



**ULAŖTIRMA YAPILARINDA DEPREM ÖNCESİ VE
SONRASINDA ERKEN HASAR TANILAMA
TEKNİKLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ: KIRKGÖZELER KÖPRÜSÜ**

Hilal ÇODUR ÇELEBİ

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ULAŞTIRMA YAPILARINDA DEPREM ÖNCESİ VE SONRASINDA ERKEN
HASAR TANILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILABİRLİĞİNİN İNCELENMESİ:
KIRKGÖZELER KÖPRÜSÜ**

(Investigation of The Usability of Early Damage Identification Techniques in Transportation
Structures Before and After Earthquake: Kırkgözel Bridge)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hilal ÇODUR ÇELEBİ

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Erzurum
Haziran, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ULAŞTIRMA YAPILARINDA DEPREM ÖNCESİ VE SONRASINDA ERKEN
HASAR TANILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
İNÇLENMESİ: KIRKGÖZELER KÖPRÜSÜ**

Doç. Dr. Ahmet ATALAY danışmanlığında, Hilal ÇODUR ÇELEBİ tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3./3)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ahmet TORTUM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğretim Üyesi Ömer KAYA <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Ahmet ATALAY danışmanlığında sunulan “Ulaştırma Yapılarında Deprem Öncesi ve Sonrasında Erken Hasar Tanılama Tekniklerinin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi: Kırkgözeler Köprüsü” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	1	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hilal ÇODUR ÇELEBİ	Doç. Dr. Ahmet ATALAY
16.6.2025	16.6.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süreci içerisinde bilgileri ve tecrübesiyle bana yön veren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet ATALAY’a, bu zorlu ve yoğun süreçte her zaman yanımda olan, sabrı, anlayışı, bilgi ve tecrübeleriyle akademik gelişimime katkıda bulunan değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ’ye en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Aynı şekilde eğitim hayatım boyunca maddi, manevi desteğiyle her daim yanımda olan kıymetli babam Yavuz ÇODUR’a, sonsuz sevgisi, duaları ve teşvikleriyle bana güç veren sevgili annem Nurhayat ÇODUR’a ve diğer aile fertlerime en derin teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunuyorum.

Bilgi, fikir ve tecrübeleri ile çalışmaya katkılar sağlayan yüksek lisans tezi jüri üyelerine teşekkür ederim.

Tezin deneysel çalışmaları sürecindeki yardımları ve kıymetli önerilerinden dolayı, Araş. Gör. Oğuzhan UĞURLU’ya çok teşekkür ederim.

Hilal ÇODUR ÇELEBİ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ULAŞTIRMA YAPILARINDA DEPREM ÖNCESİ VE SONRASINDA ERKEN HASAR TANILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILABİRLİĞİNİN İNCELENMESİ: KIRKGÖZELER KÖPRÜSÜ

Hilal ÇODUR ÇELEBİ

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Amaç: İnsanların sosyal, kültürel ve ticari etkileşimlerine olanak sağlayan ulaştırma üst yapılarının kendilerinden beklenen fonksiyonelliğini kaybetmeden üzerinde taşıt yüklerinden ve deprem gibi dinamik yüklere karşı dirençliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Türkiye Erzurum İli Horasan İlçesi sınırlarında bulunan beş mahalleyi İlçe merkezine ve İl merkezine bağlayan Kırkgözeler Ulaştırma Üst Yapısının ulaşım uygunluğunun araştırılması hedeflenmiştir. Ulaşım uygun olmadığı yapısal analizlerle ve yapı sağlığı izleme gibi erken hasar tanılama tekniğiyle doğrulanması amaçlanmıştır. Erken hasar tanılama teknikleriyle ulaştırma üst yapısının mevcut durumu hızlı bir şekilde test edilerek hem ekonomik hem de muhtemel zaman kayıplarının önüne geçilmesi istenmiştir.

Yöntem: Tez kapsamında Kırkgözeler köprüsünden kış ve yaz dönemlerinde geçen taşıt yükleri ve bölgenin sismik aktivitesinden kaynaklanan deprem yükleri dikkate alınarak bir dizi yapısal analizler uygulanmıştır. Köprü'nün sonlu elemanlar modeli geometrik sınır koşulları ve malzeme sınıfları dikkate alınarak sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Sonlu elemanlar modeli kurulan yapıda deprem analizlerinin yapılmasından sonra yapı sağlığı izleme ölçümleri yapılarak doğrulanmıştır.

Bulgular: Köprü yapısında uygulanan zaman tanım alanı sonuçları mesnetlerde çekme gerilmelerinin ve düzlem içi kayma gerilmelerinin izin verilebilen sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. Maksimum basınç gerilmelerinin tabliye ve kolon üst noktası bileşim bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir. Köprü yapısının bu bölgelerde deprem ve diğer düşey yüklerden kaynaklı oluşan basınç gerilmelerini karşılayabildiği tespit edilmiştir. Yapı sağlığı izleme sistemleriyle ölçülen ivme değerlerinin çok uzun periyot aralıklarında mesnet bölgelerinde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yapı analizi ile yapı sağlığı izleme sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

Sonuç: Tez çalışması sonunda Ulaştırma Üst Yapısının kendinden beklenen fonksiyonelliği sağlayabilmesi için mesnet bölgelerinin CFRP gibi yatay rijitliği arttıran güçlendirme elemanı ile desteklenmesi gerektiği elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem Analizi, Erken Hasar Tanılama, Tepki İvme Değerleri, Ulaştırma Üst Yapıları, Yapı Sağlığı İzleme.

Haziran 2025, 79 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF EARLY DAMAGE DIAGNOSIS TECHNIQUES IN TRANSPORTATION STRUCTURES BEFORE AND AFTER EARTHQUAKE: KIRKGÖZELER BRIDGE

Hilal ÇODUR ÇELEBİ

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ATALAY

Purpose: Transportation superstructures are vital components that enable social, cultural, and commercial interactions among people. Ensuring their resistance to dynamic loads such as traffic and earthquakes without compromising their intended functionality is of great importance. In this context, the study aimed to investigate the transportation suitability of the Kirkgözüler Bridge, located within the boundaries of Horasan district in Erzurum Province, Turkey, which connects five neighborhoods to the district and provincial centers. Through structural analyses and early damage detection techniques based on structural health monitoring, the bridge's current condition was assessed and its suitability for transportation was verified. This study aimed to evaluate the structural condition of the transportation infrastructure in a fast, economical, and reliable manner, thereby preventing potential economic losses and time delays.

Method: Within the scope of the thesis, a series of structural analyses were applied by taking into account the vehicle loads passing through the Kirkgözüler Bridge in winter and summer periods and the earthquake loads originating from the seismic activity of the region. The finite element model of the bridge was established by taking into account the geometric boundary conditions and material classes. After the earthquake analyses were performed on the established structure, the finite element model was verified by structural health monitoring measurements.

Findings: The time history results applied to the bridge structure have determined that the tensile stresses and in-plane shear stresses at the supports exceed the permissible limit values. It has been determined that the maximum compressive stresses occur at the deck and column top junction areas. It has been determined that the bridge structure can withstand the compressive stresses caused by earthquakes and other vertical loads in these areas. It has been determined that the acceleration values measured with structural health monitoring systems occur more at the support areas at very long period intervals. In this case, it has been shown that the structural analysis and structural health monitoring results are compatible with each other.

Results: At the end of the thesis study, it was concluded that in order for the Transportation Superstructure to provide the expected functionality, the support areas should be supported with a reinforcement element that increases horizontal rigidity, such as CFRP.

Keywords: Earthquake Analysis, Early Damage Identification, Response Acceleration Values, Transportation Superstructures, Structural Health Monitoring.

June 2025, 79 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Ulaştırma Üst Yapıları	5
Ülkemizde Deprem ve Etkileri.....	8
Yapı Sağlığı İzleme.....	10
Ulaştırma Üst Yapılarında Güçlendirme.....	13
MATERYAL VE YÖNTEM	16
Ulaştırma Üst Yapısına Ait Bilgiler	16
Yükleme Koşulları ve Hasar Sınır Değerleri	16
Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi.....	17
Köprü'nün Sonlu Elemanlar Modeli	25
Ulaştırma Üst Yapısında Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları.....	26
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	29
Zemin Dinamiği Parametrelerinin Belirlenmesi	29
Köprü Yapısının Modal Analiz Sonuçları	32
Köprü Yapısının Taşıt Yükleri Etkisi Altında Analiz Sonuçları	34
Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçları.....	35
Yapı Sağlığı İzleme Sonuçları	51
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Köprü Yapısının Maruz Kaldığı Depremler ($M_w > 6$)	9
Tablo 3. Köprü Yapısının Yerel Deprem Parametreleri	18
Tablo 4. Tezde Kullanılan Deprem Yer Hareketleri.....	18
Tablo 5. Köprü Yapısında Yatay Deprem Yüğü ve Taşıt Yüğülerinden Kaynaklı Oluşan Analiz Sonuçları	36
Tablo 6. Köprü Yapısında Düşey Deprem Yüğü ve Taşıt Yüğülerinden Kaynaklı Oluşan Analiz Sonuçları	37
Tablo 7. Ölçüm Alınan Noktalara Ait Frekans ve Periyot Değerleri	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Köprü yapısını oluşturan elemanlar	6
Şekil 2. Betonarme köprü yapılarının kesit özellikleri.....	7
Şekil 3. Türkiye deprem tehlike haritası	8
Şekil 4. 6 Şubat 2022 depremlerinde kullanılamaz hale gelen ulaşım üst yapıları	9
Şekil 5. Yapı sağlığı izleme uygulaması	11
Şekil 6. Ulaşım üst yapılarında güçlendirme yöntemleri; a) betonarme köprü kolonlarında mantolama ve FRP sargı (Nicolae vd. 2008), b) Yığma köprü taşıyıcısına takviye için TRM uygulaması (Javier vd. 2024), c) çelik köprülerde MR sönümleyici uygulaması.....	13
Şekil 7. Kırkgözel köprüsü.....	16
Şekil 8. Türkiye Deprem Tehlike Haritasında köprünün konumu	18
Şekil 9. Zaman tanım alanında hesap için kullanılan depremlere ait ivme-zaman eğrileri.....	19
Şekil 10. Ölçeksiz deprem spektrumları.....	20
Şekil 11. Ölçekli deprem spektrumları.....	20
Şekil 12. Ölçekli deprem ivme eğrileri	21
Şekil 13. Ortalama deprem spektrum eğrileri	21
Şekil 14. Ölçeksiz düşey deprem ivme spektrumu.....	22
Şekil 15. Ölçekli düşey deprem ivme spektrumu.....	23
Şekil 16. Ortalama düşey deprem ivme spektrumu.....	23
Şekil 17. Ölçeksiz Düşey deprem ivme zaman eğrileri.....	24
Şekil 18. Ölçeksiz Düşey deprem ivme zaman eğrileri.....	24
Şekil 19. Köprünün geometrisi.....	25
Şekil 20. Köprünün geometrisi.....	26
Şekil 21. Kuvvetli yer hareketi kayıtçısı	27
Şekil 22. Köprü yapısının zemininden alınan ölçümler	27
Şekil 23. Köprü yapısında alınan ölçüm noktaları	28
Şekil 24. Köprü yapısında yapı sağlığı izleme ölçümleri.....	28
Şekil 25. Köprü yapısının zemininden alınan ivme ölçümleri	29
Şekil 26. Köprü yapısına ait zemin spektral ivme değerleri.....	30
Şekil 27. Köprü yapısına ait zemin spektral yer değiştirme değerleri.....	30
Şekil 28. Köprü yapısına ait zemin spektral hız değerleri.....	31

Şekil 29. Köprü yapısına ait zeminin ortalama spektral değerleri; a) ivme, b) yer değiştirme, c) hız	32
Şekil 30. Mod şekilleri; a) 1.mod, b) 2.mod, c) 3.mod	33
Şekil 31. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde X yönlü oluşan deformasyon değerleri	34
Şekil 32. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde Z yönlü oluşan deformasyon değerleri.....	34
Şekil 33. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde oluşan normal gerilme dağılımı	35
Şekil 34. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde oluşan düzlem içi kayma gerilmesi dağılımı.....	35
Şekil 35. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum ivme dağılımı.....	39
Şekil 36. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum ivme dağılımı.....	40
Şekil 37. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum ivme dağılımı	41
Şekil 38. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum ivme dağılımı	42
Şekil 39. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum deformasyon dağılımı.....	43
Şekil 40. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum deformasyon dağılımı.....	43
Şekil 41. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum deformasyon dağılımı.....	44
Şekil 42. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum deformasyon dağılımı.....	45
Şekil 43. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum normal gerilme dağılımları.....	46
Şekil 44. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum normal gerilme dağılımları.....	47
Şekil 45. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum normal gerilme dağılımları.....	47
Şekil 46. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum normal gerilme dağılımları.....	48
Şekil 47. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları.....	49
Şekil 48. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları	49
Şekil 49. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları.....	50
Şekil 50. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları.....	51

Şekil 51. X doğrultusunda alınan ölçümler	52
Şekil 52. Y doğrultusunda alınan ölçümler	53
Şekil 53. Z doğrultusunda alınan ölçümler	54
Şekil 54. Frekans-genlik eğrileri	55



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AASHTO LRFD	: Yük ve Dayanım Katsayısına Göre Tasarım Kılavuzu (AASHTO)
AASHTO	: Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
b	: Kesit genişliği
bn	: Bingöl Depremi
bw	: Kirişin etriye aralığına göre net genişliği
ch	: Chile Depremi
DAF	: Doğu Anadolu Fayı
dam	: Metredeki deplasman (displacement amplitude)
DC	: Doğrudan Akım (Direct Current) veya Sürekli Akım
DD-1	: Deprem Düzeyi 1
DD-2	: Deprem Düzeyi 2
DD-3	: Deprem Düzeyi 3
el	: Elbistan Depremi
erz	: Erzincan Depremi
fc	: Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı
fci	: Betonun ilk basınç dayanımı (initial compressive strength)
FRP	: Fiberle Güçlendirilmiş Polimer
g	: Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2)
H30-S24	: Karayolu aks yükü sınıflandırması
Hz	: Hertz (Frekans birimi)
iv	: İzmit (Gölcük) Depremi
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
kb	: Kahramanmaraş-Baz Depremi
km	: Kilometre
kN	: Kilonewton
m	: Metre
MPa	: Megapaskal
MR	: Manyetik Sönümleyici
Mw	: Moment Büyüklüğü (Moment Magnitudü)
P	: Referans Noktası

PGA	: En Büyük Yer İvmesi
S1	: 1.0 sn Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
Sae	: Elastik Spektral İvme
SD1	: 1.0 sn Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SDS	: Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
sn	: Saniye
SS	: Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
sv	: Sivrice Depremi
T	: Periyot
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TRM	: Textile Reinforced Mortar (Tekstil Donatılı Harç)
ZD	: Zemin Davranışı
τ_{fc}	: Betonun kayma gerilmesi kapasitesi

GİRİŞ

Ulaştırma yapı sistemleri bir ülkede ekonomi, sosyal ve kültürel anlamda gelişmişliği temsil eden üst yapılar olarak tanımlanmaktadır (Akgüngör 2003). İhtiyaç duyulan mal ve hizmetlere erişim sağlanması ulaştırma üst yapı sistemleriyle mümkün olabilmektedir. Sanayi, tarım ve endüstri gibi alt yapıların işlevlerinin devam edebilmesi için ulaştırma alt yapı sistemlerinin güvenilir bir şekilde inşa edilmesi önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak ulaştırma üst yapılarının ihtiyaca göre yapılması gereklidir. Gereğinden fazla ulaştırma üst yapı sisteminin inşa edilmesi ekonomiye önemli ölçüde zarar verecektir. Bilindiği üzere ulaştırma ifadesi insanların ve eşyaların yararlı olduğu varsayılan belli bir amaca yönelik yer değiştirmeleri olarak tanımlanmaktadır (Umar ve Yayla 1997). Buradan hareketle ulaştırma yapılarının bir amaca uygun olarak tasarlanması ve inşa edilmesi gerekmektedir. Ulaştırma üst yapılarının tasarımı ve inşaatı Ülke politikalarına uygun olarak yapılması da önemli bir konudur. Arz ve talep değerlerinin saptanarak ve buna uygun bir ekonomik sistematüğün geliştirilmesiyle ulaştırma üst yapıları hayata geçirilmelidir. Bu kapsamda ticari, sosyal ve kültürel boyutta etkileşimin sağlanması için ülkeler arası, ülke içinde şehirler arası ve kırsal alanları şehire bağlayan ulaştırma üst yapılarının güvenli bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ülkemizde günden güne karayolu, demiryolu, havayolu, denizyolu, boru hattı ve doğalgaz ulaşım sistemlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Anon 1995). Ülkemizde kurtuluş savaşından sonra ki 1950 yılına kadar olan dönemde demiryolu, 1950'den günümüze kadar ki dönemde ise karayolunun ağırlıklı olarak yapıldığı bilinmektedir (Evren ve Öğüt 1997). 1950'lerden sonra ülkemizde karayolları kapsamında köprüler inşa edilmeye başlanmıştır. 1950'lerden sonra yapılan köprüler genellikle çelik ve betonarme taşıyıcı sistem esaslı olarak yapılmıştır. Ancak tarihsel dönemlere bakıldığında ticaret, sosyal ve kültürel etkileşimin sağlanması üzere inşaa edilen yığma formlu köprülerin de olduğu bilinmektedir (Uğurlu vd. 2024). Bu tür köprü yapılarının günümüzde yapısal olarak değerlendirilmesi operasyonel modal analiz ve yapı sağlığı izleme gibi teknolojilerle yapılmaktadır (Alforno vd. 2021; Cucuzza vd. 2024). Yapılan değerlendirmeler tasarımının 1970 yılı öncesine dayanan köprülerde önemli hasarların oluştuğunu göstermiştir (Priestley vd. 1996). Bu hasarların düzeyde taşıt yüklerinden yatayda ise deprem yüklerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Deprem ve diğer dinamik yüklere maruz kalarak hasar alması muhtemel olan mevcut ulaştırma yapılarının yeniden tasarlanmasının çok maliyetli olacağı bilinmektedir. Mevcut ulaştırma yapılarında güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi bu anlamda hem deprem güvenliği açısından hem de ekonomi

açısından önemli olacaktır. Mevcut ulaştırma yapılarında taşıt yüklerinden kaynaklı titreşimlerin sönümlenmesi için köprü tabliyelerinin güçlendirilmesi ve kolonların mantolanması çoğu çalışmalarda önerilmiştir (Padgett 2007; Pellegrino 2010). Aynı zamanda deprem etkilerinin köprü yapılarında karşılanması için de viskoz sönümleyici sistemlerinin kolon ve tabliye birleşim noktalarına yerleştirilmesi önerilmiştir (Modena vd. 2015).

Ülkemiz Avrasya ve Arap Plaklarıyla çevrelenmiş aktif sismik bölge içinde bulunmaktadır. Bu plakaların birbirlerine karşı grel hareketleri sonucunda sıkışan Kuzey Anadolu Fay (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) oluşmuştur (Sucuoğlu ve Nurtuğ 1995). İfade edilen fay hatları üzerinde sık sık depremler meydana gelmektedir. Depremler ulaştırma yapılarında, konutlarda, kamu binalarında ve deprem sonrası hemen kullanım düzeyi istenen yapılarda önemli hasarlar meydana getirmektedir (AFAD 2024). Ticari, sosyal ve kültürel boyutta insanlığın ihtiyaçlarını karşılayan ulaştırma yapılarında da son yıllarda yaşanan depremler ağır hasarlar meydana getirerek kullanılmayacak duruma getirmiştir. İnsanlığın ihtiyaçları doğrultusunda ulaştırma st yapılarında deprem sonrasında hemen kullanım düzeyinin sağlanması gereklidir. Bu durum hem ekonomik kayıpların hem de can kayıplarının önüne geçmesini sağlayacaktır. Deprem ncesi ve sonrasında ulaştırma st yapılarının deprem güvenliğinin belirlenmesi ve buna karşılık olarak ta alınacak önlemlerin hayata geçirilmesi olası ekonomik ve can kayıplarının önüne geçecektir. Günümüzde ulaştırma yapılarının tasarımı ve inşaatı AASHTO ve AASHTO LRFD Yönetmeliklerine göre yapılmaktadır (AASHTO 2002; AASHTO LRFD 2014). Ancak 1970 yılından önce oluşturulan ulaştırma yapılarında kısmi olarak yönetmeliklerde bulunan sınır koşullarının tam yeterince uygulanamasından dolayı karşılaştığı dinamik yükler neticesinde önemli hasarlar meydana gelmiştir. 1970 yılı öncesinde yapılan köprü ulaşım sistemlerinin mevcut durumunun değerlendirilmesi için normal şartlar altında zemin etüdünün, geometrik ölçümlerin ve malzeme tespitlerinin yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir (AASHTO LRFD 2014). Köprülerde yapılan analiz sonuçlarının ilgili Yönetmelik sınır değerleriyle karşılaştırılması sonucunda köprünün tekrarlanan ve/veya dinamik yükler altında davranışı ortaya çıkmış olacaktır. Ancak bu yöntemlerin özellikle deprem sonrasında uygulanmasının çok zaman alacağından dolayı farklı bir teknoloji ile ulaştırma yapılarının kullanıma uygun olup olmadığının değerlendirilmesinin yapılması gereklidir. Yapı sağlığı izleme denilen bu teknoloji ile ulaştırma yapılarının deprem öncesi ve sonrasında güvenli olup olmadığı hızlı bir şekilde tespit edilebilmektedir (Li vd. 2016).

Ülkemizin ulaştırma politikasının ve yaşanabilecek muhtemel deprem etkilerinin göz önünde bulundurulmasıyla ulaştırma st yapılarının güvenliğinin sağlanması amacıyla bu araştırma ortaya çıkmıştır. Ulaştırma st yapısında deprem öncesi ve sonrasında hızlı hasar

tanılama tekniğinin geliştirilmesiyle can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi bu tezin çıkış noktası olmuştur.

Ülkemizde yaşanan son depremler ulaştırma üst yapılarında önemli derecede hasarlar vermiştir. Bilindiği üzere ulaştırma üst yapılarının tasarımının ve inşaatının hem zaman açısından hem de yüksek maliyet gerektirmesinden dolayı zor süreçlerden geçmektedir. Bu nedenle mevcut ulaştırma üst yapılarının tekrarlanan ve deprem gibi dinamik yük etkisi karşısında davranışlarının önceden tespit edilmesi önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür yapıların performansının belirlenmesi için AASHTO LRFD gibi yönetmelikler kullanılmaktadır. Ulaştırma üst yapılarının performansının değerlendirilmesi bu kapsamda zaman alıcı olması hem de maliyetli olmasından dolayı yenilikçi hasar tanılama tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Yapı sağlığı izleme adı verilen bu teknoloji ile ulaştırma üst yapılarının deprem öncesi ve sonrasında hızlı hasar tanılamalarının yapılmak istenmesi ve sayısal analizlerle doğrulanması araştırmanın amacı olarak nitelendirilmiştir. Yapı sağlığı izleme teknikleriyle hasar tanılamalarının yapılması ve akabinde gerektiğinde güçlendirme prosedürlerinin hayata geçirilmesi ülke bazında hem ekonomik hem de can kayıplarının önüne geçecektir. Burada ki amaçlardan birisi deprem öncesi ve sonrasında insanlığın ihtiyacı olan ticari, sosyal ve kültürel etkileşimin kesintiye uğramadan ulaştırma üst yapılarıyla sağlanmasıdır. Araştırmanın amacı kapsamında Erzurum İli Horasan İlçesine bağlı ve yapımı tahmini olarak 1970 yılı öncesine dayanan Kırkgözeler Köprüsü çalışmaya konu edinilmiştir.

Yüksek lisans tezi, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ve Tartışma ve son olarak Sonuçlar kısmı olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır.

Kuramsal Temeller bölümünde tez konusunun anlaşılabilmesi için deprem ve etkileri, ulaştırma üst yapıları, yapı sağlığı izleme ve köprü güçlendirme yöntemleri açıklanmıştır. Bu bölümlerin tez konusuyla olan ilişkileri değerlendirilmiştir. Literatürde bu kapsamda var olan boşluklar ortaya çıkarılarak yeni bir çalışmanın neden yapılması gerektiği açıkça ortaya konulmuştur.

Materyal ve Yöntem bölümünde çalışma kapsamında ilk olarak köprü yapısının malzeme ve geometrik sınır koşulları belirtilecektir. Köprü yapısının sonlu eleman modeli tanımlandıktan sonra üzerinde oluşabilecek muhtemel taşıt yükleri ve deprem yükleri ifade edilmiş olacaktır. Çalışmada kullanılan zaman tanım alanı yöntemi ve buna bağlı olarak deprem kayıtları verilecektir. Daha sonra köprü yapısında yapı sağlığı izleme çalışmalarının nasıl yürütüleceği birtakım görsellerle desteklenerek verilecektir. Görsellerde kurgulanan yapı sağlığı izleme ölçüm sistemleri saha da birebir uygulamaları verilecektir.

Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde zaman tanım alanında analiz sonuçları verilmiş olacaktır. Bu sonuçlar çekme gerilmeleri, basınç gerilmeleri, düzlem içi kayma gerilmeleri ve şekil değiştirme değerleri olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca köprü yapısında modal analiz yapılarak yapıya ait mod şekilleri, periyot ve frekans değerleri elde edilmiş olacaktır. Son olarak yapı sağlığı izleme ölçümleri ile ifade edilen analiz parametreleri doğrulanmış olacaktır. Yapı sağlığı izleme sistemleriyle yapının hâkim mod periyot aralıklarında tepki ivme ve yer değiştirme değerleri hem mesnet hem de döşeme kolon birleşim bölgelerinde verilmiş olacaktır.

