 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği	50
Şekil 5.7. İncelenen elastomer mesnet ve düğüm noktalarının köprü üzerindeki konumları	53
Şekil 5.8. Sadece D1 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	54
Şekil 5.9. Sadece D1 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	55
Şekil 5.10. Sadece D1 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	55
Şekil 5.11. Sadece D2 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	55
Şekil 5.12. Sadece D2 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	56

Şekil 5.13. Sadece D2 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	56
Şekil 5.14. Sadece D3 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	57
Şekil 5.15. Sadece D3 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	57
Şekil 5.16. Sadece D3 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	57
Şekil 5.17. Sadece D1 depremi için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	58
Şekil 5.18. Sadece D1 depremi için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	58
Şekil 5.19. Sadece D1 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	58
Şekil 5.20. Sadece D2 depremi için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	60
Şekil 5.21. Sadece D2 depremi için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	60
Şekil 5.22. Sadece D2 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	60
Şekil 5.23. Sadece D3 depremi için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	61
Şekil 5.24. Sadece D3 depremi için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	61
Şekil 5.25. Sadece D3 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	61
Şekil 5.26. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	62
Şekil 5.27. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	62
Şekil 5.28. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	63
Şekil 5.29. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	64
Şekil 5.30. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	64
Şekil 5.31. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	64
Şekil 5.32. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	65
Şekil 5.33. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	65
Şekil 5.34. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	65
Şekil 5.35. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	66
Şekil 5.36. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	67

Şekil 5.37. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	67
Şekil 5.38. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	67
Şekil 5.39. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	68
Şekil 5.40. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	69
Şekil 5.41. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	69
Şekil 5.42. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	69
Şekil 5.43. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	70
Şekil 5.44. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	70
Şekil 5.45. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	71
Şekil 5.46. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	71
Şekil 5.47. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	72
Şekil 5.48. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	72
Şekil 5.49. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	73
Şekil 5.50. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	73
Şekil 5.51. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	73
Şekil 5.52. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri.....	74
Şekil 5.53. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	74
Şekil 5.54. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	75
Şekil 5.55. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	75
Şekil 5.56. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	76
Şekil 5.57. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	76
Şekil 5.58. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	77
Şekil 5.59. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	77
Şekil 5.60. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri	78

Şekil 5.61. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38’ in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri 78

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Demiryolu köprüleri için çeşitli deprem seviyelerinde kullanılacak tasarım yöntemleri.....	16
Tablo 2.2. Yönetmelikte belirtilen deprem seviyelerinde hedeflenen hasar düzeyi.....	17
Tablo 5.1 Köprü Elemanları Kesit Özellikleri	48
Tablo 5.2. Elastomer mesnedin geometrik ve mekanik özellikleri.....	51
Tablo 5.3. Analiz Programı ile Sap2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması	52

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ATC	: Applied Technology Center
ATC-6	: Seismic Design Guidelines for Highway Bridges
ASTM-A 416	: Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete
SAP	: Structural Analysis Program
LRB	: Lead Rubber Bearing
LDRB	: Low Damping Rubber Bearing
LHDRB	: Lead-High Damping Rubber Bearing
HDRB	: High Damping Rubber Bearing
LM	: Load Model
UIC	: International Union of Railways
DLH	: Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği
TS3233	: Öngerilmeli Beton ve Yapılarının Hesap Yönetmeliği
ÇHEM	: Çelik Histeretik Elastomer Mesnet
KÇKEM	: Kurşun Çekirdekli Kauçuk Elastomer Mesnet
HVSM	: Hidrolik Viskoz Sönümleyici Mesnet

SEMBOLLER LİSTESİ

A_c	: Beton brüt kesit alanı
c	: Kenara olan uzaklık
d_x	: Yatay yerdeğiştirme
d_y	: Düşey yerdeğiştirme
d_z	: Düzleme dik yerdeğiştirme
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_{ps}	: Öngerme Kablosunun elastisite modülü
f_0	: Başlangıç kesitinde kablodaki gerilme
f_b	: Kesitin alt kenarındaki gerilme
f_{ctk}	: Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
F_m	: Kablonun kopma yükü
f_{pu}	: Kablonun karakteristik çekme dayanımıdır.
f_t	: Kesitin üst kenarındaki gerilme
f_x	: Ankrajdan (x) uzaklığında kablodaki gerilme
I_g	: Kesitin brüt atalet momenti
Δf_{CR+SH}	: Sünme ve rötreye bağlı ön gerilme kuvveti kaybı
Δf_{pA}	: Ankraj kaçacağından doğan gerilme kaybı
Δf_{pR}	: Gevşemeye bağlı gerilme kaybı
ϵ_c	: Betonun şekil değiştirmesi
ϵ_{co}	: Betonun göçme anındaki şekil değiştirmesi
ϵ_{cu}	: Betonda maksimum şekil değiştirme
σ_c	: Beton basınç gerilmesi
σ_y	: Akma gerilmesi
μ	: Sürtünme katsayısı

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Karayolları, demiryolları, deniz ve havayolları ulaşım sistemlerini oluşturmaktadır. Limanlar deniz ulaşımının en önemli yapı sistemini oluşturmaktadır. Karayolu ve demiryolları için ise köprüler ve viyadükler önde gelmektedir. Köprü ve viyadükler, üzerine gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Bu tip yapılara gelen yüklerin en önemlilerinden biri de deprem yüküdür. Özellikle depremin şiddetli olduğu bölgelerde bu tip yapıların gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilmesi hem deprem sırasında ve hem de depremden sonraki zamanlar için önem arz etmektedir.

Hızlı trenin ülkemiz gündemine girmesi ve artan ulaşım talebine bağlı olarak her geçen gün demiryollarının öneminin artması; buna bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu hatlarına ve bunların bir parçası olan köprü ve viyadüklere duyulan ihtiyacı artırmıştır. Yapılarda büyük açıklıkları ekonomik olarak geçilebilmesi, kesitin tümünü çalıştırarak narin elemanlar elde edilmesi ve iç kuvvetleri istenildiği gibi tutarak sehim ve çatlamların önüne geçilebilmesi gibi büyük avantajlar sağlamasından dolayı ön gerilmeli prefabrike köprü kirişlerinin demiryolu köprülerinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu durum hızlı demiryolu köprülerinin tasarım, güvenlik ve ekonomi açısından daha iyi irdelenme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle tasarım yapılırken tüm faktörler dikkate alınmak zorundadır.

Yapılan literatür araştırmalarında ve incelenen hızlı demiryolu köprü projelerinin hesaplarında; deprem meydana geldiği esnada köprü üzerinden trenin geçmesi durumunun elastomer mesnetler üzerinde etkisinin göz önüne alınmadığının farkına varılmıştır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Hızlı demiryolu köprülerinde kullanılan elastomer mesnetlerin deprem etkisi altında davranışı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Dunker ve Rabat ve National Bridge Inventory (NBI) teşkilatının yapmış olduğu araştırmaya göre Amerika Birleşik Devletlerinde son yıllarda yapılan köprülerin yarısının ön gerilmeli betondan prefabrike kirişli köprü olduğunu görülmektedir [1]. Bu durum ülkemizde son otuz yıl için değerlendirildiğinde yapılan otoyol köprülerinin büyük bir kısmı öngerilmeli prefabrik

kirişli olarak tasarlanmıştır. Son yıllarda artan talebe bağlı olarak demiryolu köprülerinde de ön gerilmeli betonarme prefabrik kirişlere sahip köprüler inşa edilmektedir.

Statik ve dinamik yükler altında köprü ve viyadüklerin yapısal elamanlarında oluşacak etkiler hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Bunlar içerisinde Sadece Kayar Tip izolasyon sisteminin davranışı üzerinde normal basıncın etkilerini bir çok araştırmacının ilgi alanını oluşturmuştur [2-4]. Normal basınçtaki artıştan dolayı sürtünme katsayısı değerinde bir azalım gözlemlenmiştir. Tsopelas ve ark. [5,6], Esnek Kayar Tip İzolatör (EKTİ) sistemi kullanılarak izolasyonu yapılmış bir köprü modeli üzerinde sarsma tablası testleri gerçekleştirmişlerdir. Japon ikinci seviye köprü tasarımı için ilave sıvı viskoz sönümleyici kullanmışlardır. İzolasyonsuz köprünün tepkisiyle karşılaştırma yapmışlar ve izolasyonlu köprünün çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. İlaveten, düşey ivmenin etkisinin çok düşük seviyede olduğunu da belirlemişlerdir. Kunde ve Jangid [7] köprüleri farklı türde elastomer mesnetler ve kayıcı mesnetler kullanarak çözümlenmiştir. Analizlerde ayak ve üst yapının elastik sınırlar içinde davranış yaptığını kabul etmişlerdir. Çözümlerde yer değiştirmelerin, ayak ve üst yapı elastik davranışı ile arttığı tespit edilmiştir. Feng ve Okamoto [8] ise kauçuk dengeleyici alete sahip kayan tip izolasyonlu bir köprü modeli üzerinde sarsma masası testleri yapmışlardır. Aynı zamanda, dış tahrik ivmesinin değeri değişmesine rağmen köprü tabliyesinde ortaya çıkan ivmenin sınırlı değerlere sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Büyük deprem ivmeleri için, kayar tip izolasyon sistemlerinin tabakalı kauçuk mesnet sistemleri ile karşılaştırıldığı zaman daha iyi bir izolasyon performansı verdiğini belirlemişlerdir. Gongkang [9] köprü ayağını elastomer mesnetli konsol kiriş olarak modellemiştir. Analizlerde filtrelenmiş beyaz gürültü kurallarını kullanarak rasgele titreşimler oluşturmuştur. Bu varsayımlarla yaptığı analizler sonucunda elastomer mesnetlerin rijitliğinin azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca mesnetlerin rijitliğinin azalmasından dolayı köprü ayağının birinci ve ikinci modal davranışının rijit cisim davranışına yakınlığını bulmuşlardır.

Nakajima ve ark. [10] sürgülü ve kauçuk yatağın birlikte olduğu izolasyon sistemi üzerinde karışık hat bağlantılı bir deprem tepkisi testini gerçekleştirmişlerdir. Sistemi 1995 Kobe depreminin ivme kayıtları kullanılarak test etmişlerdir. Çalışmalarında testleri, yatay ve düşey tahriklerinin en gayri müsaait olduğu durumlar için gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda aralarında faz farkının olduğu yatay ve düşey sinüs dalgaları için de sistemi test etmişlerdir. Test sonuçlarından düşey hareketin izolasyon sisteminin davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olmadığını gözlemlenmiştir. Bunun aksine harmonik

hareketler için kayar tip yatakların yatay ve düşey hareketin pik değerlerinin kesiştiği bölgede büyük bir deprem tepkisine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Iemura ve arkadaşları [11] araştırmalarında, kayar tip izolasyon sistemi kullanarak sismik yalıtımı yapılmış köprü sistemi üzerinde düşey ivmenin etkilerini incelemişlerdir. Köprüye karma değerlerle oluşturulan düşey ivme değerlerini etki ettirerek, sistemde oluşan deformasyonları incelemişlerdir. Yapılan deneylerde, izolatöre eksenel yönde küçük bir ivme değerleri etki ettirildiğinde, sistemde oluşan deformasyon değerlerinin büyüdüğünü gözlemlenmiştir. Ancak farklı deprem ivmeleri için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında oluşan farkın önemsiz olduğunu ve sistemin genel tepkisinin hemen hemen aynı olduğunu tespit etmişlerdir.

1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışmasında, elastomer mesnetler ve çubuk elemanlar ile modellenen bir demiryolu köprüsünün tren gibi dinamik kuvvetlerin ve sismik yüklerin birlikte dikkate alınmasıyla köprü üzerinde oluşabilecek etkiler incelenmiştir. Çözümlerde kullanılan köprü, iki açıklıklı ve her bir açıklığı 20 m olan ön gerilmeli I en kesitine sahip kirişlerle inşa edilmiş bir demiryolu köprüsüdür. Analizler için sonlu elemanlar metodu kullanılarak yeni bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılan programın doğruluğunun kontrolü için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Çözümlerde, Kurşun Çekirdekli Kauçuk Elastomer mesnet dikkate alınmıştır. Sismik yük olarak DLH 2007 [58]' de verilen iki farklı deprem seviyesi için sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deprem yükleri sadece köprü'nün akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Dinamik yük olarak LM71 yük katarının iki şerit üzerinden etki etme durumu dikkate alınmıştır.

Bölüm 2' de demiryolu köprüleri hakkında genel bilgiler ve bu köprülere etkiyen statik, dinamik ve sismik yüklerden bahsedilmiştir.

Bölüm 3' te elastomer mesnetlerin temel tasarım prensibinden ve köprülerde kullanılan elastomer mesnet türlerinden bahsedilmiştir. Elastomer mesnetlerin davranışları ve tasarım kuralları tanıtılmıştır.

Bölüm 4' te ön gerilmeli kirişlerin tasarım esasları hakkında bilgiler verilmiş olup ön betonarme kirişlerden oluşan köprülerin hesap ve yapım kurallarından bahsedilmiştir.

Bölüm 5'te sayısal uygulama kısmı yer almakta olup söz konusu köprü'nün üzerinden LM71 yük katarının geçmesi sırasında depremin etkisini incelemek amacıyla yük katarsız

ve yük katarlı durumlar dikkate alınmıştır. Deprem ivmesi için D1 ve D2 deprem seviyelerinde üretilmiş yapay deprem ivme verileri kullanılmıştır. Çözümlerde yer değiştirme-zaman grafikleri ile elastomer mesnetlere ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri birbirleri ile karşılaştırılarak depremin köprü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

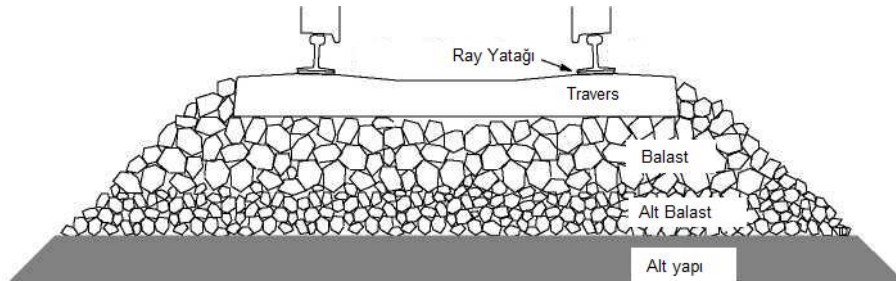
Bölüm 6' te ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. DEMİRYOLU KÖPRÜLERİ

Ulaşım sistemleri; insanların, üretilen malzemelerin bir yerden başka bir yere taşınmasında kullanılan insanlık tarihinin en önemli yapılarıdır. Bir ülkenin ekonomisinin gelişmesi için ulaşım yollarının sıklığının, uzunluğunun artırılması gerekmektedir. Çünkü ulaşım sistemlerinin vasfı, ulaşımında kullanılan taşıtların çeşitliliği o ülkenin ekonomik seviyesi yansıtmaktadır. Ülkemizde ulaşım altyapısının modernleştirilmesi, ulaşım araçlarının çeşitliliğinin artması ve yaygınlaşması 1950 yılından sonra ilerlemeye başlamıştır. Bu gelişmeler sonucunda sanayi ve ticaret alanında büyük atılımlar meydana gelmiştir. Ülkemizde 1866 yılında ilk demiryolu hattı İzmir–Aydın arasında inşa edilmiştir. İşletim maliyeti açısından demiryolu taşımacılığı karayolu taşımacılığına göre daha ekonomik olmaktadır. Bu nedenle Cumhuriyet’in ilk yıllarında demiryollarının inşasına daha çok önem verilmiştir. Ancak demiryollarının inşası 1950 yılından sonra azalmaya başlamıştır. Ülkemizde mevcut demiryollarının uzunluğu 10300 km civarındadır ve bu hatların 8607 km’sini ana hatlar oluşturmaktadır. Ülkemiz coğrafyasının dağlık ve ortalama yüksekliğinin fazla olmasından dolayı demiryolu ulaşım sistemlerinin inşasında köprülere olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

2.1. Demiryolu Köprülerine Etkiyen Yükler

Demiryolu köprülerinin tasarımı yapılırken hesaplamalarda dikkate alınacak yükler; taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların kendi ağırlığı, hareketli yükler ve dinamik yükler şeklinde sıralanmaktadır.



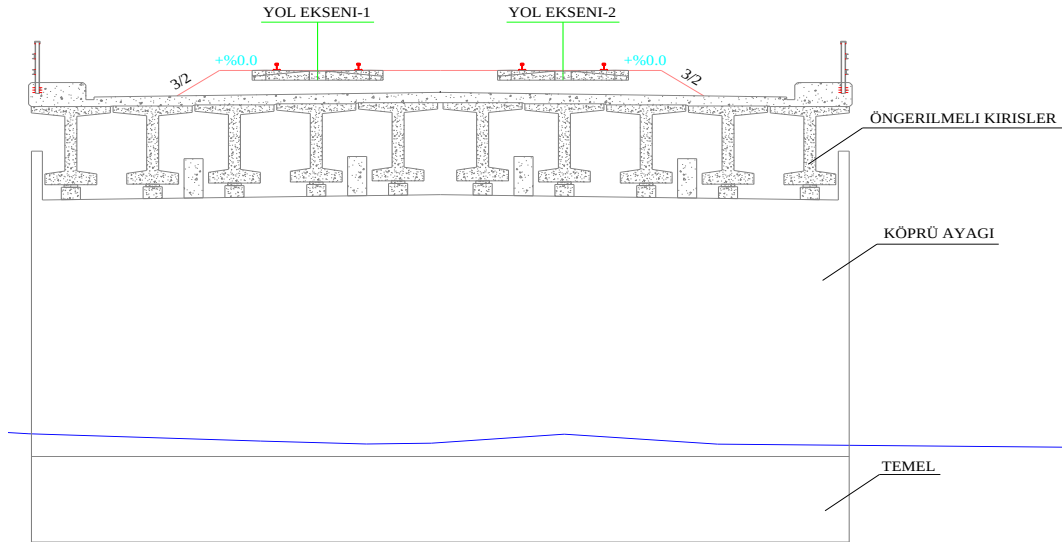
Şekil 2.1. Tipik bir demiryolu en kesiti

Dinamik yükler köprünün işletilmesi esnasında ortaya çıkan yük grubudur. Bu yükler merkezkaç kuvveti, rüzgâr etkisi ve deprem etkisi ısı değişimi ve rötre etkisi,

ivmeleme ve fren kuvvetleri, yanal çarpma, sürüşarj yükleri şeklinde sıralanmaktadır. Demiryollarını oluşturan elemanların sistemindeki konumu Şekil 2.1’ deki en kesitte görülmektedir. Doğrudan zemin üzerine inşa edilen demiryolu hattını; ray yatağı, travers, balast, alt balast, altyapı gibi yapı elemanları oluşturmaktadır.

2.1.1. Demiryolu köprüsü zati yükleri

Hareketli yük olarak “Tren Katarı Yükleri” ile “İvmelenme ve Fren Kuvvetleri” yanı sıra “Yanal Çarpma etkisi” olarak dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda sismik etki için DLH-2007’ de belirtilen yükler deprem yükü şeklinde hesaba katılmaktadır. Bir demiryolu köprüsü yapı elemanları; Şekil 2.2’ de görüldüğü gibi temel, köprü ayağı, başlık kirişi, ön gerilmeli kirişler enleme kirişleri ve tabliye kısımlarından inşa edilmektedir [24]. Bu elemanlar yapıdaki ölü yüklerin bir kısmıdır. Ayrıca demiryolu ulaşım sisteminde yalıtımında kullanılan malzemeler, yapı üzerinden geçen tesisat boruları, yapının aydınlatılmasında kullanılan malzemeler v.s. ölü yük olarak analizlerde dikkate alınmaktadır [24].

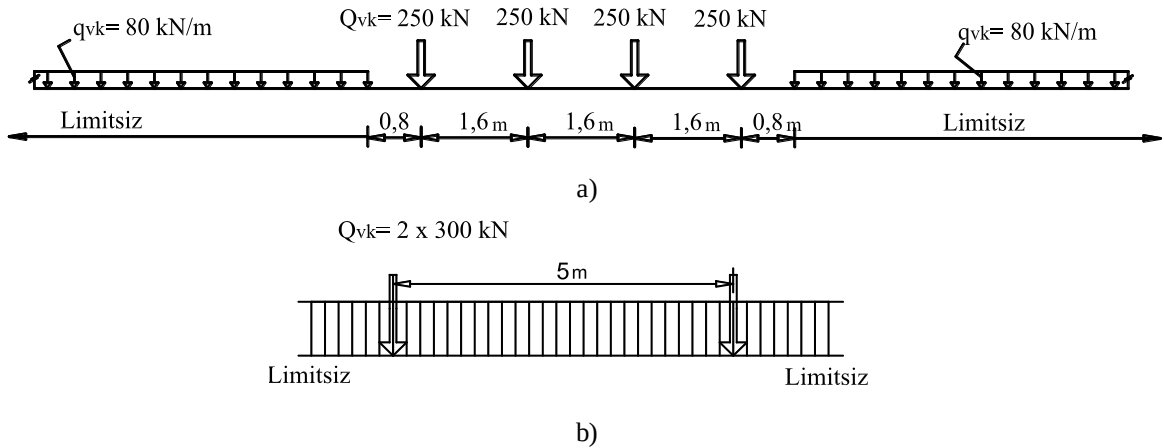


Şekil 2.2. Demiryolu köprüsü yapı elemanları.

2.1.2. Demiryolu köprüsü hareketli yükleri

Ülkemizde, demiryolu köprülerinin inşasında Betonarme Alman Demiryolu yönetmeliği kullanılmıştır. Ancak bu yönetmelik daha çok çelik demiryolu köprülerinin

tasarımında kullanılması amacı ile hazırlanmıştır. Bu teknik şartnamenin yetersizliği nedeni ile EN 1991 Eurocode [28] yönetmeliği ve UIC (International Union of Railways) [26,27] yönetmeliği kriterlerine göre köprü dizaynları yapılmaya başlanmıştır. "Load Model 71 (LM71)" hareketli yükü UIC 702 şartnamesinde tren yük modeli olarak hesaplamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca "Load Model 2000" yük modeli köprü tasarımlarında kullanılmaktadır. Bu yük modelinin LM71 yük modelinden farkı sistemde oluşabilecek tren yüklerinde oluşabilecek artışları da dikkate almasıdır. Bu nedenle demiryolunun kullanımı sırasında meydana gelecek yük değişiklerinin olması durumunun hesaplamalarında LM2000 yük modeli kullanılmaktadır. Yönetmeliğe göre betonarme veya öngerilmeli prefabrike kirişlerle tasarlanan köprülerde tren yükü olarak LM71 yük modelinin kullanılması gerekmektedir [25-28]. Şekil 2.3.a' da UIC 702 ve Şekil 2.3.b' de EN 1991 standartlarında belirtilen Tren katar yükleri görülmektedir [24].

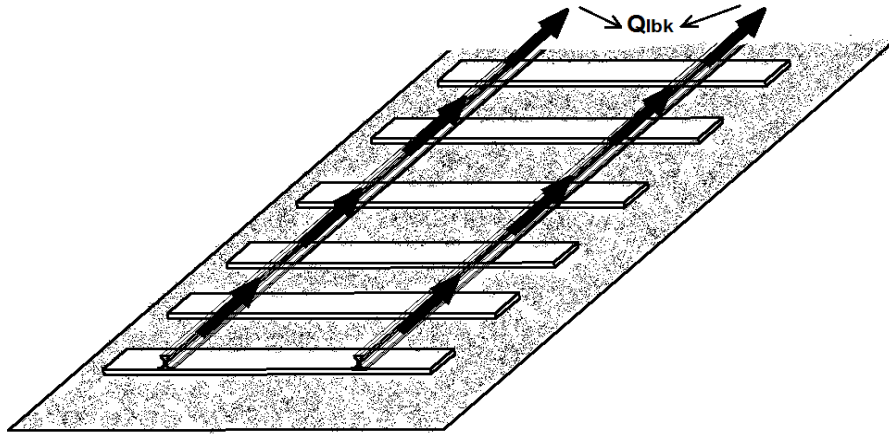


Şekil 2.3. Servis ve işletme durumlarında a) EN1991-2-2003 (Load Model 71) ve b) UIC 702 (Load Model 2000)'ye göre tren yük katarları.

Demiryollarında gelecekte meydana gelebilecek değişiklikler dikkate alındığında UIC 702 yönetmeliğinde Bölüm 2.6 'ya göre LM71 yük modelinin " α " katsayısı ile çarpılması ile LM2000 yük modeli yerine kullanılabileceği belirtilmektedir [26-28]. Buradaki " α " katsayısı hareketli yük arttırma katsayısı olup 1.33 olarak kullanılması tavsiye edilmektedir [28]. Böylece işletme durumunda LM71 yük modeli ile gerekli kontroller yapılabilmektedir [26-28]. Ülkemizde ise betonarme ve ön gerilmeli betonarme elemanlar, TS500 ile TS3233 şartlarına uyularak tasarlanmaktadır [19-20].

Demiryollarında trenin hızlanması ve fren yapması sonucunda oluşan kuvvetler Şekil 2.4.' de görüldüğü gibi tren raylarının üst noktasından etki ettiği kabul edilmektedir.

Sisteme etki eden yük modelleri α katsayısı ile çarpılmaktadır. Ancak bu durumda “ φ ” dinamik etki katsayısı ile yükler arttırılmamaktadır. Yönetmelikte belirtilen HSLM, Model--71, SW/2, ve SW/0 yük modellerinde ivmelenme kuvvetinin en fazla 30 m boyunca $Q_{lak}=33$ kN/m kuvvetinde etki ettiği kabul edilmektedir. Etki eden kuvvet toplamda en fazla 1000 kN ‘a kadar olacak şekilde dikkate alınmaktadır. Köprü üzerinde hareket halindeki trenin fren yapması sonucunda oluşacak kuvvetler ise en fazla 300 m boyunca etki ettiği ve $Q_{lbk}=20$ kN/m yaylı kuvvet oluşturduğu kabul edilmektedir. Toplamda ise 6000 kN geçmeyecek olacak büyüklükte hesaplarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. İvmelenme ve fren kuvvetlerinin uygulanması.

UIC 776-1 (R) yönetmeliğinin “Bölüm D-Merkezkaç Kuvveti” bölümüne göre EN1991-2 yönetmeliğinin de ise Bölüm 6.5.1'e göre trenin viraj içinde hareketi sonucunda oluşan merkezci kuvvetin hesaplamaları yapılmaktadır. Yatay kurpun köprünün tamamını veya bir kısmının oluşturması durumlarına göre merkezci ivme sonucunda oluşan kuvvet, köprünün ray üst kotundan 1.8 m yüksekinde ve dışarıya doğru etki ettirilmektedir. Bunun yanı sıra hesap kolaylığı açısından merkezkaç kuvvetinin ray üzerinde oluşturacağı moment bir rayda çekme diğer rayda basınç oluşturacak şekilde bir kuvvet çiftine dönüştürülerek Şekil 2.5. görüldüğü gibi hesaba katılmaktadır [27]. Merkezkaç kuvvetinin karakteristik yük değeri,

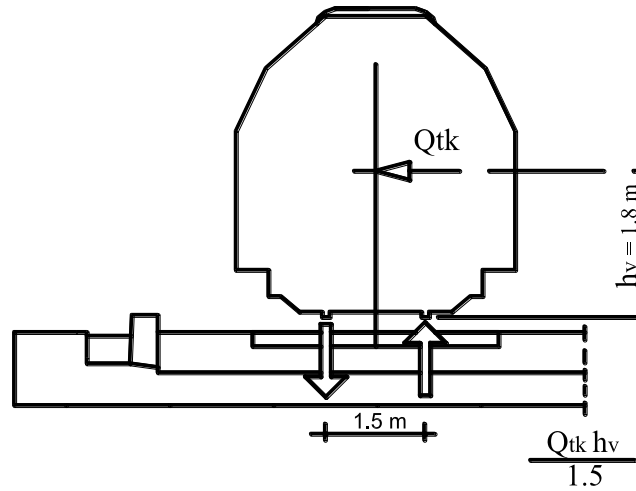
$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times Q_{vk}) \quad (2.1)$$

$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times q_{vk}) \quad (2.2)$$

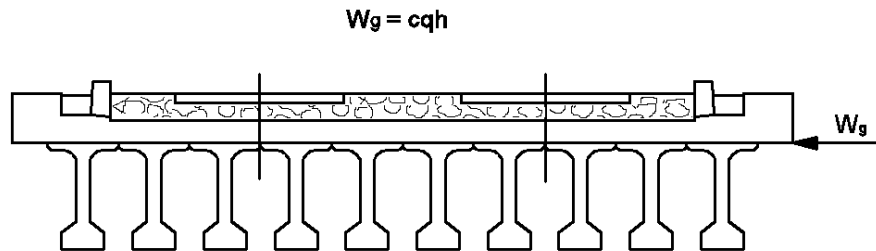
eşitlikleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada, V , maksimum hat hızını, Q_{vk} , tren yükünü, q_{vk} , tren yayılı yükünü, r , kurp yarıçapını, g , yer çekim ivmesini ve f ise yük azaltma katsayısını belirtmekte olup,

$$f = \left[1 - \frac{V - 120}{1000} \left(\frac{814}{V} + 1.75 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{2.88}{L_f}} \right) \right] \geq 0.35 \quad (2.3)$$

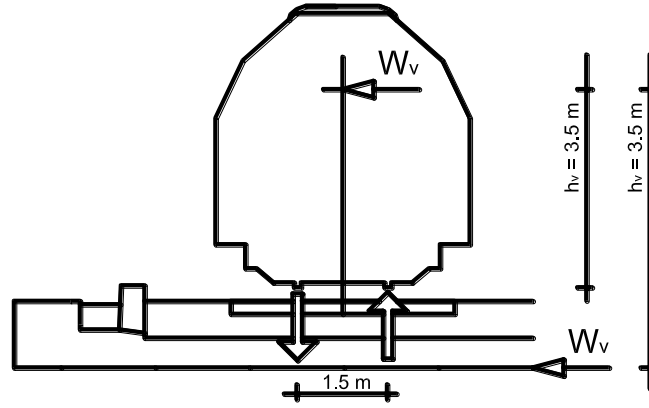
bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte L_f , kurp içinde kalan köprü uzunluğunu ifade etmektedir. LM 71 ve SW/0 yük modelleri için f , yük azaltma katsayısı 120-300 km/saat hız aralığı ve L_f 'nin 2.88 m' den büyük olması durumlarında denklem (2.5) yardımıyla hesaplanmaktadır. Hızın 300 km/saat' ten büyük olması halinde (2.5) eşitliğinde hız, 300 km/saat alınmaktadır. Diğer durumlarda ise yük azaltma katsayısı f , 1.00 alınmaktadır. İlaveten SW/2 ve "Yüksüz tren" yük modelleri için bu katsayısı 1.00 alınmaktadır.



Şekil 2.5. Merkezkaç kuvvetinin uygulanması.



Şekil 2.6. Köprü üzerine rüzgar yükünün etki ettirilmesi.



Şekil 2.7. Tren üzerine rüzgâr yükünün etki ettirilmesi

UIC 776-1-R yönetmeliğinin "K-Rüzgâr Yüğü" bölümünde rüzgârın trene etki etmesi sonucunda oluşabilecek kuvvetlerin nasıl hesaplanacağı belirtilmektedir. İklim şartlarının normal koşullarda olduğu ve köprü yüksekliği 20m'den büyük olmadığı durumlar göz önüne alındığında; köprüdeki yapı elemanlarına etki eden yük Şekil 2.5'de görüldüğü gibi köprü tabliye seviyesinin altından uygulanmaktadır. Rüzgâr yükü W_g olmak üzere,

$$W_g = c.q.h \quad (2.4)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır [24]. Burada q , dinamik rüzgâr basıncını, h , üstyapı yüksekliğini ve c ise rüzgâr yükünü hesaplamada kullanılan bir katsayıyı göstermekte olup,

$$B_k / h < 2 \rightarrow c = 2.5 - 0.50 \times B_k / h \quad (2.5)$$

$$B_k / h > 2 \rightarrow c = 1.6 - 0.05 \times B_k / h \quad (2.6)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada B_k , üstyapı genişliğini ifade etmektedir. Aynı zamanda ray-travers etkileşiminde ortaya çıkabilecek gerilmeleri hesaplamak amacıyla trene etkiyen rüzgâr yükü Şekil 2.6' da görüldüğü gibi dikkate alınmaktadır. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi ray kotunu 3.5m üstünden düzgün yayılı yük olarak sisteme etki ettiği kabul edilmektedir [27].

UIC 776-1 (R) yönetmeliğinin “E–Nosing” bölümüne göre, EN1991-2 yönetmeliğinde ise Bölüm 6.5.2' ye göre yanal çarpma sonucunda sistemde oluşabilecek kuvvetler hesaplanmaktadır [27-28]. Yük sisteme Şekil2.8 'de görüldüğü gibi etki etmektedir. Yanal çarpma tesiri sonucunda oluşan kuvvet Şekil2.8 'de görüldüğü gibi köprü eksenine dik etki ettirilip α artırma katsayısı ile çarpılarak hesaplanmaktadır. Ancak ϕ katsayısıyla çarpılması gerekmemektedir. Yanal çarpma sonucunda oluşan kuvvet 100 kN büyüklüğünde kuvvet oluşmaktadır. Bu kuvvet aligmanda ve kurpta köprü üzerine katar yüklerine ilave olarak etki ettirilmektedir [24].