Sonuçlar bölümünde, araştırma bulguları ve tartışma bölümünde elde edilen bulgular derlenerek eksi ve artı yönleriyle ifade edilecektir. Çalışma sonunda ulaştırma üst yapısının taşıt ve deprem yükleri etkisi altında performansı belirtilmiş olacaktır. Yapı sağlığı izleme sistemleriyle erken hasar tanılamanın ulaştırma üst yapılarında uygulanabilirliği gösterilmiş olacaktır. Tez sonunda gerekmesi durumunda köprü yapısına uygulanacak güçlendirme yöntemi önerilmiş olacaktır.

KURAMSAL TEMELLER

Tez konusu deprem ve etkileri, ulaştırma üst yapıları, yapı sağlığı izleme ve köprü güçlendirme yöntemleriyle ilişkilidir. Bundan dolayı Kuramsal Temeller ve İlgili Araştırmalar Bölümünde deprem ve etkileri, ulaştırma üst yapıları, yapı sağlığı izleme ve köprü güçlendirme yöntemleri başlıkları ele alınmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda mevcut durum ve araştırma ihtiyacı açıkça ortaya konulmuştur. Değerlendirme sonunda incelenen çalışmaların birbirleriyle olan ilişkileri ve eksiklikleri ifade edilmiştir. İhtiyaç olunan çalışma netice de belirlenmiştir.

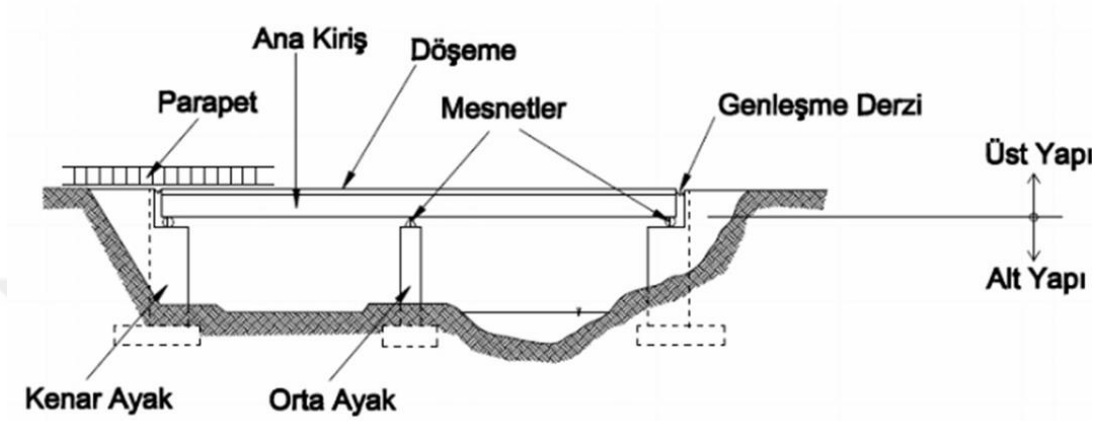
Ulaştırma Üst Yapıları

Ulaştırma üst yapıları sosyo-ekonomik ve sosyo-kültürel kapsamında grek yolcu gerekse yük taşımacılığını sağlayan bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Akgüngör ve Demirel 2003). Ulaştırma üst yapılarıyla sağlanacak bu sistemlerin hızlı, güvenilir, çevreye zarar vermeyen ve ülkenin ulaşım kuşullarına uygun olarak yapılması gerekmektedir (Akgüngör ve Demirel 2003). İfade edilen sistem parametrelerinin birlikte yapılabilmesi için planlamanın ve tasarımın bölge kuşullarına göre oluşturulması gerekmektedir. Ülkemizde yapılan yolcu ve yük taşımacılığının %1'nin deniz yolu ile %95'nin karayolu ile ve diğer yüzdelik dilimin ise hava ve demir yolu ile yapılmaktadır. Ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığının en çok yapıldığı ulaştırma üst yapısı olduğu bilinmektedir. Karayolları birbirlerine ülkeler arası, şehirler arası ve kırsal bölgeleri şehirlere köprülerle bağlanmaktadır. Tarihsel dönemlerden günümüze kadar elik, betonarme ve yığma taşıyıcı sistem olarak inşaa edilen köprüler (Cavicci ve Gambarotta 2005; Calderon vd. 2019) akarsu, iki vadi arasını ve demiryolu gibi engelleri aşmak için tasarlanan uygarlık yapılarıdır (Tally 1998). Köprüler inşaa edilecek olan bölgenin iklim, deprem ve malzeme kuşullarına göre farklı formlarda tasarlanmaktadır. Köprüler genellikle kirişli plak dōřeme, kolon dōřeme mesnet bölgelerinden ve taşıyıcı kolonlardan oluşmaktadır (Celasun 1974). Dolu gövdeli veya boşluklu gövdeli olarak tasarlanan köprüler taşıyıcı elemanlardan kaynaklanan yüklere, sabit yüklere, taşıtlardan kaynaklı olarak hareketli yüklere, rüzgar, fırtına ve deprem gibi yüklere maruz kalmaktadır (AASHTO 2002). Hareketli yükler kamyon dingil yükü, eşdeğer şerit yükü ve asgari taşıt yükleri olarak tanımlanmıştır (AASHTO 2002).

Ülkemizde 1980'li yıllarda hazırlanan Yol Köprüleri şartnamesi'nin (Yol Köprüleri 1982) günümüz kuşullarına göre geride kalması AASHTO (Amerikan Eyalet Karayolu ve

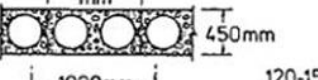
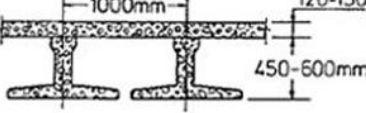
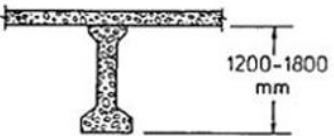
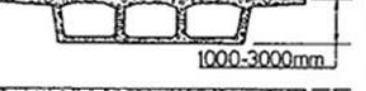
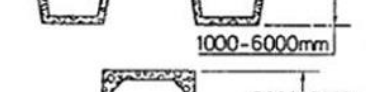
Ulaştırma Görevlileri Derneği) tarafından sunulan yönetmelik kabul edilmektedir. Bu yönetmelik köprülerin malzeme ve geometrik açıdan doğrusal olmayan özelliklerinin tanımlanmasıyla elastik ötesi davranışların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Tipik bir ulaşırma üst yapı köprüsünün bileşenleri Şekil 1’de verilmiştir. Köprü kenar ayak, orta ayak, mesnet, ana kiriş, döşeme, mesnet ve genişleme derzlerinden oluşmaktadır (Tören 2011).



Şekil 1. Köprü yapısını oluşturan elemanlar

Betonarme köprü yapıları Şekil 2’de gösterildiği gibi farklı taşıyıcı formlarda tasarlanmaktadır. Genellikle I ve T kesitli betonarme prekast kirişlerinin tasarlandığı gözlemlenmiştir.

Tipi	Örnek	İnşaat Yöntemi	Açıklık aralığı
Dolu kesitli döşeme		Yerinde döküm (YD)	5-15m (15-50 ft)
Boşluklu döşeme		Prekast ya da Prekast+ YD	6-15m (20-50ft)
Ters-T kirişli		Prekast T + YD döşeme	12-24m (40-80ft)
I-kirişli		Prekast I + YD Döşeme	12-35m (40-120ft)
Çift-T kirişli		Yerinde Döküm	25-40m (80-130ft)
Tek omurgalı (tek gözlü) kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-200m (100-650ft)
Çok gözlü kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-100m (100-330ft)
İki omurgalı (iki kutu kesitli) tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-200m (100-650ft)
Dikdörtgen kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-150m (100-300ft)

Şekil 2. Betonarme köprü yapılarının kesit özellikleri (Priestly vd. 1996)

İnsanlığın sosyal, kültürel ve ekonomik ihtiyaçlarına karşılık veren araçlardan birisi olan ulaşım üst yapılarının ifade edilen yüklemeler etkisi altında davranışının bozulmadan devam etmesi ekonomik ve can kayıplarının önüne geçilmesinde önemli olmaktadır. Ülkemizin ulaşım planlaması ve ekonomisi gözden geçirildiğinde arz talep oluşması durumunda yeni bir ulaşım ağının yapılması yerine mevcut ulaşım ağlarının güvenliğinin değerlendirilerek önlem alınması ekonomik sürdürülebilirliği açısından daha efektif sonuç doğuracaktır.

Akgüngör ve Demirel (2003) yapmış oldukları çalışmada Türkiye’de ki ulaşımın %1’nin deniz yolu ile ve %95’nin karayolu ile yapılmasının ulaştırma politikalarının dönüştürülmesi gerektiğini göstermiştir. Ülke ekonomisi kapsamında değerlendirildiğinde yeni karayolu yapılmasının aksine mevcut karayolu yapılarının kullanılıma uygun olup olmamasının değerlendirilmesi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır (Akgüngör ve Demirel 2003). Bu durumdan kaynaklı olarak mevcut betonarme köprü karayolları ele alınarak incelenmiştir. Bu köprüler özellikle taşıt yükü ve deprem gibi dinamik yükler etkisi altında

incelenmiştir (Crisci vd. 2022). Sandık kesitli, boşluklu betonarme plak döşemeli, I ve kutu kesitli betonarme-çelik kompozit gibi köprülerin taşıt yükleri ve deprem etkileri altında performansları değerlendirilmiştir (Karadağ ve Pala 2021; Tören 2011). Yapılan değerlendirmeler neticesinde FRP, Betonarme kolon mantolama ve çelik mantolama gibi güçlendirme yöntemleri önerilmiştir (Evcen vd. 2013). Köprü yapılarına ait zemin güçlendirmesi (Jet Grout Konsolidasyon, yeni temel kazıklarının yerleştirilmesi ve temel hacminin büyütülmesi vs.) ve Politetrafloroetilen esaslı sürtünmeli izolatörlerin yerleştirilmesiyle de güçlendirme çalışmaları yürütülmüştür (Modena vd. 2015).

Ülkemizde Deprem ve Etkileri

Yer kabuğunda meydana gelen ısıma ve soğuma sonucu plakalarda oluşan göreceli hareketler meydana gelmektedir. Bu hareketlerden kaynaklanarak oluşan şekil değiştirmeler yer yüzeyinde deprem adı verdiğimiz titreşimleri oluşturmaktadır (Celep 2018). Depremler üst yapılarda önemli derecede hasarlar oluşturmaktadır. Odak noktasından çıkarak merkezüssüne doğru ilerleyen depremler birtakım jeolojik formasyondan geçmektedir. Bundan dolayı deprem etkilerinin incelenmesi için odak noktası ile merkezüssü arasında ki jeolojik katmanların iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir (Şengör vd. 1985). Ülkemizde depremler Avrasya ve Arap Plakasının birbirlerine karşı yapmış olduğu göreceli hareketler sonucunda oluşmaktadır (Şengör vd. 1985). Bu hareketler neticesinde sağ atımlı Kuzey Anadolu Fayı ve sol atımlı Doğu Anadolu Fayı (DAF) oluşmaktadır. Başlangıç noktaları Bingöl-Karlıova olan bu iki fay hattında da önemli depremler meydana gelmiştir (AFAD 2024). Ülkemizin çoğu bölgesi Şekil 2’de de görüldüğü üzere fay hatları üzerinde bulunmaktadır. Fay hatları üzerinde bulunmayan yerleşkeler ise uzak alan kaynaklı depremlerin etkisi altında kaldığı görülmektedir. Ülkemizde yaşanan depremlerde ulaştırma üst yapılarının yıkıldığı ve/veya ağır hasar aldığı gözlemlenmiştir (AFAD 2024).



Şekil 3. Türkiye deprem tehlike haritası

Son olarak meydana gelen 6 Şubat tarihli moment büyüklükleri (M_w) 7.7 ve 7.6 olan Pazarcık ve Elbistan depremleri ile 50000'e aşkın insan hayatını kaybederek binlerce yapı yıkılmıştır. Ayrıca bu depremlerde yaklaşık olarak 20 tane otoyol ve köprü kullanılmayacak hale gelmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. 6 Şubat 2022 depremlerinde kullanılamaz hale gelen ulaşım üst yapıları (Bakırcı ve Aydoğdu 2023)

Tez kapsamında çalışmaya konu edinilen Erzurum Horasan İlçesinde ki Kırkgözeler Köprüsünde Türkiye Tehlikeli Deprem Yer Haritalarına göre en yüksek yer ivme değeri (PGA) 0,5g'den büyük olan depremlerin oluşma ihtimallerinin olduğu belirlenmiştir. Kırkgözeler köprüsü DAF ve KAF'a yakın bölgede bulunmaktadır. Ayrıca köprüyü çevreleyen Şenkaya-Narman-Oltu Fayı ve Erzurum-Pasinler-Köprüköy-Erzurum Fayı, Pasinler Fayı, Palandöken Fayı, Karayazı Fayı yerel olarak bulunmaktadır (MTA). Köprü yapısının geçirmiş olduğu depremler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Köprü Yapısının Maruz Kaldığı Depremler ($M_w > 6$) (AFAD 2024)

Yer	Tarih	Saat	Depremin Büyüklüğü	Enlem	Boylam	Derinlik (km)
Göle, Kars	28.09.1906	05.50	6.2	40.5000	42.7000	30
Oltu, Erzurum	28.12.1906	-	6.0	40.5000	42.0000	30
Horasan, Erzurum	30.10.1983	04.12	6.6	40.3310	42.1730	15
Şenkaya, Erzurum	18.09.1984	16.28	6.4	40.4400	42.1500	10
Erzurum	08.11.1901	-	6.1	40.0300	41.5300	10
Köprüköy, Erzurum	13.09.1924	14.34	6.8	40.5000	42.0000	10
Pasinler, Erzurum	03.01.1952	06.03	5.8	39.9500	41.6700	40

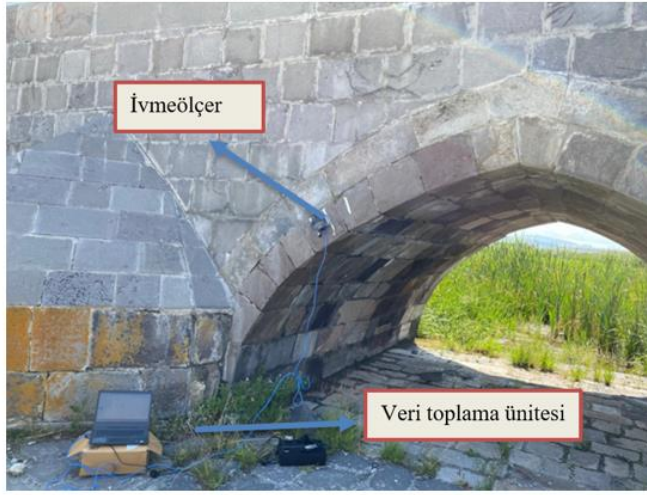
Açıklandığı üzere yaklaşık olarak toplam nüfusu 2000 olan 5 mahalleyi Erzurum İline ve Horasan İlçesine bağlayan Kırkgözeler ulaşım üst yapısı köprüsünün deprem öncesi değerlendirilmesinin yapılarak meydana gelebilecek depremlerden sonra hemen kullanım düzeyinde olabilmesi için gerekli çalışmaların yapılması gerekli olmaktadır.

Yapı Sağlığı İzleme

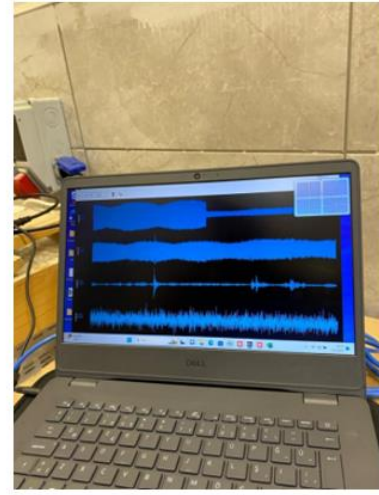
Yapı Sağlığı izleme yüksek yapıların, konutların, hastanelerin, endüstri tesislerinin, tarihi yapıların, köprü ve viyadük yapılarının, okulların ve kamu binalarının deprem güvenliğinin sağlanması için uygulanan teknolojik bir sistemdir (Kaya ve Şafak 2015). Yapılarda deprem, yüksek titreşim, patlama, yorulma, sünme, yaşlanma, restorasyon, inşaat hataları, sel ve fırtına gibi yapısal risklerinin tespiti için yapı sağlığı izleme sistemleri kullanılmaktadır (Dong vd. 2021). Yapı sağlığı izleme uygulamalarının amacı yapılarda oluşan ivme, titreşim, eğim, deformasyon, strain (gerinim), çatlak, deplasman, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, korozyon (paslanma), modal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarının belirlenmesi akabinde yapının performansı hakkında bilgiler edinmemizi sağlamaktır (Kamariotis vd. 2023). Yapı sağlığı izleme sistemleri bağımsız çalışır, otomatik değerlendirme ve hasar tespiti yapar (Kamariotis vd. 2023). Acil durum müdahale ekiplerine, afet yöneticilerine, tesis mühendislerine, operatörler ve işletme sahiplerine hızlı bildirimler gönderir. Yapı sağlığı izleme çalışmalarıyla, deprem sonrası hızlı hasarlı/hasarsız tespiti, nokta atışı afet yönetimi, normal hayata hızlı dönüş, gereksiz tahliye ve maliyetli kesintileri önleme, bilimsel verilerle hukuki koruma, yaşlanma ve çevresel etkilerde zamanında müdahale hedeflenmiştir (Şafak vd. 2010). Örneğin, bir derin kazı yapıldığında, deprem anında ya da ulaşım üst yapısında yıllara bağlı olarak gelişen yorulmada kısacası köprünün taşıyıcı sisteminde bir bozulma olduğunda bunu dakikalar içinde çözebilmek yapı sağlığı izleme sistemiyle mümkün olabilecektir (Şafak ve Kaya 2016).

Tıpkı bir doktorun herhangi bir tespit yapmadan hastalığı anlayamayacağı gibi deprem sonrasında hangi okulun, konutun, hastanenin ve ulaşım üst yapısının vb. hasar alıp alamadığını tam olarak çözülmemektedir. Ancak bu tür yapılarında sağlığını da insanların sağlığı gibi takip edebileceğimiz bir yöntem bulunmaktadır. Yapı sağlığı izleme dediğimiz bu yöntemle ifade edilen sorunların çözümü mümkün olmaktadır. Yapılarımıza yerleştirilen bir grup ivmeölçerler ile herhangi bir deprem olmasa dahi binanın dinamik davranışını ortaya çıkarabilmektedir. Doğal salınım frekansları, mod şekilleri ve katlar arası ötelemeler bu ivmeölçerler aracılığıyla yapının tüm yönleri için belirlenebilmektedir. Ve bu veriler yapı sağlığı izleme sistemiyle 7/24 takip edilebilmektedir. Eşik değerlerini aştığı zaman yazılımlar tarafından sistem uyarılmaktadır (Civera vd. 2021).

Mevcut bir ulaşım üst yapısında Şekil 4a'da gösterildiği dijital ivmeölçerler yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerden alınan köprü tepkileri ise Şekil 4b'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5. Yapı sağlığı izleme uygulaması

Ulaştırma üst yapıları genellikle malzeme tayini, zemin etüdü ve bunlara bağlı olarak yapısal analiz olarak değerlendirilmektedir (Mazzotti vd. 2014). Ancak bu test yöntemi bazı yıkıcı etkilere sahip olduğundan dolayı alternatif olarak yıkıcı olmayan yapı sağlığı izleme gibi test teknikleri geliştirilmiştir (Sarhosis vd. 2015; Mousseau vd. 2008). Yapıya herhangi bir hasar vermeden hasar tanınması ve deprem performansının belirlenmesi son zamanlarda yaygınlaşmaktadır (Sarhosis vd. 2015). Köprü yapılarında yaşam döngüsü boyunca meydana gelebilecek etkiler titreşim esaslı olarak izlenebilmiştir (Liu vd. 2024). Köprü yapılarında oluşan değişimlerin anlık olarak yapı sağlığı izleme uygulamalarıyla izlenebilmesi sürdürülebilir alt yapının ve akıllı şehirler mantığının gelişmesinde de etkili olabileceği düşünülmüştür (Rathore vd. 2016). ABD’de de yapı sağlığı izleme yöntemiyle 600.000’den fazla otoyol köprüsünün %46,4’ü orta, %7,6’sı ise kötü durumda olarak derecelendirilmiştir (Rizzo vd. 2021). Mishra vd. (2022) köprü yapılarının anlık olarak izlenebilmesi için dünya çapında geliştirilen yöntemleri derlemiştir (Mishra vd. 2022). Deplasman, ivmeölçer, hız, şekil değiştirme, sıcaklık ve nem ölçer sensörlerle köprü yapılarında oluşan değişimler anlık olarak izlenerek sürdürülebilir alt yapıya önemli katkılar sunulmuştur (Mishra vd. 2022). Düzgün bir şekilde kurulmuş ve işletilen bir SHM sistemi, özellikle büyük köprü yapılarının hizmet ömrü boyunca genel bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabildiği de yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır (Kaya ve Şafak 2015). Fatih Sultan Mehmet köprüsünde ivmeölçerler aracılığıyla yapılan ölçümlerle deprem etkisi riskinin azaltılmasının yanısıra köprünün bakımdan kaynaklanan işletme maliyetleri de önemli ölçüde azaltılmıştır (Kaya ve Şafak 2015). Birinci Dünya Savaşından sonra İtalya’da Milano yakınlarında inşa edilen Betonarme taşıyıcı sisteme sahip olan üç açıklıklı Tarihi Brivio Köprüsünde yapı sağlığı izleme uygulamaları yürütülmüştür. Günümüzde taşıt trafiğine açık olan betonarme köprünün yapı tanınması için

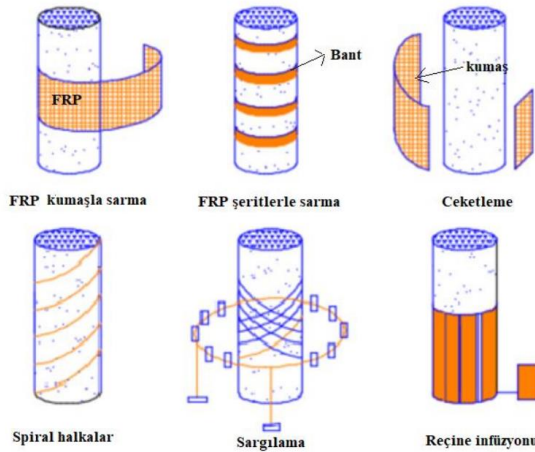
ARMA model kullanılmıştır. Köprünün hasar tanınması için yapı sağlığı izleme sonunda elde edilen sinyallerin işlenmesi suretiyle Wavelet analizleri yürütülmüştür (Cornaggia vd. 2022). Gentile ve Saisi (2013) İtalya’da bulunan taşıt ve sismik etkilere maruz kalan San Michele ulaştırma üst yapısında serbest ve taşıt yüklerinden kaynaklı oluşan zorlamış titreşim seviyelerinde yapı sağlığı izleme çalışmalarını yürütmüşlerdir (Gentile ve Saisi 2013). San Michele köprüsünde uygulanan yapı sağlığı izleme çalışmaları erken uyarı prosedürleri açısından son derece önemli bir oluşum olduğunu göstermiştir. Bunların dışında kablo desekli betonarme-çelik kompozit köprülerde de yapı sağlığı izleme çalışmaları yürütülmüştür (Li ve Ou 2016). Köprülerin güvenliği, hizmet verilebilirliği, dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği için yapı sağlığı izleme uygulamalarından olan optik fiber sensör teknolojisi ve kablosuz sensor teknolojisi kullanılmıştır (Li vd. 2009). Bu sensor teknolojileri gerilme, şekil değiştirme, ivme, akustik emisyon, nem ve sıcaklık değişimleri için köprü yapılarının uzun ve kısa kenar açıklıklarında ve ayrıca mesnet bölgelerine yerleştirilmiştir. İlgili sensörlerden alınan sonuçlar işlenerek değerlendirilmektedir. Genelde dinamik parametrelerin elde edildiği bu sensörlerden alınan sonuçlarla köprü yapılarında uygulanan deprem ve taşıt yükleri analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak doğrulanmaktadır (Shokrieh ve Mohammadi 2021). Fawad vd. (2022) 27.6 m açıklığa sahip ve toplamda 138 m uzunluklu betonarme köprünün sonlu elemanlar modelini oluşturduktan sonra doğrusal olmayan analizlerle köprünün göçme mekanizmasını belirlemiştir (Fawad vd. 2022). Analiz sonuçları yıkıcı olmayan test teknikleriyle (NDT) yani yapı sağlığı izleme çalışmalarıyla doğrulanmıştır. Cosenza ve Losanno (2021) trafik yüklerine maruz kalan betonarme köprünün İtalyan Karayolu Yönetmeliği şartlarına göre değerlendirmiştir. Çalışma sonunda köprü yapısında trafik sınırlamasının yapılması gerektiği önerilmiştir (Cosenza ve Losanno 2021). Kuncham ve Sen (2024) betonarme köprü yapılarında yapı sağlığı izleme yaklaşımlarını kullanarak mevcut sağlık durumlarına bağlı olarak hemen kullanım seviyesini sağlamak için yorulma tahminlerinde bulunmuşlardır (Kuncham ve Sen). Bu çalışma yorulma hasarı ile yüzey pürüzlülüğü, araç hızı, araç ağırlığı ve araç kategorisi gibi faktörler arasındaki ilişkileri araştıran parametrik bir analizi içermektedir.