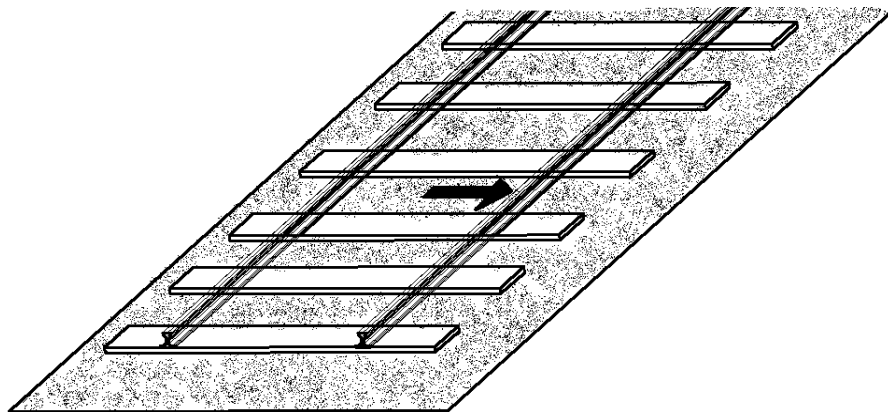
Düzgün sıcaklık dağılımı, engellenmemiş bir yapıda eleman boylarının değişmesine sebep olmaktadır. Isı değişim tesirleri UIC 776-1 (R) şartnamesi "Bölüm L-Isı Değişimlerinin Etkileri" bölümüne göre hesaplanmaktadır. Köprülerin imal edileceği güzergah kesimi için belirlenecek maksimum ve minimum sıcaklık değerlerine göre hesaplanacak maksimum sıcaklık farkı Δt_1 ,

$$\Delta t = 1.2 \times \Delta t_1 \quad (\text{çelik yapılar}) \quad (2.7)$$

$$\Delta t = 0.8 \times \Delta t_1 \quad (\text{betonarme yapılar}) \quad (2.8)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır.

Sürşarj etkisi, UIC 776-1 (R) yönetmeliğinin A bölümünde köprü üzerine etki eden sürşarj kuvvetinin hesaplamalarında bahsedilmektedir. Tren hareketi sonucunda oluşacak kuvvetlere benzer olarak köprü kenar ayak hesaplamalarında kullanılmak etki ettirilmektedir. Yükün sisteme uygulanmasında eşdeğer bir zemin tabakası olarak 1.70 m yüksekliğinde ve 1.8 t/m³ birim hacim ağırlığına bir tabaka şeklinde kabul yapılmaktadır [27].



Şekil 2.8. Yanal çarpma kuvvetlerinin ray üst seviyesinden dikkate alınması

2.1.3. Demiryolu köprüsü sismik yükleri

Köprü veya viyadüklerin deprem hesapları, Kıyı ve Liman yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliğinde verilen (DLH'2007) tasarım ivme spektrumu veya bu spektruma uyumlu yapay deprem ivme kayıtları üretilerek elde edilmektedir. Bu ivme spektrum eğrisi, köprü veya viyadüğün bulunduğu enlem ve boylam dikkate alınarak üç farklı deprem düzeyi ile altı farklı zemin grubu için bulunan ivme değeri yardımıyla elde edilmektedir [DLH-2007]. Söz konusu bu üç deprem seviyesi D1, D2 ve D3 olarak adlandırılmış olup, D1 seviyesi olan 50 yıllık süre zarfında olabilecek depremlerin tasarlanan depremleri aşma olasılığı %50 olarak ifade edilmektedir (dönüş periyodu 72 yıl). D2 seviyesi deprem durumunda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremlere göre tasarım yapılmaktadır (dönüş periyodu 475 yıl). D3 seviyesi deprem durumunda ise 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem durumları dikkate alınmaktadır (dönüş periyodu 2475 yıl). Bu deprem seviyelerine ait spektrum ivme değerlerinin elde edilmesi amacıyla S_s ve S_1 büyüklükleri kullanılmaktadır. 0.2 ve 1.0 s' lik doğal titreşim periyotlarını ifade eden spektral ivme değerlerini S_s ve S_1 ile gösterilmektedir. Üç deprem seviyesi için S_s ve S_1 değerleri yapının inşa edileceği enlem ve boylam kullanılarak DLH-2007 Ek-A' da B zemin sınıfı için verilen tablo yardımıyla belirlenmektedir. Diğer zemin sınıfları için spektral ivme değerleri,

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.9.a)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (2.9.b)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Burada F_a ve F_v parametrelerin değerleri ise DLH-2007 yönetmeliğinde sırası ile Tablo 1.1 ve 1.2' ye göre S_1 ve S_s büyüklükleri yardımıyla belirlenmektedir. Bölgeye ait deprem tasarım ivme spektrumları, S_{MS} ve S_{M1} değerleri kullanılarak,

$$S_{ae}(T) = 0.4S_{MS} + 0.6 \frac{S_{MS}}{T_o} T \quad (T_o \leq T) \quad (2.10.a)$$

$$S_{ae}(T) = S_{MS} \quad (T_o \leq T \leq T_s) \quad (2.10.b)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{M1}}{T} \quad (T_s \leq T \leq T_L) \quad (2.10.c)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{M1} \times T_L}{T^2} \quad (T_L \leq T) \quad (2.10.d)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikler kullanılarak elde edilen deprem tasarım spektrum eğrisi Şekil 2.9’ da görülmekte olup uzun periyod bölgesi geçiş için kullanılan eşik periyodu $T_L=12$ sn alınmaktadır. Tasarım spektrum ivme grafiğinin köşe periyodları T_o ve T_s ise

$$T_s = \frac{S_{M1}}{S_{MS}} \quad , \quad T_o = 0.2T_s \quad (2.11)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

Dinamik yüke eşdeğer statik zemin ve su basınçlarının hesabında göz önüne alınacak olan deprem ivmesi katsayıları, D1 ve D2 deprem seviyeleri için bulunan hesaplamalarda kullanılacak dizayn spektrumlarında $T=0$ s periyot değerine karşı gelen spektrum ivme büyüklüğü ($0.4S_{MS}$) yerçekimi ivmesine bölünmesi hesaplanabilmektedir. A_{10} ve A_{20} sırasıyla D1 ve D2 düzeylerine ait etkin yer ivmesi katsayılarını göstermek üzere yatay doğrultuda uygulanacak eşdeğer deprem ivme için kullanılacak katsayısı 1. düzeydeki depremler için

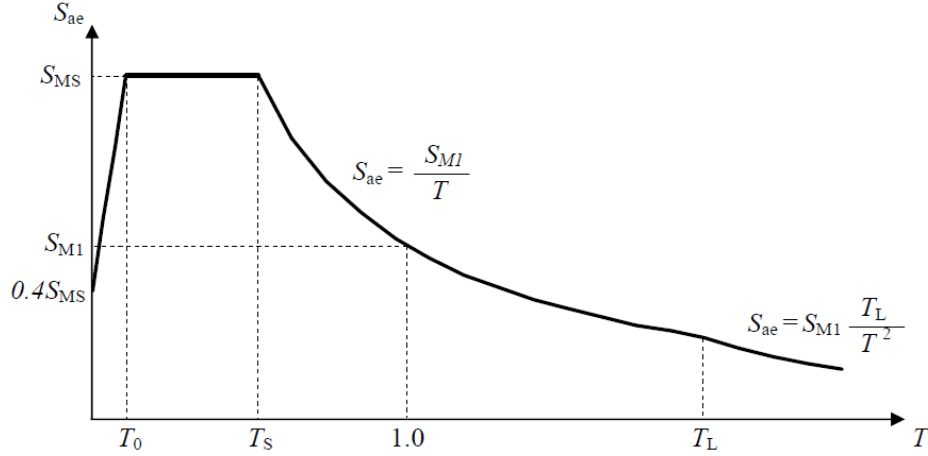
$$k_h = (2/3)A_{10} \quad (2.12)$$

eşitliği ile D2 deprem düzeyi için

$$k_h = A_{20} \quad A_{20} \leq 0.20 \quad (2.13.a)$$

$$k_h = (1/3)A_{20}^{(1/3)} \quad A_{20} > 0.20 \quad (2.13.b)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 2.9. DLH-2007' ye göre deprem spektrum eğrisi [58]

Zaman tanım alanında yapılacak analizlerde ise DLH-2007'de belirtilen özelliklere sahip üç adet ivme kaydı seçilmektedir. Bu ivme kayıtları yardımıyla yapılacak analizlerden elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve şekil değiştirmenin en elverişsiz değerleri tasarıma esas büyüklükler olarak alınmaktadır. Bununla birlikte, seçilecek yedi adet ivme kaydı kullanılarak elde edilen analizlerden bulunan büyüklüklerin ortalaması tasarıma esas olarak alınmaktadır. Tasarım yapılırken kullanılacak deprem ivme değerleri seçilirken; depremin büyüklüğü (manyitüd), tasarımı yapılan yapının deprem odak noktasına olan mesafesi ve depremin meydana geldiği mekanizmanın göz önüne alınarak en gayri müsait deprem durumu temsil eden değer seçilmelidir. Şekil 1.1' de verilen elastik davranış spektrum ivme kaydı ile uyumlu yapay ivme kayıtları üretilebilmektedir. Bu yapay ivme kayıtlarının genlik değerlerinin $\pm 0.05g$ ' den küçük olduğu kısımların süresi en az 10 s. olması gerekmektedir. $\pm 0.05g$ değerinden büyük olduğu genlik durumlarında ise hesaplamalar değişmektedir. İvme genliklerinin ilk ve son aşıldığı iki nokta arasındaki bölge ise köprünün birinci doğal titreşim periyodunun 5 ile çarpımından ve 15 s.' den küçük olmaması gerekmektedir. Aynı zamanda bütün deprem ivme değerleri kullanılarak %5 sönümlü elastik davranış spektrumlar grafiği hesaplanmaktadır. Ayrıca her periyoda karşılık gelen değerleri % 10' luk sapma değerinden küçük olması gerekmektedir.

2.2. Demiryolu Köprülerinin Sismik Tasarımı

DLH-2007' ye göre köprüler Özel, Normal ve Basit olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Bu köprü sınıfları için Dayanıma ve Şekil değiştirmeye göre sismik tasarım yöntemleri kullanılmaktadır [58].

2.2.1. Dayanıma Göre Tasarım (DGT) Yöntemleri

Dayanıma göre tasarım (DGT) yaklaşımında, sisteme etki eden yüke göre köprü elemanları boyutlandırılmaktadır. Dayanıma göre tasarım yönteminde elastik deprem kuvvetleri dikkate alınmaktadır. Ayrıca elastik ötesi sünük davranışların dikkate alınması gerekmektedir. Bu tasarım yöntemi eşdeğer deprem kuvvetlerinin azaltılması ile hesaba katılmaktadır. Yapı elemanlarının boyutlandırılması için doğrusal davranış yaptığı elastik sınırlar dikkate alınmaktadır.

DGT Yöntemleri, yönetmelikte belirtilen özel türdeki ve normal demiryolu köprülerinin birinci ve ikinci düzeyinde bir deprem yükü için en az seviyede hasar performans düzeyinin hesaplamalarında kullanılmaktadır. Yönetmelikte belirtilen diğer bir demiryolu köprüsü basit türdekilerde ise ikinci seviyede bir deprem etkimesi hali için Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH)'nin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Dayanıma göre tasarım; mod birleştirme yöntemi ile analiz, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analiz, azaltılmış deprem yükleri ile doğrusal elastik analiz yöntemlerinden oluşmaktadır.

2.2.2. Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım (ŞGT) Yöntemleri

Şekil değiştirmeye göre tasarım (ŞGT), köprü düzeylerdeki deprem kuvvetlerinin sistem elemanlarına etki etmesi sonucunda meydana gelen yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Bu yer değiştirmelerin sistem elemanlarında oluşturabileceği hasarların sayısal olarak belirlenmekte ve analizi yapılan elemanlar için hasar limitlerinin kabul edilebilir seviyelerde olup olmadığını kontrol etmektedir. Kabul edilebilir hasar seviyeleri, çeşitli deprem seviyelerindeki yapılar için tahmin edilen hedef performans seviyeleri ile örtüşecek biçimde tanımlanmaktadır. Eleman seviyesinde oluşması tahmin edilen deprem hasarları, büyük depremlerde çoğunlukla doğrusal davranış yapmadığı elastik sınırlar ötesinde davrandığı kabul edilmektedir. Bu deformasyonlar doğrusal olmayan şekil değiştirmelere veya bunlarla uyumlu deformasyonlara karşılık gelmektedir. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan performansa göre analiz yöntemin temeli ŞGT yöntemine dayanmaktadır. ŞGT Yöntemleri, demiryolu köprülerinin ikinci ve üçüncü seviyedeki depremlerde ortaya çıkan dinamik yüklerin etkisinde sistemin Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH) performans seviyesinde incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 2.1. Demiryolu köprüleri için çeşitli deprem seviyelerinde kullanılacak tasarım yöntemleri

Köprü'nün Sınıfı	(D1) Deprem Düzeyi	(D2) Deprem Düzeyi	(D3) Deprem Düzeyi
Özel	-	DGT	ŞGT
Normal	DGT	ŞGT	-
Basit	-	DGT	-

Şekil değiştirmeye göre tasarım; deprem etkisi altında lineer olmayan itme analizi yöntemi, artımsal mod birleştirme ve eşdeğer deprem yükü yöntemi ile itme analizi, zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan davranışla analiz yöntemlerinden oluşmaktadır.

ŞGT ve DGT yöntemleri kullanılarak tasarımı yapılan demiryolu köprülerinde esas alınacak performans düzeyleri 4 ana başlık altında tanımlanmaktadır. Performans seviyeleri deprem yükün etkisi ile yapıda oluşması beklenen hasarlara bağlı olarak saptanmaktadır. Kabul edilebilir hasar sınırları ise her bir yapı türü veya yapı elemanları için tek tek ve sayısal olarak belirlenmesi gerekmektedir.

- Minimum Hasar Performans Düzeyi (MH)

Demiryolu köprülerinde deprem tesiri ile yapıda ve yapı elemanlarında hasar durumunun oluşmaması veya deprem sonrası yapıda oluşan hasarın çok az olması durumu Minimum hasar performans düzeyini belirtmektedir. Depremin meydana gelmesinin ardından köprü kullanımdan herhangi bir aksama meydana gelmemektedir veya meydana gelen aksamalar birkaç gün içinde basit bir şekilde onarılacak seviyede kalmaktadır.

- Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH)

Bu performans seviyesinde, depremin meydana gelmesinin ardından köprü kullanımında aksama meydana gelmektedir. Ancak bu aksama kısa bir süre (birkaç gün veya hafta) aralığında giderilebilmektedir.

- İleri Hasar Performans Düzeyi (İH)

Deprem sonucunda demiryolu köprüsüne etki eden yükler; köprüde göçme meydana gelmeden hemen önce ağır ve ileri hasar durumunu oluşturabilir. Bu duruma ileri

hasar düzeyi denilmektedir. Bu durum sonucunda, demiryolu köprüsü uzun süre kullanılamayacak şekilde hasar almaktadır.

- Göçme Hasarı Durumu (GH)

Deprem hareketi sonucunda ortaya çıkan yüklerin demiryolu köprüsüne etki etmesi sonucunda göçme durumu gerçekleşir. Köprü işlevini yerine getiremez. Demiryolu köprülerinde hedeflenen performans seviyesinin belirlenmesi, yönetmelikte belirtilen deprem düzeyleri ve köprü sınıfına göre tayin edilmektedir. Tablo 2.2 'de demiryolu köprülerine ait hedef performans seviyeleri üç deprem seviyesi için verilmiştir.

Tablo 2.2. Yönetmelikte belirtilen deprem seviyelerinde hedeflenen hasar düzeyi.

Köprü Türleri	(D1) Deprem Düzeyi	(D2) Deprem Düzeyi	(D3) Deprem Düzeyi
Özel D. Köprüler	-	MH	KH
Normal D. Köprüler	MH	KH	(İH)
Basit D. Köprüler	(MH)	KH	(İH)

Tablo 2.2. 'de parantez içinde gösterilen hasar durumlarının kendiliğinden gerçekleştiği kabul edilmektedir. Normal ve basit köprüler için üçüncü seviye deprem etkisinde ileri seviyede hasar (İH) durumunun incelenmesine gerek yoktur. Ayrıca yönetmelikte basit olarak adlandırılan köprüler için birinci düzeyde deprem etkisinde minimum hasar (MH) durumunun incelenmesine gerek yoktur.

3. DEMİRYOLU KÖPRÜLERİNİN SİSMİK İZOLASYONU

Sismik izolasyon sistemlerinin kullanımı 1960'lı yıllarda ilk olarak binalar üzerinde, 1970'li yıllarda otoyol köprülerinde kullanılmaya başlanmıştır [16]. Yapı tasarımlarında kullanımı ise 1990'lı yıllarda yaygın hale gelmiştir. [17]. Sismik izolasyon sistemlerinin demiryolu köprülerine uygulaması diğer uygulamalara göre daha gecikmiştir. Bu durumun temel sebeplerinden birisi; uygulama sırasında karşılaşılan teknik zorluklardır. Demiryolu köprüleri, otoyol köprüleriyle kıyaslandığında yapı ve hesaplama bakımından bazı farklılıklar göstermektedir [18]. Bu farklılıklardan biri; demiryolu köprüsü üzerinde yer alan ray-travers ile köprü tabliyesi etkileşimidir. Bu iki yapı arasında bağıl yer değiştirmelerin sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sınırlandırma raylarda oluşacak aşırı gerilmeleri önlemenin amacı, trenin raydan çıkmasına engel olmak ve yolcu konforunu sağlamak içindir [15]. Bu bağıl yer değiştirmeleri sınırlandırmak için kütle ve rijitliği büyük olan tabliye ve kiriş ile köprü ayakları arasında özel kısıtlama cihazları kullanılır. Sismik bölgelerde inşa edilen demiryolu köprülerinde ise en çok etkilenen taşıyıcı kısımlar orta ve kenar ayaklar ile bunların temelleridir. Bu sebeple orta ve kenar ayaklar ile tabliye-kiriş taşıyıcı bölgeleri arasına sismik izolatörler yerleştirilmektedir.

Demiryolu köprülerinde dinamik kuvvetler, frenleme ve hızlanma etkileri gibi yatay yükler taşıyıcı sistemi zorlayan önemli kuvvetlerdir. Bu durum, raylarda meydana gelen gerilmelerin güvenli bir şekilde taşınabilmesini sağlamak işlemleri daha karışık bir hale getirmektedir. Bu dinamik kuvvetler ve deprem yükleri dikkate alındığında demiryolu köprülerinin hesaplamaları zorlaşmaktadır. Tasarım yapılırken dinamik yüklerden dolayı ortaya çıkacak hareketlerin engellenmesi veya deformasyon sebebiyle oluşan kuvvetlerin servis yüklerinin altında tutulması gerekmektedir. Aynı zamanda sismik hareket sırasında hakim olan kütleyi zemin hareketlerinin etkisinden kurtarmak için yeteri kadar yanıl esneklik sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle izolatörlü bir mesnet sisteminin hem servis hem de deprem yükleri altında yeteri kadar işlevini sağlaması gerekirken köprünün tasarım ömrü boyunca bu işlevini emniyet sınırları içerisinde gerçekleştirmesi gerekmektedir [15].

Genellikle, tasarım mühendisleri deprem hareketi sırasında meydana gelen kuvvetler üzerine odaklanmaktadır. Ancak demiryolu köprülerinin kullanımı esnasında deprem hareketinin gerçekleşmesi durumu genellikle göz ardı edilmektedir. Ayrıca deprem hareketi muhtemelen demiryolu köprüsünün kullanım ömrü boyunca meydana gelmemesi

durumu da olasıdır. Fakat bu durum göz önünde bulundurularak köprü tasarımı yapılırsa dayanıklılık problemi yaşanmaktadır [15].

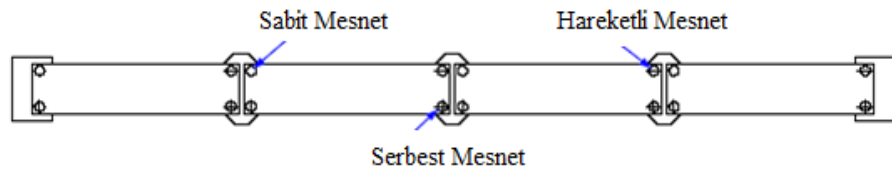
Bu cihazlar, kırılğan bir yapıya sahiptir ve bu kırılğanlığı kopma gücüne göre belirlenen mekanik tipte olabilirler veya oluşan iç kuvvetlerin sönümlenmesi aşırı basınçlı kapağın açılmasıyla yapıldığı hidrolik türde cihazlar olabilir. Düşük ve orta deprem olaylarının gerçekleştiği bölgelerde, frenleme sonucunda oluşan kuvvetlerin değeri bir deprem hareketi sonucunda ortaya çıkan değere çok yakın olabilmektedir. Bu nedenle köprünün kullanılması sonucunda ortaya çıkan durumlarla, deprem anına meydana gelen duruma geçişi sağlamak için ileri teknolojideki sistemlerin kullanılması gerekmektedir. Bir diğer olasılık olan yalnızca deprem anında devreye giren ve köprüye etki eden yükleri sönümleyen kuvvetleri kullanmaktadır. Bu bahsedilen geçişi sağlamak için hızı başvurulur ve genel olarak şok iletici cihazlar olarak adlandırılan Geçici Bağlantı Cihazları kullanılmaktadır. Isı değişimi sonucunda sistemde oluşan yer değiştirmeler veya diğer faktörler sonucunda sistemde oluşan yavaş hareketler karşısında, bu cihazlar meydana gelen yavaş hareketlere izin vermektedir. Ancak cihazların aktif olduğu hız aşıldığı anda sistem davranış değiştirerek rijit bir hal almaktadır. Isı ve zamanla meydana gelen hareketlerin hızı, deprem sonucunda oluşan hareketlerin hızından daha düşük olmaktadır. Bu sebeple, kullanım durumuyla deprem durumu arasındaki değişim riskli bir durum oluşturmamaktadır [15].

Enerji sönümlemesini sağlayabilen birçok cihazın vardır [20]. Bu cihazlardan sadece bazıları demiryolu köprülerinin tasarımında kullanılmaya uygundur. Bu cihazlar Çelik Histeretik Elastomer Mesnet (ÇHEM), Kurşun Çekirdekli Kauçuk Elastomer Mesnet (KÇKEM), Hidrolik Viskoz Sönümleyici Mesnet (HVSM) olmak üzere 3 tip olarak yer almaktadır. Bu cihazlar arasında seçim yapılırken maliyet ve şartname koşulları dikkate alınmaktadır.

Sismik izolasyon sistemlerinin diğer özelliği olan merkezleme yeteneği ancak son yıllarda fark edilmiştir. Elastomer mesnetlerin hesaplamaları yapılırken temel özellik olarak dikkate alınmaya başlamıştır [22]. Sonradan bu özelliğin önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun gecikmesi; tarihte ilk elastomer mesnetler plaka ve kauçuk malzemenin katmanlar halinde kullanılması ile yapılmıştır.. Kayma kuvveti sonucunda oluşan deformasyon, yük kaldırıldığında eski haline dönmekteydi. Bu durum kauçuk mesnetlerin eski haline dönmesinin çabuk olmasından kaynaklanmaktaydı. Mesnedin tasarım haline geri dönmesi olayına esnek geri çağırım yada merkezleme özelliği

denilmektedir. Merkezleme özelliği olmayan diğer türdeki elastomer mesnetlerin piyasaya girmesiyle beraber bu gerekli özelliğin mevcut olması önemli bir problem olmaya başlamıştır. Bu elastomer mesnetlere örnek olarak; merkezinde kurşun çekirdek bulunan kauçuk mesnetler, çelik histeretik parçalı kayar mesnetler, sürtünme esaslı cihazlar, vs. gibi mesnetler türleri verilebilir [21]. Bu özellikler ilk defa 1991 yılında AASHTO yönetmeliğinin Sismik İzolasyon Tasarımı Rehber Şartnamesi bölümünde standartlaştırılmıştır [22].

Elastomer mesnetlerin enerji sönmleme kapasitesi ve geri çağırım özelliği iki farklı özellikler olduğu ve değişen koşullara göre önemlerinin değiştiği bilinmektedir. Elastomer mesnetlerin merkezleme yeteneğinin değerlendirilmesi; sisteme etki eden güçlerin karşılaştırılarak yapılması gerektiği savunulmaktadır. Ancak teorik olarak yanlış bir kabuldür. Temelde, elastomer mesnetlerin karşılaştırılması döngüsel olarak etki eden deprem kuvvetinin elastik davranış yaparak sönmlemesi ancak plastik şekil değiştirmeye ulaşmadan sönmlemesi arasında yapılmalıdır. İzolatör sisteminin merkezleme özelliği, yüksek mertebede simetrik olmayan hareketlerle ayrılan depremler ve yapının deprem odak noktasına olan yakın olup olmaması bakımından önem arz etmektedir. Tekrar eski haline dönme ihtiyacının amacı, deprem hareket sonunda mesnette oluşan kalıcı yer değiştirmeleri sınırlamak değildir. Onun yerine deprem olayının gerçekleştiği anda yığışımlı şekil değiştirmelerin engellenmesi ve aynı düzeyde yer değiştirme yapmamak gibi elastomer mesnetlerin merkezleme problemlerin ortaya çıkmasını önlemektir. Elastomer mesnetlerde tekrar eski haline dönme şartı, mesnetler tarafından geri çevrilebilir biçimde elastik, potansiyel, vs. olarak depolanan enerji ile mesnetler tarafından sönmmlenen enerji [23] arasındaki karşılaştırmalar göre belirlenmektedir [15].



Şekil 3.1. İzostatik köprülerde var olan genel mesnet modeli.

İnşaat yapım yöntemi bir diğer incelenmesi gereken konudur. Hiperstatik olmayan köprüler, basit mesnetli kirişler olduğu için hizmet durumunda karşılaşılan frenleme ve hızlanma etkilerini köprü ayakları arasında rahatlıkla dağıtma kapasitesine sahiptir. Bu

nedenle diğer köprü sistemlerine göre avantajlara sağlamaktadır. Tipik izostatik kirişlerden oluşan bir köprünün mesnetlenme modeli Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.

Deprem performansı yönünden incelendiğinde bu tasarım yaklaşımı birçok problem barındırmaktadır. Bu problemlerden en dikkat edilmesi gereken köprü döşemelerinin eş zamanlı olarak hareket etmedikleri sorunudur. Bu durum beraberinde uzunlamasına yönde çok yüksek deplasmanlar meydana gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca farklı yükseklikte ayaklara sahip olan köprülerde, uzunlamasına yönde çok yüksek deplasmanların meydana gelmesi bitişik döşemeler arasında çarpışma riski oluşturmaktadır. Bu problemlerden kurtulmak için, göreceli olarak meydana gelen hareketleri belirli sınırlarda tutan veya tamamen durduran şok-iletici cihazların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca enine doğrultuda meydana gelen yer değiştirmeler de eş-zamanlı değildir ve tabliyelerin çarpışma riskini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum genellikle, boyuna doğrultudaki hareketlere ilaveten eni doğrultudaki meydana gelen dönüşlü hareketlerin meydana gelmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu problemi engellemek için köprü elemanlarının birleşim yerlerine iki adet şok-iletici cihaz yerleştirmek gerekmektedir.

Yapılar, geçici tutucular sayesinde hizmet koşullarında izostatik ve sismik atak sırasında hiperstatik olacak şekilde tasarlanır. Bu tasarım yöntemi ile daha yüksek yapısal karışıklık ve daha yüksek maliyetli imalat yapmak zorunda kalınmaktadır. Hiperstatik yapısal çözüm ve devamlı çok-açıklı tabliyenin en uygun tasarım şekli olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Servis yükleri her zaman daha fazla irdelenmelidir ve tasarım yapılırken bu yüklere daha çok dikkat edilmesi gerekmektedir [15].

3.1.Sismik İzolatörlerin Temel Tasarım Prensibi

Sismik tasarım anlayışını basit bir şekilde anlatmak için; Enerjinin korunumu kuralı' na [12] göre

$$E_i = E_s + E_d \quad (3.1)$$

enerji denklemi temel alınmıştır. Burada E_i enerji girdisini (deprem esnasında yapıya aktarılan enerji), E_s yapı elemanları tarafından depolanan enerjiyi, E_d ise yapının mevcut kapasitesi veya sismik izolatörler aracılığıyla dağıtılan enerjiyi ifade etmektedir.

Yapılara, dışarıdan gelen dinamik etkilerden oluşacak kuvvetleri güvenli bir şekilde taşımak için; yapı elemanlarının rijitliğinden faydalanılarak tasarlanır (elastik sınırlar içerisinde aynı kalacağını kabul ederek), bu tasarım felsefesi ile yalnızca E_s enerjisini kullanarak tasarlanabilir. Ancak, dinamik etkiler tarafından yapıya iletilen enerji yapının elastik sınırlarda sahip olduğu enerji kapasitesini aştığı takdirde, yapının tamamında veya yapı elemanlarının bazıları göçmektedir veya hasar görmektedir. Yapı sistemi böyle bir kuvvete maruz kaldığı durumlarda; sistem, gelen enerjiyi sönmüleyebilmek için sistemde var olan E_d enerji kapasitesini kullanarak enerji eşitliğini sağlamaya çalışmaktadır. Uzun yıllardan beri ve halen günümüzde de, yapıların E_d enerji kapasitesi kullanılarak tasarım yapılmaktadır. Bu tasarım şekliyle, yapı elemanları elastik sınırlarının ötesinde deformasyona maruz kalarak, yapı elemanlarının süneklik özelliği kullanılır ve bu şekilde sisteme gelen enerjinin taşınması amaçlanmaktadır. Teorik olarak yapının süneklik kapasitesini kullanarak enerjinin sönmülenmesini amaçlamak, uygulamada sorunlar oluşmasına neden olmaktadır. Yapının elastik limitin ötesinde deformasyon yapması, yapının kendi sahip olduğu enerji kapasitesini kullanarak gelen enerjiyi dengelemesi anlamına gelmektedir. Bu sönmü yaparken yapıda plastik mafsallar oluşur ve gelen enerji bu şekilde absorbe edilir. Sistemin güvenli bir şekilde gelen enerjiyi taşıması ve işlevine devam edebilmesi için E_d enerji kapasitesinin kullanılması gerekir. Sistemdeki E_d enerji kapasitesinin gerekli olduğu zaman önemli ölçüde artırma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. E_d enerji taşıma kapasitesini artırmak amacı ile hesaplar neticesinde önceden tespit edilen yerlere enerji sönmüleme cihazları yerleştirilmektedir. Bu yöntemle bütün yapının davranışını kontrol altına almak mümkün olmaktadır ve bu şekilde sistemin güvenliği sağlanmaktadır. Sistemin E_s ve E_d enerji taşıma kapasiteleri kullanılarak, yapıya giren enerji dengelenemiyorsa ya da ekonomik olarak uygun değil ise o zamanda sisteme giren enerji E_i 'nin enerji taşıma değerini azaltmak gerekmektedir. Bu hesaplama yöntemi kullanılarak sismik izolatörlerden yararlanılmaktadır. Etkin olan yapısal kütlelerin temel ile olan etkileşiminin özel cihazlarla azaltılmasını gerektirmektedir.

Köprü tasarlanırken, enerji denge denklemindeki tüm terimlere başvuracak bir şekilde hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Ekonomik ve işlevsel tasarım için Enerji Sönmüleme ve Sismik İzolasyon'un birlikte kullanıldığı sistemler tasarlanmaktadır. Sismik İzolasyon ve Enerji Sönmüleme, deprem bölgelerinde mevcut olan bitişik nizam yapıları,

aynı seviyede olan köprü tabliyelerinin yer değiştirme yaparak birbirlerine çarpmasını önlemektedir. Bu tür yapılarda mühendislerinin kullandığı en ekonomik ve etkili çözüm yöntemidir. Deprem izolasyon sistemlerinin kullanılabileceği yapı sistemleri üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalar genellikle sismik izolatörlerin otoyol ve demiryolu köprülerinde nasıl kullanılması gerektiği üzerine yapılmaktadır [13-14]. Köprülerin sismik izolasyonu genellikle elastomer mesnetlerin kullanımı ile yapılmaktadır.

Sismik izolatörler dört ana özelliğe sahip olmak zorundadır. Bunlar;

1. Dinamik ve sismik yükler sonucunda sistemde meydana gelen düşey doğrultudaki yer değiştirmelerden dolayı oluşan iç tesirleri emniyetli bir şekilde taşıması gerekmektedir.
2. Sisteme etki eden yüklerin azaltılması durumunda sistemin performansı artmaktadır. Yapıya yanal yönde belirli bir esnekli verilerek sistem kapasitesi artırılmaktadır. Sistemin çalışma prensibi yapıda mevcut olan en büyük ağırlıklardan biri olan üst yapı kütlelerini zeminden gelebilecek yüklere karşı ayırmaktır.
3. Dinamik etkiler sonucunda sistemde meydana gelen yer değiştirmeler sonucunda yapı elemanlarında iç tesirler oluşturmaktadır. Oluşan bu kuvvetlerin etkisini ve değerini azaltmak için yapı elemanlarında meydana gelen yer değiştirmeleri kısıtlayacak şekilde izolatörler kullanılmalıdır.
4. Çevrimsel dinamik yükler sonucunda sismik izolatörlerde meydana gelen yığışimli kuvvet- şekil değiştirme değerleri görülmektedir [15].

3.2. Demiryolu Köprülerinde Kullanılan İzolatör Tipleri

Yapı elemanlarının veya yapının tamamının enerji taşıma kapasitesini artırmak tasarım yaklaşımlarından biridir. Ancak sismik yalıtım kullanarak tasarım yapmak yapının dinamik etkilere karşı gösterdiği tepkiyi azaltma prensibine dayanmaktadır. Bu tasarım yönteminin düzgün ve doğru bir şekilde uygulanması, yapıların büyük depremler meydana geldiğinde oluşan kuvvetleri taşıyabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu işlevini yerine getirirken elastik şekil değiştirme sınırları içerisinde yapabilmektedir [30]. Sismik izolasyon sistemlerinin kullanılmasındaki temel amaç, tasarımcının maliyeti düşük yapı

tasarımları kullanarak orta ve büyük deprem ivmelerinde, yapının taşıyıcı elemanlarında ortaya çıkabilecek hasarın sınırlandırmasını sağlamaktadır [31].

Sismik izolasyon sistemleri basit bir çalışma prensibine dayanmaktadır. Köprülerde en büyük kütleyle sahip eleman tabliyelerdir. Tabliye ve köprü ayakları arasına yerleştirilen düşük yatay rijitliğe sahip cihazlar, deprem sonucunda meydana gelen yatay kuvvetlerden sistemi ayrı çalıştırarak etkin kütleli ayırmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, uygulandığı yapıya; ankastre mesnet kullanılarak tasarlanan sistemin frekansından ve zeminin sahip olduğu hakim frekanslardan çok daha küçük değerlerde asal frekans vermektedir. Sismik izolasyon kullanılarak tasarlanan yapılarda, birinci titreşim modu etkin olduğu esnada yer değiştirmeler yalnızca yapıda kullanılan sismik yalıtım cihazlarında meydana gelmektedir.

Üstyapıyı oluşturan yapı elemanlarının rijitliklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Sismik izolasyon sistemleri, deprem sonucunda ortaya çıkan enerjiyi sönümlemekten ziyade yapının dinamik özellikleri aracılığı ile etki etme şeklini değiştirmektedir. Bu durum sönüm özelliği ile değişmemektedir. İzolasyon sistemi ile donatılan bir yapının sahip olduğu sönüm oranı önem arz etmektedir. İzolasyon sistemi ile donatılan yapının sönüm değeri, rezonans durumunun meydana gelmesini önlemeye yardımcı olmaktadır [30].

3.2.1. Kauçuk Malzeme ile Tasarlanmış Sismik İzolatörler

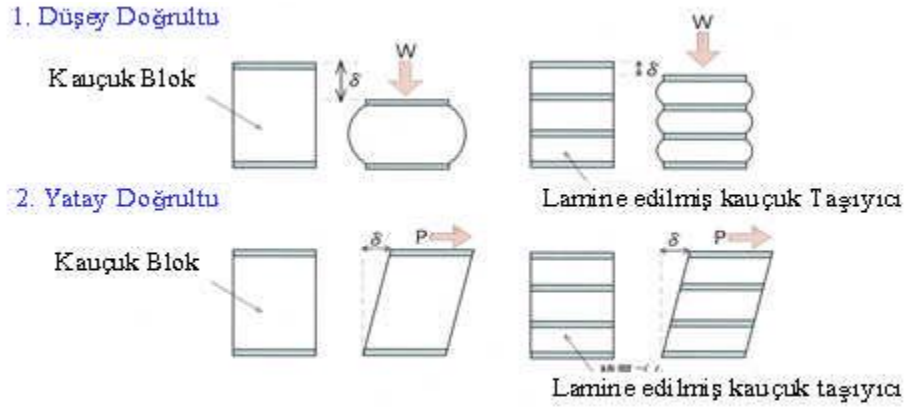
Kauçuk esaslı elastomer mesnet kullanımı yapı sistemlerini deprem hareketi sonucunda ortaya çıkan yıkıcı kuvvetlerden korumayı amaçlamaktadır. Bu çözüm yöntemi hem ekonomik hem de basittir. Bu cihazlar, yerleştirildikleri yapı elemanının rijitliği kadar çektiği deprem kuvvetini absorbe etmesi suretiyle sistemin en fazla kütleyle sahip üst kısmını dinamik etkilerden korunmasını sağlamaktadır. Sönümlemek, mevcut bir kuvveti absorbe etmek, azaltmak anlamı taşımaktadır. Bu sistem otomobillerde mevcut olan süspansiyon sistemine benzetilebilir. Otomobilin amortisörleri, engebeli yollardan dolayı oluşan sarsıntıları sönümleyerek araç içindeki kişilere iletmemektedir. Benzer şekilde kauçuk izolatörler, köprüye gelen deprem sarsıntılarını sönümleyerek üst yapıya etki eden yükleri en az seviyeye indirmektedir. Bu çalışma prensibi ile köprü döşemesinin zemin ile olan irtibatı kesilmiş olur [33-37].



Şekil 3.2. Kauçuk esaslı sismik izolatör ve laboratuvar ortamında yük deneyi

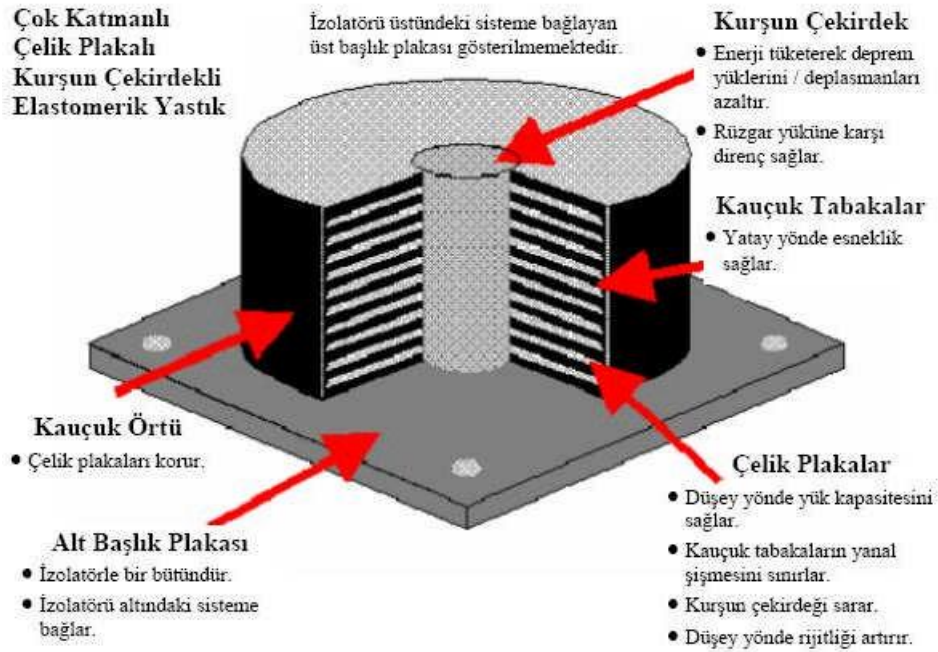
İzolatörde kullanılan kauçuğun malzemenin özelliği ve normal eksenindeki alanı değişmedikçe, mesnetteki kauçuk tabakanın toplam kalınlığı azaltıldıkça; düşey yönde taşıdığı yük artmaktadır. Kauçuk tabaka sayısı arttıkça, yatay ötelenme ve dönme hareketlerine karşı rijitlik azalmaktadır. Normal doğrultudaki basınç altında kauçuk tabakalar, dışa doğru şekil değiştirme yapmaktadır. Düşey ve yatay yükler etkisi sonucunda elastomer mesnetler şekil değiştirme yapmaktadır. Bu yükler kaldırıldığında elastomer mesnet ilk konumuna dönmektedir. Kauçuk tabakalar arasına yerleştirilen çelik plakalar, düşey doğrultudaki yay rijitliğini artırmaktadır. Yüksek düşey yay rijitliği, köprünün üst yapı elemanlarının ağırlığını taşıyabilmesi gerekmektedir. Ayrıca düşey rijitlik kauçuk tabakaların eksenel yükler altında Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi enine yönde şekil değiştirmeyi engellemek için gerekmektedir. Düşey doğrultuda elastomer mesnedin karakteristiğini değiştiren çelik katmanlar, mesnedin enine doğrultudaki hareketini çok az etki etmektedir. Kauçuk elastomer mesnet, imal edildiği boyutlara göre 450 ton büyüklüğünde yük taşıyabilir ve imal edildiği boyutlara göre 1 metre civarında yatay yer değiştirme yapabilme özelliğine sahiptir. Dairesel ya da dikdörtgen şeklinde üretilmektedir. Daire şeklindeki elastomer mesnetlerin çapı 300-1000 mm ölçülerinde olabilmektedir. Bir kauçuk malzemeli elastomer mesnedin kalınlığı 100-450 mm arasında değişmektedir. Hesaplamalar sonucunda farklı kalınlık ve çapta mense çıkarsa üretilme imkânları vardır. Sıcaklığı düşük veya yüksek olması durumunda, tasarım performanslarında herhangi bir değişim oluşmamaktadır. Elastomer mesnedin yaklaşık kullanım süresi 50 yıldan daha fazladır. Mesnetler laboratuvarlarda eskime deneyine tabi tutulmaktadır. Deneyler öncesinde yapılan ölçümlerle deneyler sonucunda yapılan ölçümler karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda elastomer mesnedin uygunluğuna karar verilmektedir. Elastomer mesnedin sahada uygulaması basittir. Teorik olarak yapılan

kabuller ve hesaplamalar ile uygulamada karşılaşılan durumlar arasında fark yoktur. Dizayn edildiği şekilde çalıştığından güvenilir ve emniyetlidir. Ayrıca kullanım ömrü boyunca elastomer mesnet elemanlarının tamir edilmesine gerek yoktur. Deprem meydana gelmesinden sonrası hasar gören elastomer mesnetler yenileri ile çok pratik ve hızlı bir şekilde değiştirilebilmektedir [33-37].



Şekil 3.3. Lamine edilmiş kauçuk taşıyıcının prensibi

Kauçuk esaslı sismik izolatör tiplerinden biri olan çelik levhalar ile kauçuğun birleştirilmesi ile elde edilmiş kauçuk taşıyıcının yapısı; bir tabaka ince kauçuk, bir tabaka çelik diziliminde yerleştirilmekte, tabakalar birbirine özel işlemlerle yapıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. İmalat şeklinden dolayı tabakalanmış kauçuk izolatör de denilmektedir. Bazı mesnetler rijitliği artırmak, kayma rijitliğini artırmak amacıyla “kurşun çekirdekli” olarak üretilmektedir [33-37]. Kauçuk yastığın ortasında genelde kurşun malzemeden bir çekirdek ilavesi yapılmaktadır. Bunlara da “Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (Lead Rubber Isolator)” denilmektedir. Şekil3.4. de kurşun çekirdekli elastomer mesnedin detayları görülmektedir. Kurşun çekirdekli izolatörler, diğer kauçuk izolatörlerin yapısal özelliklerine benzer olarak; tabakalar halinde bulunan dairesel şeklindeki kauçuk ve çelik plakalardan imal edilmiş izolatörlerdir. İnce kauçuk tabakalar ile çelik plakaların sıcak presleme işlemi ile yapıştırılmasıyla imal edilmektedir. Bu izolatörlerin enerji sönümleme kapasitesini artırmak amacıyla mesnedin merkezine kurşun çekirdek yerleştirilmektedir [32].



Şekil 3.4. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör

Kauçuk izolatörler, yapıya gelen dinamik yükleri sönümleyerek, yapının salınım periyodu arttırmaktadır. Bir yapının etkin salınım periyodu 0.1 ile 1 saniyelik periyot aralığında değişmektedir. Kauçuk izolatörlerin kullanılmasıyla yapının normal salınım periyodu, 2-3 saniyelik periyotlara kadar uzamaktadır. İzolatör mesnedin yapı tasarımında kullanımına, mimarî ve statik projelendirme aşamalarından önce karar verilmesi gerekmektedir. Sismik izolatörler, hazırda bulunan bir projeye uygulanma özelliği taşımaz. Ancak izolatör uygulanacak mevcut sistemin tüm statik hesaplamalarının tekrar yapılması gerekmektedir. Yapılan hesaplar neticesin sisteme izolatörün uygulanıp uygulanmayacağına karar verilmelidir. Yapıda hangi tip sismik izolatörün kullanılacağına ise gerektiğinde imalatçı firmaların da görüşü alınmak suretiyle, proje işlemlerine başlamadan karar verilmesi gerekmektedir [33-37].

Diğer bir kauçuk esaslı sismik izolatör tipi ise Şekil 3.5. de görüldüğü gibi Kayıcı Tabakalı Kauçuk İzolatör (Sliding Laminated Rubber Isolator) sistemidir. LRI, CLB türü izolatör sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Küçük genlikli yatay sarsıntılarda SLR tipi mesnetler; yapısında bulunan kauçuk tabakaların şekil değiştirmesi ile uygulandığı sistemin sönüm kapasitesini artırmaktadır. Daha büyük etkilerde ise, plakanın kayması ile üzerindeki yapıda meydana gelen salınım hareketini kontrol altına alınmaya çalışmaktadır [32].



Şekil 3.5. Kayıcı Tabakalı Kauçuk İzolatör (SLR)

3.2.2. Sürtünme Esaslı Sismik İzolatörler

Sürtünme esaslı sismik izolatör türlerinden biri olan Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi (Cross Linear Bearing) (CLB), Şekil 3.6 de görüldüğü gibi birbirine dik olarak konumlandırılmış iki adet doğrusal ray bulunmaktadır. Bu raylara monte edilen yine iki adet düşük sürtünmeli doğrusal hareket eden bloklar bulunmaktadır. CLB mekanizması üzerinde yer alan tampon bloklar çok düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir ve çok az kesme kuvveti taşımaktadır. Bu nedenle sistem çok düşük büyükteki yanıl etkilerde yerdeğıştirme hareketi yapabilmektedir. CLB türü izolatörler; basınç kuvvetlerinin yanı sıra çekme kuvvetlerine karşı da çalışabilmektedir. CLB tipi izolatörler de kurşun çekirdekli izolatörler ve diğler sönümleyicilerle birlikte kullanılabilirlerdir [32].

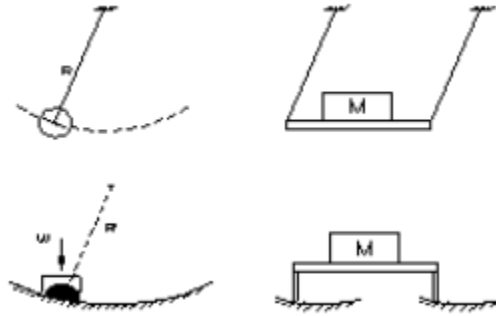


Şekil 3.6. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi (CLB)



Şekil 3.7. Sürtünme esaslı sismik izolatörler

Sürtünme esaslı mesnetler özel metaller kullanılarak iç bükey küresel yüzey üzerinde kayabilen elemanlardan imal edilmektedir (Şekil 3.7). Bu elemanlar sayesinde, yapıya gelen yatay yöndeki kuvvetleri düşey yönde yerdeğiştirme yaparak sönümlenmektedir. Böylece dinamik etkisi %80 oranında azalmaktadır. Yapıya gelen kuvvetleri içbükey kısımda sarkaç hareketine dönüştürerek sönümleme mantığına dayanmaktadır. Şekil 3.8.' de sürtünme esaslı sismik izolatörün ağırlık altındaki çalışma prensibi basitçe ifade edilmektedir [33-37].



Şekil 3.8. Sürtünme esaslı izolatörün, sarkaç prensibine dayanan çalışma sistemi

Dinamik yüklerin etkisi ile sürtünme esaslı izolatörün çalışma prensibinden dolayı yapıda belirli yükselmeler gerçekleşecektir. Dış yükü çok fazla olan yapılarda sarkaç altındaki plakanın yırtılma riski ortaya çıkmaktadır, bu sebep nedeni ile kauçuk esaslı izolatörlerin tercih edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Ancak yapıda kullanılacak izolatörün projelendirmesi düzgün bir şekilde yapılırsa bu sorun ortadan kalmaktadır.

Çünkü tüm izolatörler, üretici firmalar tarafından projelendirme esaslarına ve siparişe göre üretilmektedir [33-37].

Bazı durumlarda sürtünme esaslı izolatör elemanları, kauçuk izolatörler ile birlikte kullanılabilir. Bu sistemlere karma sistem adı verilmektedir. Karma sistem, statik gereksinim ve tercihler, kauçuğun sahip olduğu dezavantajları ortadan kaldırılması, maliyeti düşürmesi, performansı yükseltilmesi nedeni ile tercih edilmektedir [33-37].



Şekil 3.9. Sürtünme esaslı izolatörün açık hâli



Şekil 3.10. Bir kolonun ortasında sürtünme esaslı sismik izolatör uygulaması

Diğer bir sürtünme esaslı sismik izolatör tipi ise Çelik Bilyeli İzolatördür (Steel Ball Bearings). Çelik bilyalı izolatör, Şekil 3.11’de görüldüğü üzere düşük bir sürtünme katsayısı vermek için iki adet çelik levha arasında sıkıştırılmış çok sayıdaki bilyelerden oluşmaktadır. Bilyelerin sayısı, yapının düşey yüklerini yeterli düzeyde karşılayacak şekilde belirlenmektedir. Bu izolatörler genellikle kurşun çekirdekli izolatörler (LRI) ve diğer sönümleyicilerle bir arada kullanılmaktadır [32].



Şekil 3.11. Çelik Bilyalı İzolatör (SBB)

3.2.3. Sönümleyici Cihazlar (Damper Sistemler)

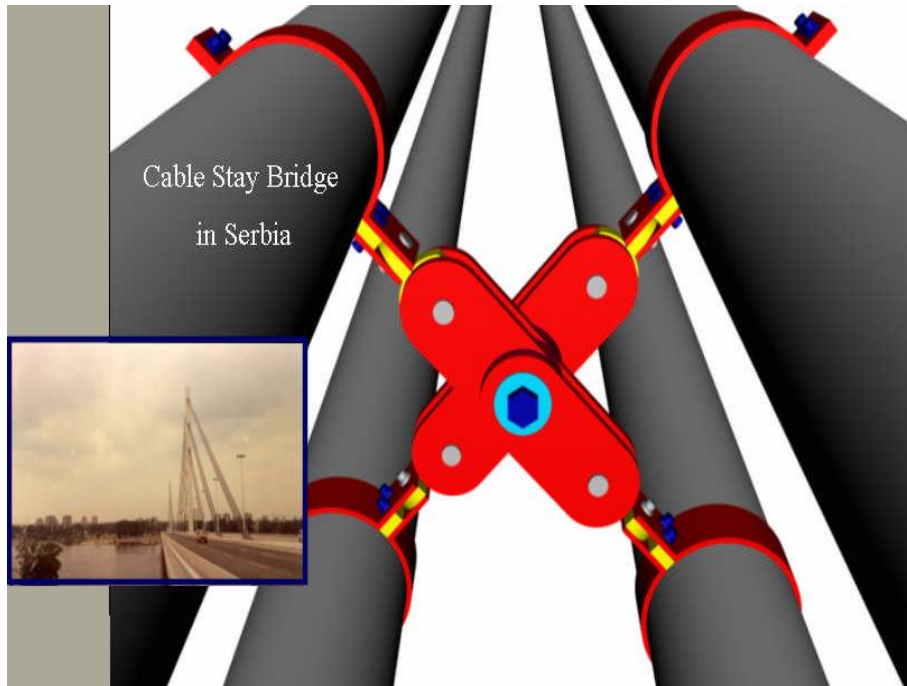
Sönümleyici cihazlar; deprem, sert rüzgârlar, makinelerin, trafiğin ve benzeri dinamik kuvvetlerin yapılarda oluşturacağı ilave etkilerin kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Sismik yalıtım sistemlerinde enerji sönümleme kapasitesinin artması amacı ile kullanılan cihazlardır. Sistemde kullanılan çelik malzeme plastik deformasyon yaparak dinamik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürmektedir. Yapıların deprem ve rüzgâr gibi yatay etkilere karşı mukavemetini artırmaktadır. Yapılarının dinamik enerji sönümleme kapasitesi artırmaktadır. Elastomer mesnetlerle birlikte kullanılarak sistemin dinamik etkilere karşı dayanımını artırmak gibi birçok avantajı mevcuttur [33-37].



Şekil 3.12. Hidrolik sönümleme cihazı

Yapıda oluşan yatay deformasyonları minimuma indirmek ve deprem kuvvetlerine karşı enerji sönümleme kapasitesini artırmak amaçlı kullanılan bu sistem, yatay rijitliği artırması için kiriş ortalarına yerleştirilmektedir. Sistemin çalışması akışkan sıvıların sıkışarak enerjiyi sönümlemesi prensibine dayanmaktadır. Cihazlar yatay kuvvetleri sönümlediklerinden, rijit bağlantılardan daha kullanışlı ve elverişlidirler [33-37].

Damper sistemler geniş bir model yelpazesi olması nedeni ile tüm yapılarda kullanılabilmektedir. Uygulamada projelendirme özelliklerini gösterirler ve pahalı olmayan cihazlardır. Kolay ve çabuk montaj edilmektedir. Uygulandığı sistemde çalışıp çalışmadığı kontrol edilebilmektedir ve ihtiyaçlar doğrultusunda yeniden ayarlanabilmektedir. Sistemde dış kuvvetlerin etkisi ile oluşan büyük deformasyonlarda çalışabilme özelliğini sahiptir. Sönümlendirici cihazlar; yüksek deprem performansı istenen tüm yapılarda kullanılabilir. Yüksek yapılar, köprüler gibi büyük dinamik kuvvetlere maruz kalan sistemlerde elastomer mesnetlerle birlikte kullanılabilir.

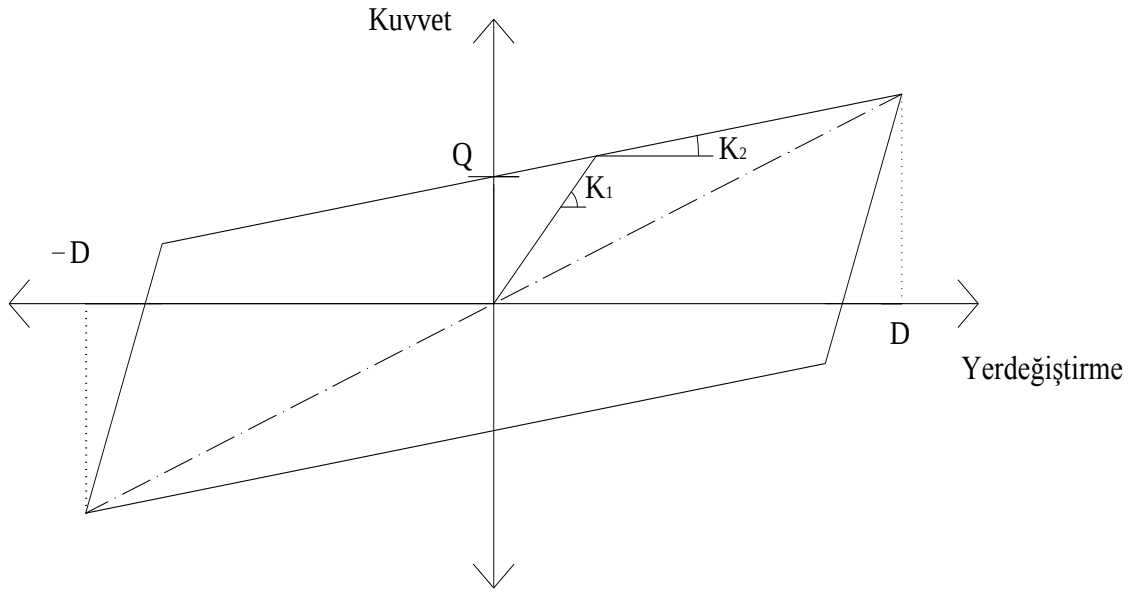


Şekil 3.13. Sırbistan’ da köprü çelik kablolarında damper sistem uygulaması

3.3. Elastomer Mesnet Tasarımı

Köprülerde kullanılan elastomer mesnetlerde akma dayanımı Q , elastik rijitlik K_1 ve akma sonrası rijitlik K_2 ile ifade edilen doğrusal iki parçalı histerik çevrimin oluşturduğu alanı temsil eden doğrular ile modellenmektedir. Histerik çevrim; kurşun

çekirdekli kauçuk mesnetlerde kurşunun akma gerilmesi ile alanından, sürtünmeli sarkaç sistemlerde ise kayıcı yüzeyin sürtünme katsayısı ile taşınan yükten faydalanarak oluşturulmaktadır. Şekil 3.14’de kauçuk mesnedin çevrimsel davranışı gösterilmiştir. Diyagramda en büyük noktaları birleştiren doğrunun eğimi, etkili rijitliği (Keff) vermektedir [53].



Şekil 3.14. Kauçuk mesnet histerik çevrimi

Elastomer mesnetler kauçuk ve çelik katmanlardan oluşması nedeniyle, görece olarak yüksek eksenel rijitlik (K_D) ve düşük kayma rijitliğine (K_Y) sahiptir, Denklem 3.2, 3.3. Elastomerlerin bu özelliklerini modellemek için elastisite modülü ve kayma modülüne bağlı olarak mesnet rijitlikleri tanımlanmaktadır. Kauçuğun ve çeliğin davranışı elastik kabul edilirse eksenel ve kayma rijitlikleri,

$$K_D = \frac{EA}{H} \quad (3.2)$$

$$K_Y = \frac{GA_s}{H_r} \quad (3.3)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Burada A mesnet plan alanı, A_s tüm alandan koruyucu kauçuğun çıkarılmasıyla bulunan kayma yüzeyi, H mesnet yüksekliği, H_r ise elastomer

katmanların toplam kalınlığını ifade etmektedir [54,55]. Basit kiriş davranışı sonucu mesnette oluşan dönme rijitliği, elastisite modülü, atalet momenti (I) ve elastomer toplam kalınlığına bağlı olarak,

$$K_E = \frac{EI}{H_r} \quad (3.4)$$

denklemini yardımı ile hesaplanmaktadır [54]. Denkleminde yer alan atalet momentinin hesaplanması ise,

$$I = \frac{WL^3}{12} \quad (3.5)$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3.6)$$

eşitlikleri ile bulunur. Burada, L köprü boyuna yönüne paralel mesnet uzunluğunu, D elastomer mesnedin çapını ve W ise köprü boyuna yönünde dik mesnet genişliğini ifade etmektedir.

4. ÖNGERİLMELİ BETONARME KİRİŞLERİN HESAPLAMA ESASLARI

4.1. Genel

Ön gerilme, bir yapı elemanının taşıma gücünü artırmak için kalıcı iç kuvvetlerin oluşturulmasıdır. Bu kuvvetlerin uygulanmasındaki amaç işletme yüklerinin neden olduğu gerilmeleri azaltmaktır [52].

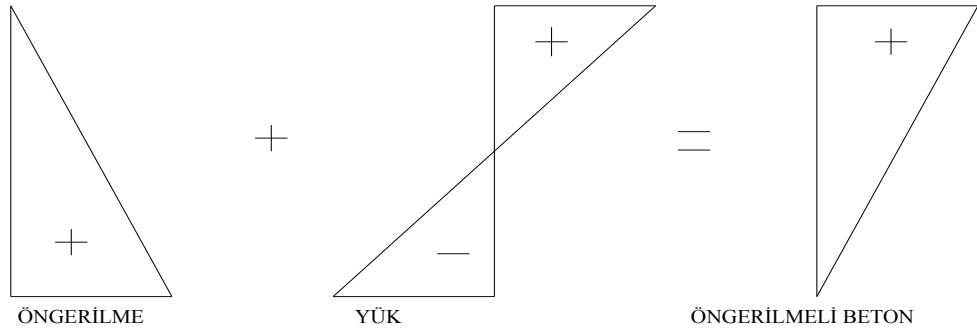
Ön gerilmeli betona ait ilk uygulama P. H. Jackson tarafından 1886 yılında Kaliforniya’da yapılmıştır. Ancak günümüzdeki haliyle ön gerilmeli beton tekniği ilk kez 1900’lü yılların başında Eugene Freyssinet tarafından kullanılmıştır ve 1928 yılında da patent almıştır. Eugene Freyssinet gerilme kayıplarının önemini ve bu kayıpları önleme yollarını ilk belirleyen kişidir. İlki 1941 yılında olmak üzere, Eugene Freyssinet tarafından ön gerilmeli beton tekniği kullanılarak çok sayıda köprü tasarlanmıştır [43].

Bilindiği üzere betonun çekme dayanımı basınç dayanımından çok daha düşüktür. Betonun bu zayıf özelliği, taşıyıcı elemanların kesitinde meydana gelen çekme kuvvetlerini karşılayacak şekilde çekme bölgelerine çelik çubuklar yerleştirilerek giderilmiş ve betonarme tekniği oluşmuştur. Ancak betonarme bazı eksiklikleri sebebiyle ihtiyaçları tam olarak karşılayamamaktadır. Betonarme elamanlarda çoğu kez, donatı tasarım çekme dayanımının yarısına ulaşmadan beton çekme dayanımının düşüklüğü nedeniyle çatlamaktadır. Eğilmeye çalışan bir betonarme elemanda kesitin sadece bir kısmı basınç gerilmesi taşımakta, geri kalan kısmı ise kirişin taşıması gereken toplam yükü arttırmaktadır. Bu sebeple açıklık büyüdükçe betonarme kirişler kendi ağırlığı nedeniyle artık ekonomik olmamaktadırlar. Ayrıca deprem yükleri kesitin ağırlığına bağlı olarak da artmaktadır. Betonarme bir kesitte çatlaklar kabul edilebilir sınırlar içinde kalmış olsa bile, bu çatlaklar sebebiyle donatı korozyona uğrayabilmektedir [44].

Yukarıda sıralanan sebeplerden dolayı üzere betonarmenin zayıflığı oluşan çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Betonarmenin bu zayıf yönlerinin giderilmesi için, kesitte hiç çekme gerilmesinin oluşmamasını veya oluşacak çekme gerilmelerinin çatlama olmayacak değerlerde kalmasını sağlamak gerekmektedir. Bunu sağlamak üzere kesitin çekme gerilmesi oluşabilecek kısımlarında bir ön yükleme ile basınç gerilmesi oluşturarak çekme gerilmelerinin dengelenmesi mümkündür [44].

Bu prensiple ön gerilmeli beton, dış yüklerin etkimesinden önce oluşturulan, taşıyıcı sistemde dış yüklerden kaynaklanan gerilmeleri amaca uygun şekilde değiştiren yapay ve

sürekli bir gerilmenin verildiği beton olarak tanımlanabilir. Aşağıda Şekil 4.1. 'de basit mesnetli bir kirişin açıklık ortasında dış yükler sebebiyle oluşan çekme gerilmelerinin kirişe ön gerilme uygulanmak suretiyle karşılanması basit olarak ifade edilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere basit kiriş açıklık ortasında dış yükler nedeniyle kesit alt bölgesinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kesite şekilde görüldüğü gibi, kiriş üst kısmına sıfır gerilme ve kiriş alt kısmına ise dış yükler sebebiyle oluşan çekme gerilmesine mutlak değeri eşit bir basınç gerilmesi oluşturacak eksantrik bir öngerilme verildiği düşünölsün. Bu durumda aynı şekilde görüldüğü üzere öngerilme ve dış yükler nedeniyle oluşan gerilmeleri süperpoze edildiğinde kesitte çekme gerilmesi sıfır olurken maksimum basınç gerilmesi ise dış yükler sebebiyle oluşan basınç gerilmesine eşit olmaktadır [44].



Şekil 4.1. Öngerilmeli basit bir kirişin açıklık ortasında gerilme dağılımı

Öngerilmeli betonun pek çok üstün yanı bulunmaktadır. Öngerilmeli betonda yüksek kalitede çelik ve beton beraber kullanılmaktadır, bu sayede ağırlık azaltılarak büyük açıklıklar ekonomik olarak geçilebilmektedir. Kesitin tümünün çalışması sağlanmakta ve bu sayede narin elemanlar tasarlanabilmektedir. İç kuvvetlerin istenilen seviyede kalması ve sehimlerin istenilen mertebeden olması ile çatlama durumunu kontrol altına alınabilmektedir. [52].

Öngerilmeli betonun ilk uygulaması P. H. Jackson tarafından 1886 yılında Kaliforniya'da yapılmıştır. Ancak günümüzdeki anlamıyla öngerilmeli beton tekniğini ilk kez 1900'li yılların başında Eugene Freyssinet kullanmıştır ve 1928 yılında da patent almıştır.

Eugene Freyssinet öngerilme kayıplarının önemini ve onları önlemenin yollarını ilk belirleyen kişidir. İlki 1941 yılında olmak üzere, Eugene Freyssinet tarafından, öngerilmeli beton tekniğinin kullanıldığı birçok köprü tasarlanmıştır.

Literatürde ön gerilmeli beton üzerine yazılmış ve ön gerilmeli beton hakkında daha geniş bilgi edinilebilecek önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar arasında Wilby (1969), Raju (1986), Nawy (1996), Preston (1964), Komendant (1952), Bilge (1981), Gilbert ve Micklebrough (1990), Nilson (1987), sayılabilir [43].

Günümüzde birçok ön germe sistemi tekniği geliştirilmiş ve yaygın olarak kabul görmüştür. Ön gerilmeli beton tekniği, köprüler başta olmak üzere, giriş, döşeme ve kolon gibi bina elemanları, borular, kazıklar, tanklar, tüneller, stadyumlar, nükleer enerji santralleri, televizyon kuleleri, deniz yapıları ve daha birçok yapıda kullanılmaktadır. Çeşitli ön gerilme teknikleri kullanılmakla beraber kimyasal ön gerilmenin dışındakiler, ön çekim ve art çekim olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılmaktadır. [52].

Ön gerilme yöntemi, birçok üstünlüğünün yanında konvansiyonel imalat yöntemlerinin fiziksel olarak yetersiz kaldığı çok uzun açıklıkların geçilmesi gibi özel durumların çözümü için geliştirilmiştir. Bu yöntemde malzeme ya da yapı elemanına taşıyacağı yüklerden önce dışarıdan suni olarak gerilme verilir [52].