Literatürden elde edilen bilgiler ışığında yapı sağlığı izleme çalışmalarıyla yapılacak olan hasar tanılamalarının deprem analizleriyle doğrulanması sağlıklı sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Bu kapsamda Kırkgözeler köprüsünde yapı sağlığı izleme çalışmaları tamamlandıktan sonra, yönetmelikler perspektifinden köprü yapısında bir dizi deprem analizleri uygulanarak sonuçlar kontrol edilmiş olacaktır. Ortaya çıkan sonuçlara göre güçlendirme ve onarım prosedürleri köprü için sunulmuş olacaktır.

Ulaştırma Üst Yapılarında Güçlendirme

Ulaştırma üst yapıları tarihsel dönemlerden günümüze kadar betonarme, çelik ve yığma taşıyıcı sistemli olarak inşa edilmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemle inşa edilmiş ulaştırma üst yapılarında dinamik ve hareketli yüklerden kaynaklı olarak betonda oluşan çatlaklardan ve donatıda oluşan burkulmalardan meydana geldiği gözlemlenmiştir (Ni vd. 2023; Zhang vd. 2023). Ayrıca su geçirgenliğine bağlı olarak donatılarda korozyonlarda izlenmiştir (Liv d. 2020). Bu tür hasarların giderilmesinde cam elyaf, çelik lif ve bazalt lif takviyeleri uygulanmıştır (Guo vd. 2023; Ahmad vd. 2022). Bu lif takviyeleri ile taşıyıcı elemanların stabilitesi korunarak yapısal mukavemeti artırılmıştır. Ayrıca bu tür ulaştırma üst yapılarında fiber takviyeli polimerler (FRP) güçlendirme için uygulanmıştır (Wu and Pandelides 2017). Ulaştırma üst yapısının kolonlarında da mantolama işlemleri yapılmaktadır (Fraol vd. 2024; Goodnight vd. 2012). Çelik köprü yapılarında ise genel olarak sismik sönümleyiciler ile güçlendirme yapılmıştır (Liu vd. 2013; Torra vd. 2014). Yığma formu köprü yapılarında genellikle çekme gerilmelerinden kaynaklı hasarlar oluşmaktadır (Sevim vd. 2011). Bu hasarlar genellikle son zamanlarda tekstil takviyeli harçla ve fiber takviyeli polimerlerle güçlendirilmektedir (Garmendia vd. 2014; Cancelliere vd. 2010).

Ulaşım üst yapılarda uygulanan güçlendirme yöntemlerine ait uygulamalar betonarme, çelik ve yığma yapılar için Şekil 6'da verilmiştir.

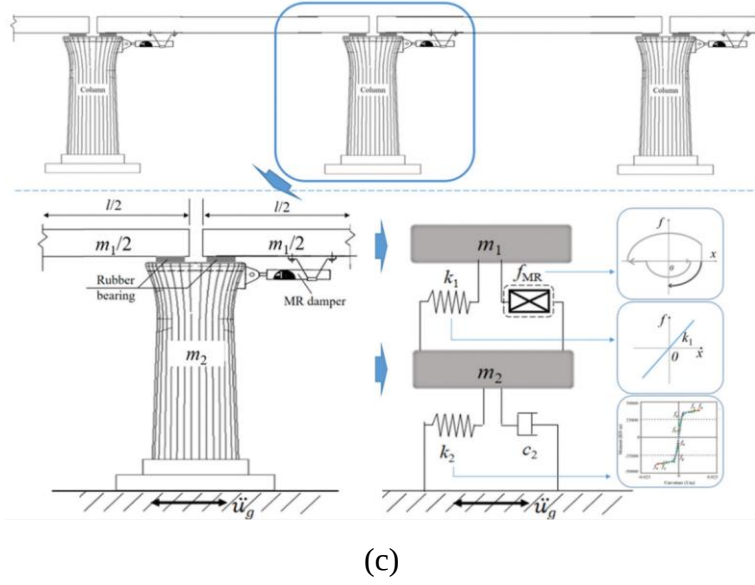


(a)



(b)

Şekil 6. Ulaşım üst yapılarında güçlendirme yöntemleri; a) betonarme köprü kolonlarında mantolama ve FRP sargı (Nicolae vd. 2008), b) Yığma köprü taşıyıcısına takviye için TRM uygulaması (Javier vd. 2024), c) çelik köprülerde MR sönümleyici uygulaması (Shuang vd. 2024)



Şekil 7. Ulaşım üst yapılarında güçlendirme yöntemleri; a) betonarme köprü kolonlarında mantolama ve FRP sargı (Nicolae vd. 2008), b) Yığma köprü taşıyıcısına takviye için TRM uygulaması (Javier vd. 2024), c) çelik köprülerde MR sönümleyici uygulaması (Shuang vd. 2024) (devamı)

Wang vd. (2021) deprem sonrasında betonarme köprünün dairesel kolonlarında düşük bağlayıcılı yüksek mukavemetli donatılarla güçlendirme yoluna gitmişlerdir. Dinamik analizlerin ve dinamik aktüatör deney sonuçları düşük bağlayıcılı yüksek mukavemetli donatıların etkili ve ekonomik bir güçlendirme yöntemi olduğunu göstermiştir (Wang vd. 2021). Qian vd. (2022) şekil hafızalı alaşımlı çelik malzemeli betonarme köprü yapılarının deprem ve farklı yükler etkisi altında kendisinden beklenen sürdürülebilirliği ve fonksiyonelliği sağladığını tespit etmişlerdir (Qian vd. 2022). İzhar vd. (2022) Betonarme köprü yapısında hasar değerlendirme için bir dizi deprem yer hareketi etkisi altında dinamik analizler yürütmüşlerdir. Analiz sonuçlarından köprünün enerji yutma kapasitesi, ivme ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir (İzhar vd. 2022). Kim (2022) hasar almış iki açıklıklı betonarme köprünün sismik performansını değerlendirmişlerdir. Performans analizi sonuçları köprünün bozulma olduğu gözlemlenen bölgelerinde hasarların oluştuğunu göstermiştir (Kim 2022). Kafaji ve Azzawi (2023) köprü tabliyelerinin güçlendirilmesinde çelik liflerin etkinliğini araştırmışlardır. Deneysel ortamda eğilme testlerinin uygulandığı tabliyelerde çelik liflerin kullanılmasının yük kapasitesini %12,93 ve enerji sönümleme kapasitesini %191,2 oranında arttırdığı izlenmiştir (Kafaji ve Azzawi 2023). Ruiz vd. (2023) Ulaştırma üst yapı precast kirişlerin performanslarının artması için yüksek performanslı fiber takviyeli beton malzemesinin (HPFRC) kullanılabileceğini önermişlerdir (Ruiz vd. 2023). Guo vd. (2023) bazalt fiberleri betonarme köprülerde güçlendirme elemanı olarak kullanmışlardır. Üç eksenli dinamik yorulma testleri köprü kirişleri üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonuçları bazalt

fiberin olduğu durumda kırılma tokluğunun %22,67 oranında arttığı ve çatlak genişliğinin %21,94 oranında azaldığını göstermiştir (Guo vd. 2023). Lamouri vd. (2024) iki açıklıklı betonarme köprü'nün sismik davranışının tahmini için polinom kaos metamodeli önermişlerdir. Önerilen bu model sonlu elemanlar analiz yöntemleriyle doğrulanmıştır (Lamouri vd. 2024). Fraioli vd. (2024) betonarme köprü yapılarının sismik performansını iyileştirmek için kolonlarda enine ve boyuna yönde FRP ile sargılama yoluna gitmişlerdir. Boyuna doğrultuda kolonlarda FRP uygulamasının köprü'nün deprem etkisinde görelî ötelemesini önemli ölçüde sınırladığını göstermiştir (Fraioli vd. 2024).

Ulaştırma üst yapılarının deprem davranışlarının tespiti için kullanılan bir dizi analiz ve deney yöntemleri literatür kapsamında araştırılmıştır. Ayrıca analiz ve deneysel sonuçlara göre güçlendirme yöntemleri tespit edilmiştir. Köprü yapılarında sonlu eleman modelleri oluşturulduktan sonra zaman tanım alanında ve artımsal dinamik analizler yürütülmüştür. Analiz sonuçlarında genellikle tepki ivme ve yer değiştirme değerleri, sönümleme kapasiteleri, kırılma yükleri ve gerilme şekil değîl değiştirme dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen bu parametrelere göre köprü yapılarında sismik performans değerlendirmesi yapılmıştır. Deneysel olarak köprü yapı elemanlarından tabliye, kiriş ve kolonlarda statik ve dinamik yöntemler uygulanmıştır. Üç noktalı eğilme statik olarak dinamik aktuatör ile yorulma ve döngüsel yükleme gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında da analiz sonuçlarına benzer parametreler elde edilmiştir. Literatür kapsamında yapılan bir dizi araştırmalar neticesinde köprü kolonlarının güçlendirilmesinde FRP sargının kullanıldığı, kiriş ve tabliye güçlendirilmesinde ise özel üretimli lifli betonların tercih edildiğı sonucuna gidilmiştir. Sismik sönümleme cihazları genellikle çelik köprülerde düşünöldüğü tespit edilmiştir. Literatürden hareketle aktif, yarı aktif, pasif ve hibrit kontrol sistemlerinden birisinin betonarme köprü güçlendirilmesinde kullanılması literatürde ki bir takım boşlukları doldurabileceğine işaretir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Ulaştırma Üst Yapısına Ait Bilgiler

Tez kapsamında Erzurum Horasan İlçesi sınırlarında Aras nehri üzerinde 1968 yılında yapımına başlanıp 1970 yılında ulaşım açılan köprüde hasar tanımlama çalışmaları yapılarak köprünün ulaşım elverişli olup olmadığının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. 105 m uzunluğu sahip ulaştırma üst yapısı toplamda 5 açıklığa sahiptir (Şekil 7).



Şekil 8. Kırkgözeler köprüsü

Betonarme taşıyıcı sisteme sahip olan Kırkgözeler köprüsünden aktif olarak ulaşım sağlanmaktadır. Kırkgözeler, Harçlı, Kükürtlü, Buğdaylı ve Emre mahallerini Erzurum İl merkezine bağlayan köprüden kış döneminde ortalama olarak günde 14 hafif taşıt ve 3 ağır taşıt olmak üzere toplamda 17 taşıt geçmektedir. Yaz döneminde ise günde ortalama olarak 129 hafif taşıt ve 197 ağır taşıt olmak üzere toplamda 326 taşıt geçmektedir.

Yüklemeye Koşulları ve Hasar Sınır Değerleri

Ulaştırma üst yapısında hareketli yükler (taşıt yükleri), kendi ağırlığından kaynaklı oluşan yükler, kaplama yükleri ve zaman tanım alanında deprem yükleri altında analizlerinin yapılması düşünülmüştür. Köprü yapısına H30-S24 en ağır taşıt yükü uygulanmıştır. Tablo 2’de dikkate alınan taşıt yükleri verilmiştir (Uluğ 2008; AASHTO 2014).

Tablo 2. Köprü Yapısında Uygulanan Taşıt Yükleri

Yük Sınıfı	H30-S24
Toplam Ağırlık (kN)	540
Ön Aks (kN)	60
Orta Aks (kN)	240
Arka Aks (kN)	240
Eşdeğer Şerit Yükü (kN/m)	15

Betonarme köprü ulaştırma yapılarında basınç, çekme ve kayma gerilmeleri tahkiki AASHTO 2014'e göre yapılacaktır. Deprem ve taşıt yüklerinin ortak etkimesi sonucunda bu değerler elde edilerek mukayese edilecektir. Eşitlik 1'de basınç gerilmeleri için sınır değeri, Eşitlik 2'de çekme gerilmeleri ve Eşitlik 3'te kullanım yükleri için kayma gerilmeleri için ve Eşitlik 4'te de aktarma anı için kayma emniyet gerilmesi sınır değerler verilmiştir. Ayrıca Eşitlik 5'te de taşıma gücü verilmiştir. Eşitlik 5'te ki taşıma gücü momentinin tüm yük birleşimlerinden elde edilecek olan toplam taşıma gücü momentinden büyük olması gerekmektedir.

$$\sigma_{ci} = 0,60f_{ci} \quad (1)$$

$$\sigma_{ti} = 0,25\sqrt{f_{ci}} \quad (2)$$

$$\tau_{fc} = 0,50\sqrt{f_c} \quad (3)$$

$$\tau_{ip} = 0,50\sqrt{0,75f_c} \quad (4)$$

$$\phi M_{nk} = A_{srk}f_{suk}d_k \left[1 - 0,6 \frac{A_{srk}f_{suk}}{b_w d_k f_c} \right] + 0,85f_c(b - b_w)t_{kk} \left(d_{ko} - \frac{t_{kk}}{2} \right) \phi \quad (5)$$

AASHTO (2014)'e göre köprü açıklık ortası sehimin açıklığa oranının şehir dışındaki köprülerde 1/800'den ve şehir merkezinde bulunan köprülerde 1/1000'den küçük olması önerilmektedir. Bunlara ek olarak aktarma anında ise sehimin açıklığa oranının 1/500 den küçük olması ve nihai sehimin de yine 1/500 değerinin altında kalması yeterli olduğu Kabul edilecektir (AASHTO 2014).

Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Horasan Kırkgözeler köprüsü 40.003445 Enlem ve 41.9650 Boylam lokasyonunda bulunmaktadır. Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre söz konusu köprüye ait yerel deprem parametreleri elde edilmiştir. Kırkgözeler Ulaştırma Üst Yapısının zemini TBDY 2018 ve AASHTO'ya göre ZD yani çok katlı kil tabakaları olarak seçilerek bazı deprem parametreleri elde edilmiştir. Şekil 8'de Kırkgözeler Köprüsünün AFAD haritalarına göre konumu

verilmiştir. AFAD haritalarından köprü için elde edilen yerel deprem parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. Türkiye Deprem Tehlike Haritasında köprünün konumu (AFAD 2024)

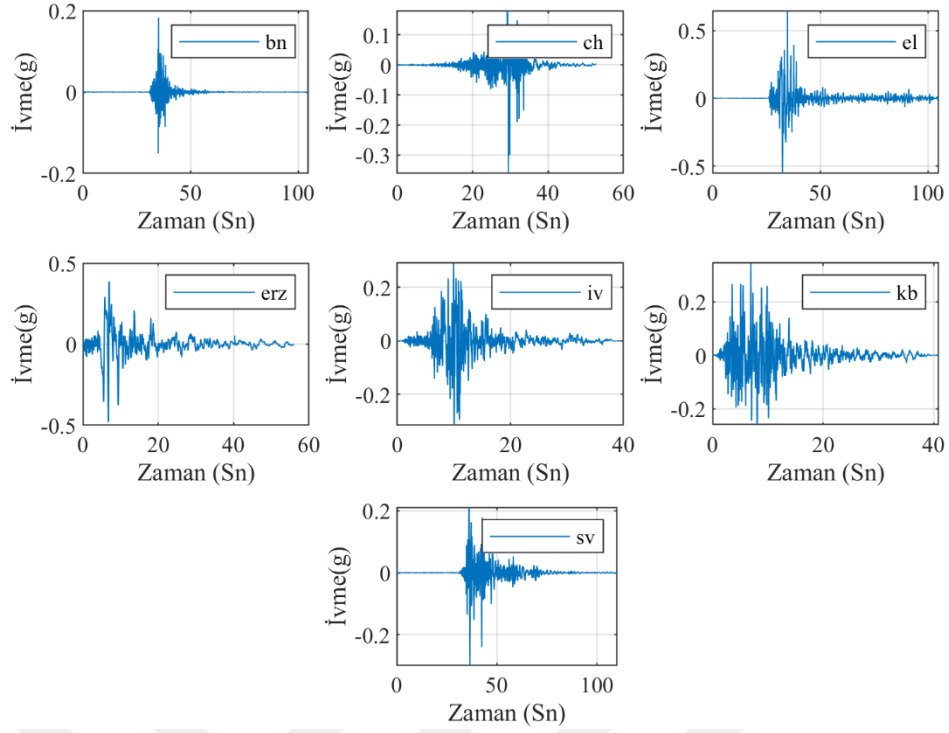
Tablo 3. Köprü Yapısının Yerel Deprem Parametreleri (AFAD 2024)

Deprem Yer Hareketi Düzeyleri	S_{DS}	S_{D1}	S_S	S_1	PGA (g)
DD-1	1,394	0,719	1,394	0,373	0,571
DD-2	0,904	0,447	0,755	0,204	0,317
DD-3	0,467	0,202	0,299	0,087	0,129

Ulaştırma üst yapısının deprem analizi için ülkemizde ve dünyada meydana gelen 7 büyük deprem yer hareketi kullanılmıştır. Deprem kayıtlarına ait karakteristik bilgiler Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te verilen deprem kayıtları Şekil 9'da gösterildiği gibi ivme zaman hikayesi olarak çizdirilmiştir. Çalışmada 5,7 Mw ile 7,7 Mw büyüklüğünde depremler kullanılmıştır. Bu depremlere ait ten yüksek yer ivmesi değerleri 0,177 g ve 0,908 g arasında değişmektedir.

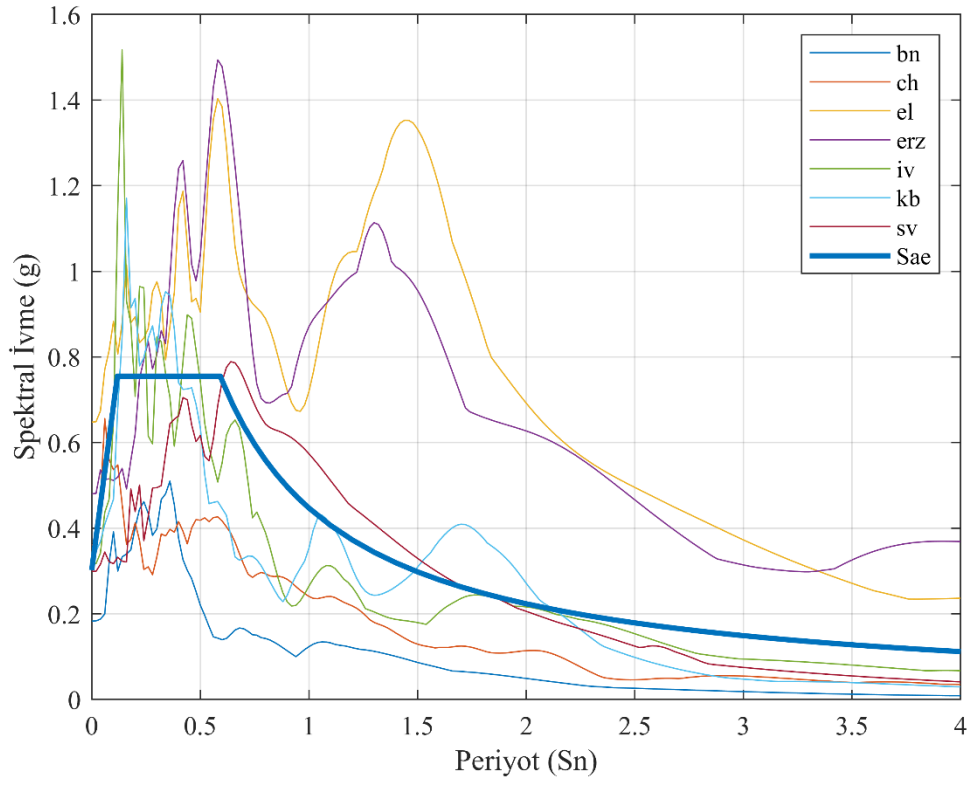
Tablo 4. Tezde Kullanılan Deprem Yer Hareketleri (AFAD 2024; PEER 2025)

Depremler	Tarih	Enlem	Boylam	İstasyon	Derinlik (km)	Büyükklük (Mw)	PGA (g)
Bingöl Karlıova (bn)	14.06.2020	39.365	40.714	Yedisu	8.0	5,7	0,181
Chi-Chi (ch)	21.09.1999	23.772	120.982	Nantou	33	7,7	0,195
Elbistan (el)	06.02.2023	38.089	37.239	Göksun	7	7,6	0,648
Erzincan (erz)	13.03.1992	39.7159	39.6292	Otlukbeli	22,6	6,6	0,488
Imperial Valley (iv)	15.10.1979	32.3700	115.1900	Imperial	11,6	6,5	0,177
Kobe (kb)	17.01.1995	34.5983	135.035	Kobe	20	7,2	0,908
Sivrice (sv)	24.01.2020	38.3593	39.063	Sivrice	8,06	6,8	0,298

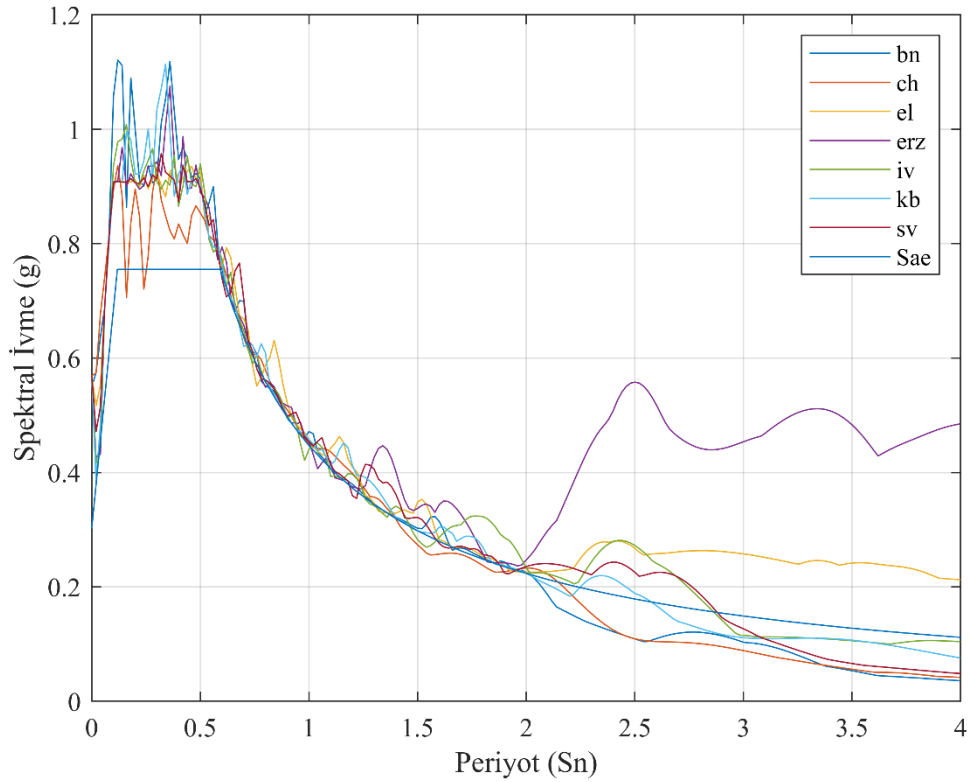


Şekil 10. Zaman tanım alanında hesap için kullanılan depremlere ait ivme-zaman eğrileri

Tablo 3'te DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre köprü yapısında oluşabilecek en büyük yer ivmesi değeri 0,317g olarak görülmektedir. Zaman tanım alanında kullanılan depremlere ait ivme değerlerinden bu ivme değerinin çok altında olan kayıtlar bulunmaktadır. Şekil 10'da depremlere ait spektrum eğrileri verilmiştir. Köprü yapısında meydana gelecek olan en yüksek spektral ivme değeri 0,904g olarak karşımıza çıkmaktadır. Etkin periyot aralıklarında deprem spektrum değerlerinden bu değeri sağlamayan değerler bulunduğundan dolayı Şekil 11'de gösterildiği gibi deprem spektrum eğrisi ölçeklendirilmiştir (Mokarram ve Banan 2025).



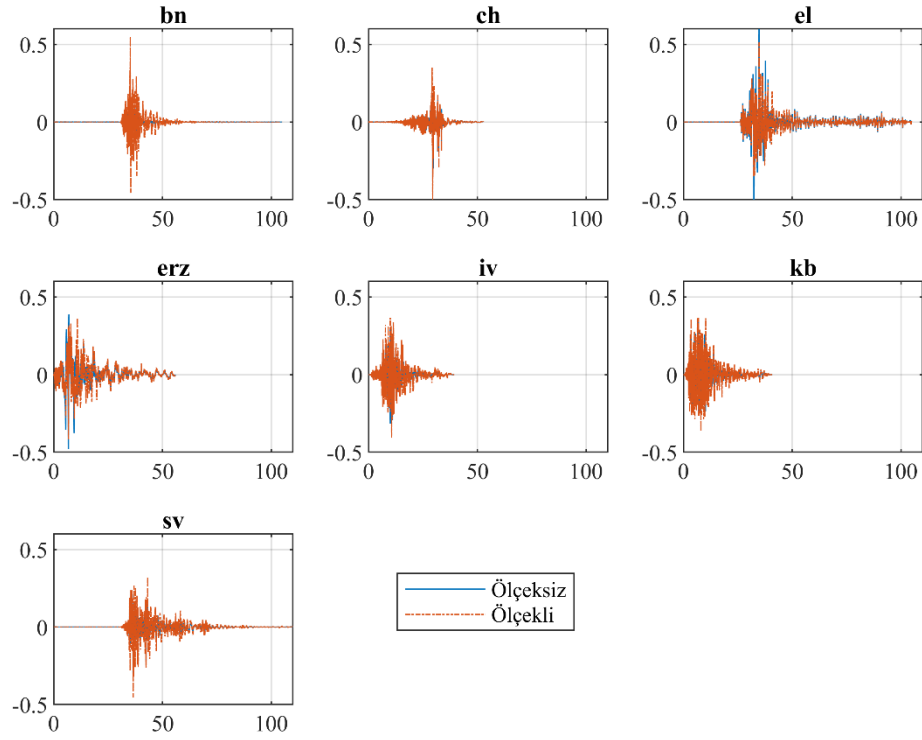
Şekil 11. Ölçeksiz deprem spektrumları



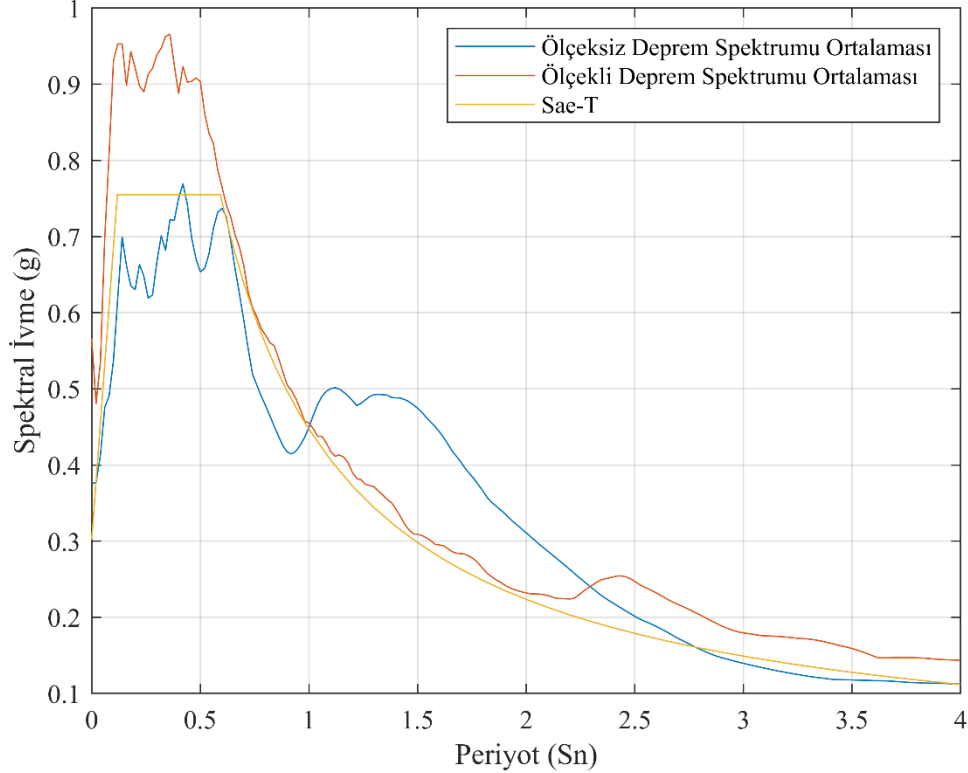
Şekil 12. Ölçekli deprem spektrumları

Şekil 12'de ise yapı analizinde kullanılacak olan depremlere ait ölçekli deprem yer ivmesi eğrileri verilmiştir. Şekil 13'te yapıya ait yatay elastik ivme spektrumu, ölçekli ve

ölçeksiz ortalama deprem spektrumu eğrisi verilmiştir. Şekil 13'te deprem spektrumlarının köprüye özgü olarak ölçeklendirildiği görülmektedir.



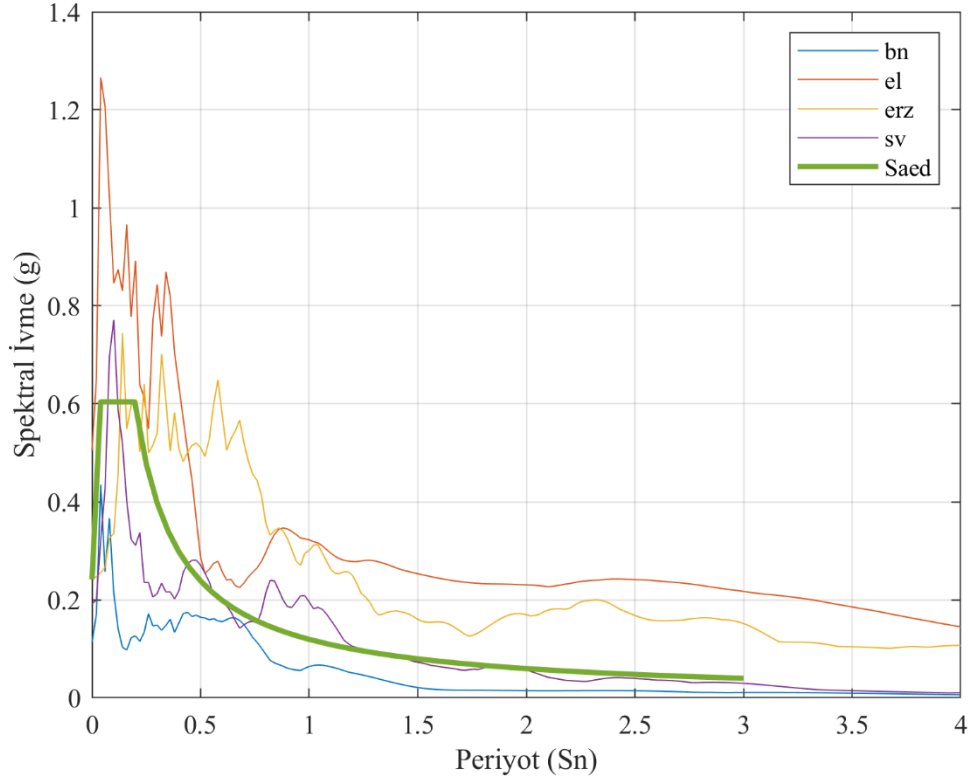
Şekil 13. Ölçekli deprem ivme eğrileri



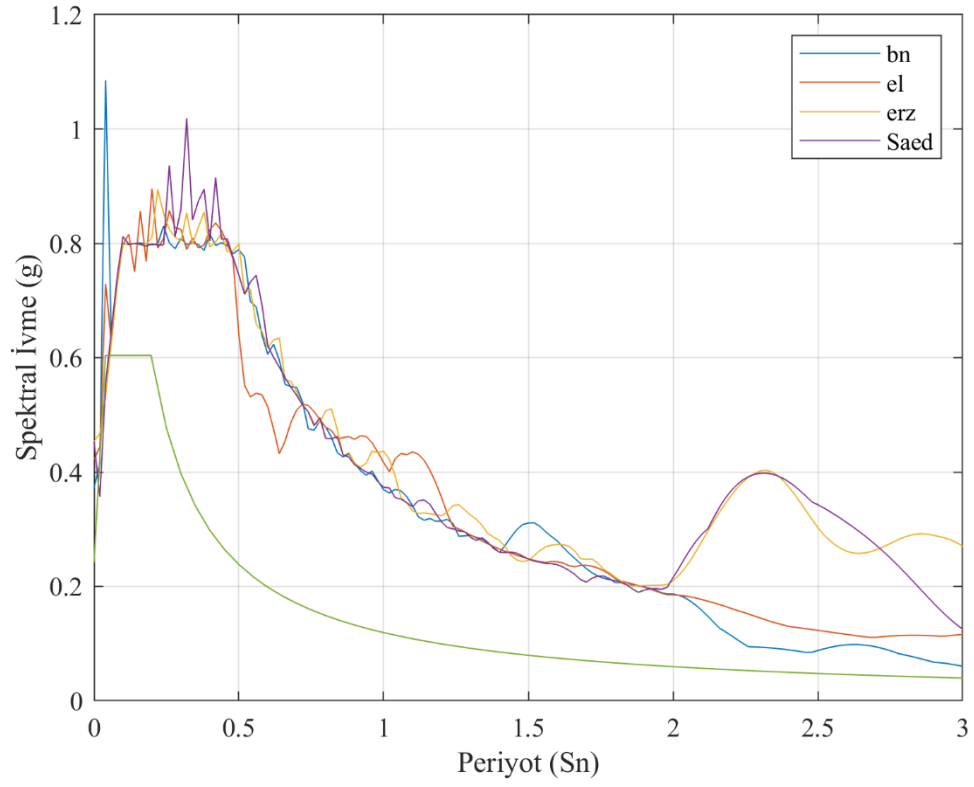
Şekil 14. Ortalama deprem spektrum eğrileri

Ulaştırma üst yapısının zaman tanım alanında analizi için Bingöl, Karlıova, Erzincan, Sivriye ve Elbistan depremlerinin düşey ivme değerleri de dikkate alınmıştır. Söz konusu

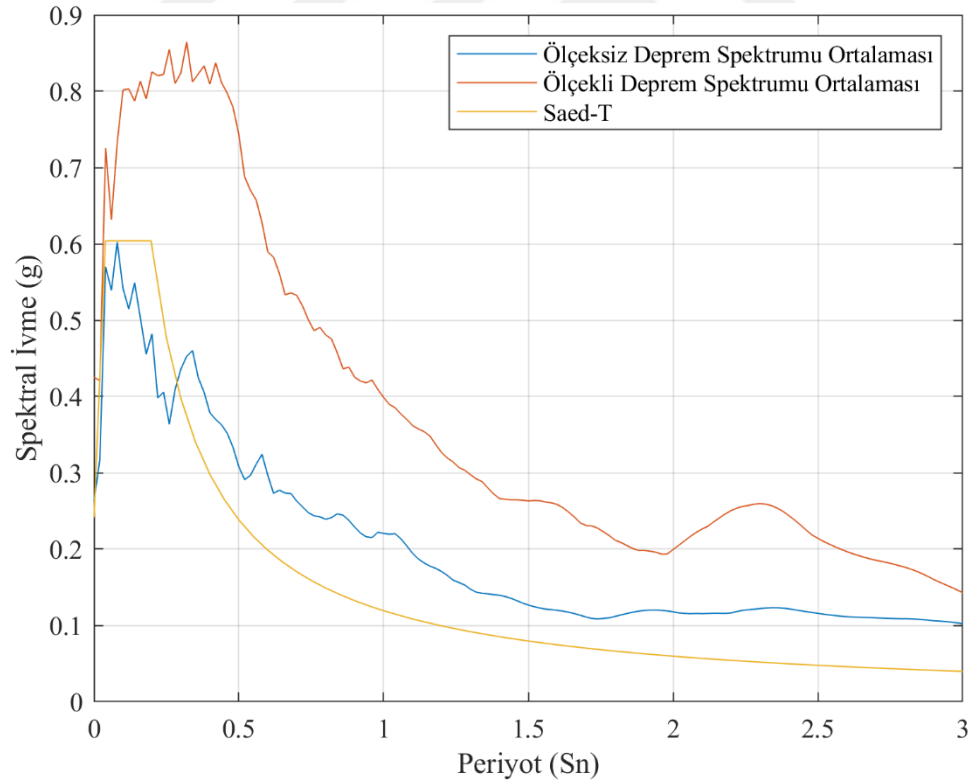
köprüde yatay ve düşey deprem yükü analizi uygulanmıştır. Düşey deprem ivme değerleri de köprü yapısına ait düşey elastik ivme spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Şekil 14'te ölçeksiz ve Şekil 15'te ölçekli düşey deprem ivme spektrumları verilmiştir. Şekil 16'da ortalama düşey deprem ivme spektrumu eğrisi ve Şekil 17'de ise ölçeksiz ve Şekil 18'de ölçekli düşey ivme zaman hikayeleri verilmiştir. Spektral esasta ortalama olarak 0,95 g yatay ivme değeri ve 0,85 g düşey ivme değeri ile köprü yapısı zaman tanım alanında analizlere hazır hale getirilmiştir.



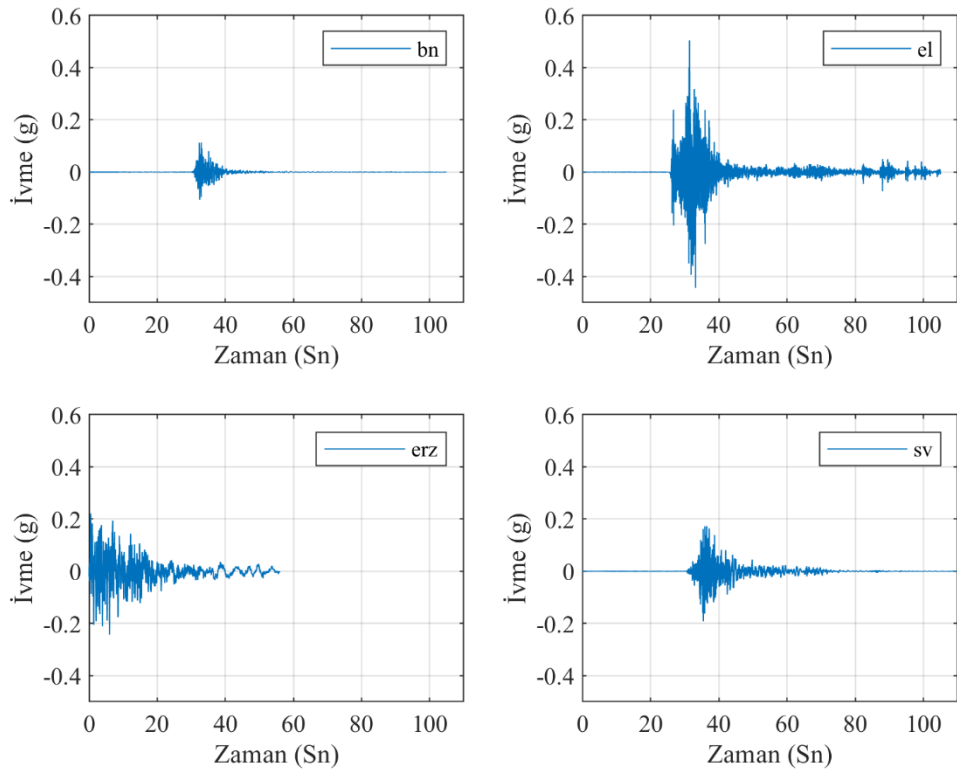
Şekil 15. Ölçeksiz düşey deprem ivme spektrumu



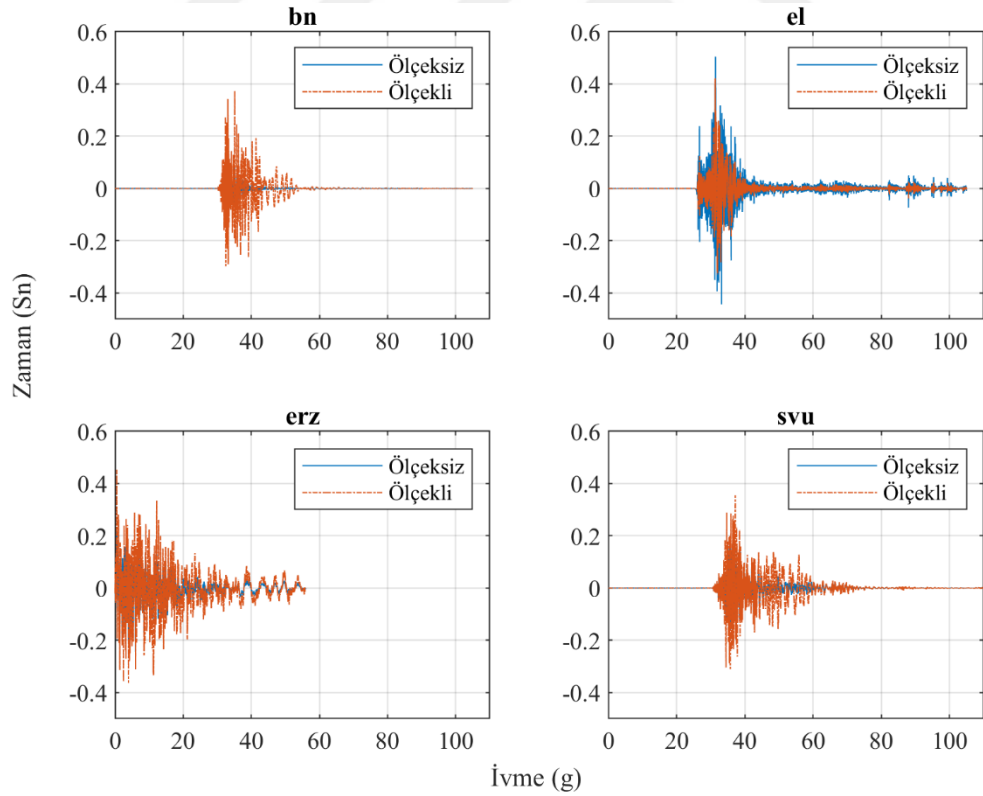
Şekil 16. Ölçekli düşey deprem ivme spektrumu



Şekil 17. Ortalama düşey deprem ivme spektrumu



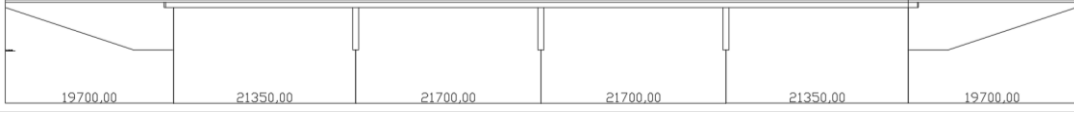
Şekil 18. Ölçeksiz Düşey deprem ivme zaman eğrileri



Şekil 19. Ölçeksiz Düşey deprem ivme zaman eğrileri

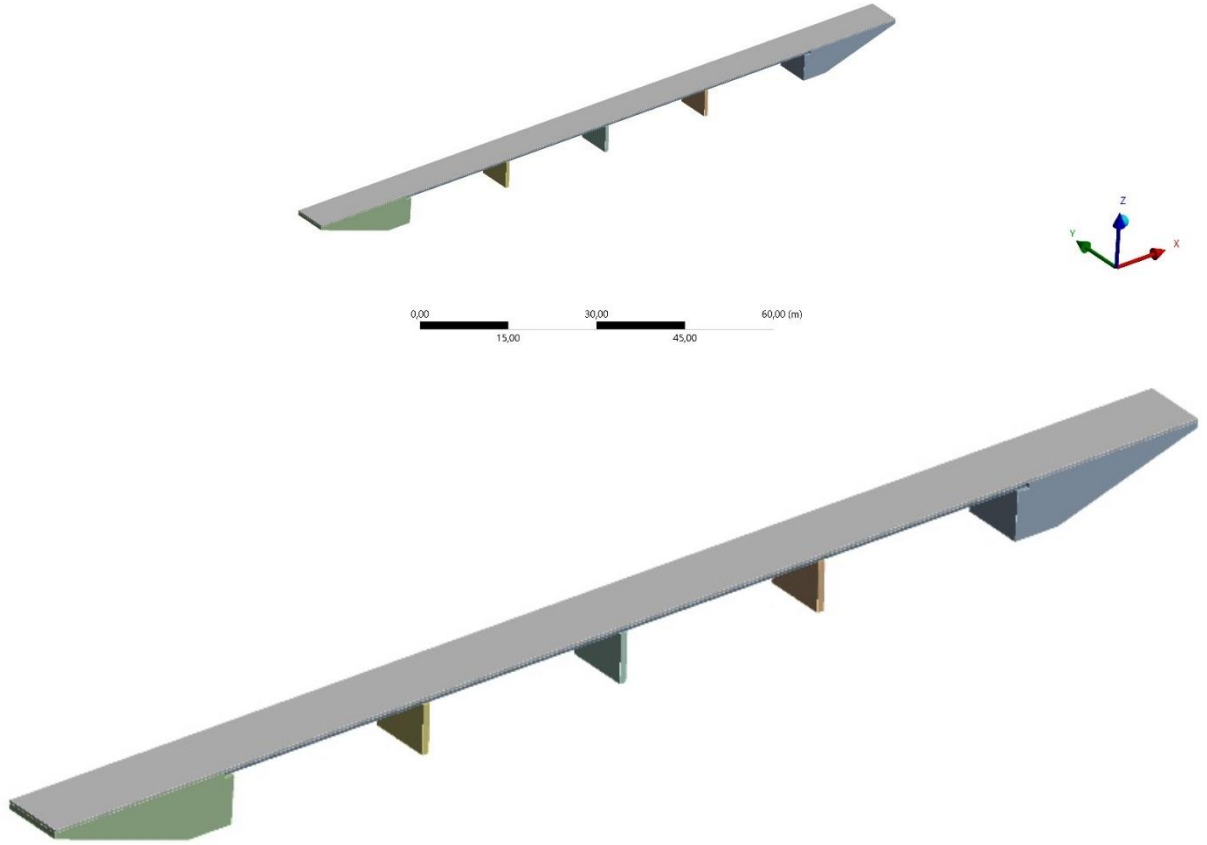
Köprünün Sonlu Elemanlar Modeli

Köprü yapısı Şekil 19’da da gösterildiği üzere üç açıklıktan ve köprüyü üst yapı birleşim bölgelerine bağlayan iki mesnetten oluşmaktadır. Mesnet uzunluklukları 19,70 m açıklık mesafeleri 21,35 m, 21,70 m, 21,70 m ve 21,35 m olduğu görülmektedir. Köprünün yerden yüksekliği 11,90 m ve mesnet ile üst tabliye arasında ki yükseklik 5,80 m olarak ölçülmüştür.



Şekil 20. Köprünün geometrisi

Köprünün tabliye kalınlığı 30 cm, kiriş boyutları 60x60 cm ve oval formunda kolon boyutları ise 70x120 cm olarak ölçülmüştür. Köprü yapısının sonlu elemanlar modeli bilgisayar tabanlı ANSYS programında Şekil 20’de gösterildiği gibi kurulmuştur. Kolonlar Zemin yapısına dönmeye, çökmeye ve yatay yer değiştirme yapabilecek şekilde kayıcı olarak mesnetlenmiştir. Mesnetler ise kolonlara sabit mesnet olarak bağlanmıştır. Mesnetlerin bir miktar sehim yapabileceği şekilde sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Köprü yapısının çok uzun olmasından kaynaklı olarak hesap karmaşıklığı olmaması için sonlu elemanlar modeli makro model olarak kullanılmıştır. Kolonlar kirişlere ve kirişler ise tabliyelere tam rijit birleşim davranışı gösterecek şekilde modellenmiştir. Kolonlarda eksenel basınç kuvvetleri, düzlem içi ve düzle dışı eğilme momenti davranışını temsil edebilecek plastik mafsallar (P-M2-M3), kirişlerde düzlem içi eğilme momentini temsil eden plastik mafsallar (M3) eleman uç bölgelerinde tanımlanmıştır.



Şekil 21. Köprünün geometrisi

Köprü yapısı kabuk eleman olarak modellenmiştir. Daha sonra yapı sonlu elemanlara ayrılmıştır. Köprü yapısını oluşturan taşıyıcı elemanlar betonarme yapı malzemesi olarak ANSYS programında tanımlanmıştır. Köprü yapısı sonlu elemanlara bölündükten sonra taşıtların arka ve ön tekerlek yüklerinin düğüm noktalarına denk gelecek şekilde yükleme yapılmıştır.

Ulaştırma Üst Yapısında Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları

Köprü yapısının zemininde kuvvetli yer hareketi kayıtcısının kullanılmasıyla 6 farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde zemin yapısına ait salınım ve periyot gibi dinamik parametreler elde edilerek yapı analizinde kullanılmıştır. Şekil 21’de gösterilen kuvvetli yer hareketi kayıtcısı üç eksenle ölçüm yapabilen, ultra düşük gürültülü, ulusal ve uluslararası standartlarla uygunluk gibi özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca bu kuvvetli yer hareketi kayıtcısı riskli yapı stoğunun hızlı değerlendirmesinde de kullanılmaktadır.



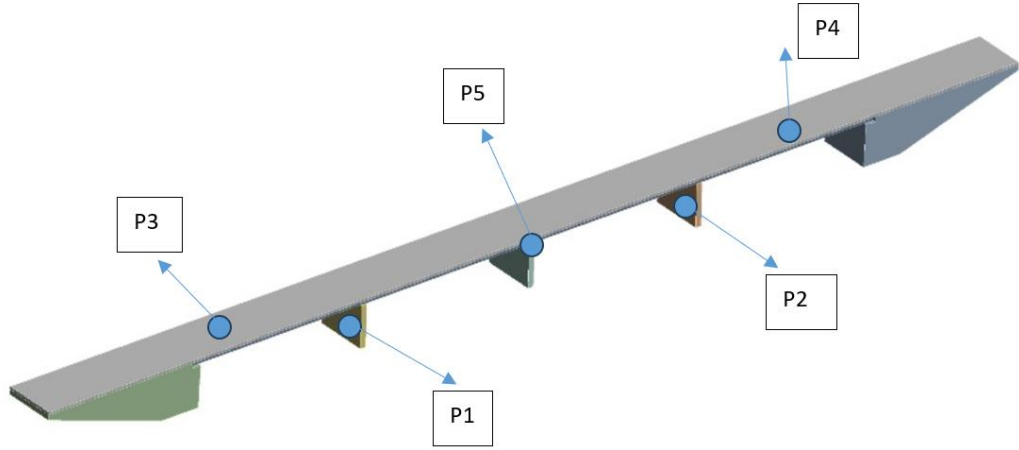
Şekil 22. Kuvvetli yer hareketi kayıtcısı

İncelemeye konu edinilen köprü yapısının zemininde elde edilen ölçümlerin (Şekil 22) ortalaması alınarak sahaya özgü spektrumları elde edilmiştir.