Ön gerilmeli beton yöntemi, kendi ağırlığı ve taşıyacağı yükler yüklenmeden önce, beton yapı elemanın içerisine tekniğine uygun olarak yerleştirilmiş yüksek dayanımlı çelik donatının dışarıdan özel araçlarla gerilmesi şeklinde uygulanır. Böylece donatıdaki çekme gerilmesi yapı elemanına basınç gerilmesi olarak aktarılır. Bu şekilde elemanın kesitlerinde çekme gerilmesi meydana gelmemesi ya da çok düşük değerde kalması sağlanarak yüksek taşıma kapasitesine sahip yapı ya da yapı elemanları üretilir [52].

TS 3233: 1979 Ön gerilmeli Betonu şöyle tanımlar; “Ön gerilmeli Beton, elemana gelecek yüklerin etkilerinin, çeliğin gerilmesi ile istenen şekilde dengelendiği betondur” [45].

Betonun, çekme gerilmesinin zayıf olması onu ön gerilme tekniğine uygun bir malzeme haline getirmektedir. Elemana basınç gerilmesi, yüklemeden önce gerilmiş yüksek dayanımlı çelik donatı veya demet şeklindeki yüksek dayanımlı bükülebilir çelik kablolarla verilir [45,46].

Ön gerilmeli beton tabliyelerde, düşey perdelerde, istinat duvarlarında ve dikdörtgen ya da silindirik su depoları gibi yapılarda çift yönde uygulanabilirken; girişlerde sadece açıklık boyunca tek yönde uygulanabilir. Silindirik yapılarda ise hem dairesel doğrultuda hem de düşey doğrultuda ön gerilme uygulanabilmektedir [47,48].

4.2. Ön germe Yöntemleri

Yapı elemanlarına bulunan toronlara verilen ön gerilme kuvvetinin biçimine göre üç şekilde yapılmaktadır. Bu yöntemler; başlangıçta ön gerilme kuvvetinin toronlara verilmesi (ön germe) yöntemi ve yapı elemanı inşa edildikten sonra ön germe kuvvetinin uygulanması (Ard germe) yöntemi ve yapı elemanında kullanılan betona kimyasal katkı yaparak ön germe kuvveti oluşturma (kimyasal ön gerilme) yönetimi olmak üzere üç şekilde sıralanmaktadır [52].

Ön germe yönteminde, ön gerilme toronları önceden belirlenen kuvvet büyüklüğünde gerdirilerek sabitlenmektedir. Gerilen toronların etrafına projede belirtilen normal betonarme donatıları yerleştirilir ve kalıp imalatı yapılır. Dökülen beton hesaplanan dayanıma ulaştığı anda toronlar sabitlendiği yerden ayrılırlar. Toronlar ve beton malzeme arasında oluşan aderans kuvveti toronun betondan sıyrılıp çıkmasını engeller. Böylece prekast yapı elemanı negatif bir kuvvetle yüklenerek öngerilme kuvveti oluşturulur.

Ön gerilme ifadesi betonun prizini almadan önce toronlara kuvvet uygulanarak gerilmesi anlamına gelmektedir. Ön germe toronlarına başlangıç çekme gerilmesi uygulamak için hidrolik krikolardan faydalanılmaktadır.

Aderans donatının betonla temas eden yüzeyiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle toronun aderansını artırmak için küçük çapta daha fazla donatı kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde aderans yüzeyinin artırılması sağlanmaktadır.

Ön gerilmeli prefabrik kirişlerin imalatı uygun altyapı ile çok kolaydır. Prefabrik elemanların üretildiği tesislerde bir defada birçok ön gerilmeli kiriş üretilebilmektedir. Bir hat boyunca toronlar gerilir ve art arda kalıplar oluşturulur. Bu kalıplara beton dökülür ve beton istenilen mukavemete ulaştığı anda kiriş aralarındaki toronlar kesilmektedir. Bu yöntemle kaç sayıda prekast kiriş aynı esnada üretilmektedir. Betonun prizini alıp istenilen mukavemete ulaşmasını hızlandırmak için kür işlem uygulanmaktadır[43]. TS 3233 yönetmeliğinde ön gerilme kirişlerine uygulanan işlemi “Ön germe, ön germe çeliğinin beton dökülmeden önce çekilmesi işlemidir” şeklinde ifade edilmektedir [45].

Bir diğer üretim yöntemi olan art germe yönteminde beton dökülüp yeterli dayanıma ulaşmasının ardından ön germe toronlarına germe kuvveti uygulanmaktadır.

Beton dökümü yapılmadan önce kalıpların içine ön germe kılıfları yerleştirilir. Toronlar yerleştirilen kılıflar içine beton dökümü yapılmadan önce yerleştirilebilir veya beton istenilen mukavemete ulaştıktan sonrada yerleştirilebilirler. Ön gerilme toronlarına

germe kuvveti uygulandıktan sonra sabitleme işlemi uygulanır. Toronlar ve kılıf arasında kalan boşluğa özel bir harç enjekte edilir. Bu uygulama ile beton ile toronlar arasında aderans sağlanmış olur. Bu sayede ön gerilmeli yapı elemanlarının çatlama riski azaltılmış olur ve ayrıca toronlardaki korozyon riskinin önüne geçilmiş olmaktadır.

Ön gerilmeli elemana yalnızca uç kısımlardan ön gerilme kuvveti etki ettirilmek isteniyorsa kılıflar ile toronlar arasındaki boşluğa aderans harcı yerine viskoz sıvı doldurulması gerekmektedir. Toron boyunca aderans kaldırılmış olacak ve toronlardaki kuvvet yapı elemanlarına sadece uç noktalarından yüklenecektir. Sonradan gerilme verilerek üretilen da kullanılmasına rağmen, yerinde dökme elemanlar için çok daha yararlı olarak kullanılmaktadır. Özellikle boyutu itibarıyla taşınması mümkün olmayan elemanların Art germe metoduyla ön gerilme vermek suretiyle yerinde dökme olarak üretilmesi çok daha verimli bir yöntemdir [43]. TS 3233: 1979 Art germe metodunu şöyle tanımlar Art germe, ön germe toronlarının beton dökümü gerçekleştikten ve yeterli dayanıma ulaşmasının ardından ön germe yükü ile yüklenmesi işlemidir [45].

Üçüncü ön gerilme yöntemi ise kimyasal ön germe yöntemidir. Toronlar ön gerilme yüküyle yüklenmeden kalıptaki yerlerine konurlar ve ardından beton dökümü yapılır. Beton birleşiminde kullanılan katkı maddeleri sayesinde priz süresi ve tasarım mukavemetine ulaşmaya kadar betonda hacim artışı meydana gelir. Fakat toronlar ve beton arasında var olan aderans kuvveti dolayısıyla beton serbest şekil değiştirme yapamaz. Betonun hareketini kısıtlayan toronlarda çekme betonda ise basınç gerilmesi meydana gelir. Bu yöntemle sisteme ön gerilme kuvveti verilebilir. Ancak bu teknoloji hala çok yeni olduğundan betonda meydana gelen hacim artışı kontrol edilememektedir. Bu nedenle pratikte bu uygulama kullanılmamaktadır[52].

4.3. Ön germeli Kirişlerinin Betonarme Malzemesi

Ön gerilmeli beton yapılar ya da elemanlar verilen ön gerilmenin mertebesine göre sınıflandırılır. BS 8110 ön gerilmeli betonu üç sınıfa ayırmıştır;

- Birinci Sınıf: Çekme gerilmelerinin oluşmasına izin verilmez.
- İkinci Sınıf: Çekme gerilmelerinin oluşmasına izin verilir fakat gözle görülür çatlak oluşmasına izin verilmez.

- Üçüncü Sınıf: Çekme gerilmelerinin oluşmasına izin verilir fakat aşırı sert ortamlara açık yapılarda yüzey çatlağı genişliğinin 0.1 mm" den, diğer ortamlara açık yapılarda 0.2 mm"den fazla oluşmasına izin verilmez [46].

Çimento: Öngerilmeli yapı elemanlarının imalatında kullanılan beton için normal Portland çimentosu kullanılabilir. Öngerilmeli yapı elemanlarında kullanılan beton en az 300 kg/m³ çimento içermelidir. Bu değerler normal Portland çimentosu için 500 kg/m³ ve uçucu kül ya da öğütülmüş yüksek fırın çimentosu için 550 kg/m³ değerlerine kadar arttırılabilir [46].

Agrega: Öngerilmeli yapı için kullanılan beton karışımında yıkanmış, temiz, dayanıklı ve yuvarlak tüvenan agrega kullanılmalıdır. Uygun agrega teminin zor olduğu durumlarda ise yıkama, eleme ve uygun granülometrenin sağlanması gibi özel koşulları yerine getirmek suretiyle kırma taş da tercih edilebilir.

Su: İçilebilir niteliğe sahip her türlü su imalat için uygundur.

Katkı Malzemeleri: Öngerilmeli betonda katkı malzemelerini kullanılmamalıdır. Eğer katkı maddesi kullanılması zorunluysa deneysel karışımlarla uygunluğu tespit edilmelidir. Korozyon oluşturabilecek maddeler ile sertleşmeyi hızlandırıcı maddeler bulunmaması gerekir. Özellikle su depolarında korozyona sebep olmaları nedeniyle katkı maddeleri dikkatle kullanılmalıdır. Plastikliği artırıcı, viskoziteyi düzenleyici ve genleştirici özelliği olan bazı katkı maddeleri kullanılabilir [45,46].

Öngerme Teli: Yüksek dayanıma sahip çeşitli çaplardaki düz ve kıvrık çelik tellerdir.

Öngerme Toronu: Bir telin etrafında bir veya birden fazla telin veya en az iki telin birbirine sarılmasıyla elde edilmiş örgüdür.

Öngerme Çubuğu: Yüksek dayanımlı çeşitli çaplarda üretilmiş özel alaşımlı çelik çubuktur.

Öngerme Kablo: Öngerme tel, toron veya çubukların grup halinde kullanılmasıdır. Bu kablolar ard çekme yöntemlerinde kullanılır.

Öngerme Çeliği: Öngerme donatısı, öngerilmeli elemanlarda donatı olarak kullanılan, tel, toron, çubuk veya bunlardan oluşan malzemedir.

Kılıf: Sonradan gerilecek elemanlar için, yapının içinde öngerme donatısının geçeceği boşluğu bırakmak için kullanılan metal yada plastik borulardır.

Ankraj Kilidi: Öngerme kablo kesme işleminden sonra gerilmiş öngerme çeliğinin iç kuvvetler sebebiyle geri kaçmasını önlemek için üretilmiş araçlardır.

Öngerilme Verme Aygıtı: Öngerme işleminde öngerme çeliğini girmek için kullanılan, jak olarak da adlandırılır çekme araçlarıdır[45,46].

Beton: TS 3233 ve BS 8110'da, 28 günlük betonun karakteristik basınç dayanımı, ard çekmeli elemanlarda küp dayanımı olarak en az 30 N/mm², silindir dayanımı olarak en az 25 N/mm² olarak verilmiştir. Ön çekmeli elemanlarda ise küp dayanımı olarak en az 40 N/mm², silindir dayanımı olarak en az 35 N/mm² olması gerektiği belirtilmiştir. Her iki durumda da transfer anındaki beton küp dayanımı en az 25 N/mm², silindir dayanımı en az 20 N/mm² olmalıdır [45,46]. Öngerilmeli Beton için Poisson Oranı 0.20 alınır. Su/çimento oranı 0.55'i geçmemelidir [45,46].

Beton, işlenebilirliği ideal olmalıdır. Ayrıca beton döküm işlemi esnasında betonun ayrışmaya uğramadan dikkatli bir şekilde dökülmesi sağlanmalıdır. Sıkıştırma işlemi için, öngerilme çeliği yada kablolarının bulunduğu kılıfların içinde ve derzlerin etrafında boşluk kalmayacak şekilde şişlenmesi gerekmektedir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus betonun sıkıştırılması sırasında öngerilme kılıflarının kırılmamasına ve kaymamasına dikkat edilmesidir.

Çelik donatıları: Öngerilmeli beton elemanları ile birlikte kullanılacak betonarme donatısı çeliklerin karakteristik dayanımları BS 8110: madde 3.1.7'de yumuşak çelik için $f_y = 250 \text{ N/mm}^2$ ve yüksek dayanımlı çelik için $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ olarak verilmiştir [45,46].

4.4. Öngerilmeli Betonarme Köprülerin Hesap ve Yapım Kuralları

Öngerilme hesabı yapılırken başlangıçta kuvvetin tekil fiktif (kurmaca) kablo tarafından verildiği düşünülür. Öngerilme donatıları gerildikten sonra, hem betondaki deformasyonlardan hem de çelikteki deformasyonlardan dolayı kablo kuvvetinde bir miktar kayıp olur. Bu kayıplara öngerilme kayıpları denir. Bu kayıplar, kablonun sahip olduğu kuvvetten düşülerek öngerilme hesabına esas olacak tekil kablo kuvveti bulunur. Sonra bu kuvvete göre kablo adedi ve aralıkları hesaplanır [47,48,49,50].

Öngerilme hesaplarına ilişkin BS 8007:1987 koşulları: Öngerilmeye ilk germe kuvveti, kablonun karakteristik dayanımının %75'ini aşmamalıdır. Öngerilme Kuvveti ve gerilmesi (1) ve (2) 'deki gibi alınmalıdır.

$$\text{Kuvvet olarak :} \quad P_o = 0.75 \times F_m \quad (4.1)$$

$$\text{Gerilme olarak: } f_o = 0.75 \times R_m = 0.75 \times f_{pu} \quad (4.2)$$

Betonun basınç gerilmesi karakteristik küp dayanımının 0.33'ünü aşmamalıdır.

$$f_c \leq 0.33 \times F_{cu} \quad (4.3)$$

Öngerilmeli köprülerde, gerilme analizleri ve elemanların boyutlandırılması yapılırken dikkate alınacak hususlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Aktarma
- servis
- çatlama
- taşıma gücü

Yukarıda belirtilen koşullardaki gerilmeler için iç etki-dış etki formülleri ile tahkik yapılır.

Ön gerilmeli köprü tasarımı için kullanılan yaygın yönetmelikler şunlardır:

- Karayolları genel müdürlüğü, yol köprüleri için teknik şartname
- AASHTO
- ACI
- TS 3233
- UIC 702

4.4.1. Ön gerilme Kayıplarının Hesabı

Germe işlemi tamamlanıp ön gerilme kablosundaki kuvvet betona aktarılınca, kablo kuvvetinde bir miktar kayıp olur. Bu ön gerilme kayıpları, transfer anında ani olabildiği gibi daha sonra gecikmiş olarak da ortaya çıkabilir. Ani ön gerilme kayıpları;

- Sürtünme Kaybı,
- Ankraj Kaçağı Kaybı,
- Gevşeme (Relaksasyon) Kayıpları,
- Betonun Ani Elastik Kısalmasına Bağlı Öngerilme Kaybı,
- Sünme ve Büzülme (Rötre) Kayıpları

olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca ön gerilme kablo kuvvetinde zamana bağlı kayıplarda oluşur [52].

Sürtünme kaybı art germeli elemanlarda görülür. Kabloda, germe sırasında kablo ile kılıf arasında sürtünme meydana gelir. Oluşan bu sürtünme kuvveti, germenin oluşturulduğu noktadan kablo boyunca uzaklaştıkça artan bir değerde sürtünme kayıplarına yol açar. Kılıf içerisindeki sürtünme, kablo profilindeki eğriliklerden doğan kayıplar ile kablo profilindeki istenmeyen ya da önlenemeyen kusurların neden olduğu kayıplar olmak üzere iki kısımdan oluşur. Her ikisi de kılıf ile kablo arasında ilave temas bölgeleri oluşturarak sürtünme kuvvetinin artmasına neden olur [52]. Ankrajdan herhangi bir (x) uzaklığında kablodaki gerilme (4.4.) ile bulunur.

$$f_x = f_0 \times e^{-m(a+Kx)} \quad (4.4)$$

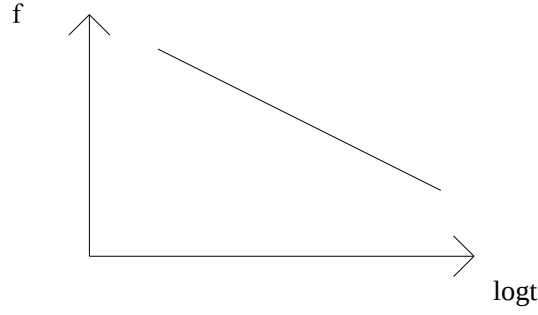
Gerilen kablo ankrajlanarak sabitlendikten sonra dışta kalan ucu kesilir. Kesme işleminden sonra kablo bir miktar içeri doğru kaçır. Bu kaçma, kabloya verilen gerilmenin azalmasına sebep olur. Bu kayıp özellikle kısa elemanlarda önemlidir. Fakat bu kayıp ankrajdan kablo boyunca uzaklaştıkça sürtünmenin ters etkisiyle azalır ve belirli bir uzaklıktan sonra gerilmeye etkisi olmaz.

Burada ΔA ankraj türüne bağlı olup T.S. 3233'de ortalama değerleri verilmiştir. Freyssinet tipi ankrajlar için kayma $\Delta A \approx 6\text{mm}$ kadardır. Diğer ankraj tiplerinde; çelik kenarlı ankraj için $\approx 3\text{mm}$, perçin-bulon başlı ankraj için $\approx 1\text{mm}$, kama ankrajı için $\approx 2.5\text{mm}$, yaslanma ankrajı için ise $\approx 0.7\text{mm}$ 'dir. Freyssinet International ise kayma toleransı hem kablo çapına hem de ankraj bloklarıyla ilişkilendirmiştir[52].

PCI ve ACI-ASCE birleşik komitesi ankraj kaçığı gerilme kaybı için,

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} E_{PS} \quad (4.5)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Ön gerilme çeliğinin zamana bağlı yer değiştirmesi aşağıdaki Şekil 4.2. 'de görülmektedir. Bu yüksek dayanımlı ön germe çeliği, yüksek sıcaklık ve gerilmelere çok duyarlıdır [51].



Şekil 4.2. Çeliğin gevşemesi sonucu çelikte gerilme kaybı

Kabloya verilen gerilme kablonun karakteristik kopma dayanımının % 55' ini geçince ön gerilme kablolarında gevşemeler meydana gelir. Standart kablolar için gevşeme katsayısı, kablonun karakteristik dayanımının %75' i civarında, gerilmesi durumunda 1000 saatte % 2-4 arasında alınabilir [52].

Buna göre gevşemelerden dolayı meydana gelen kayıp, (%R) kablo cinsine göre kablo üreticisinin verdiği değer olmak üzere;

$$\Delta f_{pR} = (\%R)(f_x) \quad (4.6)$$

$$\Delta f_{pR} = f_0 \rho [1 - 2(\frac{\Delta f_{CR+SH}}{f_x})] \quad (4.7)$$

ve 1000 saat sonraki gevşeme için,

$$\Delta f_{pR(t)} = \Delta f_{pR(1000h)} (\frac{t}{1000})^\beta \quad (4.8)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. TS 3233 de çekme gerilmesi çeliğin karakteristik kopma dayanımının %70'ni ya da daha fazlasını aşması durumunda kayıp ön germe kuvvetinin %8'i; %50'ni aşması durumunda ise kayıp ön germe kuvvetinin %0.1'i kadar olacağını belirtilmiştir.

Betona ön gerilme kuvveti aktarıldığı anda elemanın boyca ani kısılmasından kaynaklanan kayıplardır. Ön çekme yönteminde betonun bütün donatılar gerildikten sonra dökülmesi sebebiyle, betondaki elastik kısılma bir kademedede oluşur.

Art çekme yönteminde ise gerilen her donatının betonda meydana getirdiği elastik kısılma, ardışık olarak birbirini etki eder. Bu da önce gerilen donatılarda ardışık olarak gevşemeye

neden olur. Bu gevşemelerin art arda oluşturduğu kayıpları hesaplamak oldukça zordur. Ancak bu kayıpları (n) germe işlemi adeti olmak üzere betonun toplam düzgün yayılmış ani deformasyonunun oranını $[(n-1)/2n]$ olarak saptamak mümkündür [52]. Betonun ani elastik kısılmasına bağlı kayıp hesapları için; betonun ani elastik deformasyonu ile donatı deformasyonu arasındaki uygunluk koşulundan faydalananarak (Eş. 4.9)“daki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta f_{pES} = \frac{(n-1)}{2n} \times \frac{f_{pc} E_s}{E_c} \quad (4.9)$$

$$f_{pc} = \frac{f_c}{[1 - (\%10 \text{ ile } \%20)] A_c} \quad (4.10)$$

Ön gerilmeli betonda sabit birim gerilme (1 N/mm²) altında zamana bağlı olarak meydana gelen deformasyon sebebiyle germe kuvvetindeki azalmaya sünme kaybı denir. Sünme kaybı elemanın kalınlığına, betonun su ihtivasına, ortam sıcaklığına, nem oranına ve transfer anındaki yaşına bağlı olarak değişmektedir.

Büzülme (Rötre) kaybı ise ön gerilmeli betonun yüklemeye bağımsız olarak, su kaybı sebebiyle oluşan büzülme deformasyonlarından doğan kayıptır. Betondaki büzülme, kullanılan agreganın türüne, su ihtivasına, transfer anındaki betonun yaşına, elemanın kalınlığı ve çevredeki bağıl nem oranına göre değişebilmektedir.

Sünme ve büzülme deformasyonları birlikte göz önüne alınacak olursa Freyssinet International şekil değiştirme ve gerilme arasındaki doğrusal bağıntıyı kullanarak gerilme için

$$\Delta f_{CR+SH} = (\varepsilon_{CR\infty} + \varepsilon_{SH\infty}) E_{ps} \quad (4.11)$$

eşitliğini önermişlerdir [52]. Ön gerilmeli yapı elemanlarına uygulanacak ön germe kuvveti elemanların ebatlarına, sistemin etki eden yüklerin çeşidine göre belirlenmektedir. Hesaplamalar yapılırken mukavemetin genel kuralları kullanılmaktadır. Yapı elemanında oluşan gerilme kuvvetleri ile şekil değiştirme arasındaki bağlantı kurularak uygulanacak kuvvetin değeri bulunmaktadır. Dikdörtgen kesit özelliklerine sahip normal bir kiriş üzerinde oluşturduğu etkiler örneklenecektir. Kiriş tarafsız ekseninden etki eden ön germe

kuvveti, kesit alanına oranlanır ise kesitin normal ekseninde düzgün yayılı basınç gerilmesi oluşturduğu

$$f = -\frac{P}{A_c} \quad (4.12)$$

eşitliği ile hesaplanacaktır. Denklemdaki A_c kirişin alanını ifade etmektedir. Basınç gerilmesi için negatif işaret, çekme gerilmesi için ise pozitif işaret kullanılmaktadır. Gerilme hesabında kullanılan $A_c = b/h$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. B ve h kirişin kenar uzunluklarını ifade etmektedir. Ön gerilmeli yapı elemanına açıklık ortasında en fazla gerilmeyi oluşturacak şekilde bir yük yüklendiğinde; kesitte oluşan gerilme kuvveti (4.13) ve (4.14) denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$f_t = -\frac{P}{A_c} - \frac{M.c}{I_g} \quad (4.13)$$

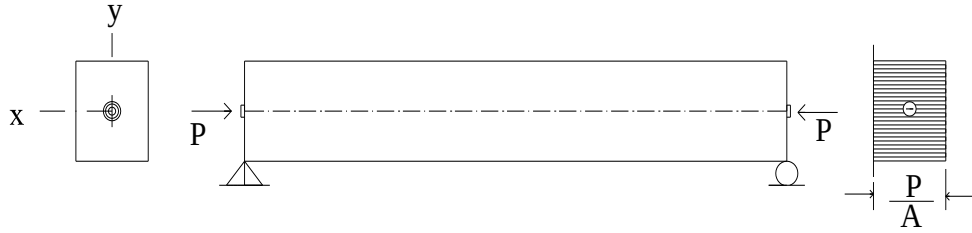
$$f_b = -\frac{P}{A_c} + \frac{M.c}{I_g} \quad (4.14)$$

Bu denklemlerle yapılan hesaplamalarda ön gerilmeli yapı elemanına normal doğrultuda etki ettirilen P kuvveti, kiriş alt noktalarında çekme gerilmesini azalttığı görülmektedir. Yönetmeliklerde ve yapılan betonarme hesaplarında betonun çekme kuvvetine karşı dayanımı sıfır alınmaktadır. Ön gerilmeli yapı elemanlarının, taşıyıcı sistemlerde kullanılmasının temel nedeni bu sebepten dolayıdır. Eksenel yönde ağırlık merkezinden basınç kuvveti uygulanarak, ön gerilme metodunun avantajından faydalanmak yeterli değildir. Ön germe yönteminin avantajlarından tam olarak faydalanmak için eksenel yönde etki ettirilen basınç kuvvetinin tarafsız eksenden daha alt bir noktadan uygulanması gerekmektedir. Buradaki temel amaç sistemde ayrıca zıt bir moment kuvveti oluşturarak sistemdeki ters kuvvetlerin sönmelenmesini sağlamaktır [52]. Basınç kuvvetinin tarafsız eksenin daha altından uygulanması sonucunda sistemde oluşturduğu Eksantrik kuvvetin durumunda,

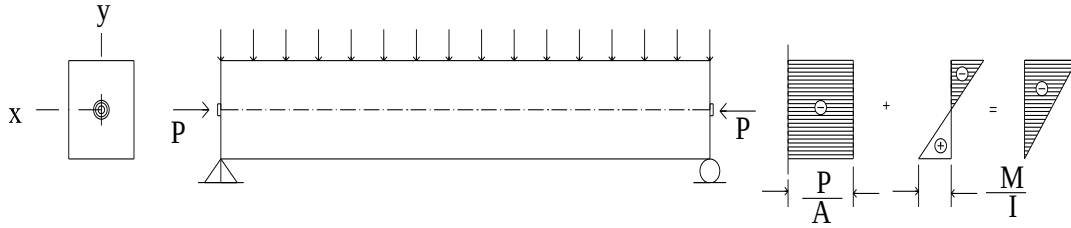
$$f_t = -\frac{P}{A_c} - \frac{M.c}{I_g} + \frac{P.e.c}{I_g} \quad (4.15)$$

$$f_b = -\frac{P}{A_c} + \frac{M.c}{I_g} - \frac{P.e.c}{I_g} \quad (4.16)$$

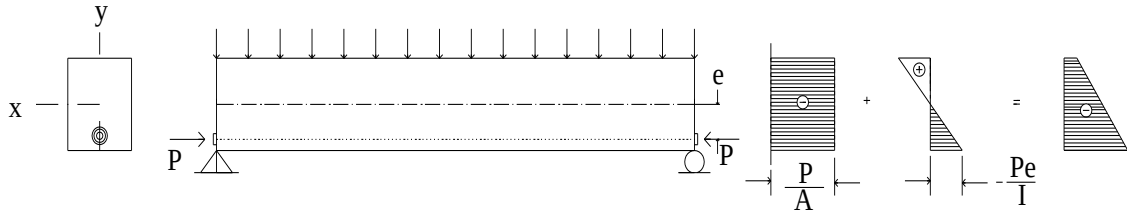
denklemleri kullanılmaktadır. Buradaki “e” kuvvetin ağırlık merkezine olan uzaklığını, I_g kesitin atalet momentini ifade etmektedir. Eksenel doğrultuda uygulanan kuvvet nedeni ile kesitte oluşan Eksantrik kuvvet çok büyük olduğunda; kesitin üst noktasında çekme gerilmesi oluşmaya başlamaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi betonun çekme dayanımı hesaplamalarda dikkate alınmamaktadır. Bu durumun kesitte çatlama veya bu gibi sorunlar doğurmaması için ön germe toronları kesitte tarafsız eksene yakın konumlandırılmalıdır. Ön gerilme toronlarının tarafsız eksene göre olan konumuna göre kirişte oluşan gerilmenin yönü ve büyüklüğü ayarlanabilmektedir. Kirişin ön gerilme durumundaki gerilme değişimleri aşağıdaki şekiller de görüldüğü gibidir.[52].



Şekil 4.3. Yalnızca ağırlık merkezinden ön gerilme kuvvetinin uygulanma durumu



Şekil 4.4. Eksenel Ön gerilme kuvveti + Sistemin zati ağırlığının etki ettiği durum



Şekil 4.5. Eksantrik Ön gerilme kuvveti + Sistemin zati ağırlığının etki ettiği durum

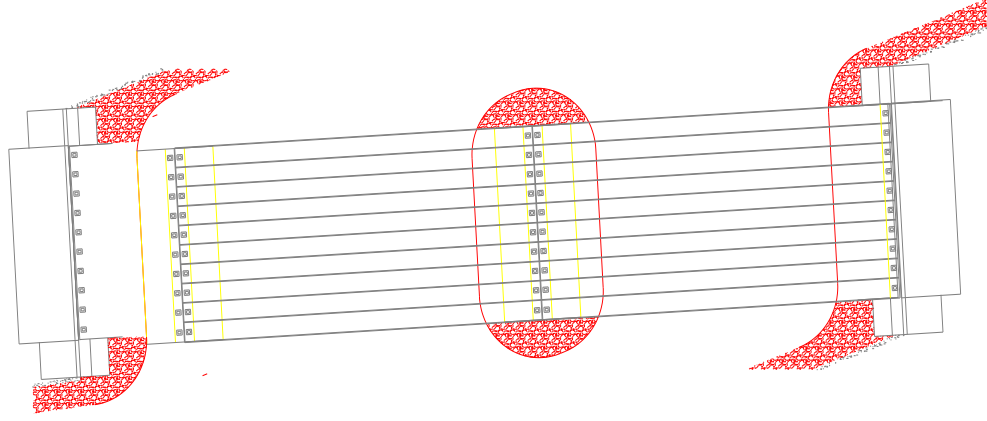
5. SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, elastomer mesnetler ve çubuk elemanlar ile modellenen bir demiryolu köprüsünün tren gibi dinamik kuvvetlerin ve sismik yüklerin birlikte dikkate alınmasıyla köprü üzerinde oluşabilecek etkileri incelenmiştir. Çözümlerde kullanılan köprü kesit özellikleri Tablo 5.1’ de verilmiştir. Devlet Demiryolları 6. Bölge Müdürlüğüne ait bu köprünün plan ve en kesit görünüşleri sırasıyla Şekil 5.1 ve 5.2’ de görülmektedir. Analizler için sonlu elemanlar metodu kullanılarak yeni bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılan programın doğruluğunun kontrolü için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Çözümlerde, çelik takviyeli elastomer mesnet dikkate alınmıştır. Sismik yük olarak DLH 2007 [58]’ de verilen farklı deprem seviyeleri için sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deprem yükleri sadece köprünün akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Dinamik yük olarak LM71 yük katarının bir ve iki şerit üzerinden etki etme durumları dikkate alınmıştır.

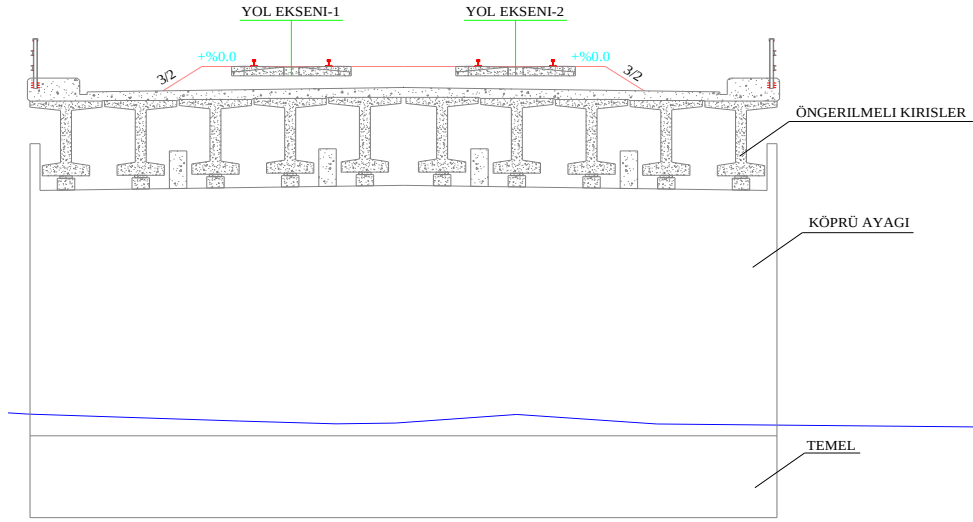
Köprünün üst yapısında, açıklıkları 20 m olan 10 adet prekast ön gerilmeli kiriş yer almakta olup bu kirişe ait en kesit Şekil 5.3.a’ da verilmiştir. Aynı zamanda, 0.50×0.50 m ölçülerine sahip kare kesitli elastomer mesnet kaideleri de köprü üst yapısında yer almaktadır. Köprü üst yapısının orta mesnedi ise 5.00×2.00m ölçülerinde sahip bir dikdörtgen şeklinde kolonla teşkil edilmiştir.