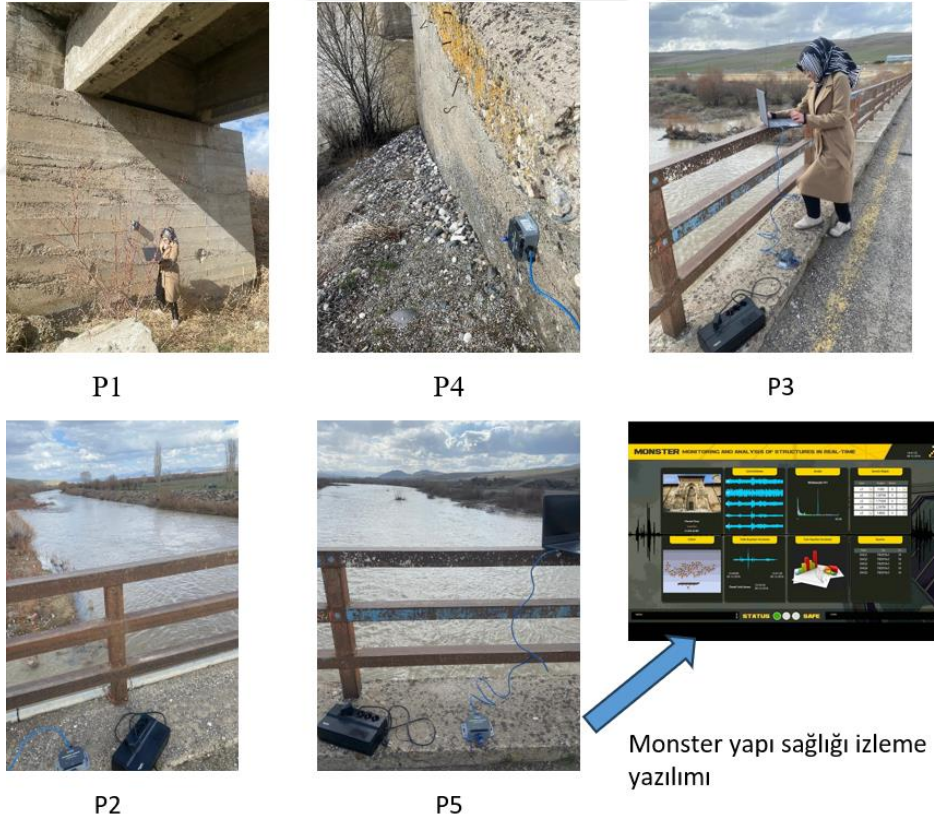
Şekil 23. Köprü yapısının zemininden alınan ölçümler

Köprü yapısının beş farklı bölümünde dijital ivmeölçerler ile yapı sağlığı izleme çalışmaları yürütülmüştür. Köprü ana taşıyıcı kirişlerin üst kısımları ve kolon elemanlarda ölçümler alınmıştır (Şekil 23). Alınan ölçümlerde bu bölümlere ait salınım ve ivme değerleri alınarak nümerik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 23'te gösterilen P1 ve P2 köşe kolon orta bölgesi, P3 ve P4 noktası köşe açıklık ve P5 ise üst tabliye ile kolon arasındaki mesnet bölgesidir.



Şekil 24. Köprü yapısında alınan ölçüm noktaları

Şekil 23’te gösterilen ölçüm noktalarına dijital ivme ölçerler Şekil 24’te de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Dijital ivme ölçerler üç eksenli ölçüm yapabilen, ölçebileceği en yüksek titreşim düzeyi en az $\pm 15g$, DC –400 Hz frekansları aralığında doğrusal olarak çalışan ve sensörün dinamik aralığı minimum 155 dB olan ivmeölçerlerdir. Yapı sağlığı izleme yazılımı olan Monster programı ile veriler değerlendirilmiştir (Şekil 24).



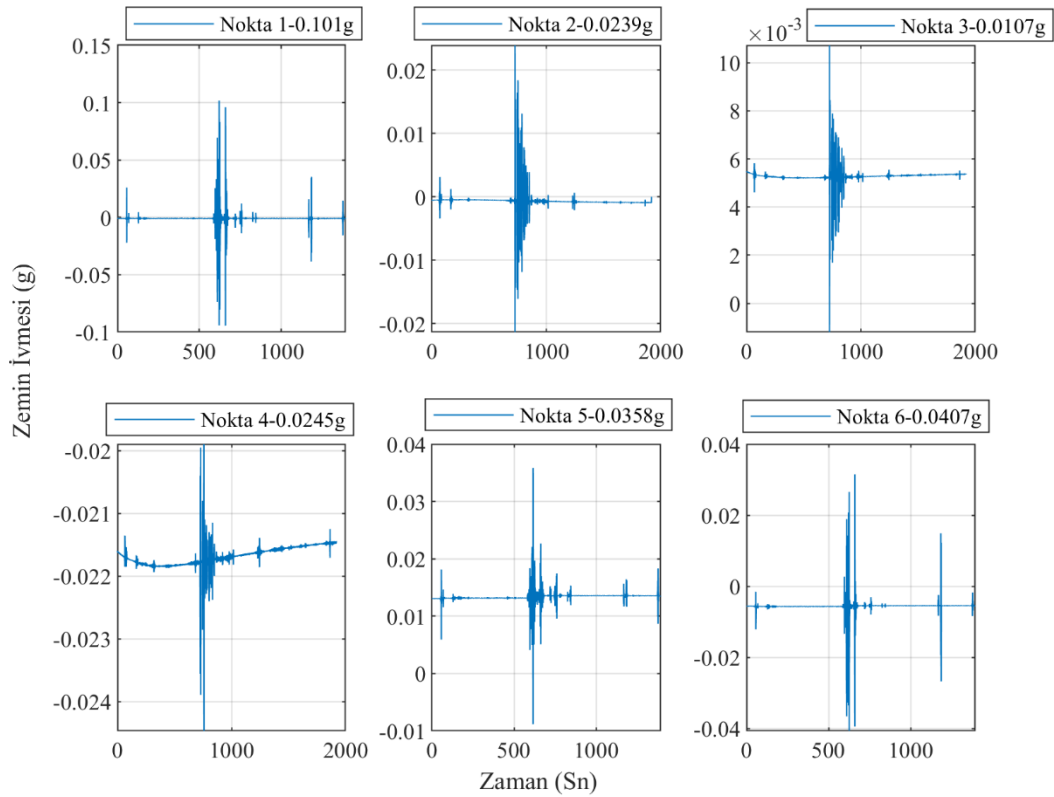
Şekil 25. Köprü yapısında yapı sağlığı izleme ölçümleri

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez kapsamında ilk olarak köprü yapısına ait zeminin dinamik ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra köprü yapısında modal analiz, taşıt ve deprem yükleri etkisi altında zaman tanım alanında analizler uygulanmıştır. Zaman tanım alanında ve taşıt yükleri etkisi altında köprü yapısında oluşan basınç gerilmeleri, çekme gerilmeleri, düzlem içi kayma gerilmeleri, deformasyonlar ve tepki ivme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yapı sağlığı izleme yapılarak alınan ölçüm sonuçları ile birlikte yorumlanmıştır.

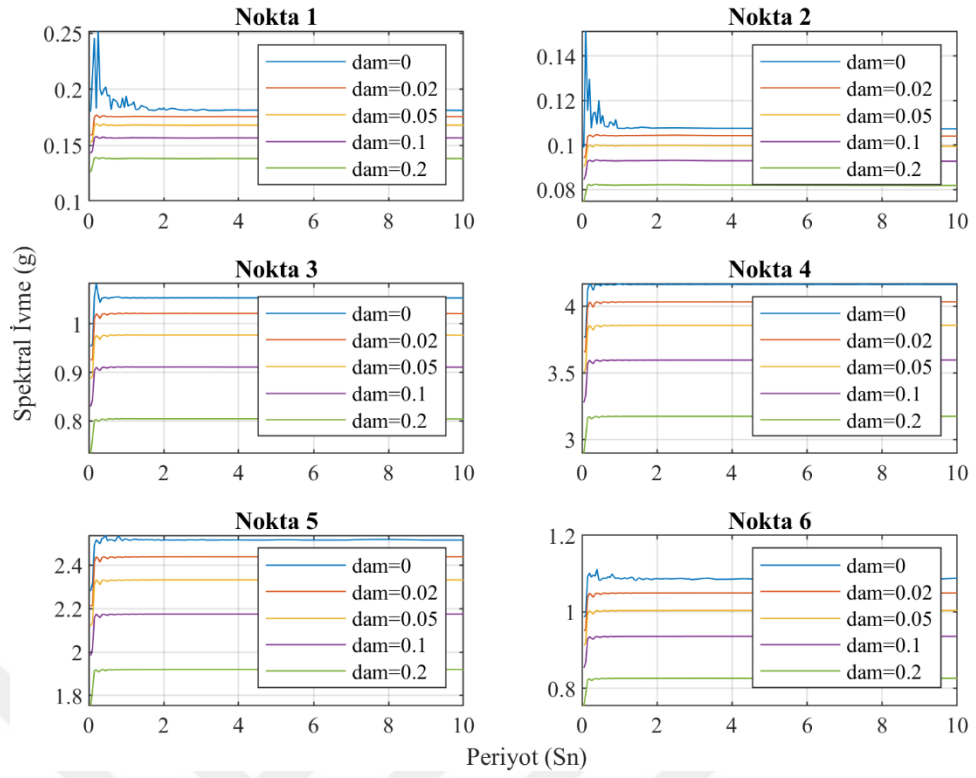
Zemin Dinamiği Parametrelerinin Belirlenmesi

Köprü yapısının zemininde altı farklı noktadan kuvvetli yer hareketi kayıtcısının kullanılmasıyla ivme ölçümleri alınmıştır. Taşıtların köprü üstünden geçtiği ve geçmediği durumlar dahil olmak üzere ivme değerleri elde edilerek Şekil 25'te sunulmuştur. En yüksek yer ivme değerleri 0.0107g ile 0.101g arasında değiştiği belirlenmiştir. Köprü yapısının zemininde en yüksek ivme değerleri yaklaşık 500. sn sonrasında elde edilmiştir.

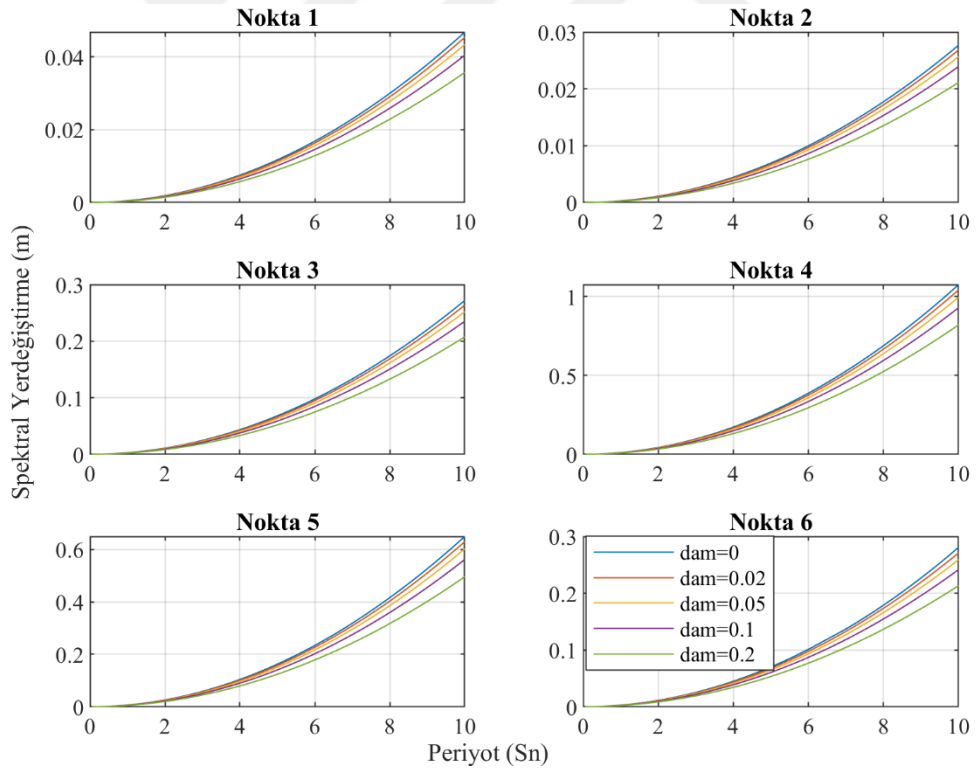


Şekil 26. Köprü yapısının zemininden alınan ivme ölçümleri

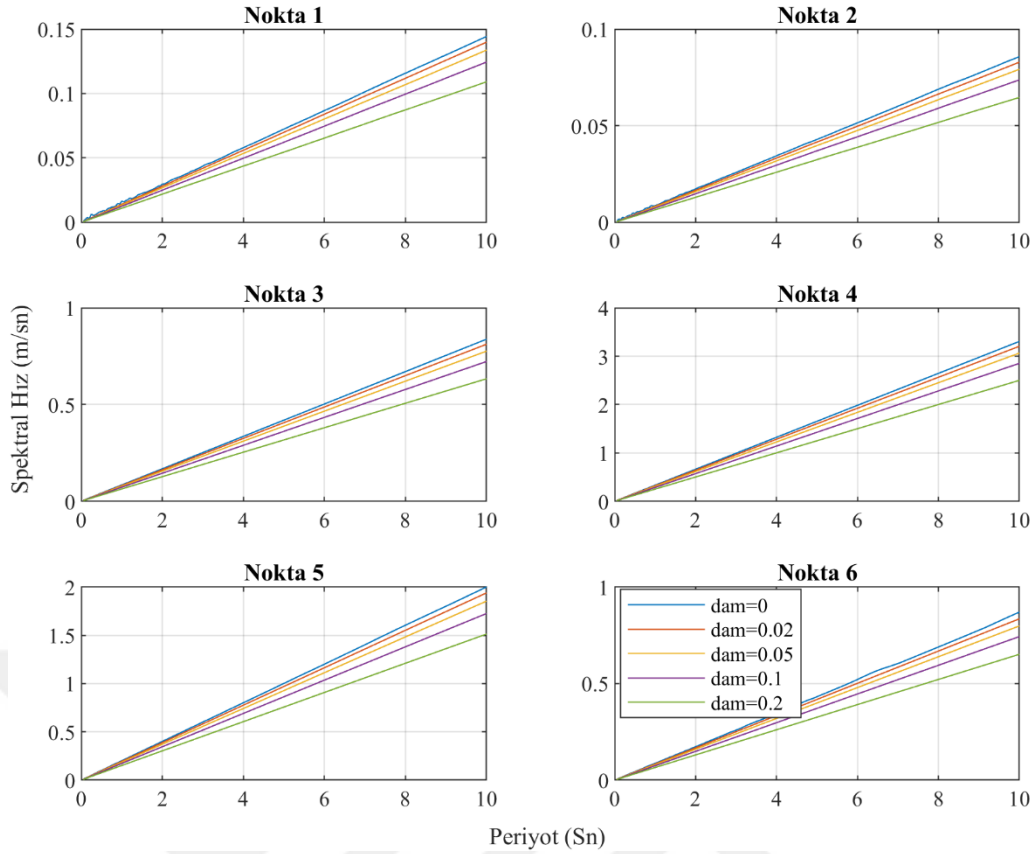
Zemin yapısından alınan ivme ölçümleri sönüm oranı 0, 0,02, 0,05, 0,1 ve 0,2 değerleri için spektral ivme (Şekil 26), yer değiştirme (Şekil 27) ve hız (Şekil 28) cinsinden çizdirilmiştir.



Şekil 27. Köprü yapısına ait zemin spektral ivme değerleri

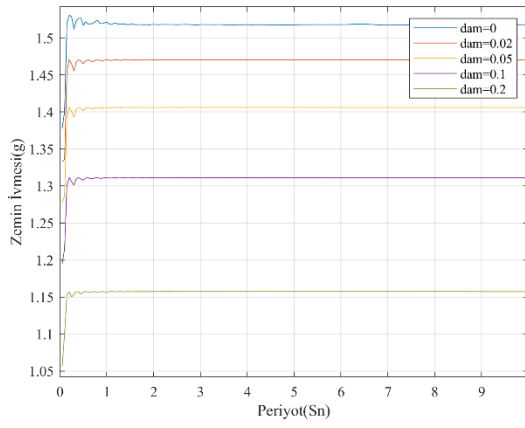


Şekil 28. Köprü yapısına ait zemin spektral yer değiştirme değerleri

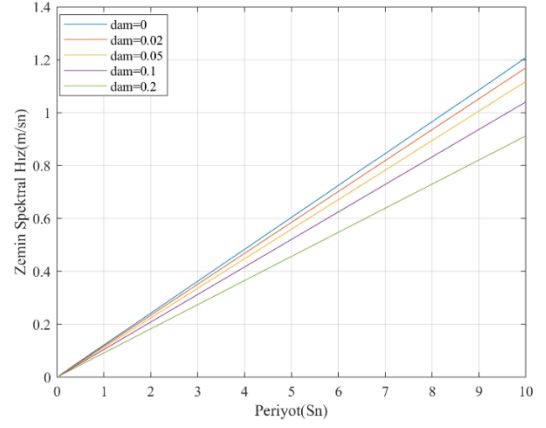


Şekil 29. Köprü yapısına ait zemin spektral hız değerleri

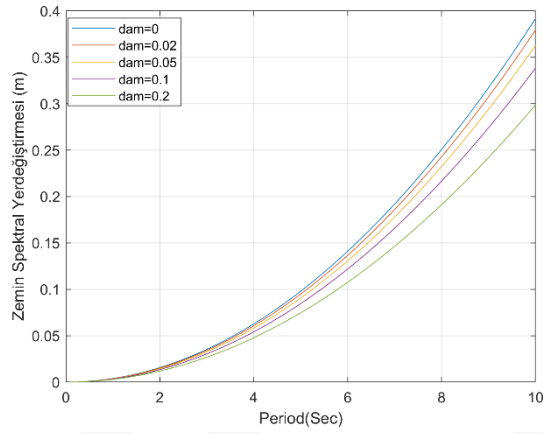
Köprü zeminin tüm sönüm oranları için yaklaşık 1.mod periyodunun 0,50 ile 1 sn arasında değiştiği hesaplanmıştır. En elverişsiz durum sönüm oranı (dam) 0 için spektral ivme değerleri 0,15g ile 2,4g arasında değiştiği izlenmiştir. Spektral anlamında AFAD verilerine göre köprü yapısının bulunmuş olduğu zeminde DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için sırasıyla 1,394g ve 0,904g spektral ivme değerleri ZD zemin sınıfı için hesaplanmıştır. Zemin yapısından alınan ölçümlere göre sönüm oranının 0.2 olması durumunda spektral ivme değerinin 1,15g ve sönüm oranı 0 olduğunda ise 1,60g ortalama spektral ivme değerlerinin oluştuğu hesaplanmıştır (Şekil 29a). Bu durumda yapısal analizde güvenli tarafta kalınması için sahadan ölçülen spektral ivme değerlerine göre analizler yapılmıştır. Zemin yapısında ortalama olarak 10 sn periyot sonunda en yüksek hız ve yer değiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Zemin yapısında kısa periyot aralığında maksimum ivme değeri ve uzun periyot aralıklarında ise hız ve yer değiştirme değerleri hâkim olmuştur. Zemin yapısında ortalama olarak 1.mod periyodunun 1,05 sn, 2.mod periyodunun 0,85 sn ve 3.mod periyodunun 0,40 sn olduğu yaklaşık olarak belirlenmiştir. Analizlerde kullanılacak olan maksimum hız, ivme ve yer değiştirme değerleri sönüm oranı 0 için yani en elverişsiz durum için seçilmiştir.



(a)



(b)

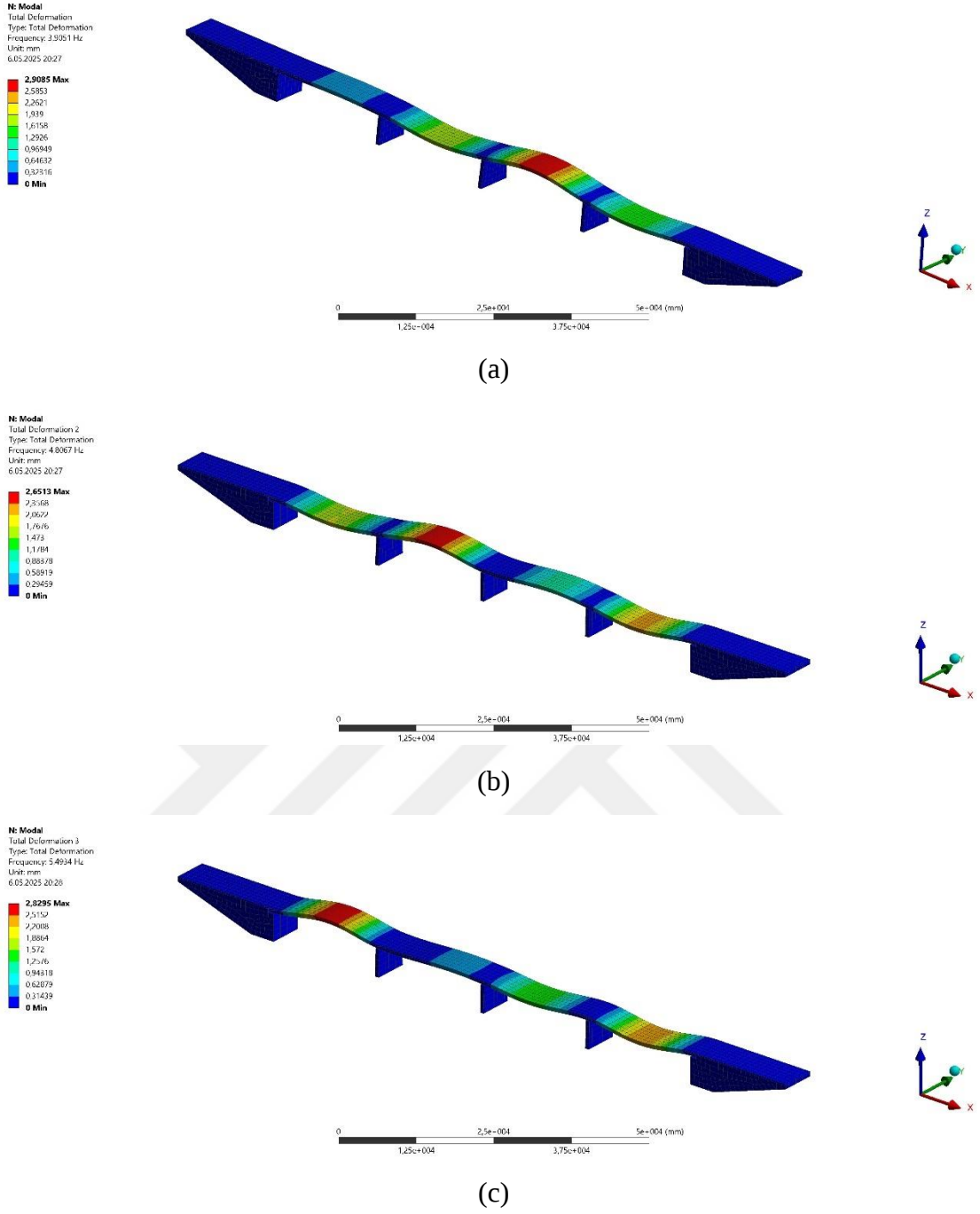


(c)

Şekil 30. Köprü yapısına ait zeminin ortalama spektral değerleri; a) ivme, b) yer değiştirme, c) hız

Köprü Yapısının Modal Analiz Sonuçları

Köprü yapısında uygulanan modal analiz sonuçlarında elde edilen mod şekilleri ve buna karşılık gelen hâkim frekans değerleri Şekil 30'da gösterilmiştir.

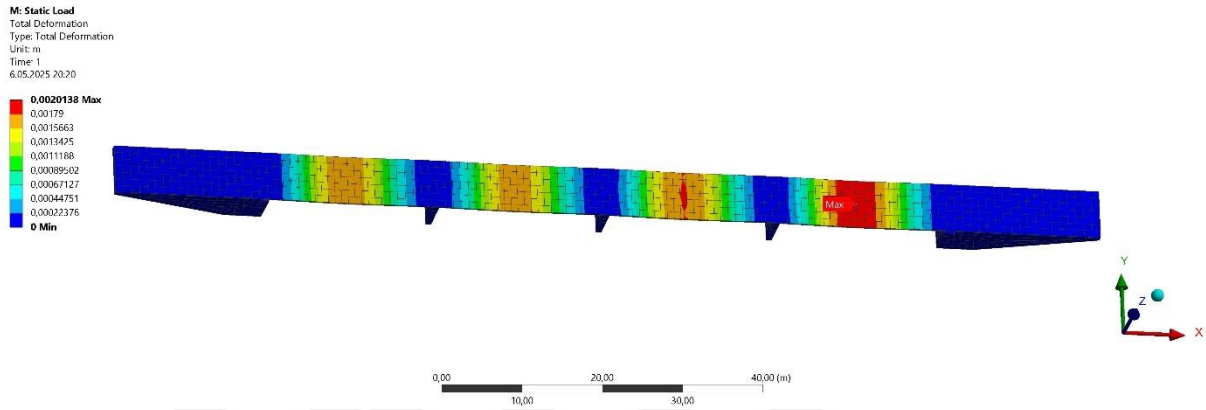


Şekil 31. Mod şekilleri; a) 1.mod, b) 2.mod, c) 3.mod

Köprü yapısının 1.mod frekansı 3,905 Hz, 2.mod frekansı 4,806 Hz. ve 3.mod frekansı 5,493 Hz. olarak hesaplanmıştır. Yapının bu frekans değerlerine karşılık gelen mod periyotları sırasıyla 0,256 sn, 0,208 sn ve 0,182 sn olarak elde edilmiştir. Köprü'nün hâkim modunun eğilme modu olduğu gözlemlenmiştir. Köprü yapısında burulmanın gözlenmeyeceği ve eğilmeden göçeceği tahmin edilmiştir. Zemin yapısının ölçülen periyot değerlerine bakıldığında zemin hâkim periyot değerleri ile yapı periyot değerlerinin birbirleriyle çok uzak olduğu ve bundan dolayı herhangi bir rezonans riskinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

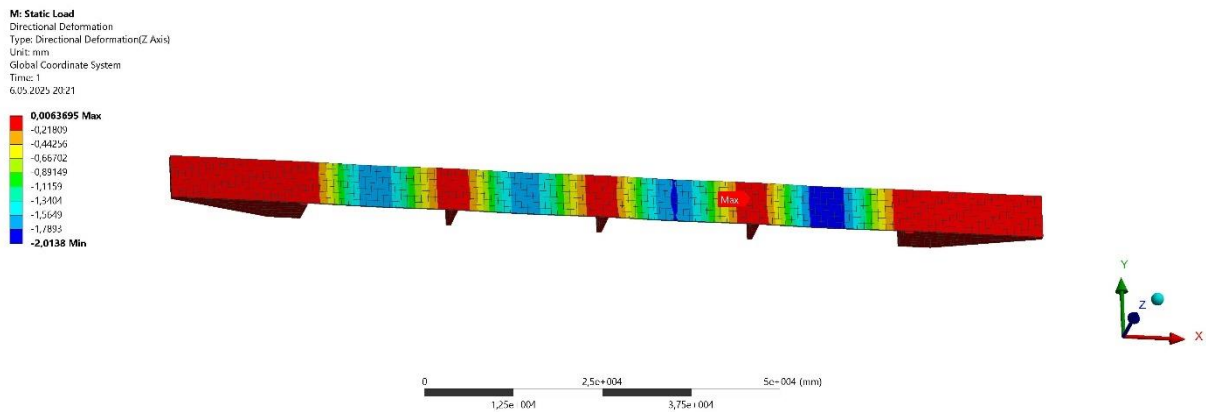
Köprü Yapısının Taşıt Yükleri Etkisi Altında Analiz Sonuçları

Köprü yapısında H30-S24 yük modeli AASHTO 2014'e göre uygulanmıştır. Göze alınan X doğrultusunda oluşan deformasyon dağılımları Şekil 31'de verilmiştir. Maksimum deformasyonların köşe açıklık bölgesinde 0,00201 m değeriyle oluştuğu gözlemlenmiştir. AASHTO 2014'e göre deformasyon değerlerinin izin verilebilir limit değerlerin altında kaldığı tespit edilmiştir.