Tablo 5.1 Köprü Elemanları Kesit Özellikleri

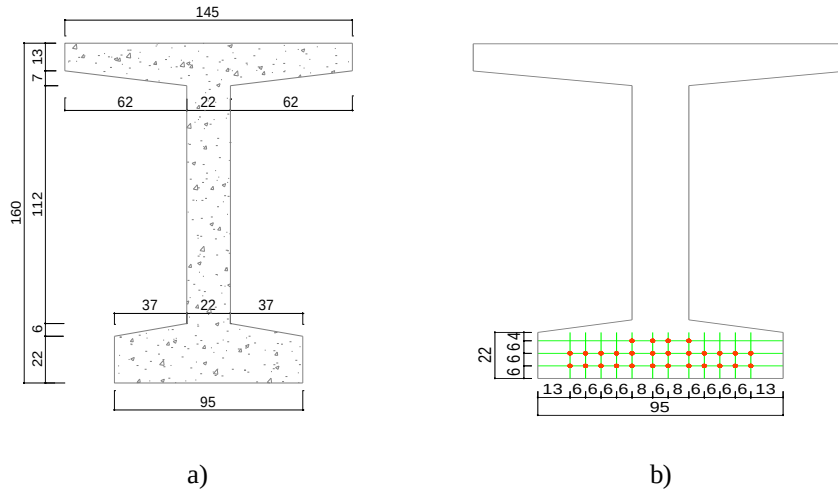
KESİT ÖZELLİKLERİ	Öngerilmeli Kiriş	Başlık Kirişi	Köprü Ayağı	Mesnet Kaidesi
Alan (m^2) (A_x)	0.7375	4.000	10.000	0.25
Y yönünde Kayma Alanı (m^2) (A_y)	0.3503	3.3333	8.3333	0.2083
Z yönünde Kayma Alanı (m^2) (A_z)	0.6016	3.3333	8.3333	0.2083
Atalet Momenti (m^4) (I_x)	0.009671	2.2533	9.9805	0.008802
Atalet Momenti (m^4) (I_y)	0.263	1.3333	3.3333	0.005208
Atalet Momenti (m^4) (I_z)	0.0564	1.3333	20.8333	0.005208



Şekil 5.1. Köprünün planı

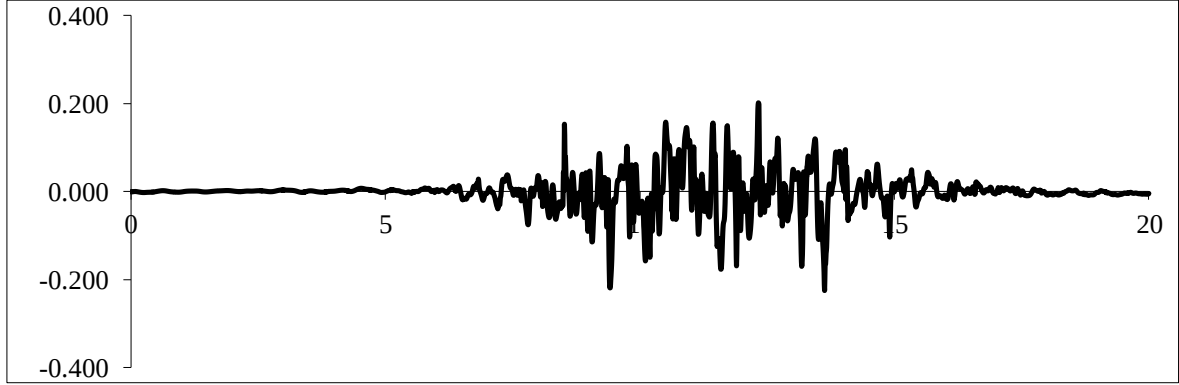


Şekil 5.2. Köprünün en kesiti

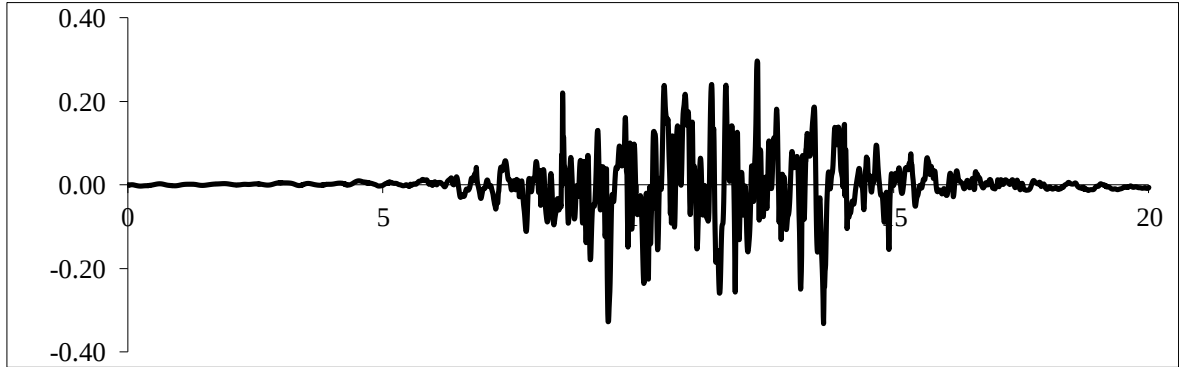


Şekil 5.3. Köprünün ön gerilmeli kirişin a) en kesiti ve b) toron detayları

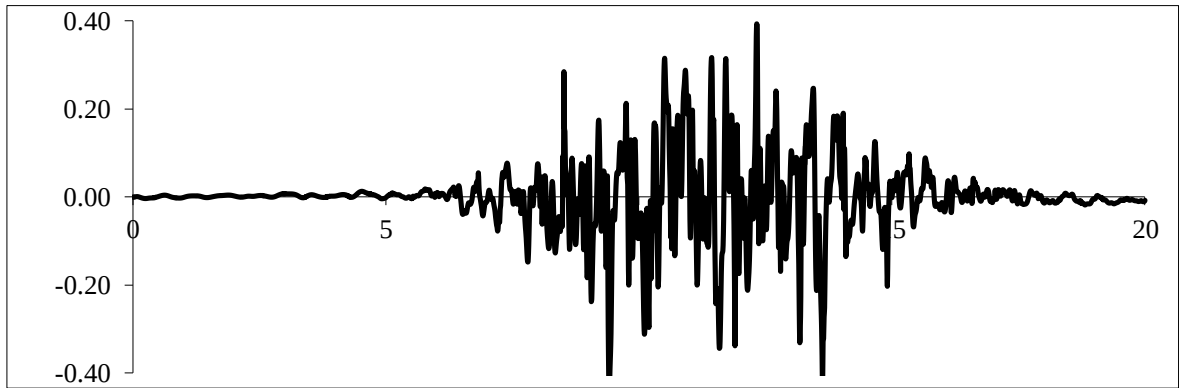
Köprü elemanlarının tümünde C30/37 sınıfı beton kullanılmıştır. Betonun silindirik basınç dayanımı 30 MPa, elastisite modülü ise 32000 MPa' dır. Ön gerilmeli kirişte kullanılan ön gerilme donatısı 270-K düşük gevşemeli tiptir. Ön gerilme toronlarının akma dayanımı 1724 MPa, elastisite modülü ise 200000 MPa olarak alınmıştır. Ön gerilme toronlarının kirişteki konumları Şekil 5.3.b'de görülmektedir.



Şekil 5.4. D1 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği



Şekil 5.5. D2 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği



Şekil 5.6. D3 seviyesi yapay deprem ivme-zaman grafiği

Dinamik analizlerde deprem yükü olarak DLH-2007 [58]' de belirtilen spektrum ivme grafikleri dikkate alınarak, mutlak değerce maksimum ivme değeri 0.2g (D1), 0.3g (D2) ve 0.4g (D3) olacak şekilde üç adet yapay ivme kaydı üretilmiştir. Yapay deprem ivmelerinin toplam etkiye süresi yirmi saniye olarak dikkate alınmıştır. Deprem kayıtlarının elde edilmesi için SeismoArtif programı kullanılmıştır.

Tablo 5.2. Elastomer mesnedin geometrik ve mekanik özellikleri

Elastomer mesnet boyutları (mm)	400×400
Elastomer mesnet yüksekliği H (mm)	85
Kauçuk toplam kalınlığı H _r (mm)	61
Çelik plaka kalınlığı h _s (mm)	24
Elastomer alanı A (mm ²)	160000
Elastomer atalet momenti I (mm ⁴)	2.133×10 ⁹
Elastomer burulma atalet momenti I (mm ⁴)	3.605×10 ⁹
Elastisite Modülü E _c	4.88
Elastisite Modülü (MPa)	2.2
Kayma Modülü (MPa)	0.68
Sertlik	50
Sertlik Katsayısı	0.73
Şekil Faktörü	12.3
Elastomer mesnet sayısı	40

Köprüde kullanılan elastomer mesnede ait geometrik ve mekanik özellikler Tablo 5.2' de verilmiştir. Elastomer mesnedin kayma yönündeki rijitliği şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir [57]. Bu nedenle elastomer mesnetlerin efektif rijitliği dikkate alınarak çözümler elde edilmektedir. Elastomer mesnetler programda yer değiştirme ve dönme yaylarından oluşacak şekilde modellenmiştir. Trafik ve akış doğrultularındaki yay elemanları lineer olmayan davranış sergilerken diğer doğrultulardaki yayların ise lineer olarak davrandığı kabul edilmiştir. Böylece düşey doğrultu için yay rijitliği olan K_D, trafik, akış doğrultuları için yay rijitliği K_Y, eğilme rijitliği K_E ve burulma rijitliği K_B Tablo 5.2' de verilen geometrik ve malzeme özellikleri yardımıyla,

$$K_D = \frac{E_c A}{H} = \frac{448143 \times 160000}{85} = 918857.41 \text{ kN / m} \quad (5.1)$$

$$K_Y = \frac{GA_s}{H_r} = \frac{680 \times 160000}{61} = 1783.61 \cdot kN / m \quad (5.2)$$

$$K_E = \frac{E_c I}{H_r} = \frac{488143 \times 2.133 \times 10^{-3}}{0.061} = 14349.69 \cdot kN.m / m \quad (5.3)$$

$$K_B = \frac{G_c J}{H_r} = \frac{680 \times 3.605 \times 10^{-3}}{0.061} = 40.187 kN.m / m \quad (5.4)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

5.1. Köprünün Sonlu Eleman Modeli ve Statik Analizi

Köprünün sonlu eleman modelinde 515 adet düğüm noktası, 474 adet üç boyutlu çerçeve elemanı ve 40 adet elastomer mesnet kullanılmıştır. Köprü kirişlerinin her birine 5400 kN' luk öngerme kuvveti uygulanmış olup bu kuvvetin eksantriklik etkisi ile ortaya çıkan 3600 kN.m' lik moment etki köprü kirişlerinin uç düğüm noktalarına etki ettirilmiştir.

Tablo 5.3. Analiz Programı ile Sap2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması

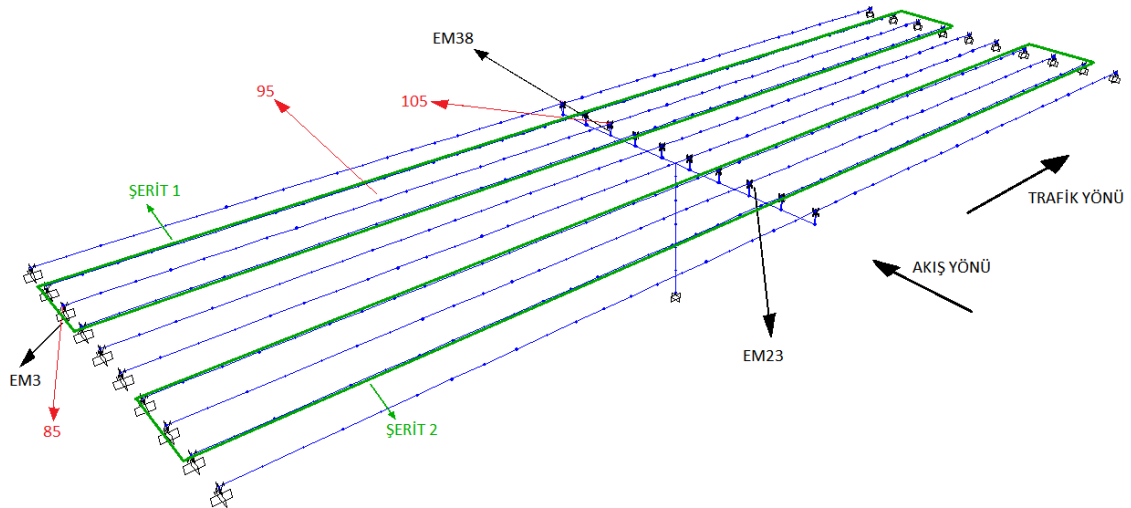
	Düğüm No.	N _x (kN)	V _y (kN)	V _z (kN)	M _x (kN.m)	M _y (kN.m)	M _z (kN.m)	Fark Oranı (%)
Sap2000	1	5398.3	0.1010	-0.000007	-0.00074	-3539.6	-0.00006	0.72
Yazılan Program	1	5398.2	0.1004	-0.000008	-0.00073	-3539.6	-0.00005	
Sap2000	11	5398.3	0.1010	-0.000007	-0.00072	-3539.6	-0.00006	0.39
Yazılan Program	11	5398.2	0.1010	-0.000008	-0.00072	-3539.6	-0.00005	
Sap2000	32	5398.3	0.1010	-0.000007	-0.00074	-3539.6	-0.00006	0.72
Yazılan Program	32	5398.2	0.1004	-0.000008	-0.00073	-3539.5	-0.00005	
Sap2000	105	-2.02	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.49
Yazılan Program	105	-2.01	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

Hesaplamalarda yapı elemanlarının tümünün statik ağırlığı başlangıç şartı olarak dikkate alınmıştır. Köprü kolonunun alt kısmına karşılık gelen düğüm noktası ve kenar ayaklarda yer alan elastomer mesnetlerin alt düğüm noktaları ankastre mesnet olarak hesaba katılmıştır. Yazılan sonlu elemanlar programının Sap2000 programı ile karşılaştırılması amacıyla söz konusu köprünün sonlu eleman modeli Sap2000 programına tanıtılmış ve statik yükler altındaki çözümleri elde edilmiştir. Her iki programdan elde

edilen sonuçların karşılaştırması ise Tablo 5.3.' te verilmiştir. Her iki programdan elde edilen sonuçlar sap2000 ile kıyaslandığında % 0.6 oranında yazılan programın farkların oluştuğu belirlenmiştir.

5.2. Köprünün Dinamik ve Sismik Yükler Altındaki Analizi

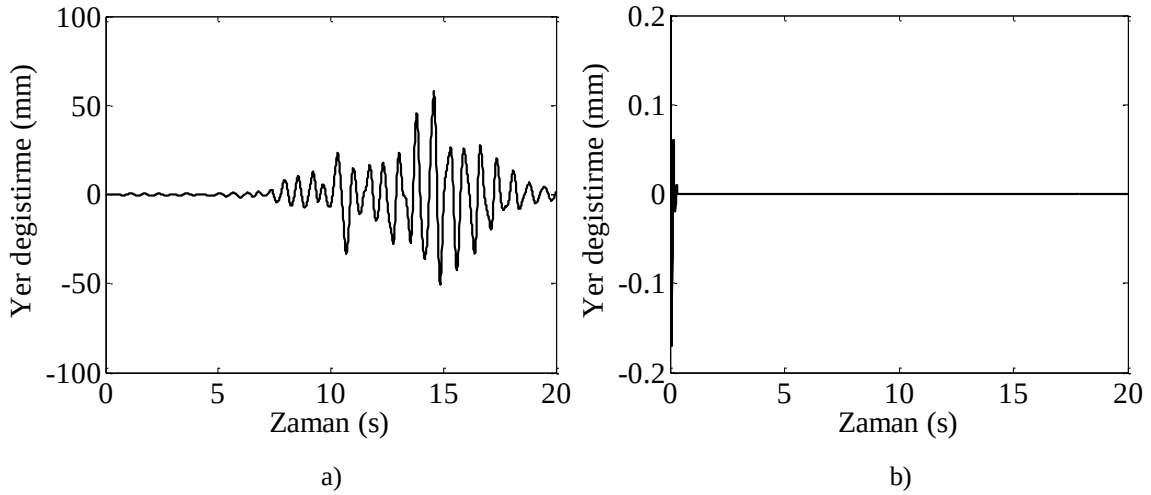
Köprünün üzerinden LM71 yük katarının geçmesi sırasında depremin etkisini incelemek amacıyla yük katarsız ve yük katarlı durumlar dikkate alınmıştır. Yük katarının hızı 200 km/saat olarak seçilmiş olup deprem ivmesi için D1, D2 ve D3 deprem seviyelerinde üretilmiş yapay deprem ivme verileri kullanılmıştır. Köprünün bir şeridinden ve her iki şeridinin LM71 yük katarı etkisi altında olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Bu yük katarının şeritlerde aksi yönlerde hareket edecek şekilde yükünü uyguladığı kabul edilmiştir. Tüm çözümler için köprünün hem sol hem de sağ sahilinde elde edilen düğüm noktası yer değiştirme değerleri karşılaştırılmış ve önemli farkların olmadığı belirlenmiştir. Aynı zamanda köprü orta ayağının her iki kenarına oturan kirişlerin yer değiştirme-zaman grafikleri kendi aralarında karşılaştırılmış ve önemli farkların olmadığı görülmüştür. Bu durum elastomer mesnetler içinde elde edildiğinden sadece Şekil 5.7' de görülen üç düğüm noktası ve üç elastomer mesnet için sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 5.7. İncelenen elastomer mesnet ve düğüm noktalarının köprü üzerindeki konumları

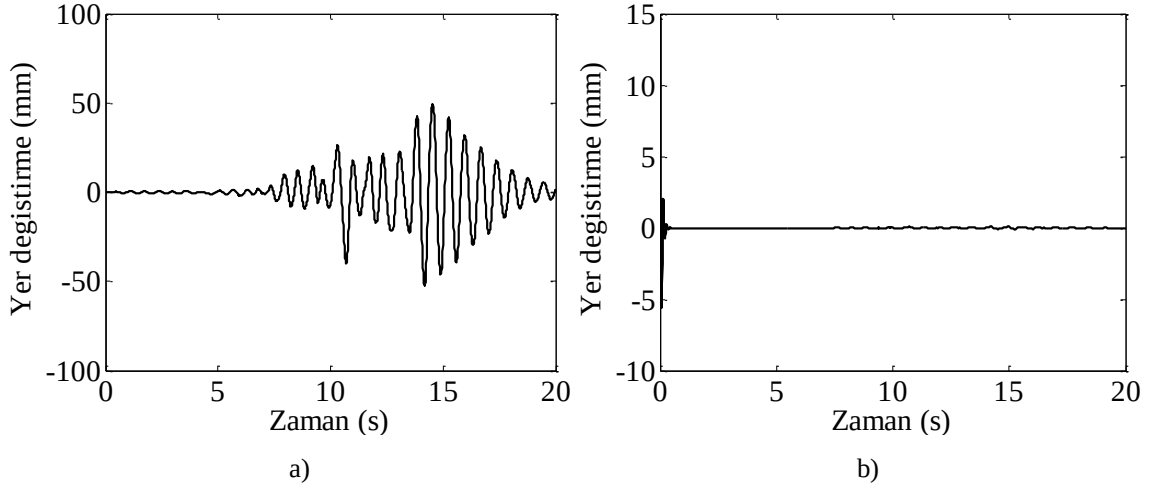
5.2.1. Köprüye sadece sismik yüklerinin etki etmesi durumu

Bu bölümde söz konusu köprüye sadece D1, D2 ve D3 deprem yüklerinin etki etmesi hali için sismik analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu yükler altında köprünün 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarında elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 5.8-5.16' de verilmiştir.

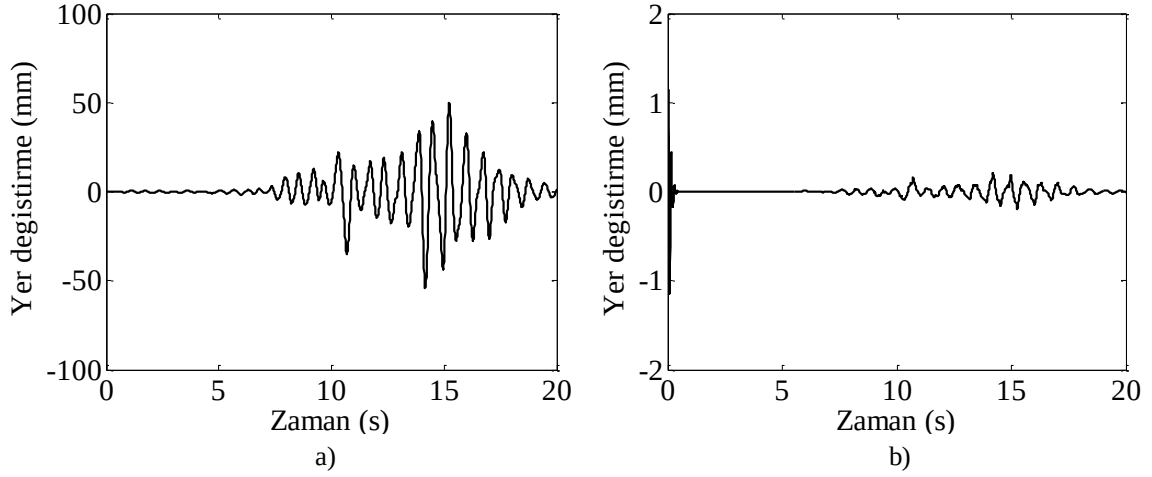


Şekil 5.8. Sadece D1 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

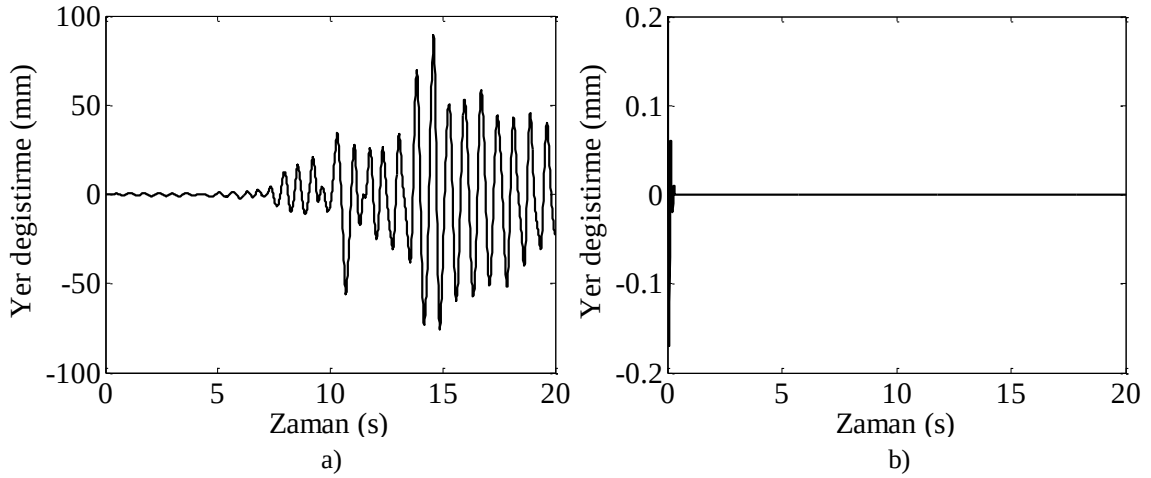
Sadece D1 deprem yükü altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının akış doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri sırasıyla 57.8, 52.0, 54.2 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında yatay doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 89.0, 83.5, 71.1 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda D3 deprem yükü altında yatay doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 94.8, 109.3, 95.1 mm olarak belirlenmiştir. D2 deprem yükleme durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 54, 61, 31 daha büyüktür. Aynı zamanda D3 deprem yükleme durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 64, 110, 75 daha büyüktür.



Şekil 5.9. Sadece D1 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

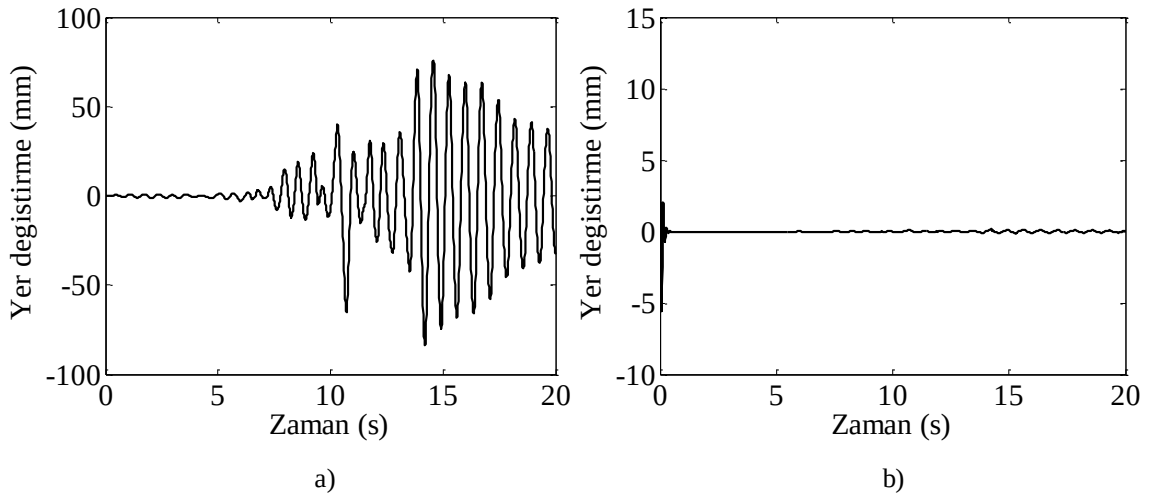


Şekil 5.10. Sadece D1 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

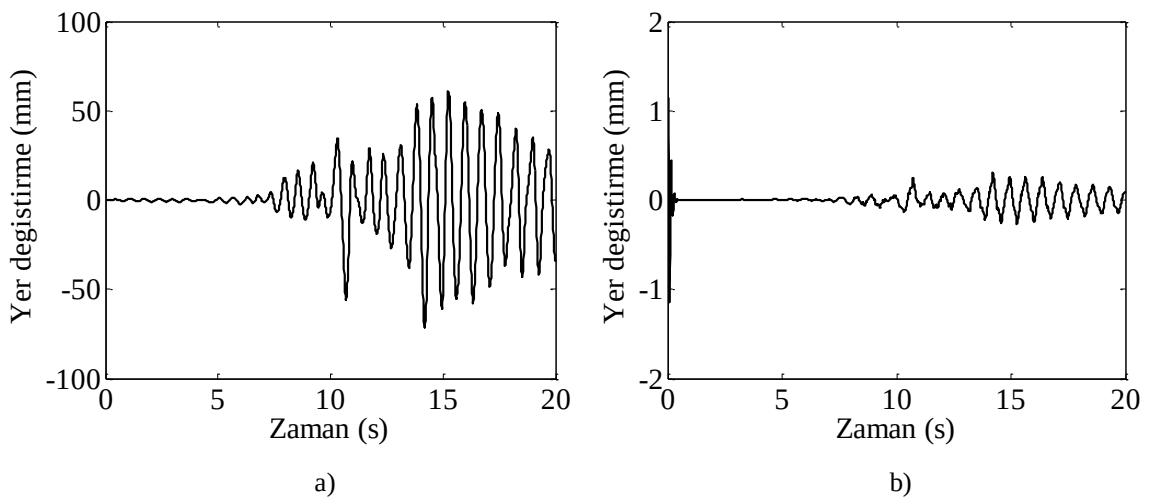


Şekil 5.11. Sadece D2 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

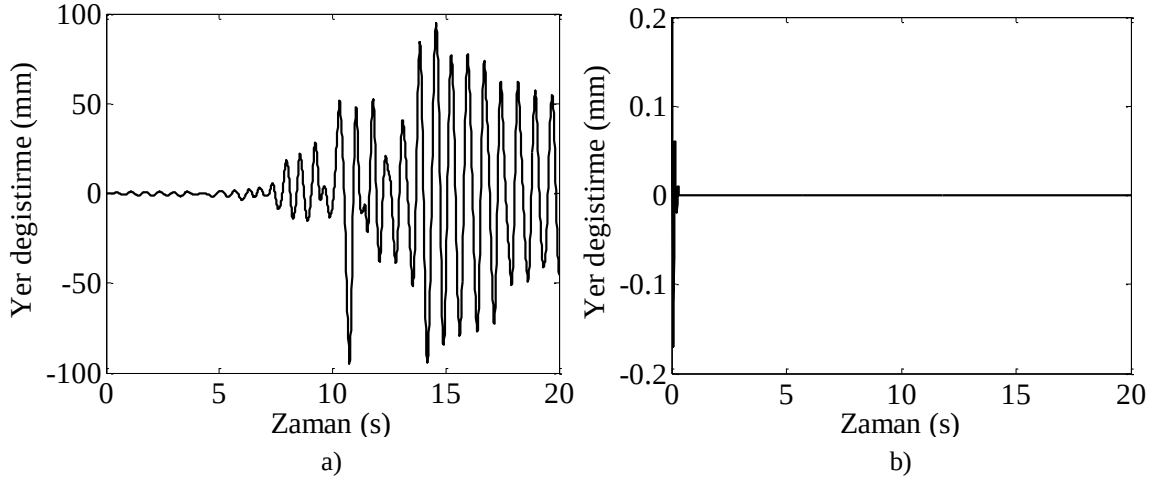
Sadece D1 deprem yükü altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının düşey doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri sırasıyla 0.2, 14.7, 1.2 mm olarak elde edilmiştir. D2 ve D3 deprem yükleri altında düşey doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri aynı değerlerde elde edilmiş olup 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 0.2, 14.7, 1.2 mm olarak hesaplanmıştır. Böylece bu üç yükleme durumları düşey yönde karşılaştırıldığında D1, D2 ve D3 yükleme durumu için her hangi bir fark elde edilmemiştir.