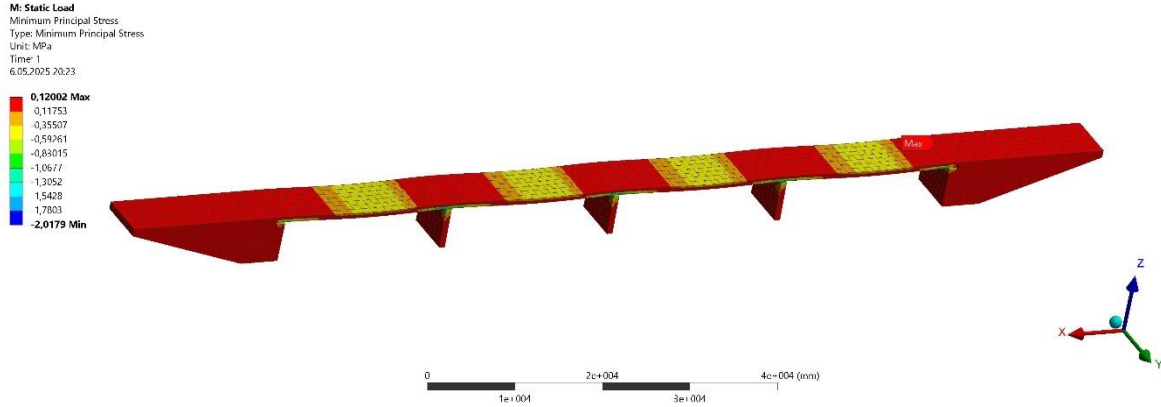
Şekil 32. Taşıtlı yükleri etkisi altında köprüde X yönlü oluşan deformasyon değerleri

Köprü yapısında oluşan Z yönünde ki deformasyon yani sehim dağılımları Şekil 32'de verilmiştir. Maksimum sehimlerin mod şekillerinden de anlaşılacağı üzere açıklık bölgelerinde oluşmuştur. Açıklık bölgelerinde maksimum sehim değerinin 0,00636 mm olduğu belirlenmiştir. AASHTO (2014)'e göre, şehir dışında bulunan köprüler için köprü merkez açıklığı sapmasının açıklığa oranının 1/800'den, şehir merkezinde bulunan köprüler için ise 1/1000'den az olması önerilmektedir. Ayrıca, transfer sırasında sapmanın açıklığa oranının 1/500'den az olması ve nihai sapmanın 1/500'ün altında olması kabul edilmektedir (AASHTO 2014). Köprü yapısı için sapmanın açıklığa oranı için izin verilen sınır değer 2 mm olarak hesaplanmıştır. Bu durumda köprüde oluşan maksimum sehim değerinin 2 mm'nin çok altında kaldığı görülmüştür.



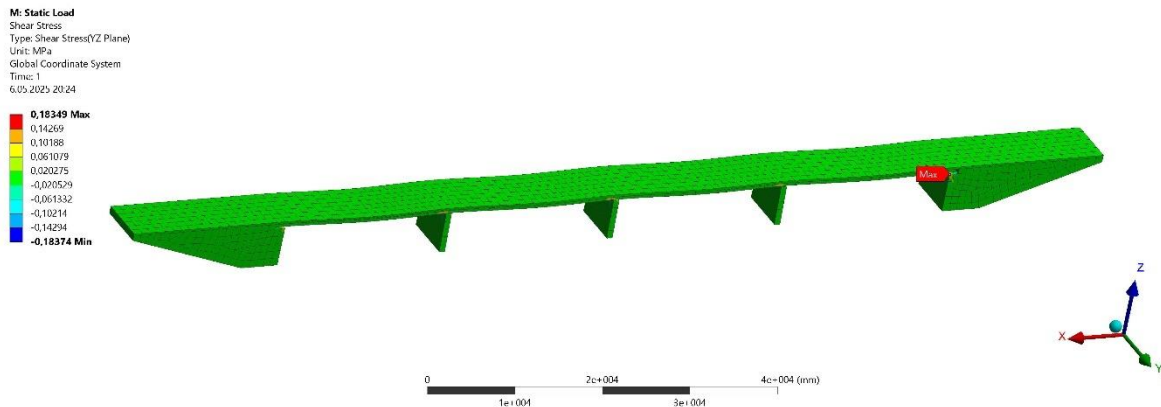
Şekil 33. Taşıtlı yükleri etkisi altında köprüde Z yönlü oluşan deformasyon değerleri

Köprü yapısında taşıt yüklerinden kaynaklı oluşan normal gerilme dağılımları Şekil 33'te verilmiştir. Kolonlarda mesnete yakın bölgelerde maksimum çekme gerilmelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Basınç gerilmeleri ise kolon mesnetlerinde ve açıklık ortalarında olduğu izlenmiştir. Taşıt yüklerinden kaynaklı oluşan en büyük çekme gerilmesi değerinin 0,120 MPa ve basınç gerilmesinin ise 2,017 MPa olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlerin malzeme esaslı olarak çekme ve basınç dayanımlarının çok altında kaldığı aşıkardır.



Şekil 34. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde oluşan normal gerilme dağılımı

Taşıt yükleri etkisi altında köprü yapısı için düzlem içi kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Maksimum düzlem içi kayma gerilmeleri üst tabliye ile kolon birleşimlerinde olduğu belirlenmiştir. Bu birleşim bölgelerinde maksimum düzlem içi kayma gerilmesi değerinin 0,183 MPa olduğu hesaplanmıştır (Şekil 34). Düzlem içi kayma gerilmesi dayanımı ilgili standarda göre 3,25 MPa olarak hesaplanmıştır (AASHTO 2014). Bu durumda taşıt yüklerinden kaynaklanan düzlem içi kayma gerilmelerinin güvenli tarafta kaldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 35. Taşıt yükleri etkisi altında köprüde oluşan düzlem içi kayma gerilmesi dağılımı

Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçları

Köprü yapısında uygulanan modal analiz sonuçları göze alınan X doğrultusunda eğilme modunun hâkim olduğunu göstermiştir. Bu durumdan kaynaklı olarak X yönünde yatay deprem

analizi köprü yapısında zaman tanım alanında uygulanmıştır. Ayrıca taşıt yüklerinin etkisi ile düşey depremlerden kaynaklı oluşabilecek etkileri göz önünde bulundurulmak için düşey deprem yükü analizi de zaman tanım alanında uygulanmıştır. Materyal ve Metod bölümünde detaylı olarak açıklanan deprem kayıtları yapıya özgü ölçeklenerek kullanılmıştır. Yatay deprem analizinde Chi-Chi, İmper Valley, Kobe, Sivrice, Bingöl, Elbistan ve Erzincan depremi kayıtları düşey deprem yükü analizinde ise Bingöl, Erzincan, Elbistan ve Sivrice depremlerine ait düşey ivme bileşenleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında basınç gerilmeleri, çekme gerilmeleri, düzlem içi kayma gerilmeleri, ivme ve yer değiştirme değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Tablo 5'te yatay deprem ve taşıt yükleri etkisi altında genel analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 6'da düşey deprem ve taşıt yükleri etkisi altında genel analiz sonuçları verilmiştir. Burada alınan değerler köprü yapısında oluşan maksimum analiz parametreleridir.

Tablo 5. Köprü Yapısında Yatay Deprem Yükü ve Taşıt Yüklerinden Kaynaklı Oluşan Analiz Sonuçları

Depremler	Maksimum İvme (g)	teff (sn)	Maksimum Yer Değiştirme (m)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Düzlem İçi Kayma Gerilmesi (MPa)
Bingöl	0,872	5,93	0,00429	5,286	0,387	1,378
Chi-Chi	1,596	6,60	0,00374	6,620	0,495	1,20
Elbistan	1,041	14,57	0,00635	5,476	0,384	1,234
Erzincan	0,728	8,59	0,00457	4,208	0,265	1,324
İmperial Valley	2,035	6,83	0,00667	8,331	0,620	1,362
Kobe	1,560	7,19	0,00767	6,901	0,336	1,417
Sivrice	0,714	7,59	0,00466	4,630	0,338	1,216
Ortalama	1,220	8,18	0,00542	5,921	0,403	1,304

Tablo 5'te köprü yapısında en yüksek ivme değerlerini İmper Valley depreminin (2,035g) en düşük ivme değerlerini Sivrice depreminin (0,714g) oluşturduğu tespit edilmiştir. Köprü yapısında ortalama etkiyen deprem verisine göre 1,220g ivme değeri oluşmuştur. Depremlerin ortalama olarak etkili süresinin 8,18 sn olduğu tespit edilmiştir. Zeminden alınan sonuçlara göre yer hareketlerinin 8,18 sn'de çok küçük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yer hareketi ivme değerlerinin köprü yapısının etkili zaman aralıklarında önemli ölçüde sönümlenebileceği beklenmiştir. Maksimum yer değiştirme değerini Kobe depreminin (0,00767m) ve minimum yer değiştirme değerini (0,00374m) Chi-Chi depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama yer değiştirme değerinin 0,00542 m olduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında maksimum basınç gerilmesi değerini (6,901 MPa) Kobe depreminin ve minimum basınç

gerilmesini (4,208 Mpa) Erzincan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama basınç gerilmesi değerinin 5,921 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama basınç gerilmesi değeri malzeme basınç gerilmesi dayanımının çok altında kaldığı için yapının basınç gerilmelerini güvenle karşılayabileceği sonucuna varılmıştır. Köprü yapısında maksimum çekme gerilmesi değerini (0,621 MPa) Kobe depreminin ve minimum çekme gerilmesini (0,265 Mpa) Erzincan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama çekme gerilmesi değerinin 0,423 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama çekme gerilmesi değeri tahmini olarak malzeme çekme gerilmesi dayanımının altında olduğu için yapıda çekme gerilmesinden kaynaklı hasarların oluşması beklenmemektedir. Köprü yapısında maksimum düzlem içi kayma gerilmesi değerini (1,417 MPa) Kobe depreminin ve minimum düzlem içi kayma gerilmesini (1,20 Mpa) Chi-Chi depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama düzlem içi kayma gerilmesi değerinin 1,304 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama düzlem içi kayma gerilmesi değeri AASHTO 2014'e göre köprü için hesaplanan 3,25 MPa düzlem içi kayma gerilmesi dayanımından çok düşük olduğu için düzlem içi kayma gerilmesinden kaynaklı olarak yapıda bir hasarın oluşmayacağı düşünülmüştür.

Tablo 6. Köprü Yapısında Düşey Deprem Yüğü ve Taşıt Yüklerinden Kaynaklı Oluşan Analiz Sonuçları

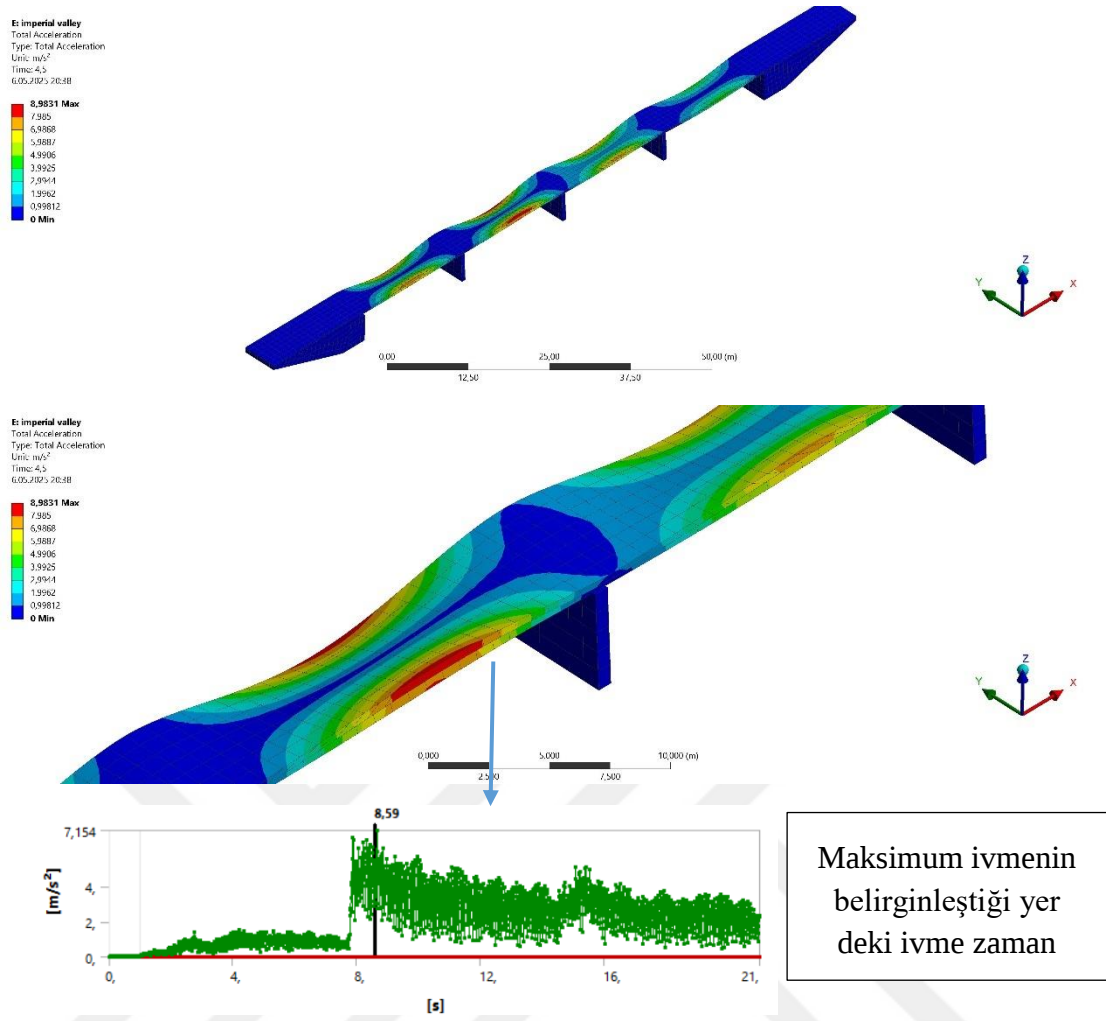
Depremler	Maksimum İvme (g)	teff (sn)	Maksimum Deformasyon (m)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Düzlem İçi Kayma Gerilmesi (MPa)
Bingöl	2,792	4,52	0,0204	16,927	0,543	2,355
Elbistan	2,002	9,61	0,0167	13,713	0,455	3,813
Erzincan	4,937	14,2	0,0389	32,347	1,217	1,30
Sivrice	2,172	8,34	0,0193	16,039	0,532	1,782
Ortalama	2,975	9,167	0,0238	19,755	0,686	2,312

Tablo 6'da köprü yapısında en yüksek düşey ivme değerlerini Erzincan depreminin (4,937g) en düşük ivme değerlerini Elbistan depreminin (2,002g) oluşturduğu tespit edilmiştir. Köprü yapısında ortalama etkiyen deprem verisine göre 2,975g ivme değeri oluşmuştur. Köprü yapısında düşey depremlerden kaynaklı oluşan ivme değerlerinin ortalama olarak %58,99 oranında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda yer hareketi ivme değerlerinin köprü yapısının etkili zaman aralıklarında önemli ölçüde yapıyı zorlayabileceği düşünülmüştür. Maksimum düşey yer değiştirme değerini Erzincan depreminin (0,0389m) ve minimum düşey yer değiştirme değerini (0,0167m) Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama düşey yer değiştirme değerinin

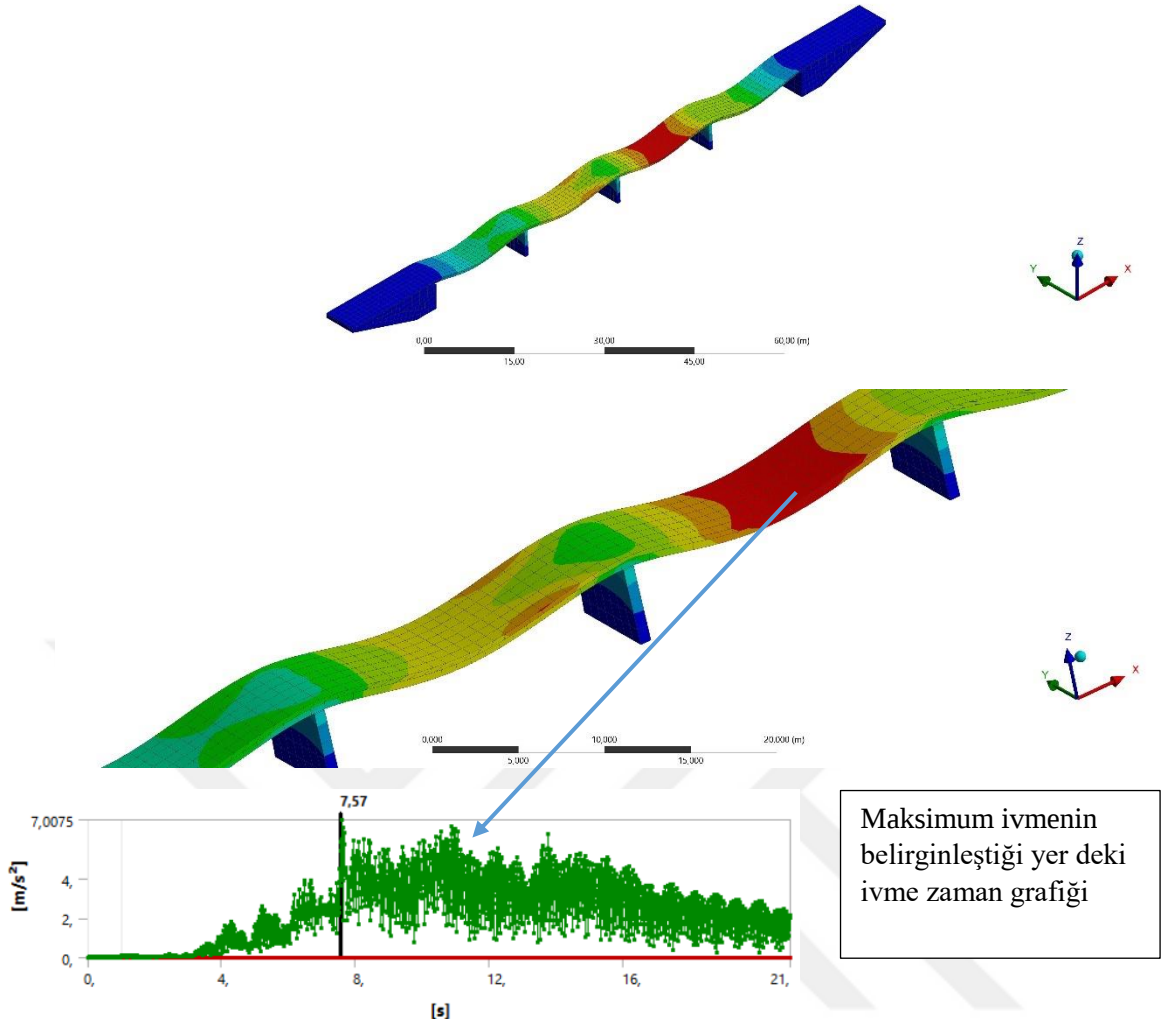
0,0238 m olduğu belirlenmiştir. Bu değerin AASHTO 2014'e göre köprü yapısı için hesaplanan 2 mm değerini aştığı için düşey yer değiştirmeden dolayı köprü yapısında hasarların oluşabileceği düşünülmüştür. Köprü yapısında maksimum basınç gerilmesi değerini (32,34 MPa) Erzincan depreminin ve minimum basınç gerilmesini (13,71 Mpa) Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama basınç gerilmesi değerinin 19,75 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama basınç gerilmesi değeri malzeme basınç gerilmesi dayanımının çok altında kaldığı için yapının basınç gerilmelerini güvenle karşılayabileceği sonucuna varılmıştır. Köprü yapısında maksimum çekme gerilmesi değerini (1,217 MPa) Kobe depreminin ve minimum çekme gerilmesini (0,455 Mpa) Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama çekme gerilmesi değerinin 0,686 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama çekme gerilmesi değeri tahmini olarak malzeme çekme gerilmesi dayanımının altında olduğu için yapıda çekme gerilmesinden kaynaklı hasarların oluşması beklenmemektedir. Köprü yapısında maksimum düzlem içi kayma gerilmesi değerini (3,813 MPa) Elbistan depreminin ve minimum düzlem içi kayma gerilmesini (1,30 Mpa) Erzincan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında etkiyen ortalama depreme göre elde edilen ortalama düzlem içi kayma gerilmesi değerinin 2,312 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ortalama düzlem içi kayma gerilmesi değeri AASHTO 2014'e göre köprü için hesaplanan 3,25 MPa düzlem içi kayma gerilmesi dayanımından çok düşük olduğu için düzlem içi kayma gerilmesinden kaynaklı olarak yapıda bir hasarın oluşmayacağı düşünülmüştür. Ancak ortalama etkiyen deprem yerine maksimum deprem etkisi dikkate alındığında düzlem içi kayma gerilmelerinden, basınç ve çekme gerilmelerinden kaynaklı olarak köprü yapısının bazı elemanlarında hasarların oluşabileceği düşünülmüştür.

Genel analiz sonuçlarından hareketle ortalama olarak düşey etkiyen depremlerin yatay etkiyen depremlere göre ivme, yer değiştirme, basınç gerilmesi, çekme gerilmesi ve düzlem içi kayma gerilmesi açısından sırasıyla %58,99, %77,22, %70,02, %41,25 ve %43,59 oranında daha fazla etkiye sahip olduğu izlenmiştir.

Köprü yapısında yatay depremlerden kaynaklı oluşan ivme dağılımları maksimum etki eden deprem için Şekil 35'te ve minimum etki eden deprem için Şekil 36'da verilmiştir.