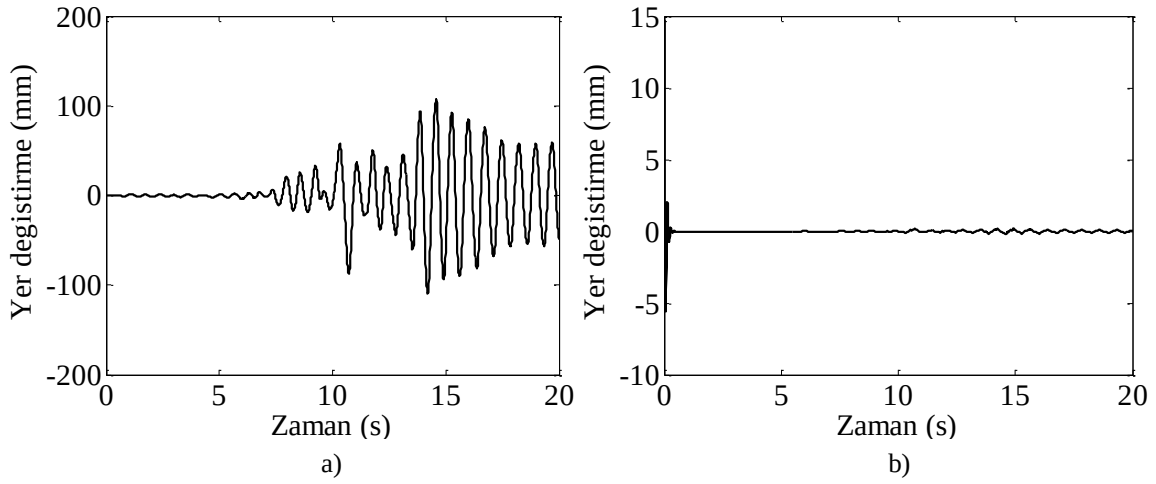
Şekil 5.12. Sadece D2 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıstirme-zaman grafikleri



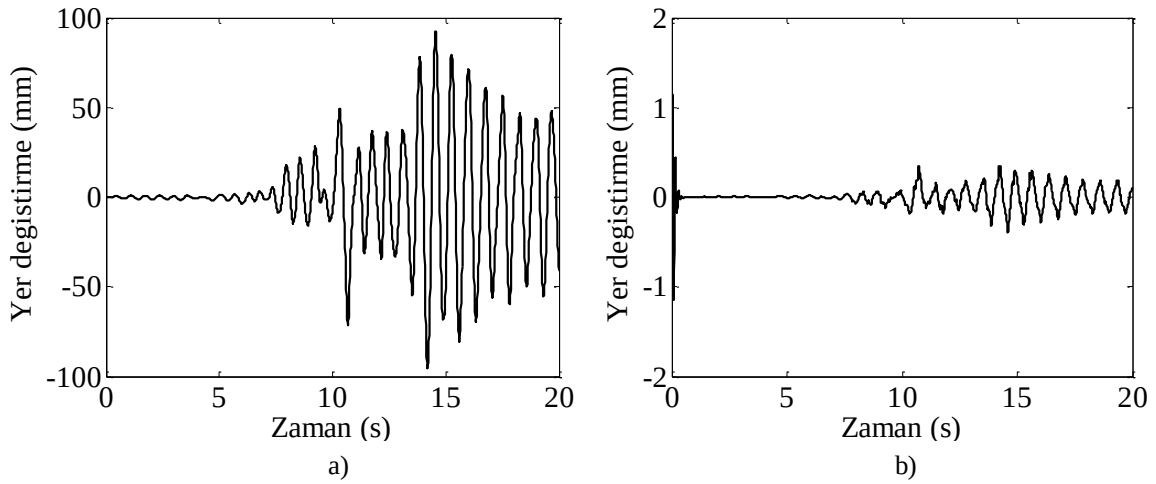
Şekil 5.13. Sadece D2 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıstirme-zaman grafikleri



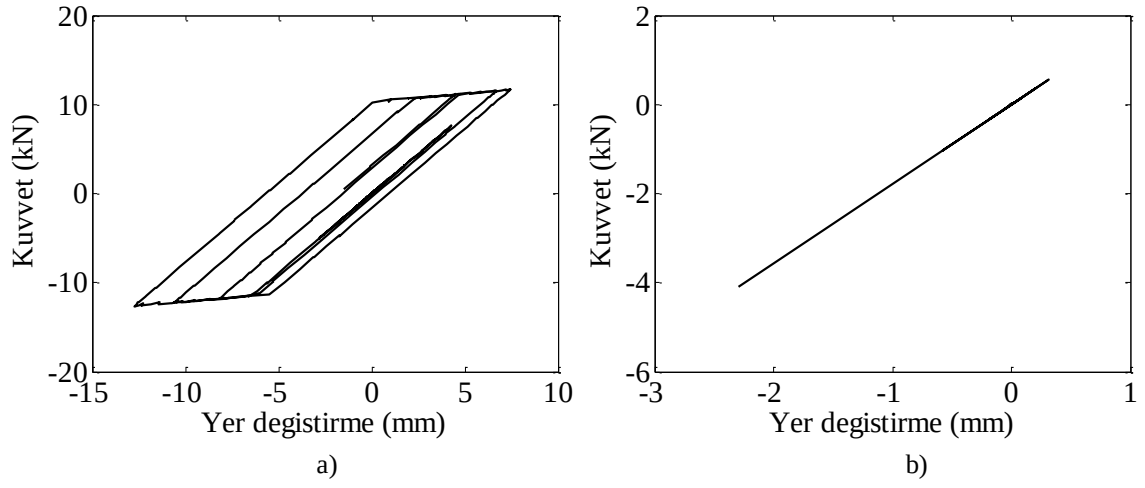
Şekil 5.14. Sadece D3 depremi için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değistirme-zaman grafikleri



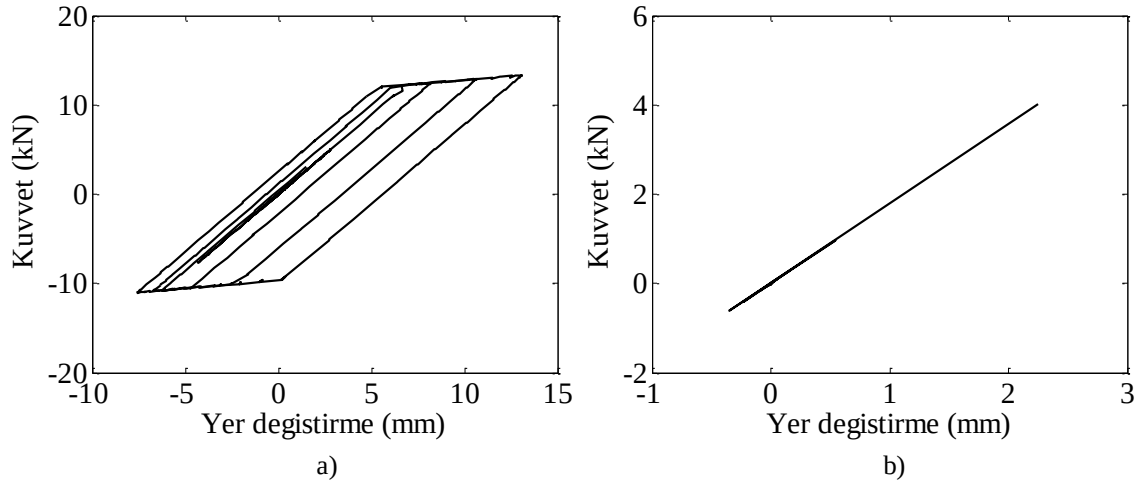
Şekil 5.15. Sadece D3 depremi için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değistirme-zaman grafikleri



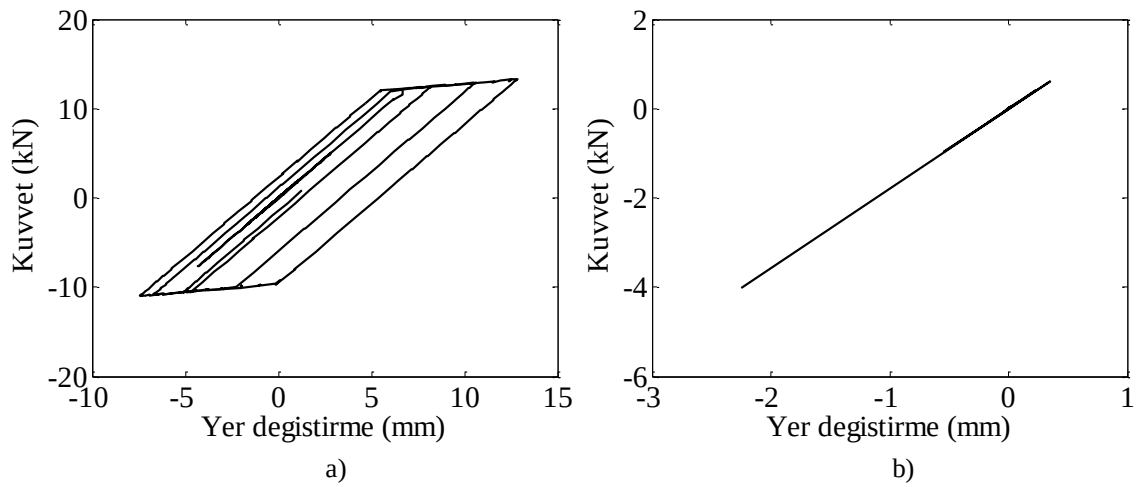
Şekil 5.16. Sadece D3 depremi için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değistirme-zaman grafikleri



Şekil 5.17. Sadece D1 depremi için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



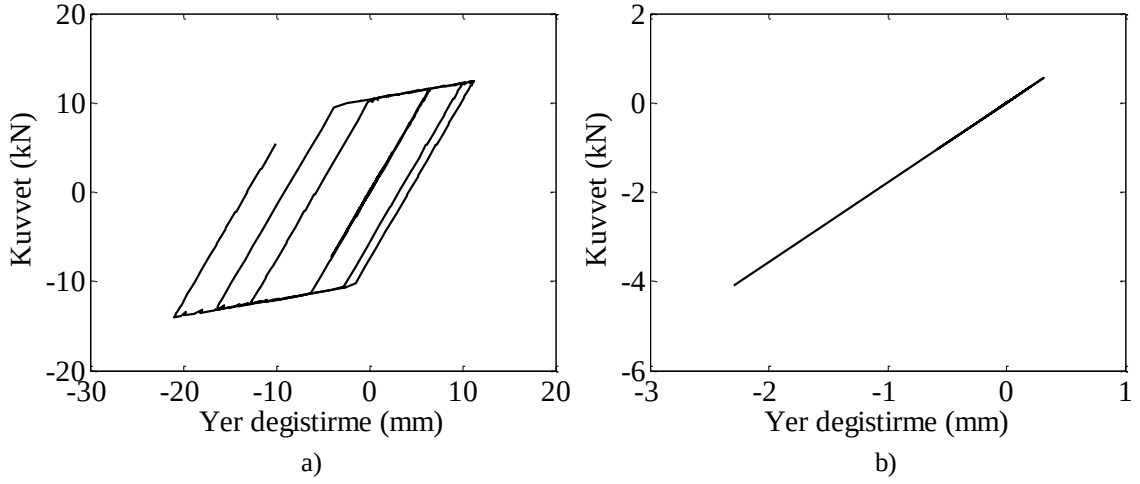
Şekil 5.18. Sadece D1 depremi için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



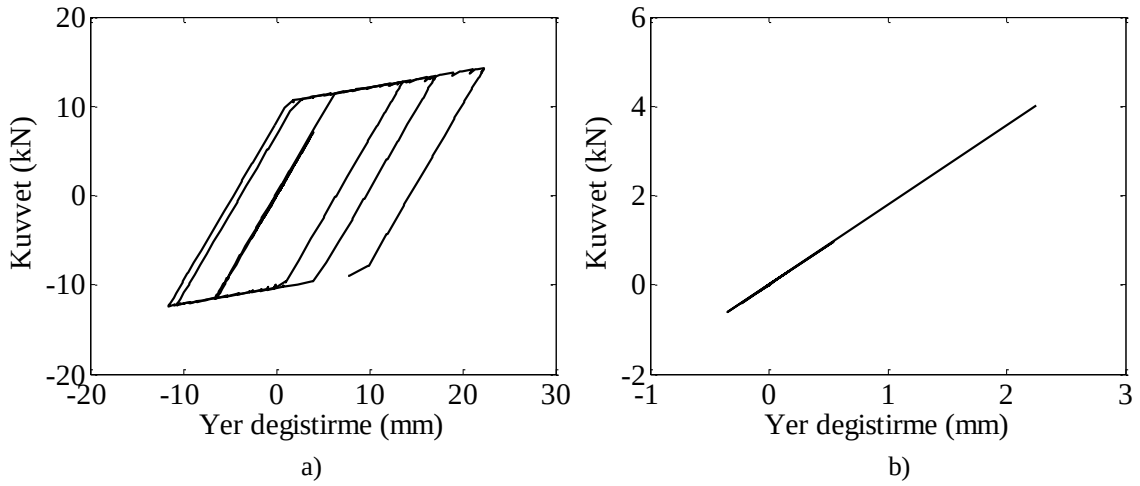
Şekil 5.19. Sadece D1 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Sadece D1, D2 ve D3 deprem yükleri altında EM 3, 23 ve 38 nolu mesnetlerin trafik ve akış yönlerine ait kuvvet yer değiştirme grafikleri Şekil 5.17-5.25' da görülmektedir. D1 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 12.6, 13.4, 13.3 kN olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise sırasıyla 14.0, 14.3, 14.2 kN olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, D3 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise sırasıyla 14.4, 14.7, 14.4 kN olarak hesaplanmıştır. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 11.0, 7.3 ve 6.5 daha büyüktür. Aynı zamanda D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 14.1, 10.4, 7.8 daha büyüktür.

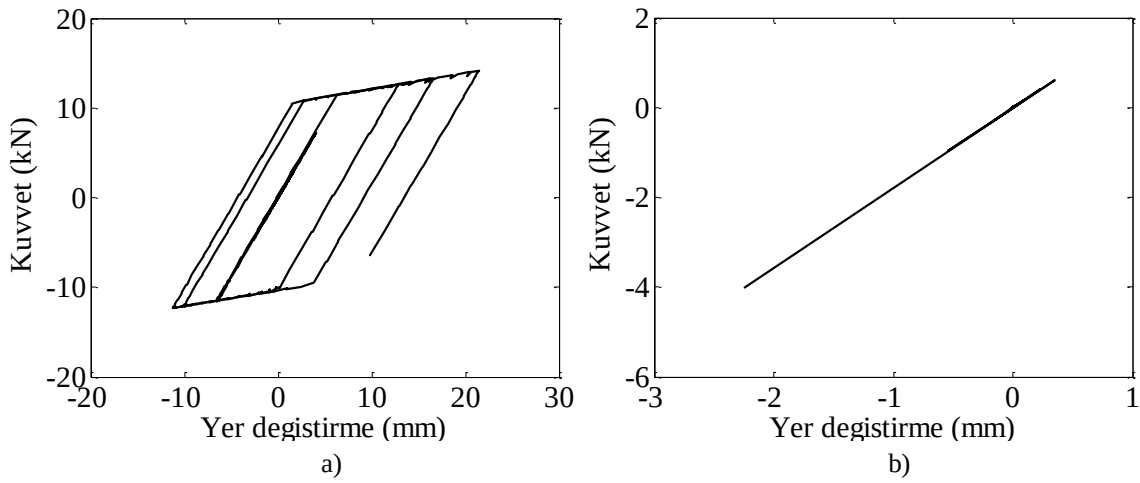
D1 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 12.8, 13.1, 12.8 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 21.0, 22.3, 21.4 mm olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, D3 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 22.3, 24.6, 22.4 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 64.5, 70.6, 66.9 daha büyüktür. Aynı zamanda, D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 74.7, 88, 74.9 daha büyüktür. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değiştirme elde edilmemiştir.



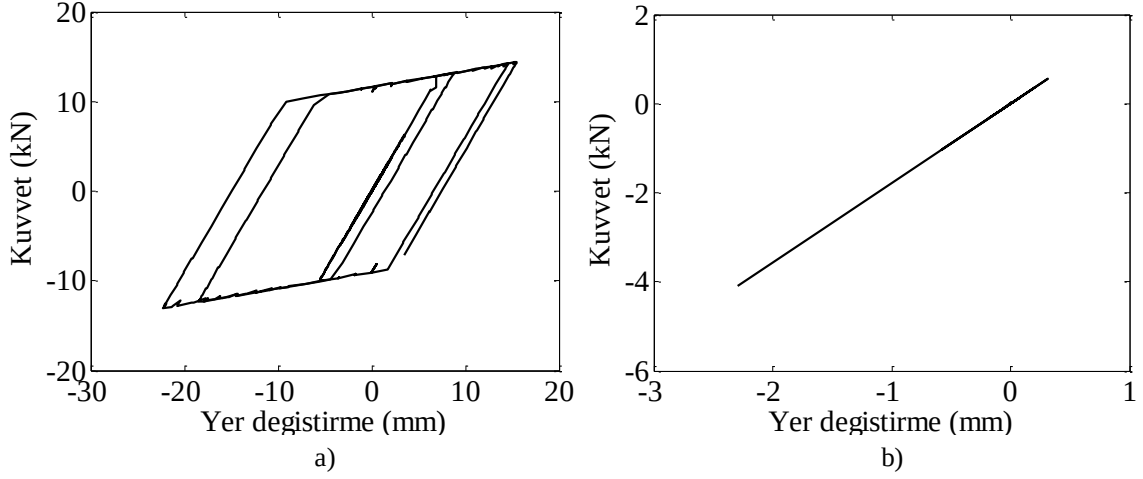
Şekil 5.20. Sadece D2 depremi için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



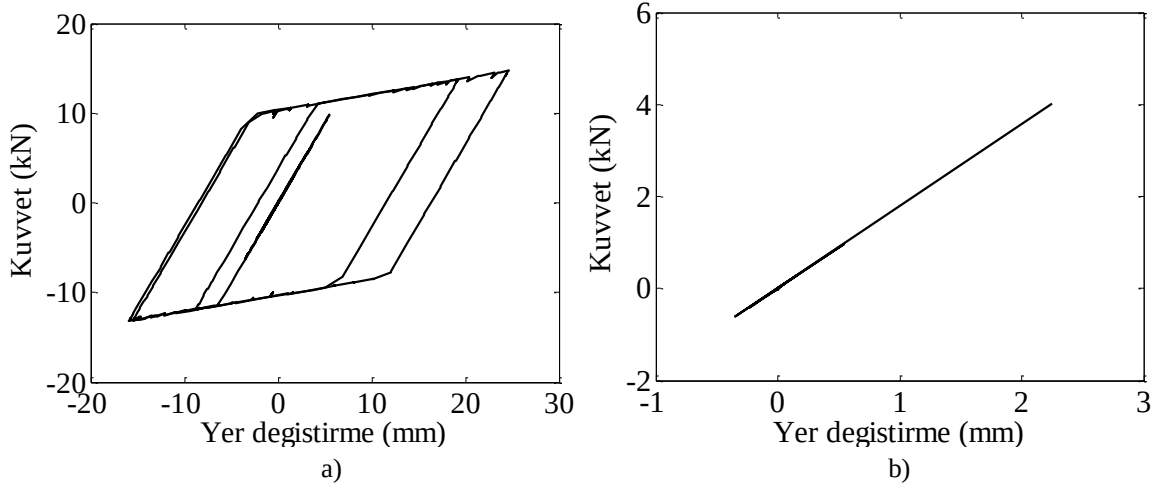
Şekil 5.21. Sadece D2 depremi için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



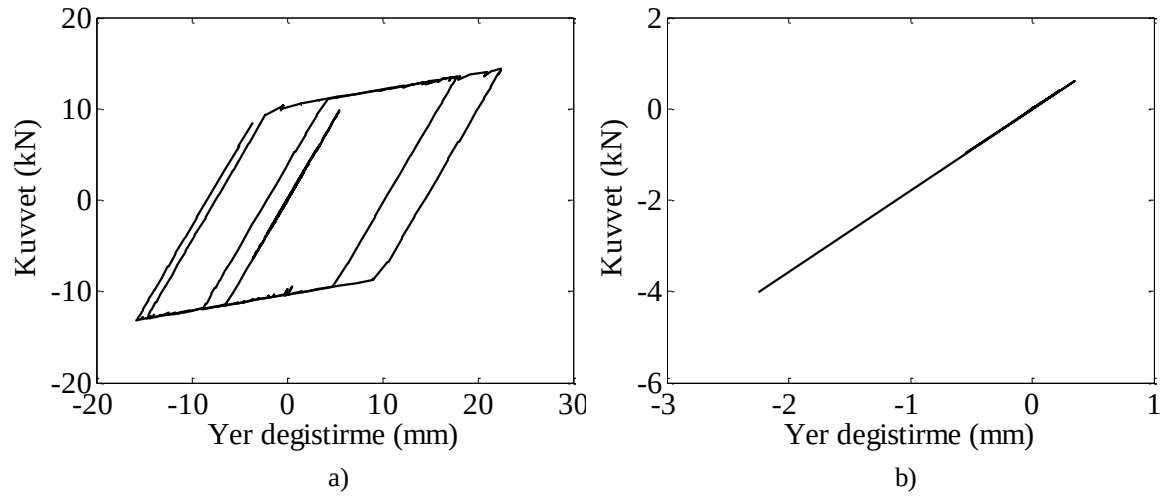
Şekil 5.22. Sadece D2 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.23. Sadece D3 depremi için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



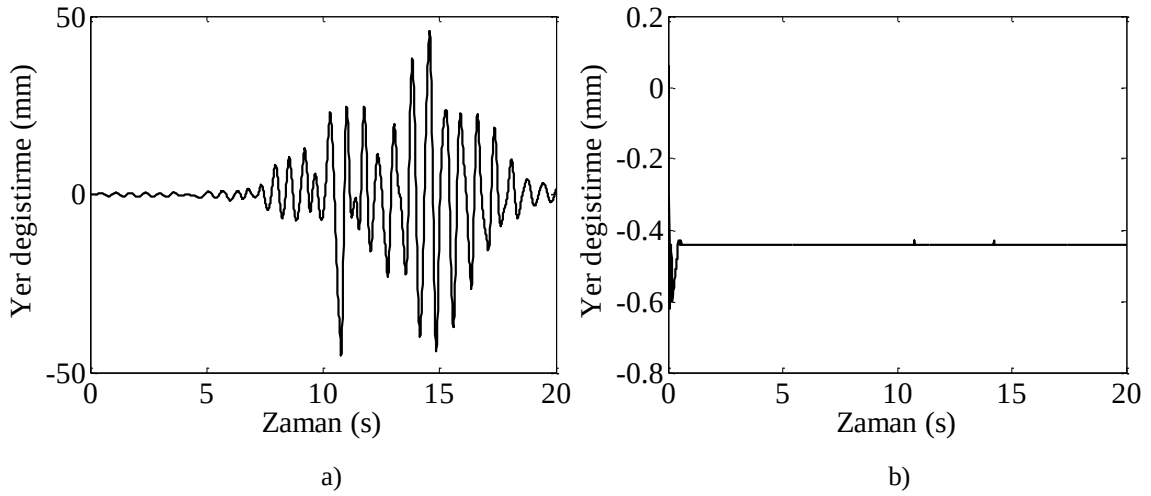
Şekil 5.24. Sadece D3 depremi için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



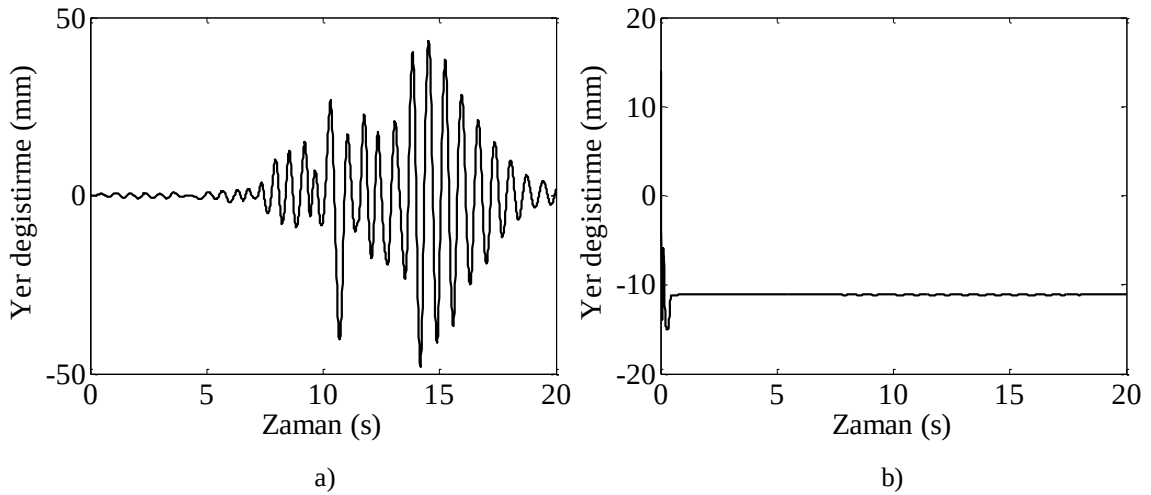
Şekil 5.25. Sadece D3 depremi için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

5.2.2. Sismik yüklerin yükler altında köprünün bir şeridinin tren katarı LM71 ile yüklü olması durumu

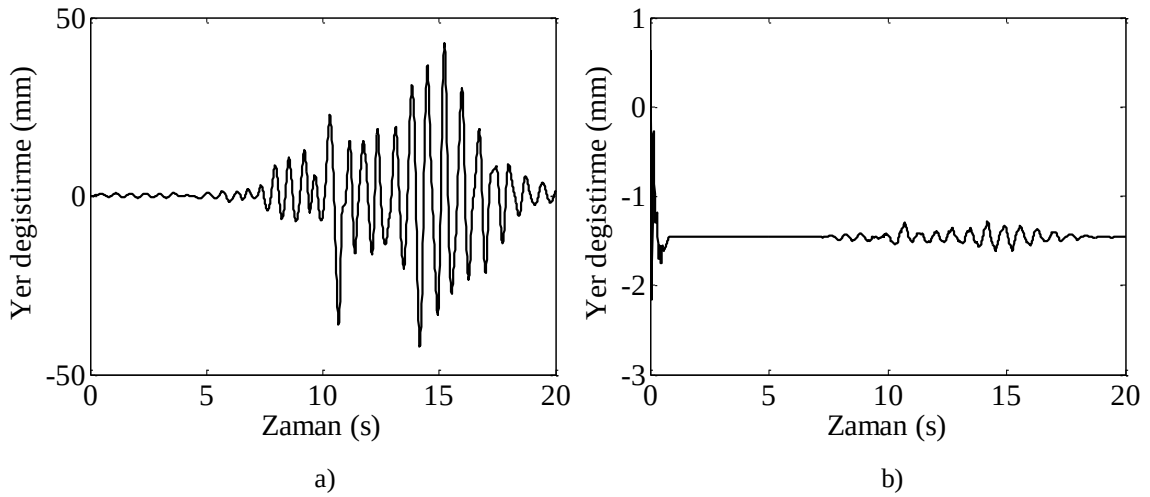
Bu bölümde söz konusu köprüye D1, D2 ve D3 deprem yüklerinin yanı sıra köprünün bir şeridine LM71 tren yükünün birlikte etki etmesi hali için dinamik analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu yükler altında köprünün 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarında elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 5.26-5.34’ de verilmiştir.



Şekil 5.26. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



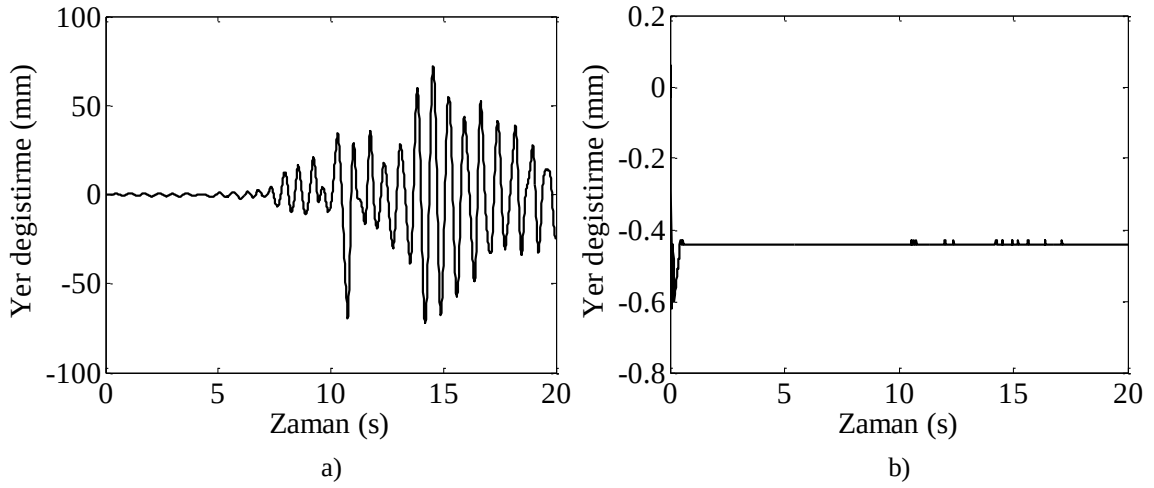
Şekil 5.27. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



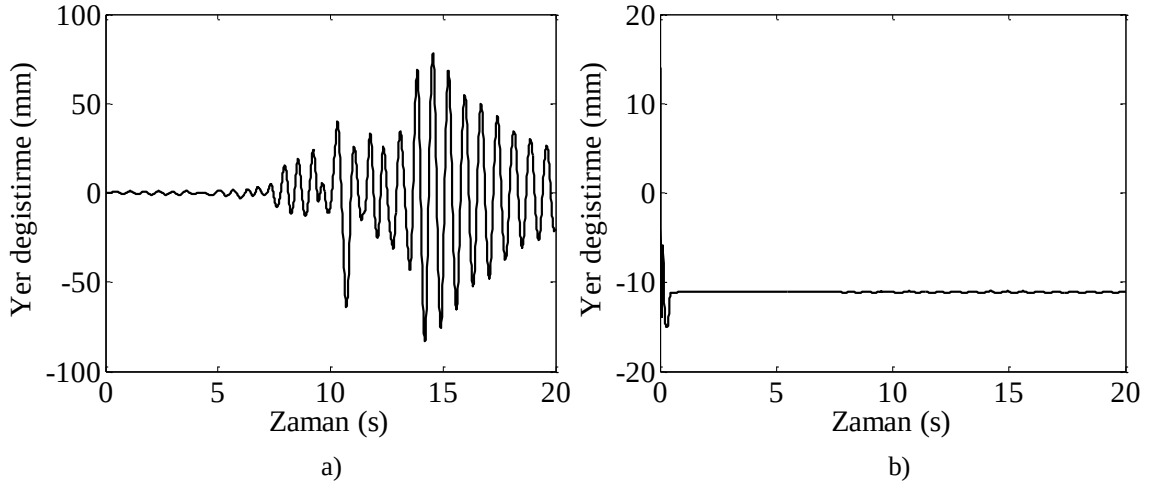
Şekil 5.28. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının akış doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri sırasıyla 45.8, 47.9, 42.7 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında akış doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 72.2, 83.1, 71.6 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda D3 deprem yükü altında akış doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 113.2, 109.7, 98.9 mm olarak hesaplanmıştır. D2 deprem yükleme durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 57.9, 73.5, 67.9 daha büyüktür. Aynı zamanda D3 deprem yükleme durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 147.3, 129.1, 131.9 daha büyüktür.

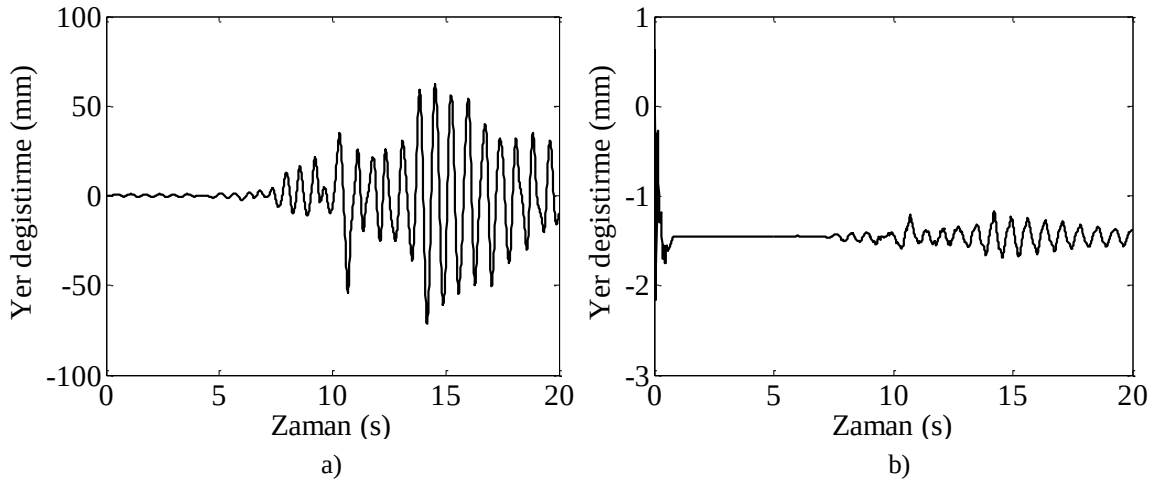
D1 deprem ve bir şerit LM71 tren yükü altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının düşey doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri sırasıyla 0.7, 17, 2.5 mm olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda D2 ve D3 deprem yükleri altında düşey doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 0.6, 15.02, 2.2 mm olarak hesaplanmıştır. Böylece bu üç yükleme durumları düşey yönde karşılaştırıldığında D1, D2 ve D3 yükleme durumu için her hangi bir fark elde edilmemiştir.