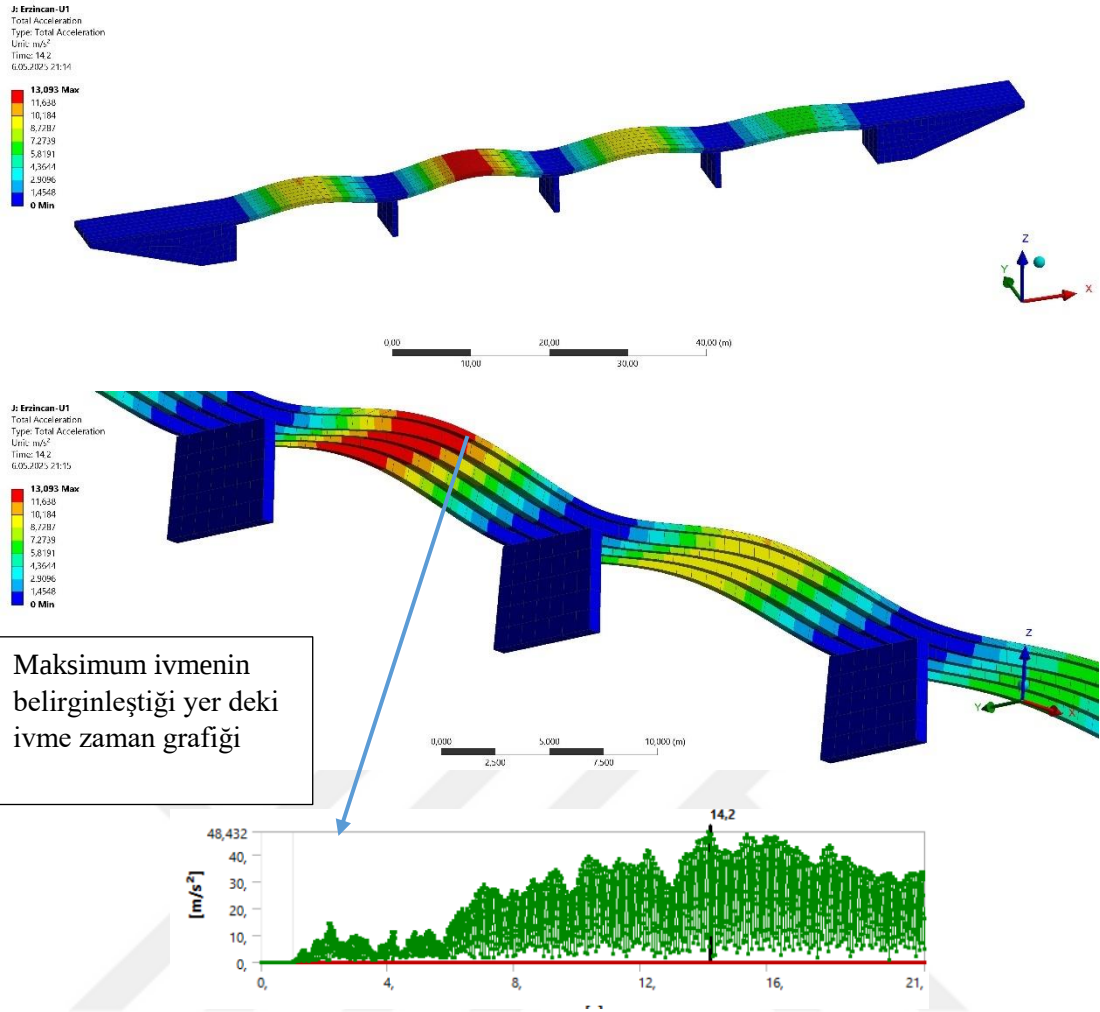
Şekil 36. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum ivme dağılımı



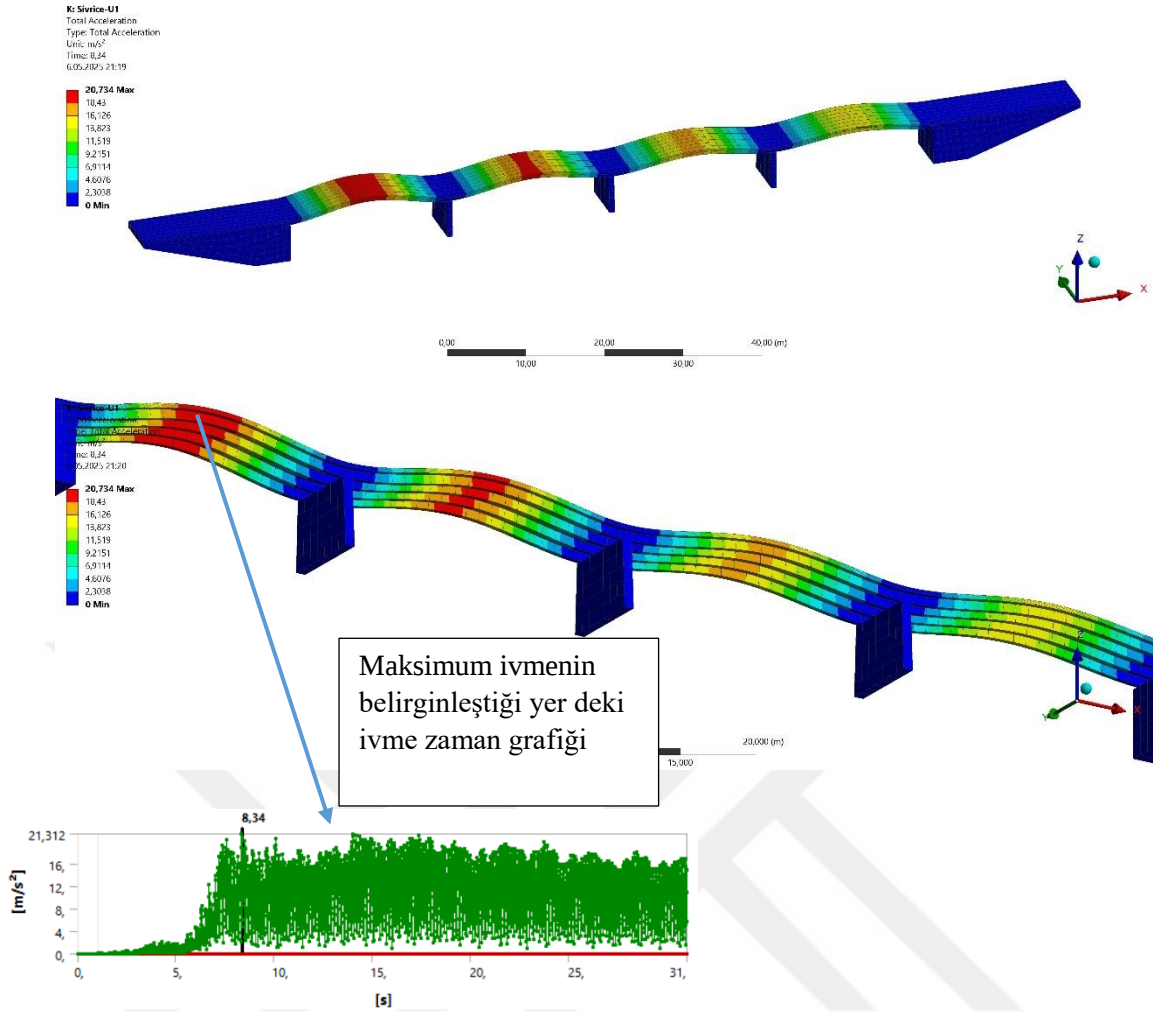
Şekil 37. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum ivme dağılımı

Maksimum ivmeyi oluşturan depremin özellikle kirişlerde en büyük ivme değerlerini oluşturduğu Şekil 35'te ve minimum ivmeyi oluşturan depremin ise orta açıklık döşemede en büyük ivme değerlerini oluşturduğu Şekil 36'da gösterilmiştir. Maksimum ve minimum etki eden depremlerin her ikisinde de ivme değerleri zeminden kolona ve oradan üst tabliyeye çıktıkça arttığı görülmüştür. Ancak maksimum etki eden depremde kenar kirişlerde maksimum ivmenin oluşması ve minimum etki eden kirişlerde orta açıklıkta maksimum ivmelerin oluşması yapı analiz değerlendirmesinde ortalama etki eden depremin referans alınabileceğini göstermektedir.

Köprü yapısında etki eden maksimum düşey depremde oluşan ivme dağılımları Şekil 37'de ve minimum etki eden düşey depremde oluşan ivme dağılımları Şekil 38'de verilmiştir.

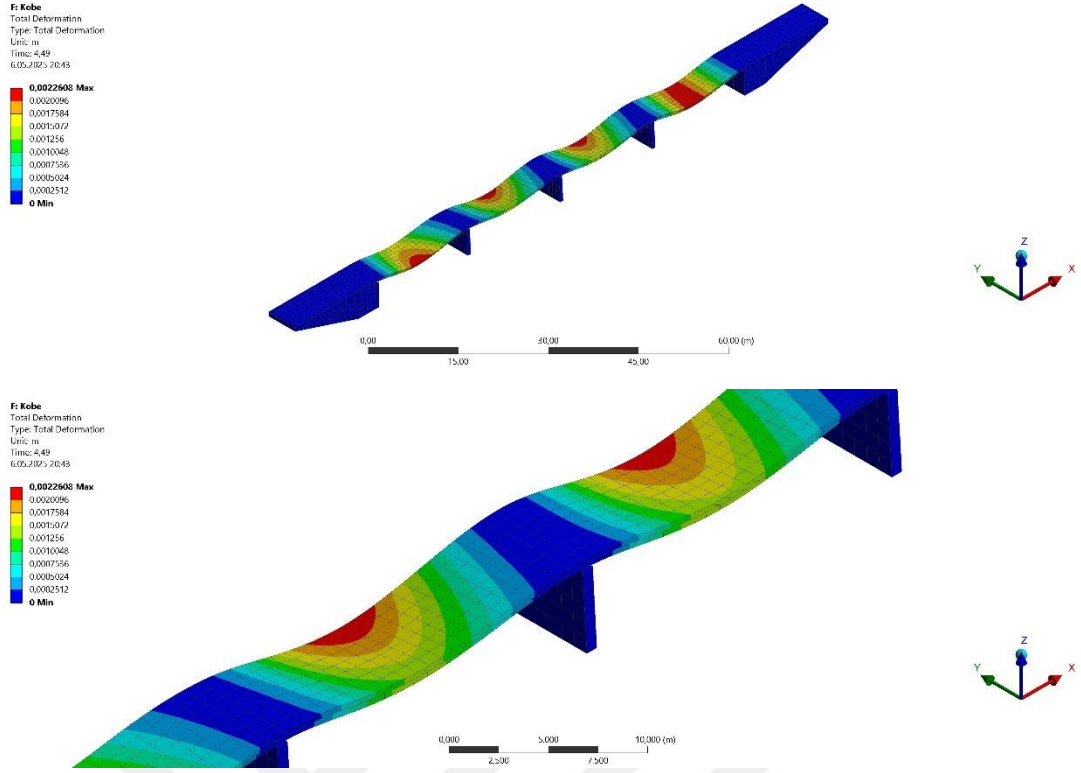


Şekil 38. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum ivme dağılımı

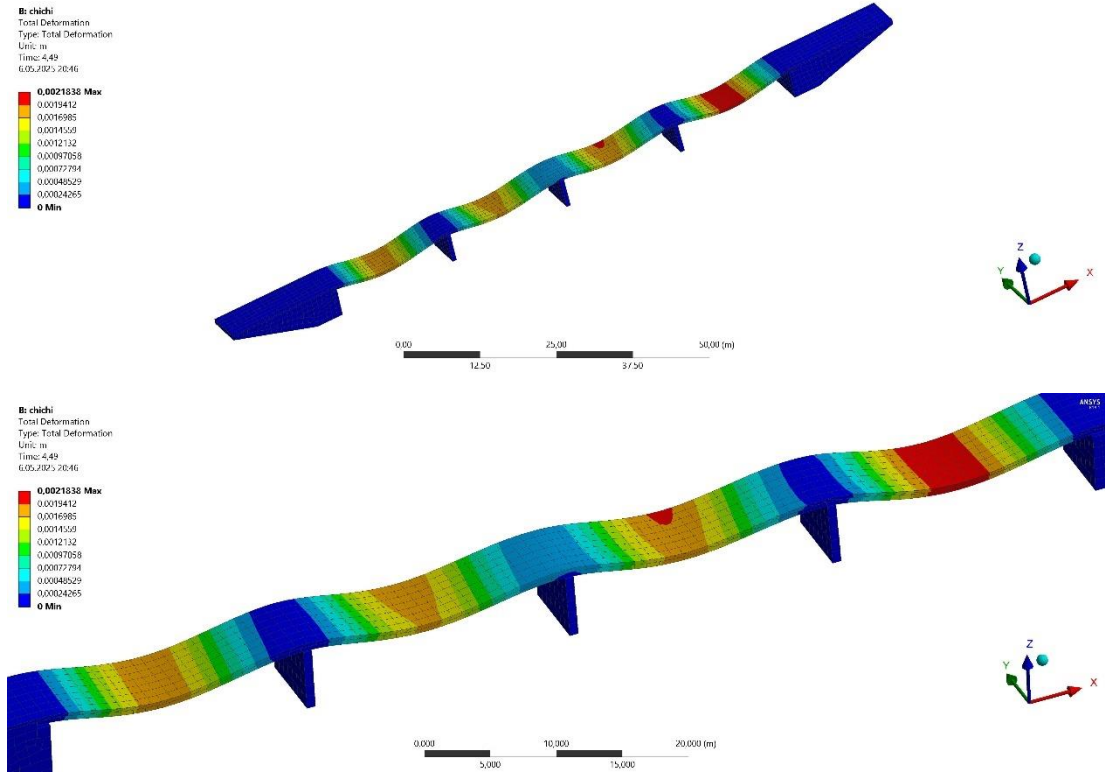


Şekil 39. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum ivme dağılımı

Maksimum ve minimum düşey ivmeyi oluşturan depremlerin orta açıklıklarda ve kirişlerde en büyük ivme değerlerini oluşturduğu Şekil 37 ve Şekil 38’de gösterilmiştir. Maksimum ve minimum etki eden depremlerin her ikisinde de ivme değerleri zeminden kolona ve oradan üst tabliyeye çıktıkça arttığı görülmüştür. Köprü yapısında yatay deprem yüklemelerinden kaynaklı olarak göze alınan X doğrultusunda deformasyon dağılımları elde edilmiştir. Şekil 39’da yatay depremlerin etkisiyle oluşan maksimum deformasyon dağılımı ve Şekil 40’ta minimum deformasyon dağılımları verilmiştir.



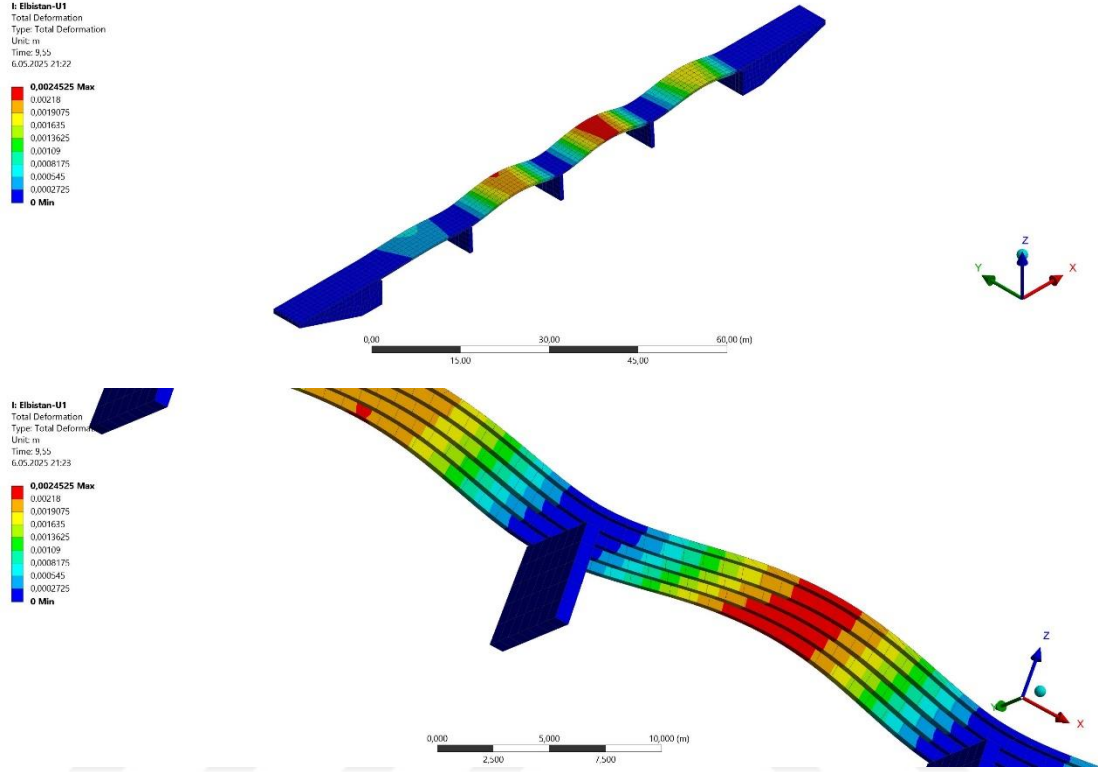
Şekil 40. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum deformasyon dağılımı



Şekil 41. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum deformasyon dağılımı

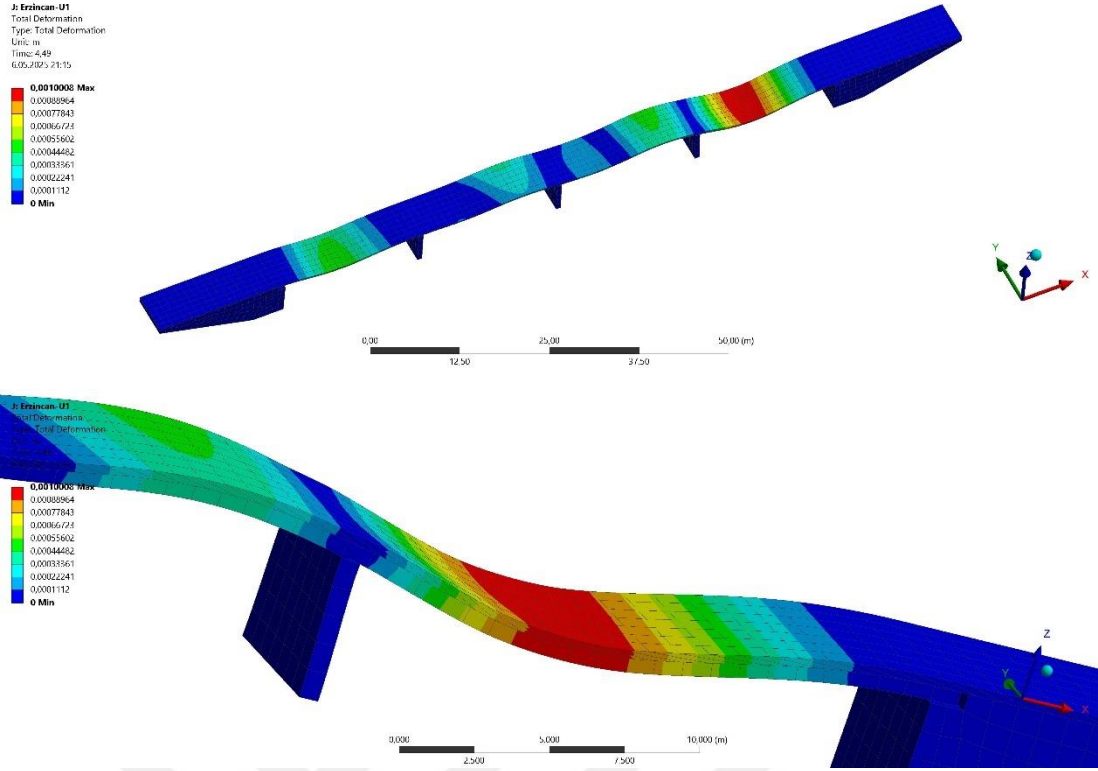
Şekil 39’da yatay deprem etkisi altında maksimum deformasyonların kenar açıklık bölgelerinde oluştuğu ve kolon mesnet bölgelerinde sınırlı düzeyde oluştuğu görülmektedir. Şekil 40’ta minimum etki eden depremin oluşturduğu deformasyon dağılımları verilmiştir. Burada deformasyonların en köşe açıklıkta belirginleştiği görülmektedir. Yatay yüklemeler

sonucunda köprü yapısında oluşan deformasyonların sınırlı düzeyde kaldığı sonucuna varılmıştır. Köprü yapısında düşey depremlerin dikkate alınmasıyla düşey deformasyon (sehim) dağılımları maksimum deprem için Şekil 41’de minimum deprem için Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum deformasyon dağılımı

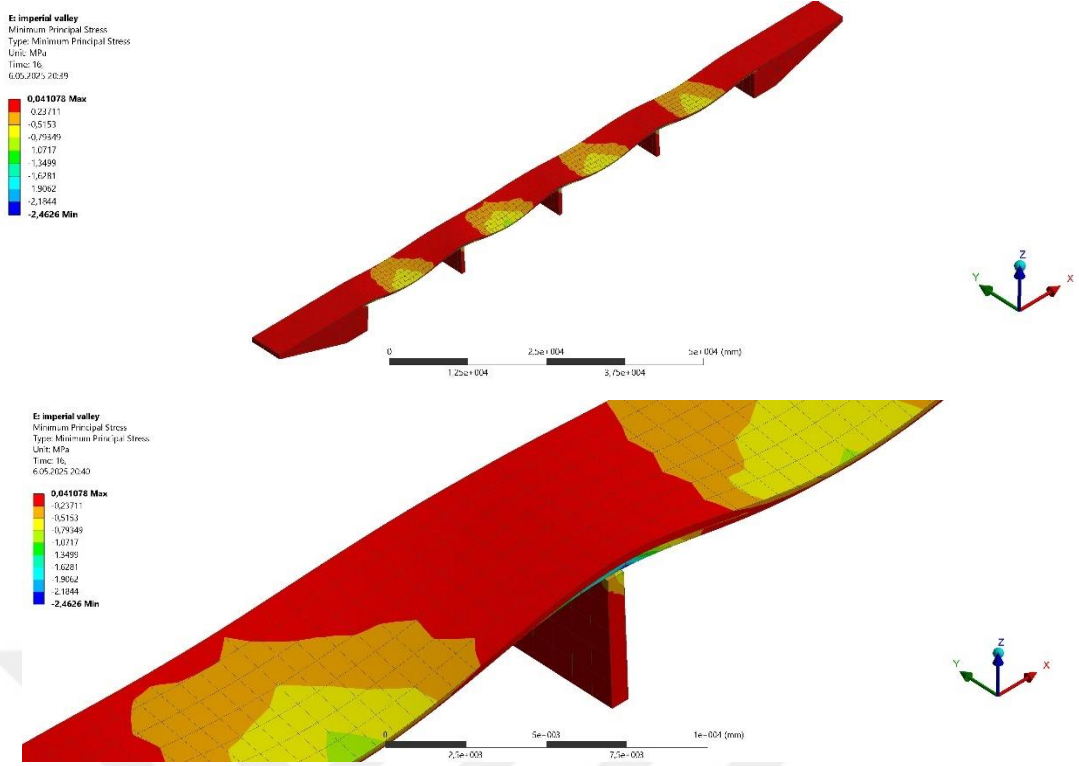
Köprü yapısında maksimum etki eden deprem etkisinde oluşan deformasyon orta açıklıkta ki kirişlerde olduğu gözlemlenmiştir. Köprünün açıklık bölgelerinde yaklaşık 2,4 mm civarında sehimlerin olduğu ve bu değer AASHTO 2014’e göre köprü için hesaplanan sehim değerinin üstünde olduğu görülmüştür.



Şekil 43. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum deformasyon dağılımı

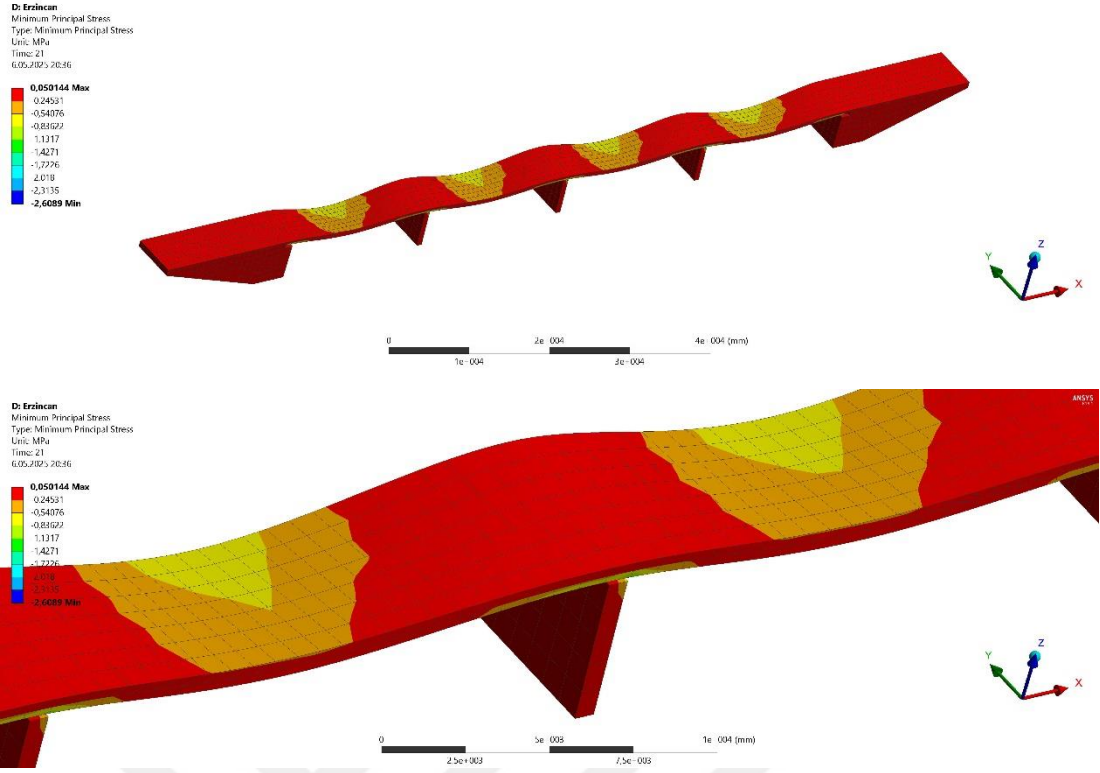
Köprü yapısında yatay deprem yüklemelerinde olduğu gibi minimum etki eden deprem etkisinde oluşan deformasyon en köşe açıklıkta olduğu gözlemlenmiştir. Köprü'nün açıklık bölgelerinde yaklaşık 1,05 mm civarında sehimler olduğu ve bu değer AASHTO 2014'e göre köprü için hesaplanan sehim değerinin altında olduğu görülmüştür.

Zaman tanım alanında yatayda ve düşeyde etki eden deprem yükü etkisi altında köprüde oluşan basınç ve çekme gerilmesi dağılımları elde edilmiştir. Şekil 43'te köprüye etki eden yatay maksimum depremin oluşturduğu basınç ve çekme gerilmeleri dağılımı ve Şekil 44'te ise yatay minimum etki eden depremin oluşturduğu basınç ve çekme gerilmeleri dağılımı verilmiştir.