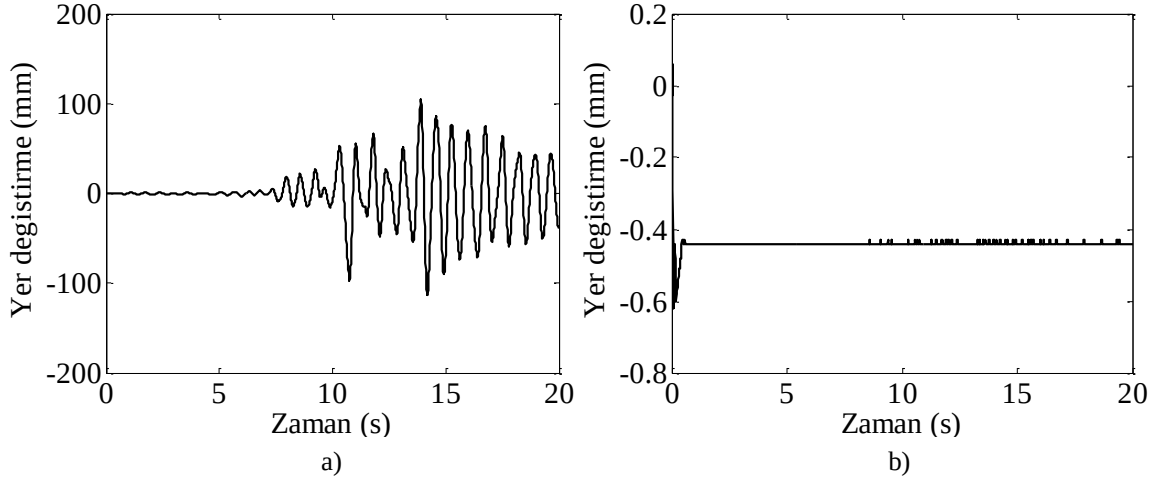
Şekil 5.29. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



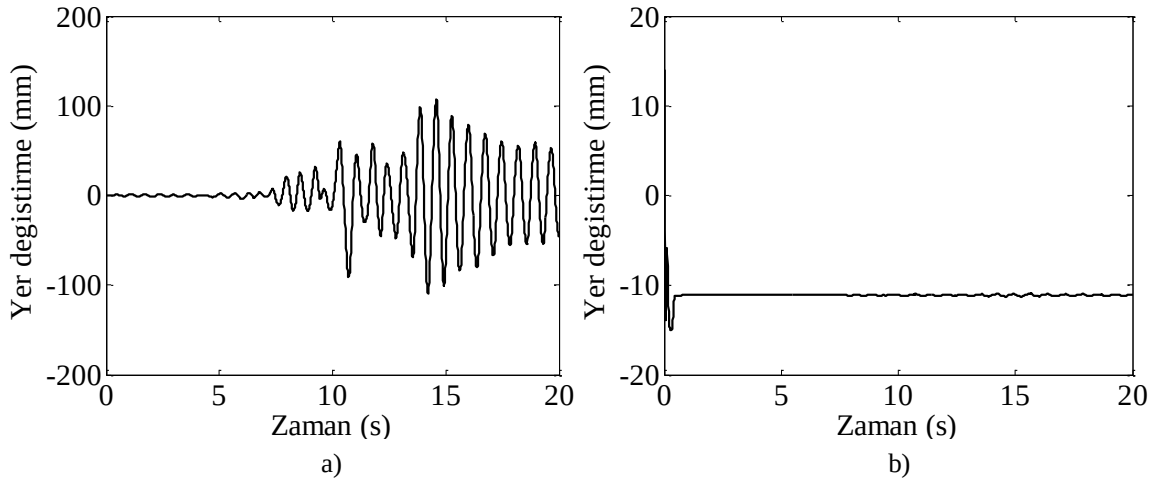
Şekil 5.30. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



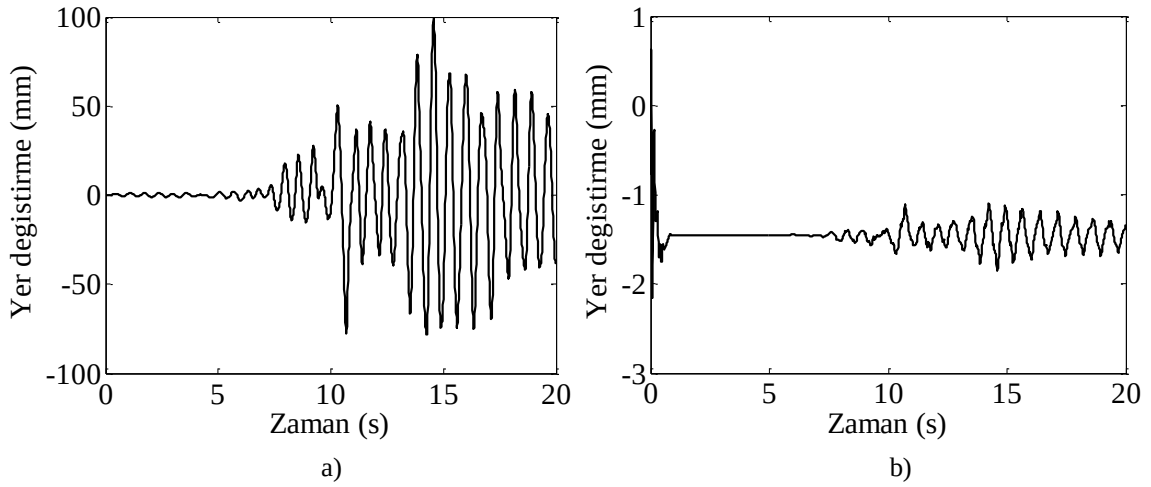
Şekil 5.31. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



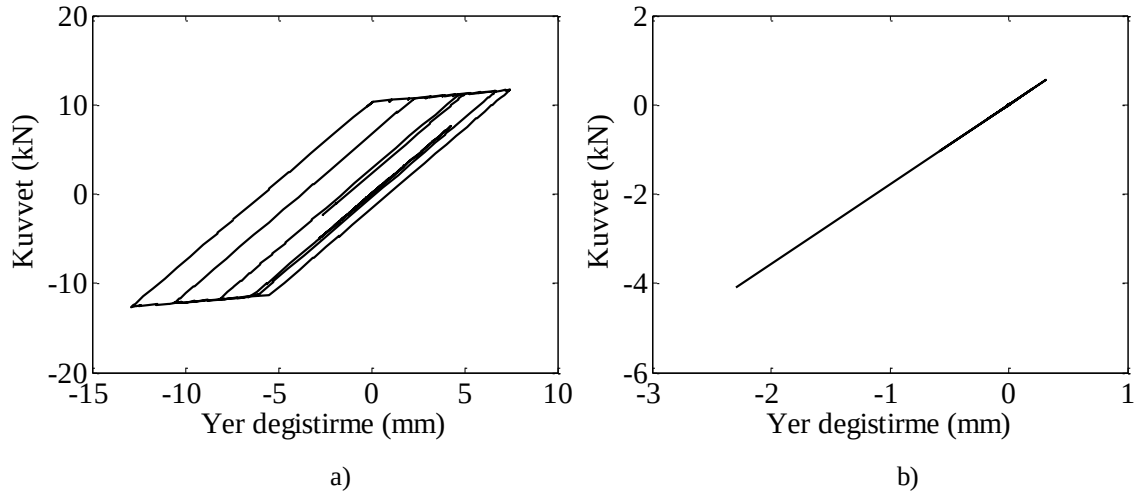
Şekil 5.32. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



Şekil 5.33. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

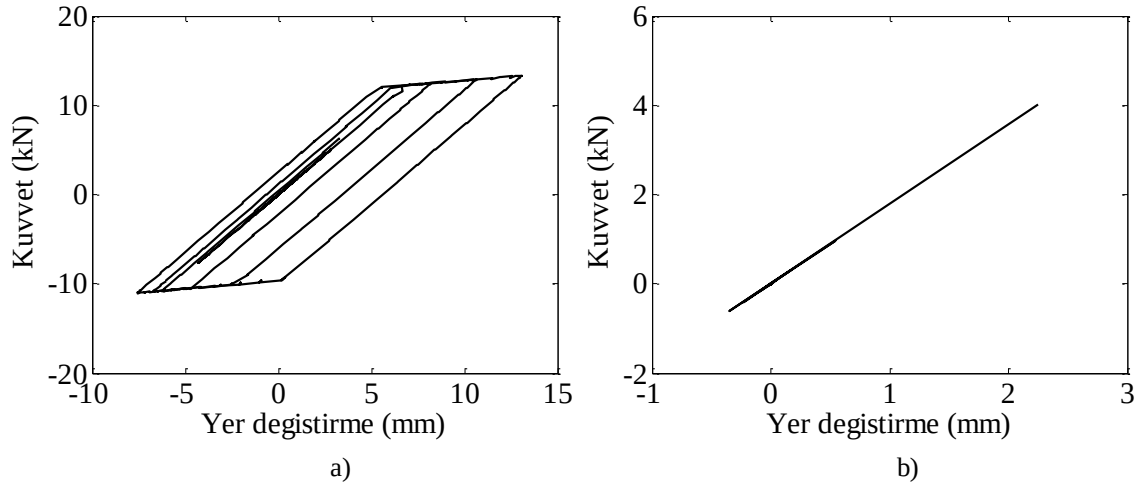


Şekil 5.34. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

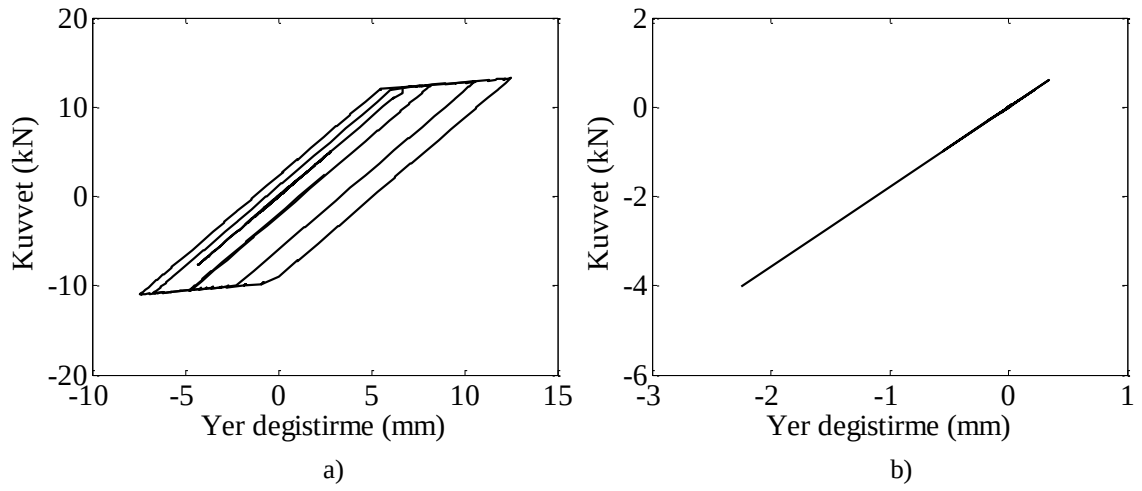


Şekil 5.35. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri

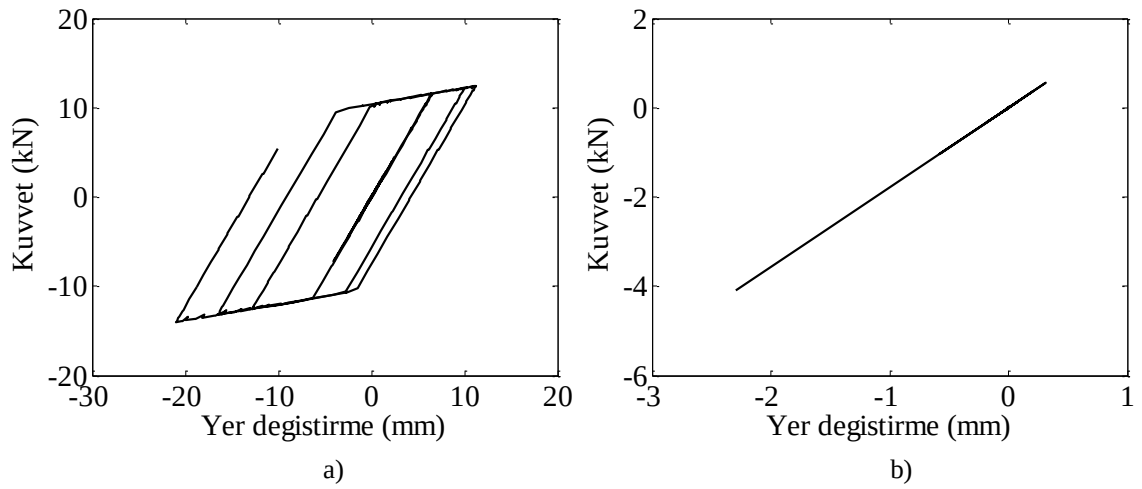
D1, D2 ve D3 deprem yükleri ile bir şerit LM71 tren yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu mesnetlerin trafik ve akış yönlerine ait kuvvet yer değıstirme grafikleri Şekil 5.35-5.43' da görölmektedir. D1 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri sırasıyla 12.7, 13.4, 13.3 kN olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise sırasıyla 14, 14.3, 14.2 kN olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, D3 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise sırasıyla 14.4, 14.6, 14.6 kN olarak hesaplanmıştır. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 10.7, 7.3, 6.9 daha büyüktür. Aynı zamanda, D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 13.8, 9.3, 10.1 daha büyüktür.



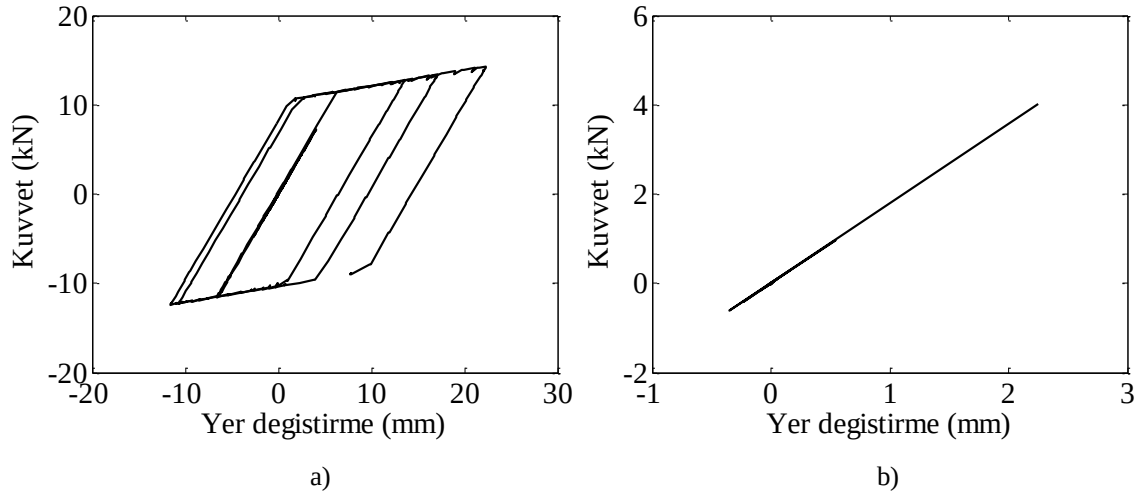
Şekil 5.36. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.37. D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

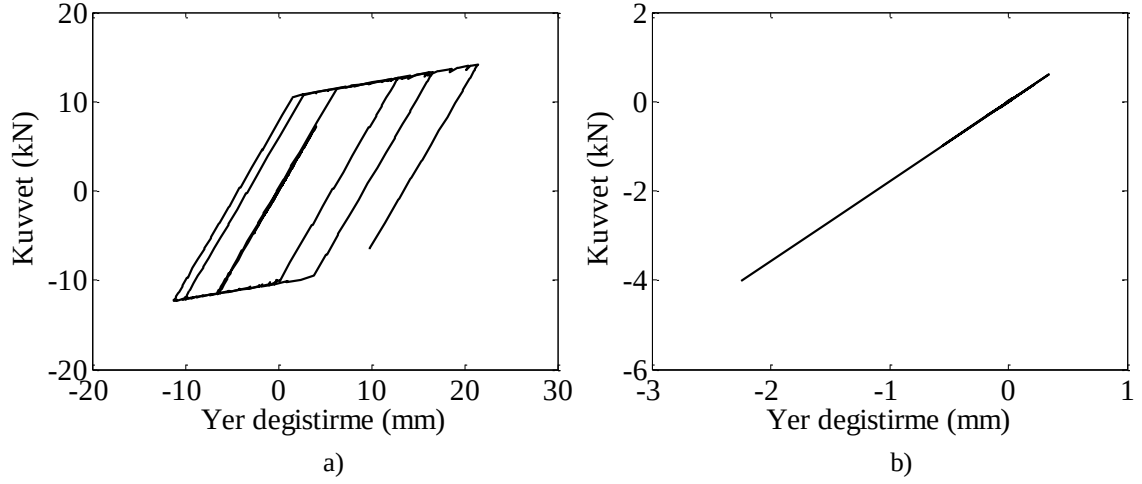


Şekil 5.38. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

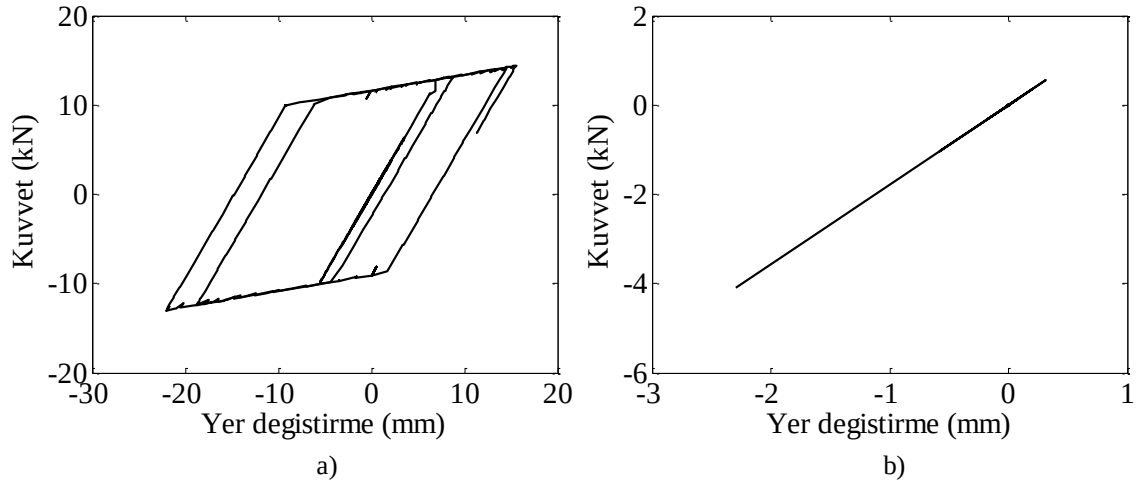


Şekil 5.39. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri

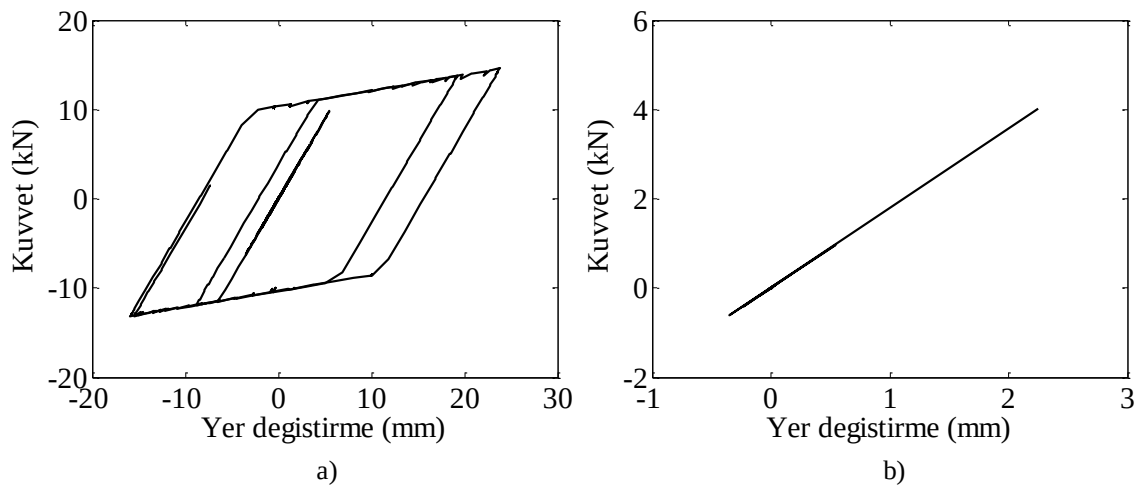
D1 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 12.9, 13.1, 12.5 mm olarak elde edilmiştir. D2 yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 21, 22.3, 21.4 mm olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, D3 yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 22, 23.8, 23.8 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 62.5, 70.6, 71.3 daha büyüktür. Aynı zamanda, D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 70.8, 81.9, 90.1 daha büyüktür. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değıstirme elde edilmemiştir.



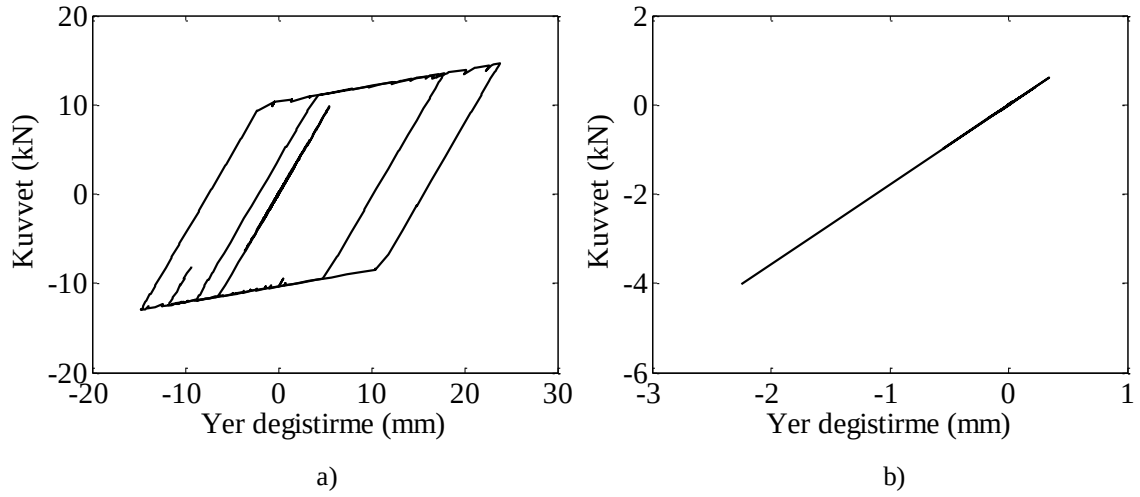
Şekil 5.40. D2 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



Şekil 5.41. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



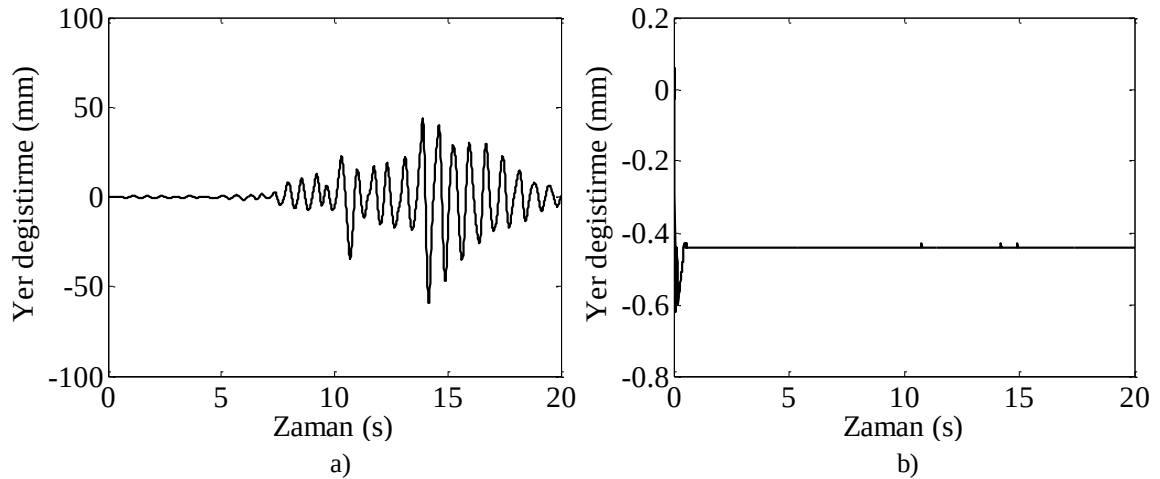
Şekil 5.42. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



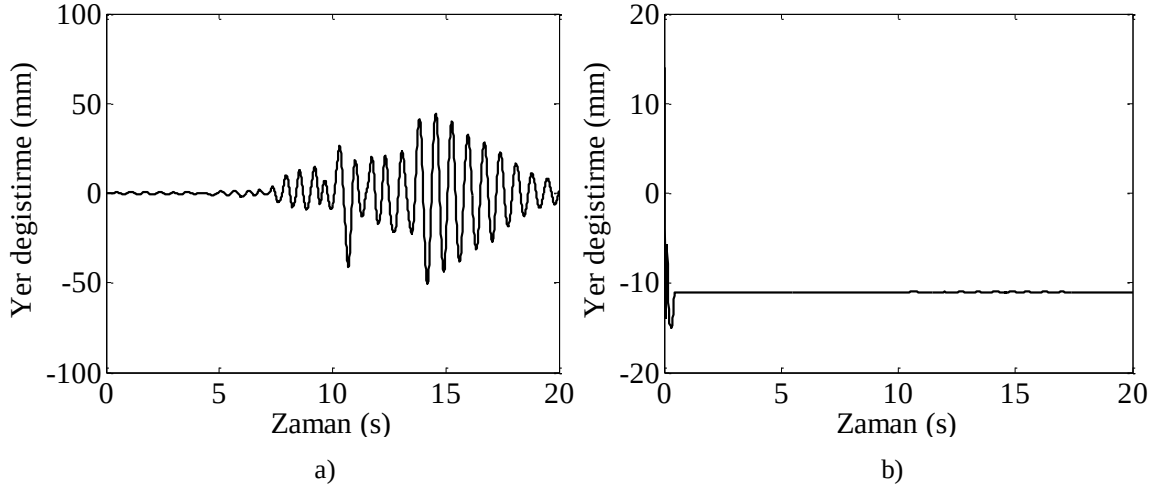
Şekil 5.43. D3 depremi ve bir şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri

5.2.3. Sismik yüklerin yükler altında köprünün iki şeridinin tren katarı LM71 ile yüklü olması durumu

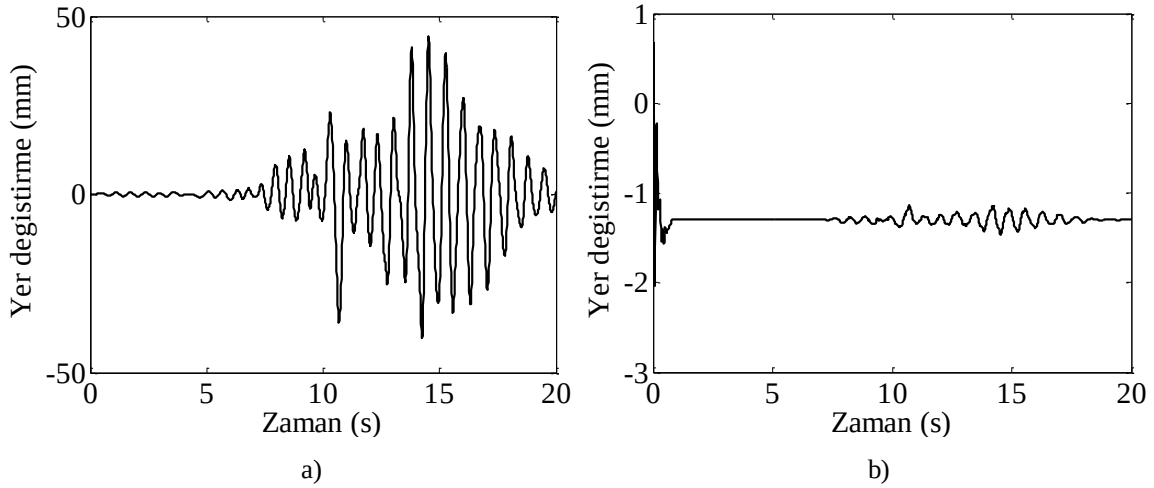
Bu bölümde söz konusu köprüye D1, D2 ve D3 deprem yüklerinin yanı sıra köprünün iki şeridine LM71 tren yükünün birlikte etki etmesi hali için dinamik analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu yükler altında köprünün 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarında elde edilen yer değıstirme-zaman grafikleri Şekil 5.44-5.52' de verilmiştir.



Şekil 5.44. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıstirme-zaman grafikleri



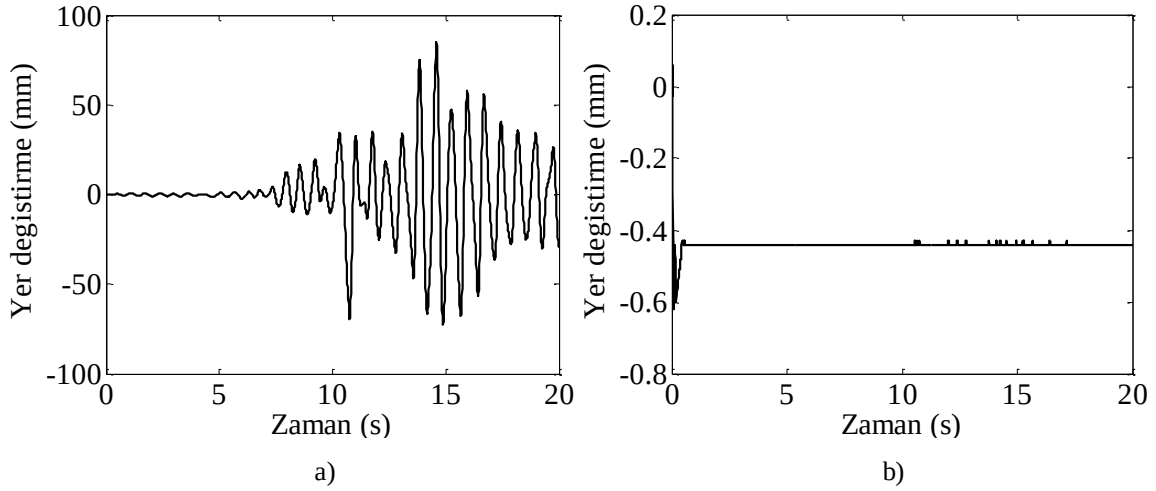
Şekil 5.45. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıstirme-zaman grafikleri



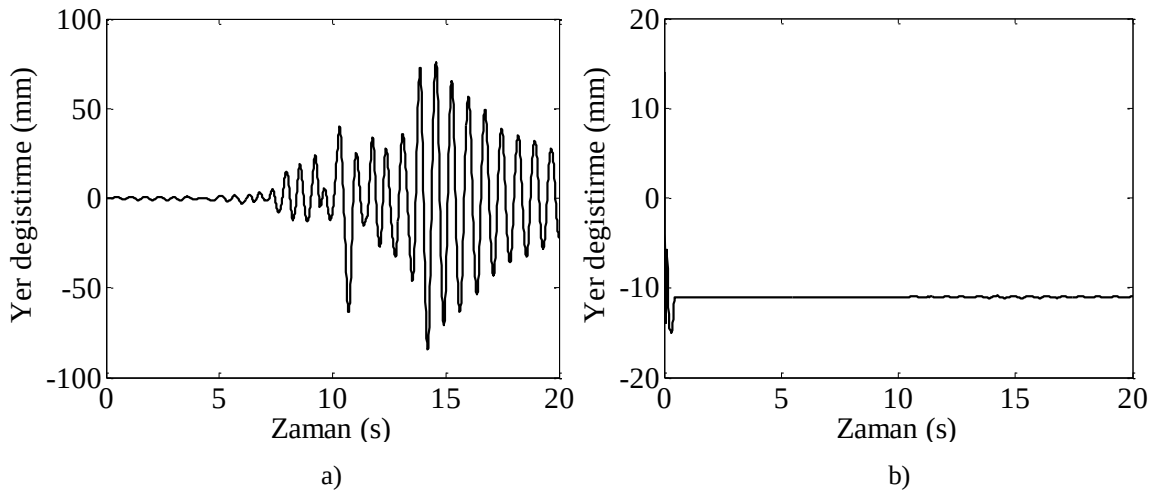
Şekil 5.46. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıstirme-zaman grafikleri

D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükleri altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının akış doğrultusundaki yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri sırasıyla 59.3, 50.2, 44.3 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında akış doğrultusundaki yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 84.7, 84.4, 80.3 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda D3 deprem yükü altında akış doğrultusundaki yer değıstirme değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 95.6, 107.9, 92.8 mm olarak hesaplanmıştır. D2 deprem yükleme durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değıstirme değıerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 42.8, 68.1, 81.3 daha büyüktür. Aynı zamanda D3 deprem yükleme

durumu için 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 yükleme durumuna göre sırasıyla % 61,1, 114,9, 109,5 daha büyüktür.



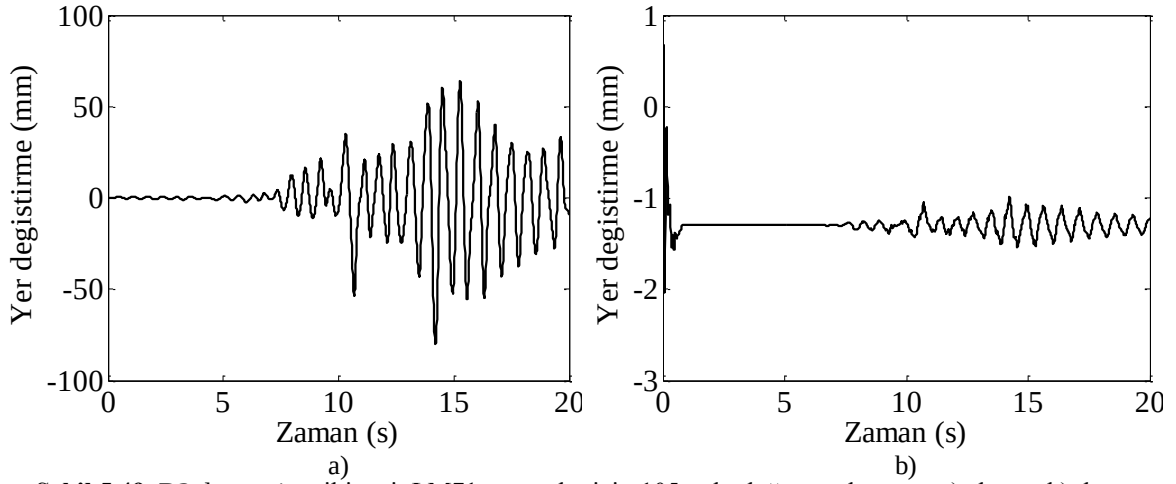
Şekil 5.47. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



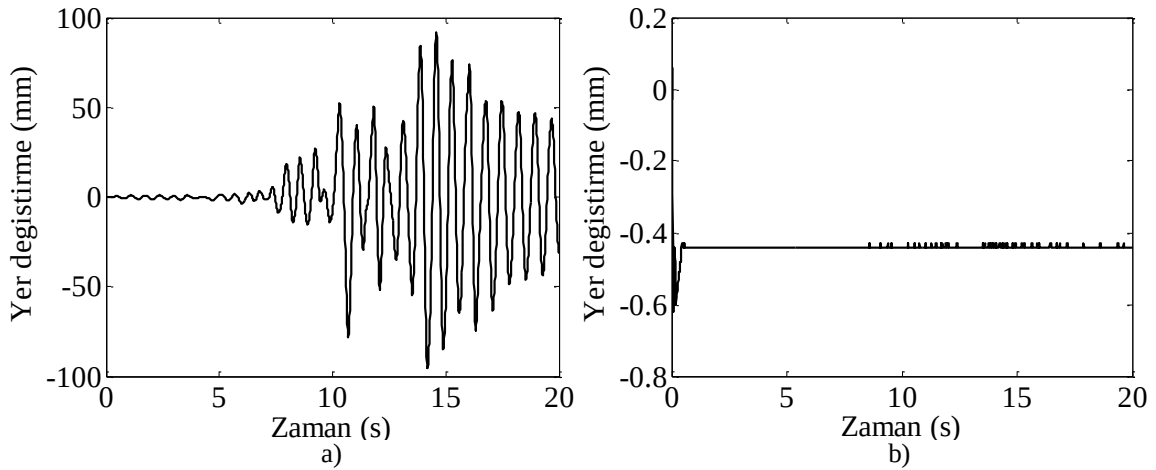
Şekil 5.48. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri

D1 deprem ve iki şerit LM71 tren yükleri altında 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktalarının düşey doğrultusundaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri sırasıyla 0,6, 15, 2 mm olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda D2 ve D3 deprem yükleri altında düşey doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ise 85, 95 ve 105 nolu düğüm noktaları için sırasıyla 0,6, 15, 2 mm olarak hesaplanmıştır.

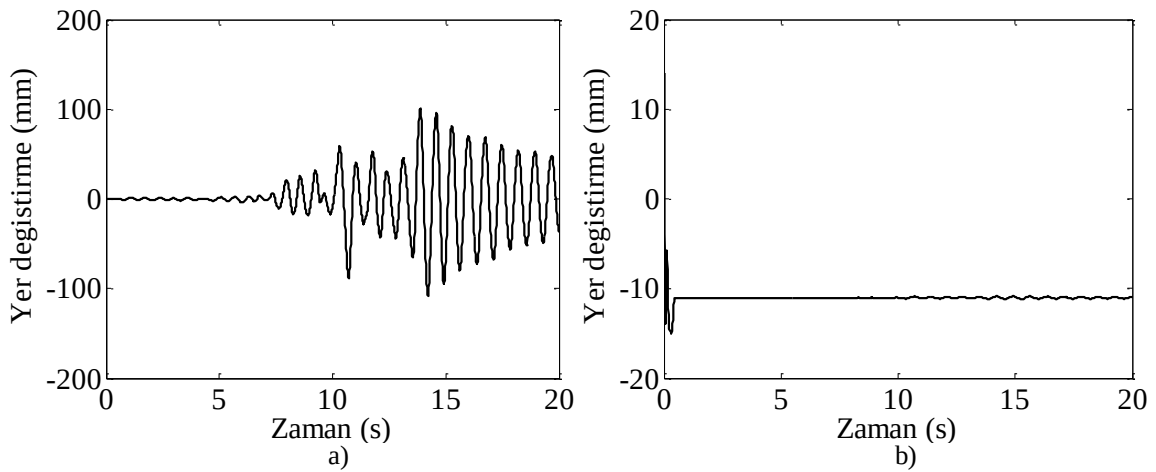
Böylece bu üç yükleme durumları düşey yönde karşılaştırıldığında D1, D2 ve D3 yükleme durumu için her hangi bir fark elde edilmemiştir.



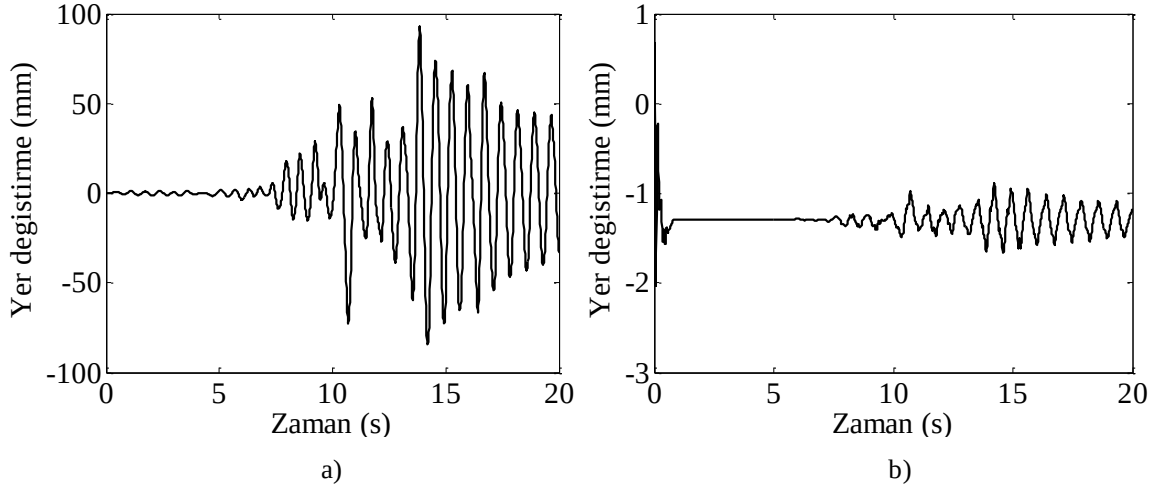
Şekil 5.49. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



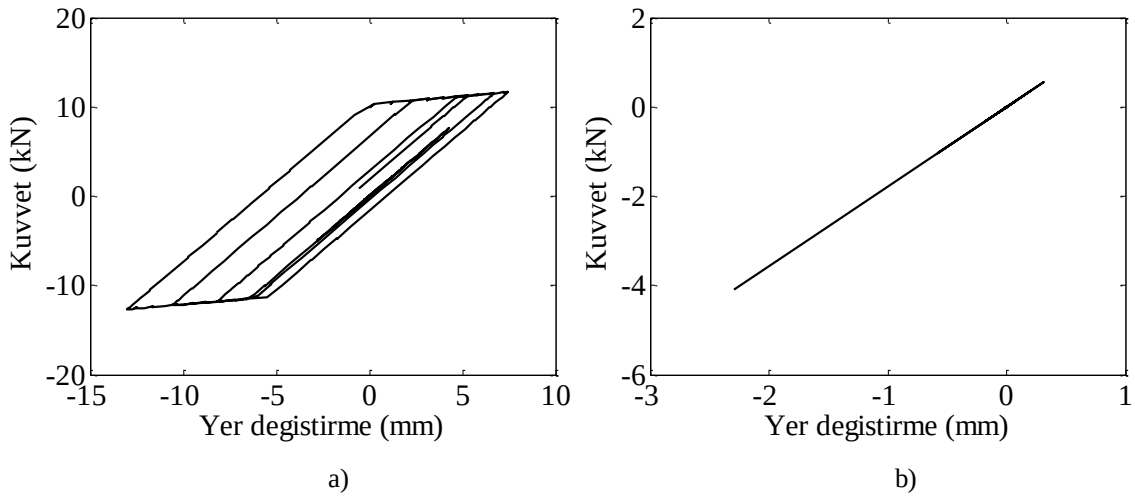
Şekil 5.50. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 85 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



Şekil 5.51. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 95 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değiştirme-zaman grafikleri



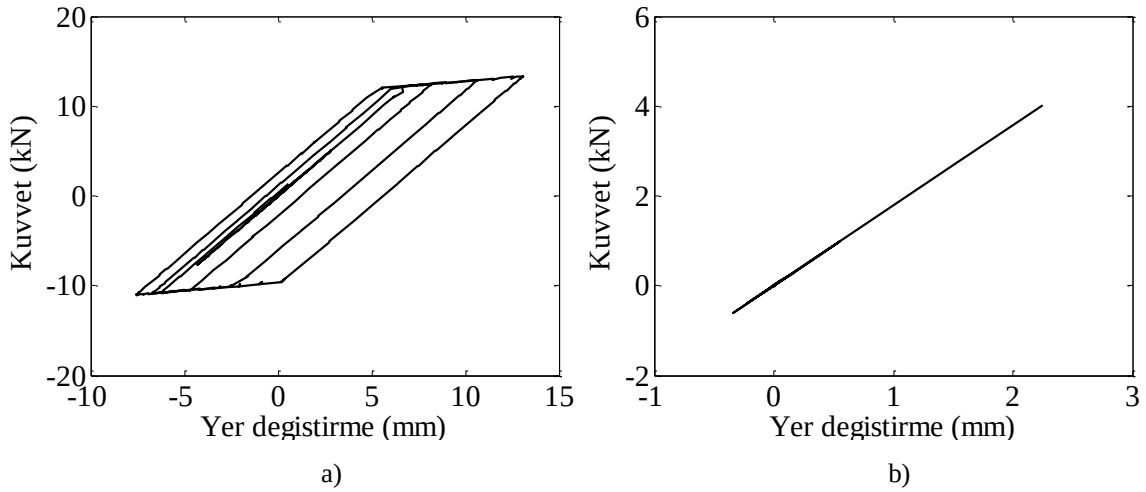
Şekil 5.52. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için 105 nolu düğüm noktasının a) akış ve b) düşey yönlerdeki yer değıştirme-zaman grafikleri



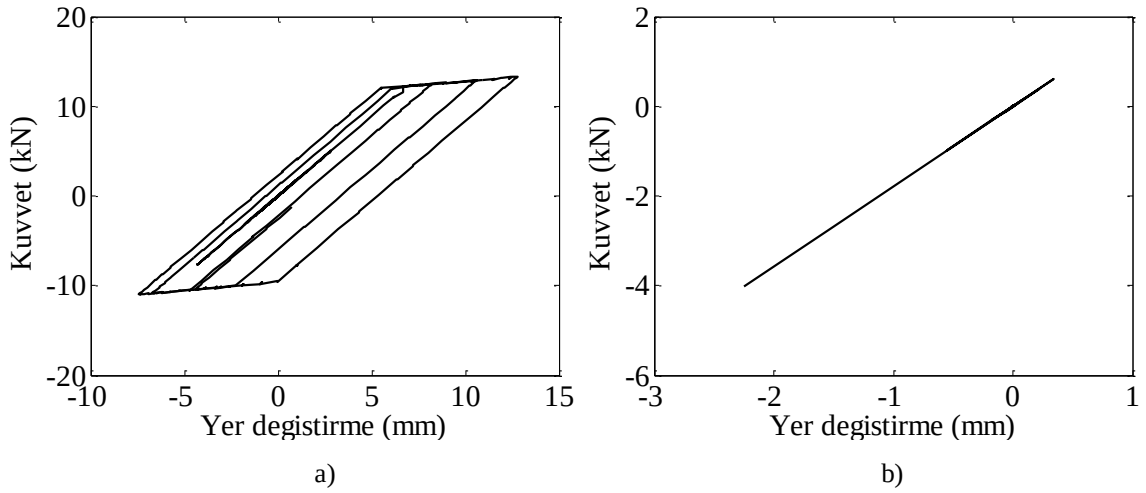
Şekil 5.53. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıştirme grafikleri

D1, D2 ve D3 deprem yükleri ile iki şeritte LM71 tren yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu mesnetlerin trafik ve akış yönlerine ait kuvvet yer değıştirme grafikleri Şekil 5.53-5.61' da görölmektedir. D1 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri sırasıyla 12.6, 13.4, 13.3 kN olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise sırasıyla 13.9, 14.3, 14.1 kN olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, D3 deprem yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğırtusunda elde edilen kuvvet değıerlerinin mutlak maksimum değıerleri ise sırasıyla

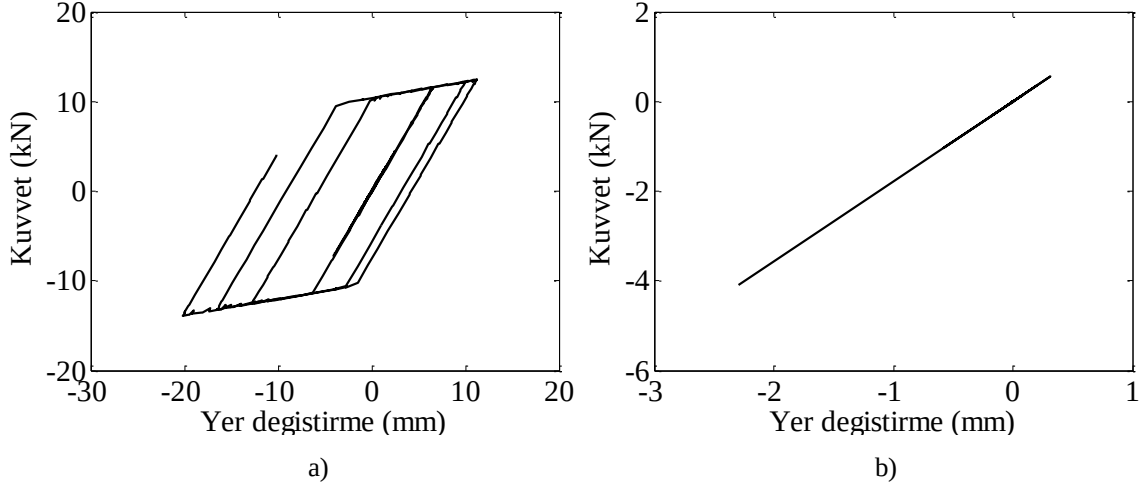
14.4, 14.6, 14.6 kN olarak hesaplanmıştır. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 9.4, 7.3, 6.4 daha büyüktür. Aynı zamanda, D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen kuvvet değerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 13.8, 9.3, 9.7 daha büyüktür.



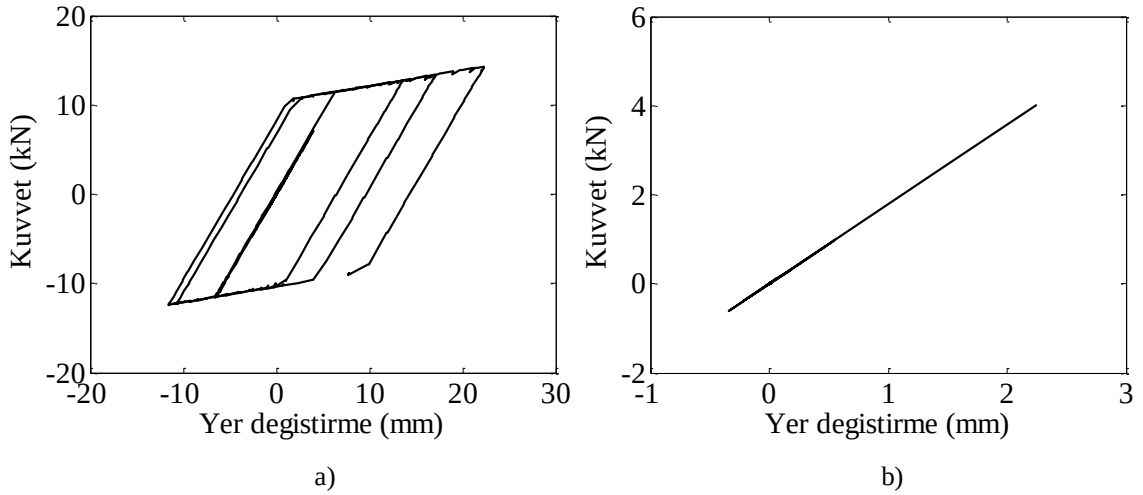
Şekil 5.54. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



Şekil 5.55. D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



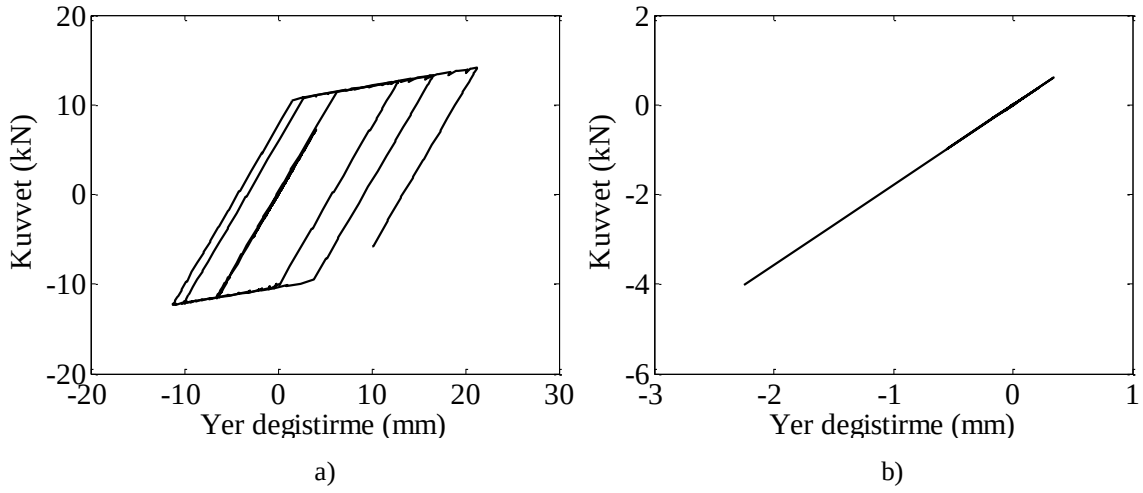
Şekil 5.56. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



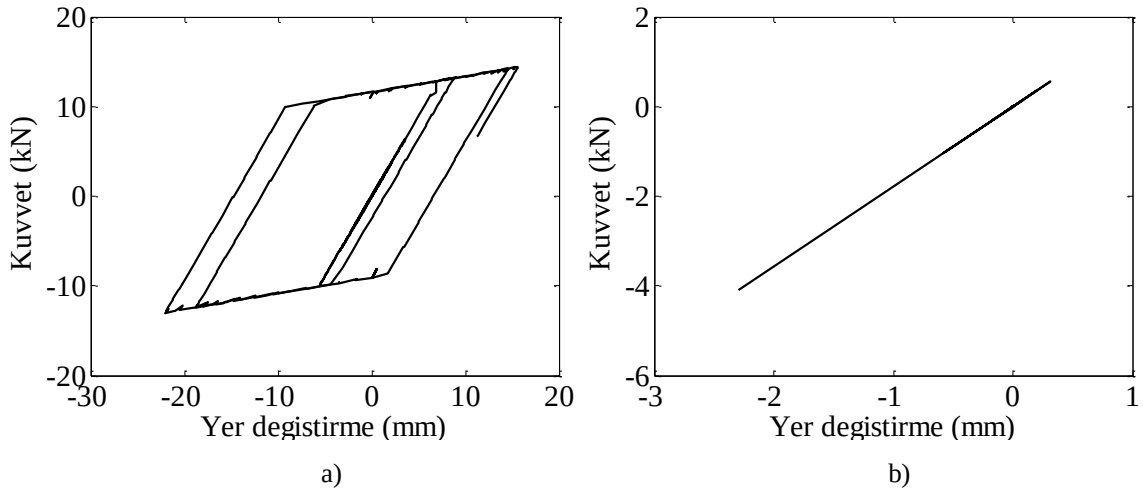
Şekil 5.57. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' ün a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

D1 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 13, 13, 12.8 mm olarak elde edilmiştir. D2 yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 20.2, 22.3, 21.3 mm olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, D3 yükü altında EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerin akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları sırasıyla 22, 23.8, 23.8 mm olarak elde edilmiştir. D2 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1

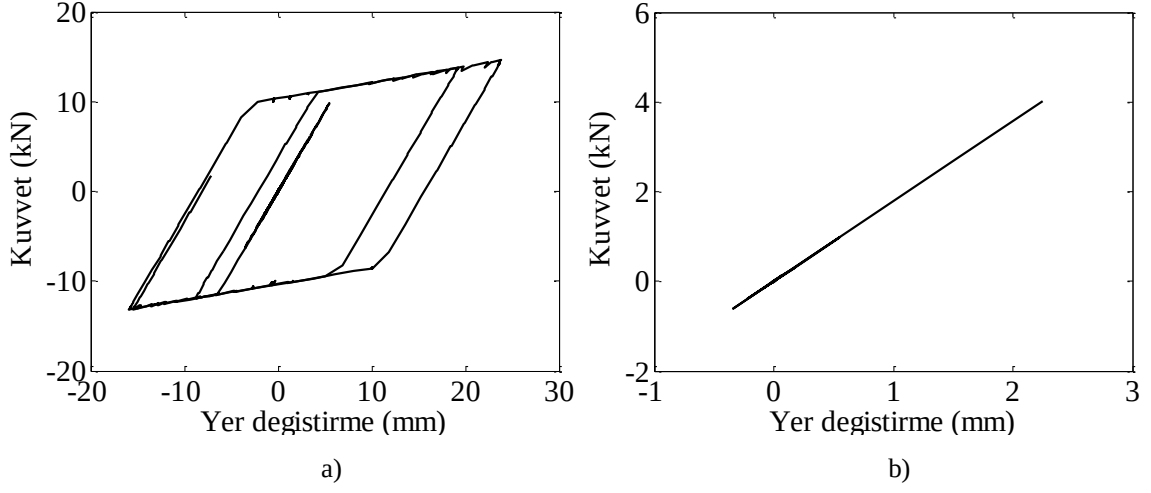
deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 55, 70.7, 66.5 daha büyüktür. Aynı zamanda, D3 deprem yükleme durumu için EM 3, 23 ve 38 nolu elastomer mesnetlerde akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri D1 deprem yükleme durumuna göre sırasıyla % 69.5, 82.1, 86.2 daha büyüktür. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değiştirme elde edilmemiştir.



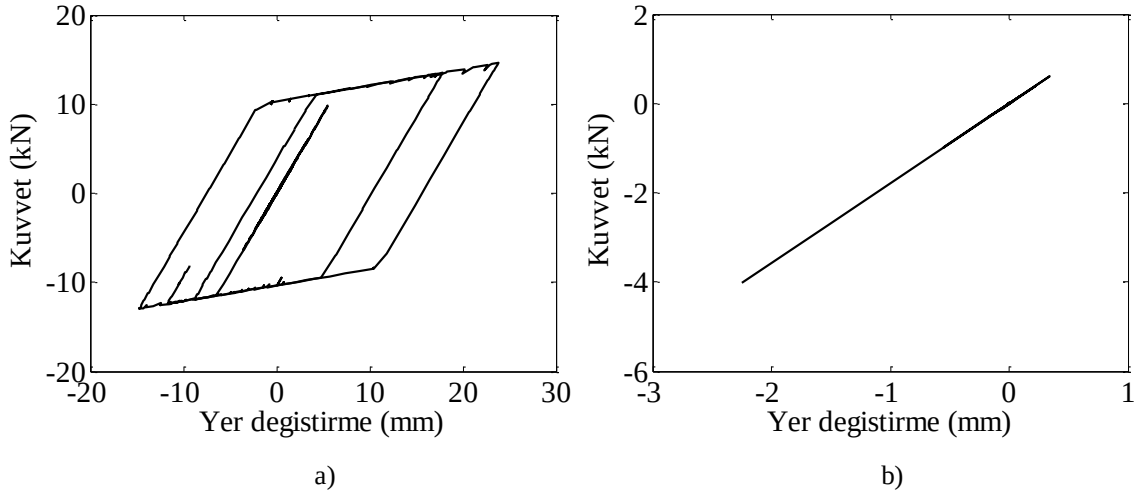
Şekil 5.58. D2 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



Şekil 5.59. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 3' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değıstirme grafikleri



Şekil 5.60. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 23' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.61. D3 depremi ve iki şerit LM71 tren yükü için EM 38' in a) akış yönü ve b) trafik yönü kuvvet-yer değiştirme grafikleri

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, elastomer mesnetler ve çubuk elemanlar ile modellenen bir demiryolu köprüsünün tren ve sismik yüklerin birlikte dikkate alınmasıyla köprü üzerinde oluşabilecek etkiler incelenmiştir. Çözümlerde kullanılan köprü, iki açıklıklı ve her bir açıklığı 20 m olan ön gerilmeli I en kesitine sahip kirişlerle inşa edilmiş bir demiryolu köprüsüdür. Analizler için sonlu elemanlar metodu kullanılarak yeni bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılan programın doğruluğunun kontrolü için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Çözümlerde, Kauçuk Elastomer mesnet dikkate alınmıştır. DLH 2007 [58]' de verilen spektrum eğrisine uyumlu yapay ivme verileri üretilmiş ve söz konusu köprüye akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Yapay ivme kayıtları üç farklı deprem seviyesi için üretilmiştir (D1, D2 ve D3). D1, D2 ve D3 seviyelerinde üretilen depremin mutlak maksimum ivme genlikleri sırasıyla 0.2g, 0.3g, 0.4g' dir. Aynı zamanda dinamik yük olarak LM71 yük katarının köprünün bir ve iki şeridi üzerinden etki etme durumları da ayrı bir çözüm olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen çözümlerde yer değiştirme-zaman grafikleri ile elastomer mesnetlere ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri birbirleri ile karşılaştırılarak depremin köprü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Köprüye sadece deprem yükü etki etmesi halinde D2 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri, D1 deprem yüküne göre % 61' e varan değerlerde daha büyük olmuştur. D3 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 deprem yüküne göre % 110' a varan değerlerde daha büyük olmuştur. Ancak düşey doğrultular her iki durum için herhangi bir fark elde edilmemiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 11' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D3 yükleme durumunda ise akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 14.1' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 70.6' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda D3 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 88' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değiştirme elde edilmemiştir.

Köprüye deprem yükü ve bir şeridine LM71 yük katarının birlikte etki etmesi halinde D2 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri, D1 deprem yüküne göre % 73.5' e varan değerlerde daha büyük olmuştur. D3 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 deprem yüküne göre % 147.3' a varan değerlerde daha büyük olmuştur. Ancak düşey doğrultular her iki durum için herhangi bir fark elde edilmemiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 10.7' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D3 yükleme durumunda ise akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 13.8' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 71.3' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda D3 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 90.1' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değiştirme elde edilmemiştir.

Köprüye deprem yükü ve iki şeridine LM71 yük katarının birlikte etki etmesi halinde D2 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri, D1 deprem yüküne göre % 81.3' e varan değerlerde daha büyük olmuştur. D3 deprem yükü altında köprünün akış doğrultusu için elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 deprem yüküne göre % 114.9' a varan değerlerde daha büyük olmuştur. Ancak düşey doğrultular her iki durum için herhangi bir fark elde edilmemiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 9.4' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D3 yükleme durumunda ise akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen kuvvet büyüklükleri, D1 yükleme durumuna göre % 13.8' e varan daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. D2 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 70.7' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda D3 yükleme durumu için akış yönünde elastomer mesnetlerde elde edilen yer değiştirme değerleri ise D1 yükleme durumuna göre % 86.2' e varan daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Tüm yükler altında düşey yönde elastomer mesnetlerde herhangi bir plastik şekil değiştirme elde edilmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Taly, N. 1998. "Design of Modern Highway Bridges", Mc Graw-Hill.
- [2] Kelly JM. 1990. Chalhoub MS. Earthquake Simulator Testing of a Combined Sliding Bearing and Rubber Bearing Isolation System. UCB=EERC-87=04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- [3] Hyashi S., Kitamura Y., Saruta T., 1998. Study about seismic isolation system, combination of laminated rubber bearing and friction sliding bearing. Proceeding of 10th Symposium of Earthquake Engineering, Yokohama, Japan; 2807–2812 (in Japanese).
- [4] Iemura H., Takahashi Y., Nakajima K., Ogawa K., 1999. Seismic response characteristic of friction sliding seismic isolation under vertical motion. Proceeding of 25th Conference of Earthquake Engineering Research, Tokyo, Japan, (in Japanese).
- [5] Tsopelas P., Constantinou MC., Study of elastoplastic bridge seismic isolation system. Journal of Structural Engineering (ASCE) 1997; 123:489–498.
- [6] Tsopelas P., Okamoto S., Constantinou MC., Ozaki D., Fujii S., 1994. NCEER Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges Experimental and Analytical Study of Systems Consisting of Sliding Bearings, Rubber Restoring Force Devices and Fluid Dampers, NCEER-94-0002, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Bu_alo, NY.
- [7] Kunde, M. C., R. S. Jangid., 2006. "Effects of pier and deck flexibility on the seismic response of isolated bridges." Journal of Bridge Engineering 11.1 109-121.
- [8] Feng MQ., Okamoto S., 1994. Shaking table tests on base isolated bridge with sliding system. Proceedings of the 3rd US–Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, NCEER-94-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Bu_alo, NY, 2.23–2.37.
- [9] Izuka M., Takaoka E., Takenaka Y., Yoshikawa K., 1998. Shaking table test on seismic isolation, combination of laminated rubber bearing and friction sliding bearing. Proceeding of 10th Symposium of Earthquake Engineering, Yokohama, Japan, 201–206.

- [10] Nakajima K., Iemura H., Takahashi Y., Ogawa K., 2000. Pseudo Dynamic tests and implementation of sliding bridge isolators with vertical motion. Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1365, New Zealand.
- [11] Iemura H., Takahashi Y., Hirai T., 2000. Horizontal and vertical seismic response experiments on high performance stopper and bearing. Proceedings of 2nd Colloquium on Base Isolation and Control, Japan, 107–114.
- [12] Bertero V.V. 1992. “Seismic Upgrading of Existing Structures“, Tenth World Conference Earthquake Engineering, Madrid, Spain.
- [13] Skinner, Robinson & McVerry, 1993. “An Introduction to Seismic Isolation”, John WILEY & Ltd. , West Sussex PO19 IUD, England : 96 – 108.
- [14] Buckle I., Mayes R., 1990. “These issue: seismic isolation” Earthquake spectra, EERI, 6, No. 201.
- [15] Medeot R. ve Tuncer M., “İspanya’daki Yüksek Hızlı Demiryolu Köprüleri ve Viyadükleri” www.imoantalya.org.tr/files/sube_yayinlari/kopru_viyaduk/docs/no-38.doc.
- [16] Kelly J.M., 1982. "Seismic Base Isolation", 1st World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, Vol. 1 – Pub. ACI – Boston, USA.
- [17] Medeot R., Albajar L., 1992. “The Evolution of Seismic Devices for Bridges in Italy“, Tenth Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain.
- [18] Romo J., Sanchez J., Corres H., 2002. Discusión Sobre los Criterios de Diseño de la Subestructura Puentes de Ferrocarril en Zona Sísmica; Jornada Anual de ACHE sobre los Puentes de Ferrocarril, Madrid, Spain.
- [19] Medeot R., 2006. “The European Standard on Anti-seismic Devices”, 6th World Congress on Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Halifax, Canada.
- [20] Medeot R., 1998. “Energy Dissipation as Technological Answer to Highly Demanding Problems“ US-Italy Workshop, Columbia University at N.Y., USA.
- [21] Medeot R., 2004. “Re-Centring Capability Evaluation of Seismic Isolation Systems Based on Concepts”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- [22] Medeot R., 2007. “Comparison between US and European Norms on Seismic Hardware”, 10th Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey.

- [23] Medeot R., 2004. "Aislamiento y Amortiguación en el Diseño Sísmico", Jornada Anual de sobre el Comportamiento de Estructuras de Hormigón en Zonas Sísmicas, Madrid, Spain.
- [24] Fenercioğlu T., Sönmez N., Koçak A., Uğur Y., Sönmez İ. K. "Öngerilmeli Betondan Kesitli Prefabrike Kirişlerin Demiryolu Köprülerinde Etkin Kullanımı".
- [25] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1996. Standard Specifications and Highway Bridges, Sixteenth edition, Washington.
- [26] UIC 702, "Static Loading Diagrams for the Design of Rail Carrying Structures", International Union of Railways.
- [27] UIC 776-1, "Loads to be Considered in Railway Bridges", International Union of Railways.
- [28] EN 1991-2 Eurocode 1, "Actions on structures-Part 2 Traffic Loads on Bridges" Eurocodes.
- [29] Öztürk, Z., Öztürk, T., & Arlı, V. Yüksek Hızlı Demiryolu Köprülerinde Rezonans Olayı.
- [30] Naeim, F. and Kelly, J.M., 1999. Design of seismic isolated structures from theory to practice, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [31] Türker H., Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi.
- [32] Hata T. and Ogura Y., 2004. Aseismic Devices Co.: Development of seismic devices for earthquake protection, Small Structures Technologies and Earthquake Engineering (SE'04) Technical Report, Japan.
- [33] Bayülke N. 2002. Yapıların Deprem Titreşimlerinden Yalıtımı, Martı, İstanbul.
- [34] Gerçek M., Köprü ve Viyadüklerin Depreme Dayanıklı Olarak Projelendirilmesi ve Deprem İzolatörleri, Araştırma yazısı.
- [35] Hasol D. 2003. Mimarlık Sözlüğü, Yem Yayın, İstanbul.
- [36] Pınarbaşı S. , Uğurhan Akyüz 2005. İMO TeknikDergi,, Sayı: 3581-3598.
- [37] Milli Eğitim Bakanlığı, 2011. "Deprem "Deprem İzolatör Sistemleri" Ankara.
- [38] Chandrupatla, T. R., Belegundu, A.D. 1997. "Introduction to Finite Elements in Engineering ", Prentice-BUdi International, U.S.A., 1-2.
- [39] Wasti, T., 1990. "Sonlu Eleman Yönteminin Betonarme Elemanlarına Uygulanması" , İMO Teknik Dergi, 199-208.

- [40] Hamil, S.J., Baglin, P.S., Scott, R.H., 2000. "Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Beam - Column Connections", Proceedings of the American Concrete Institue (Structural Journal), 97 (6) : 886-894.
- [41] Arslan, G., 2004. "Mesh Size Effect On Load Carrying Capacity Of Thereinforced Concrete Beams Without Stirrups By Using Drucker-Prager And Crackin Concrete Fracture Criteria" , Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi.
- [42] Qu, R., 1994. "Theoretical Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Bridge Members Strengthened with CFRP Laminates," Master Tezi, Fiorida Atlantic University, 51, 101, 144-145.
- [43] Naaman, A. E., 1982 "Prestressed Concrete Analysis and Design Fundamentals", McGraw- Hill Publishing Company, USA, 20-80.
- [44] Özden, K. ,Eren, İ., Trupia, A. L. ve Öztürk, T., 1994. "Öngerilmeli Beton", İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 5-15.
- [45] TS 3233, 1979. "Öngerilmeli Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1-44.
- [46] BS 8110, (1985). "Structural Use of Concrete Part 1,2 and 3", British Standards Institution, 1-68.
- [47] Lin, T.Y., Burns, N.H., 1981. "Design of Prestressed Concrete Structures", John Wiley & Sons, New York, 1-16.
- [48] Nilson, A. H., Darwin, D., Dolan, C. W., 200). "Design of Concrete Structures", Mc Graw-Hill, New York, 1-13.
- [49] Chudley, R., 1977. "Construction Technology", Vol. 4 .ELBS-Longman Group Ltd. Essex, 287-293 .
- [50] Allen, A.,H., 1989. "An Introduction to Prestressed Concrete", Cement and Concrete Association, Slough, 380-400.
- [51] Şener, S. 2006. "Öngerilmeli beton", Alp Yayıncılık, Ankara, 50.
- [52] MOHAMMED, K.A., 2010. "Öngermeli betonarme köprü kirişi modellenmesi" Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara,
- [53] Naeim F, Kelly JM, 1999. Design of Seismic Isolated Structures, John Wiley & Sons, Inc.,USA.
- [54] Yazdani, N., Eddy, S., Cai, C.S., 2000. Effect of Bearings on Precast Pretressed Concrete Bridges, Journal of Bridge Engineering , 5(3), 224-232.

- [55] Dai, W., Moroni, M.O., Roeset, J.M., Sarrazin, M., 2005. Effect of isolation pads and their stiffness on the dynamic characteristics of bridges, Elsevier.
- [56] SAP 2000, 2007. Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc. Berkeley, California.
- [57] HITEC 98-11, 1998. Evaluation Findings For Scougal Rubber Corporation High Damping Rubber Bearings, Highway Innovative Technology Evaluation Center.
- [58] DLH-2007, “Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği”,

ÖZGEÇMİŞ

Aykut ÖZPOLAT, 1989 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır.

2007 yılında başlamış olduğu Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2011 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekanik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2012 yılında Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'nda Araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2013 yılında İlbank A.Ş. teknik uzman yardımcısı olarak görevine devam etmiştir. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.