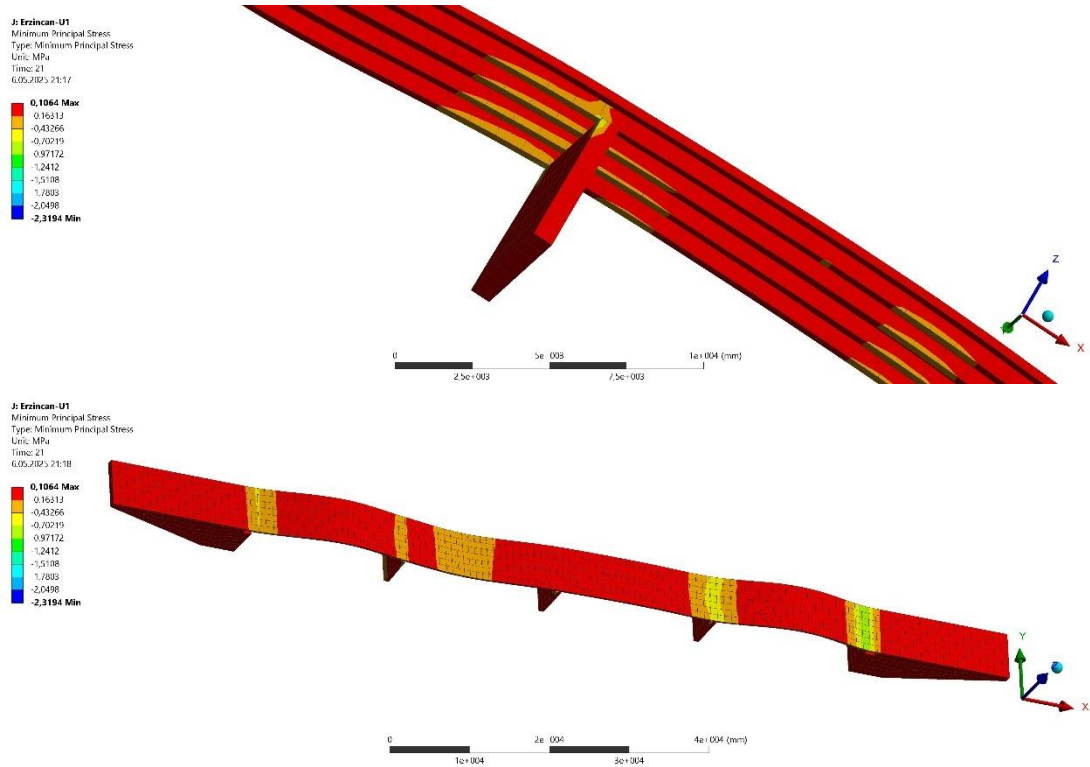
Şekil 44. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum normal gerilme dağılımları

Şekil 44'te gösterildiği gibi yatay deprem etkisiyle maksimum çekme gerilmeleri kolonların tabliyelere bağlandığı kısımlarda ve basınç gerilmelerinin ise açıklık ortalarında oluşmuştur. Maksimum basınç ve çekme gerilmesi değerlerinin sırasıyla 6,60 MPa ve 0,620 MPa olduğu belirlenmiştir. Şekil 45'te gösterildiği gibi minimum basınç ve çekme gerilmelerinin sırasıyla 4,208 MPa ve 0,265 MPa olduğu tespit edilmiştir. Her iki durumda da malzeme çekme ve basınç dayanımlarının altında kaldığı sonucuna varılmıştır.

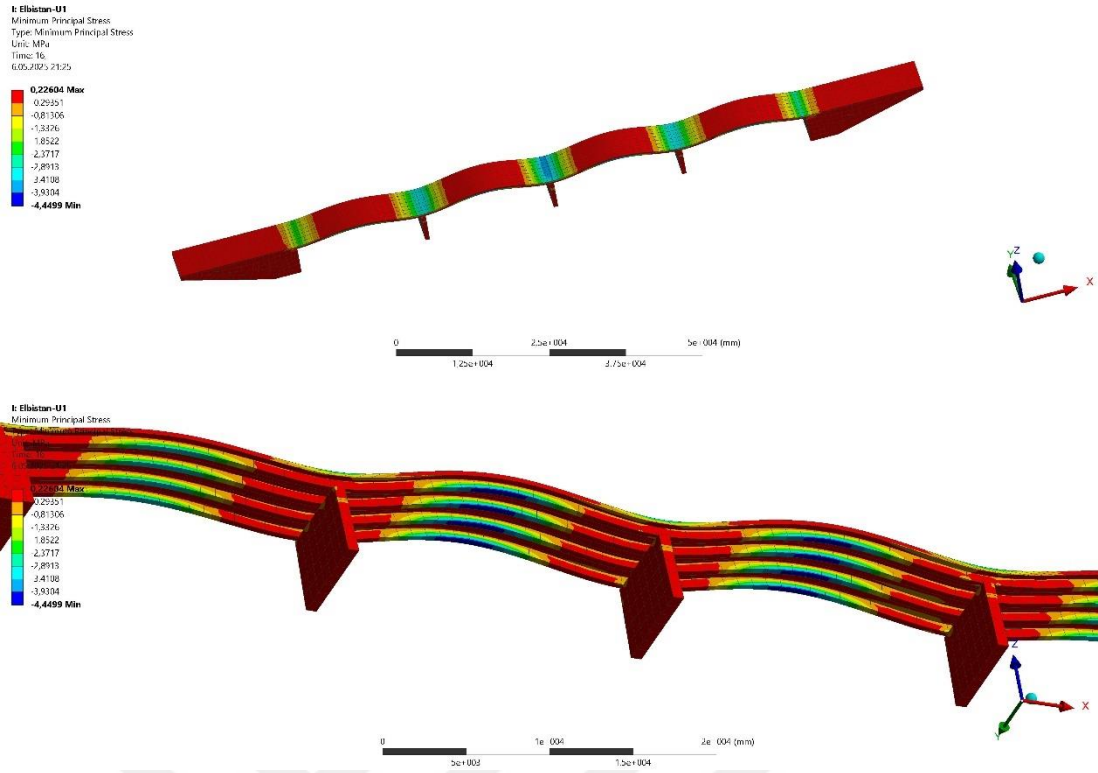


Şekil 45. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum normal gerilme dağılımları

Düşey depremlerin köprü yapısında oluşturduğu maksimum basınç ve çekme gerilmesi dağılımları Şekil 45'te ve minimum basınç ve çekme gerilmesi dağılımları Şekil 46'da verilmiştir.



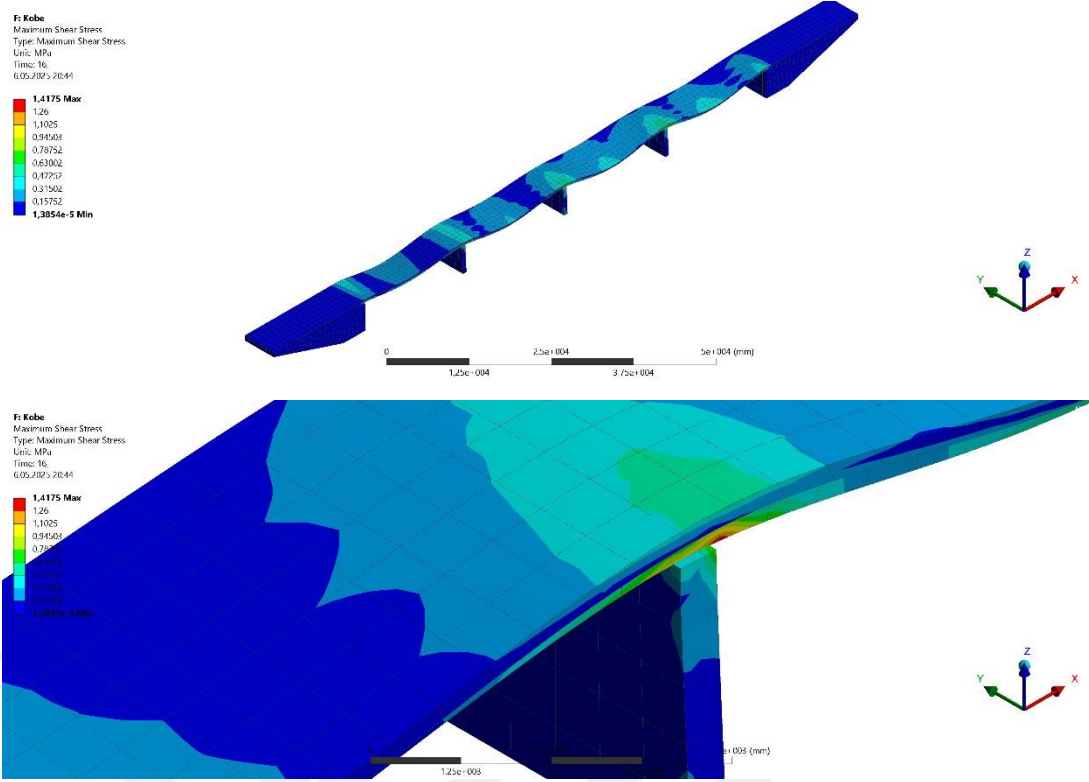
Şekil 46. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum normal gerilme dağılımları



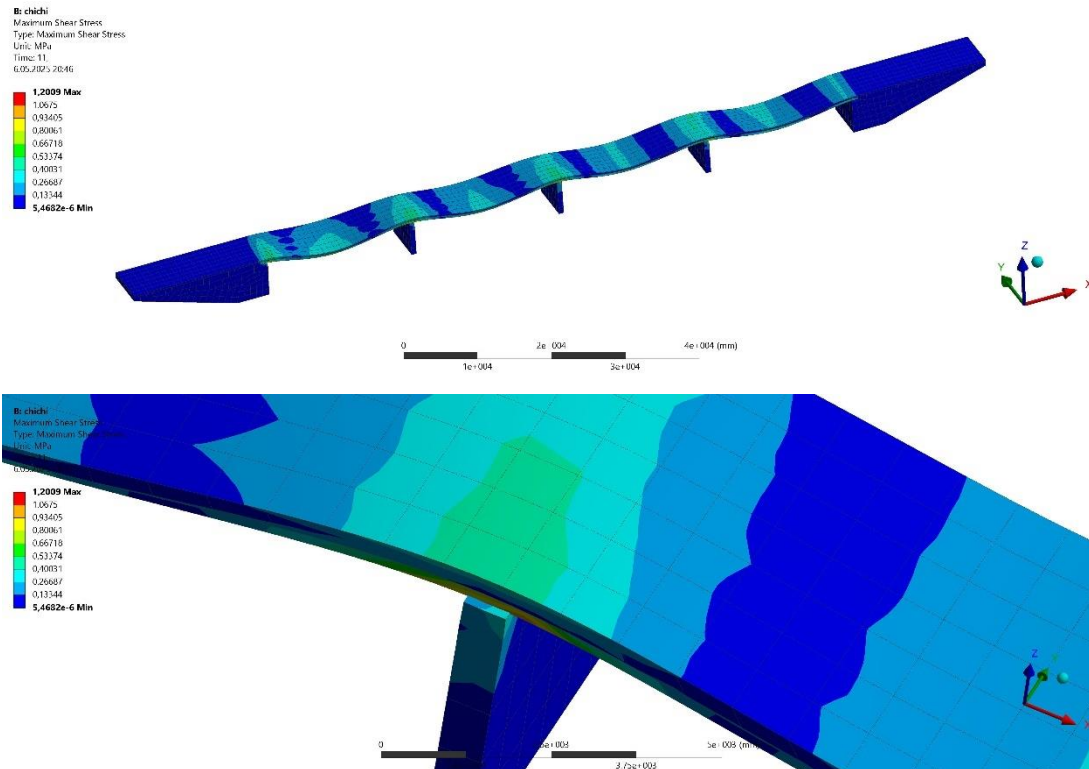
Şekil 47. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum normal gerilme dağılımları

Köprüde kolon mesnet bölgelerinde oluşan maksimum basınç gerilmesi 32,347 MPa'dır. Çekme gerilmeleri açıklık bölgelerinde 1,217 MPa değeriyle en yüksek değerine ulaşmıştır. Erzincan depreminin düşey ivme bileşenin köprü yapısına etki etmesiyle bu sonuçlar elde edilmiştir. Elbistan depreminin düşey ivme bileşeni ise söz konusu yapıda en düşük basınç (13,713 MPa) ve çekme gerilmesi (0,455 MPa) değerlerini oluşturmuştur. Erzincan depremi etkisine benzer bir şekilde kolon mesnet bölgelerinde basınç gerilmesinin ve açıklık bölgelerinde çekme gerilmesinin yoğun olduğu sonucuna varılmıştır.

Köprü yapısında yatay ve düşey deprem yüklemeleri etkisi altında düzlem içi kayma gerilmesi dağılımları elde edilmiştir. Şekil 47'de yatay deprem yüklemesi altında maksimum düzlem içi kayma gerilmeleri ve Şekil 48'de minimum düzlem içi kayma gerilmeleri verilmiştir.



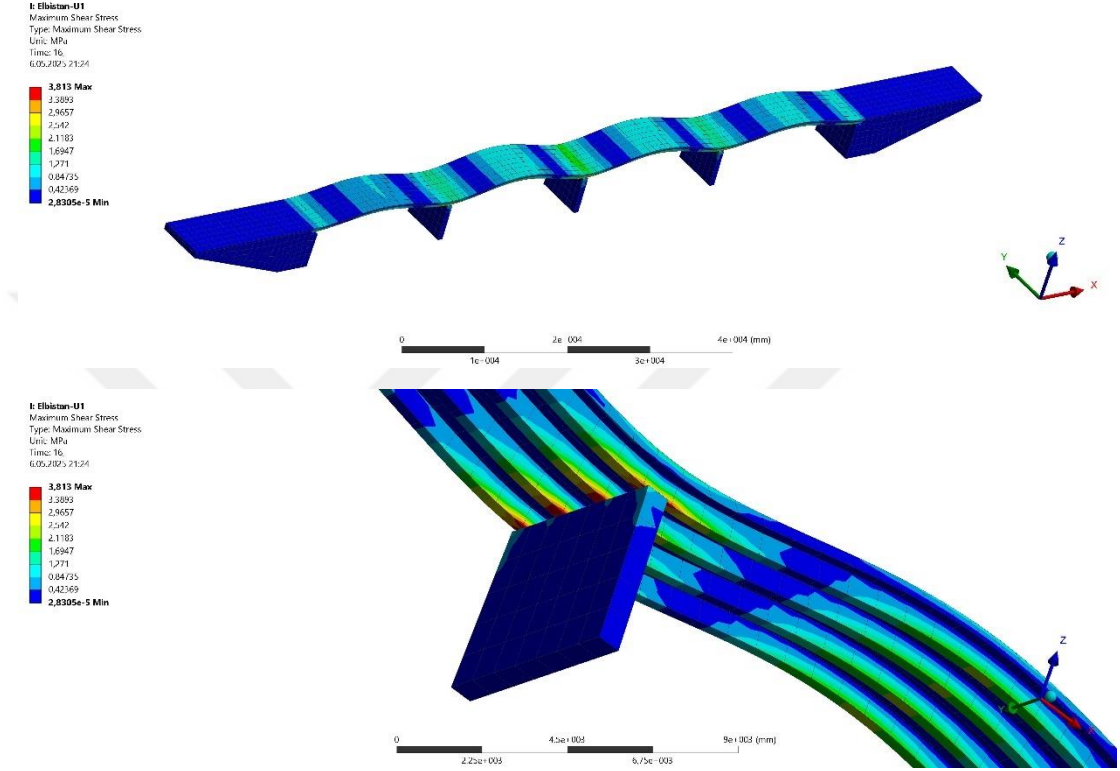
Şekil 48. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları



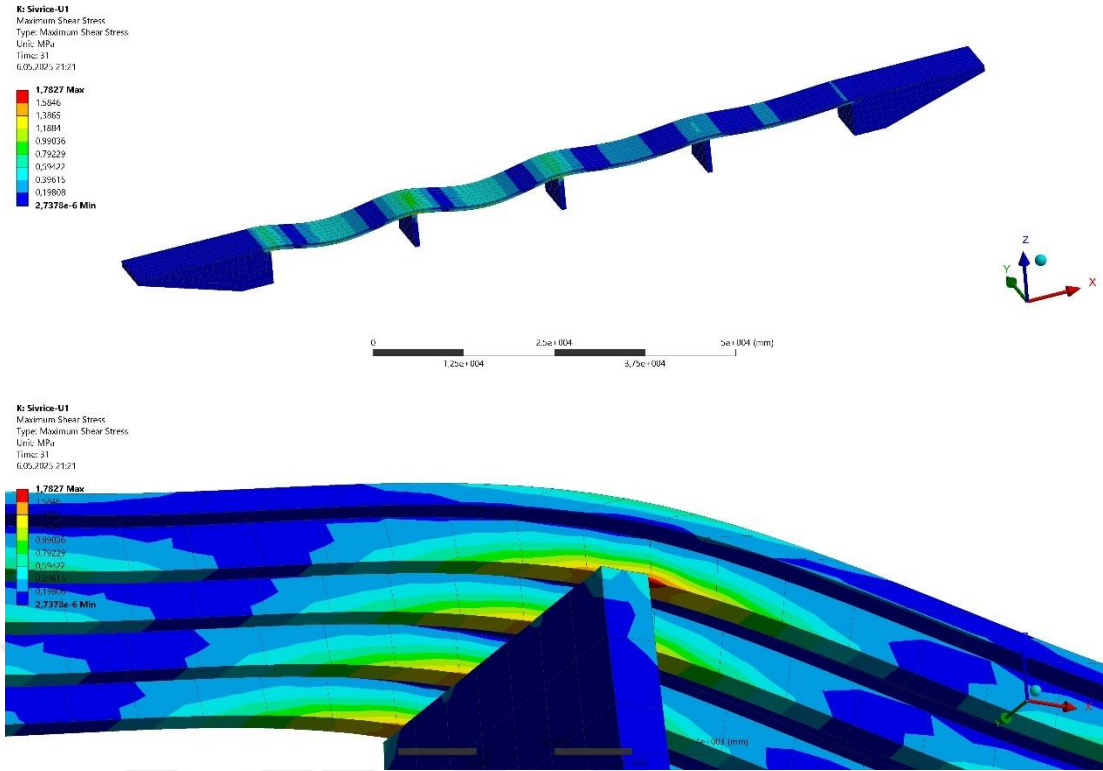
Şekil 49. Yatay deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları

Maksimum ve minimum düzlem içi kayma gerilmeleri dağılımları sırasıyla Şekil 48 ve Şekil 49’da verilmiştir. Her iki dağılımda da en büyük düzlem içi kayma gerilmeleri orta kolon

ile üst tabliyenin birleşim noktalarında elde edilmiştir. Bu birleşim bölgesinde yatay depremlerden kaynaklı olarak maksimum 1,417 MPa düzlem içi kayma gerilmesi ve 1,20 MPa düzlem içi kayma gerilmesi elde edilmiştir. Yatay deprem yüklemelerinde tüm düzlem içi kayma gerilmelerinin emniyetle karşılandığı tespit edilmiştir (AASHTO 2014). Düşey depremlerin etkimesi durumunda köprü yapısında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi dağılımları Şekil 50’de ve minimum düzlem içi kayma gerilmesi dağılımları Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 50. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları



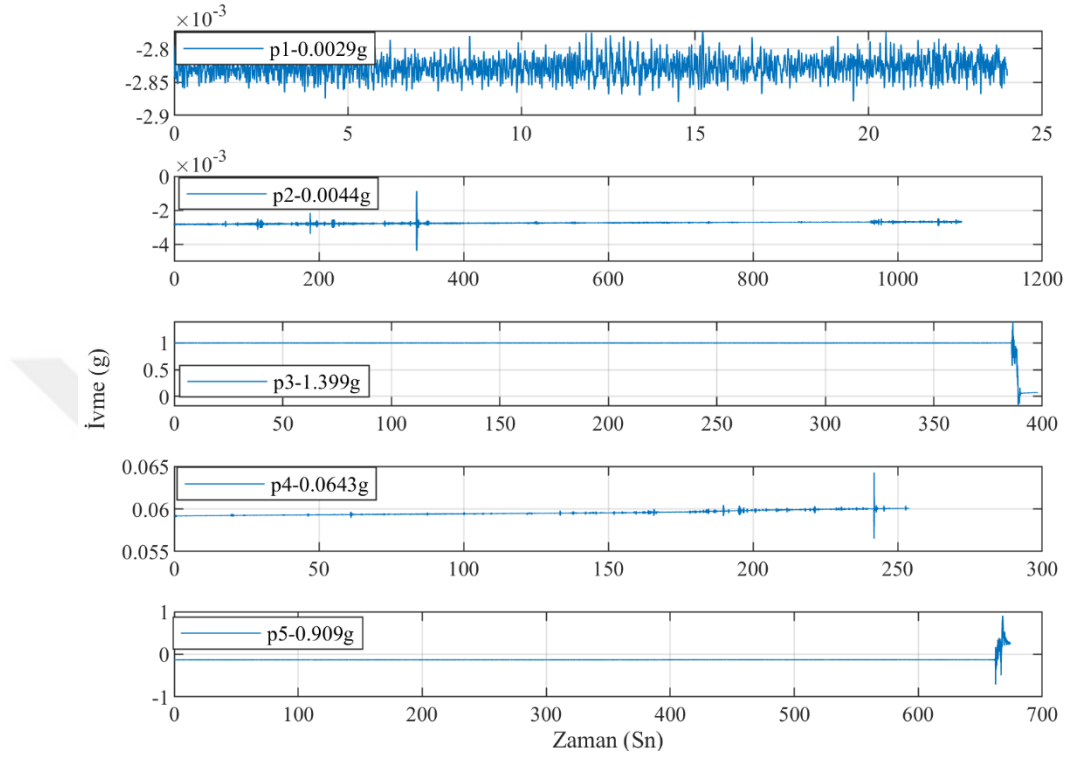
Şekil 51. Düşey deprem yükleri etkisi altında köprüde oluşan minimum düzlem içi kayma gerilme dağılımları

Maksimum ve minimum düzlem içi kayma gerilmeleri dağılımları sırasıyla Şekil 49 ve Şekil 50’de verilmiştir. Her iki dağılımda da en büyük düzlem içi kayma gerilmeleri orta kolon ile üst tabliyenin birleşim noktalarında ve aynı bölgenin kiriş uçlarında elde edilmiştir. Bu birleşim bölgesinde düşey depremlerden kaynaklı olarak maksimum 3,813 MPa düzlem içi kayma gerilmesi ve 1,30 MPa düzlem içi kayma gerilmesi elde edilmiştir. Düşey deprem yüklemelerinde maksimum depreme karşı ifade edilen bölgede ki düzlem içi kayma gerilmeleri emniyetle karşılanamadığı tespit edilmiştir (AASHTO 2014).

Yapı Sağlığı İzleme Sonuçları

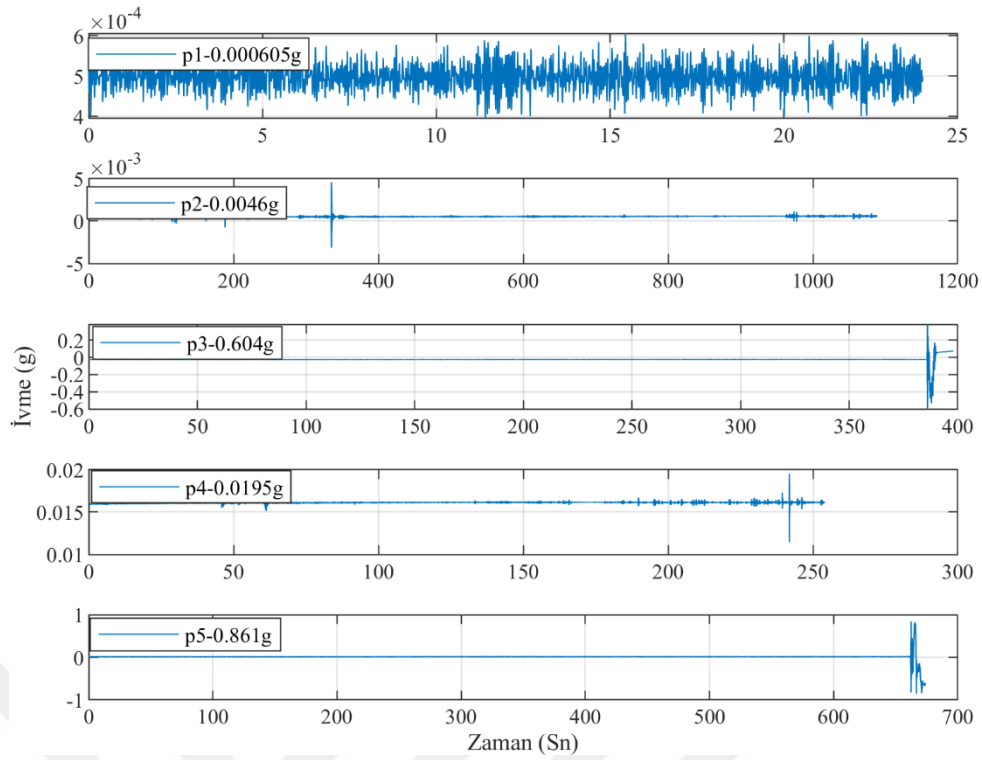
Köprü yapısında P1 ve P2 köşe kolon orta bölgesi, P3 ve P4 noktası köşe açıklık ve P5 ise üst tabliye ile kolon arasındaki mesnet bölgesinde dijital ivmeölçerler ile ölçümler alınmıştır. Yapı analizi sonuçlarında P1 ve P2 kolon bölgelerinde izin verilebilir düzeyde basınç, çekme ve düzlem içi kayma gerilmeleri oluşmuştur. P3 bölgesinde basınç gerilmelerinin, P4 bölgesinde deformasyon değerlerinin ve P5 bölgesinde ise düzlem içi kayma gerilmelerinin yoğunlaştığı belirlenmiştir. İfade edilen bölgelerde alınan x doğrultusunda ki ivme kayıtları Şekil 51, y doğrultusunda ki ivme kayıtları Şekil 52 ve z doğrultusundaki ivme kayıtları Şekil 53’te verilmiştir. X doğrultusunda en yüksek ivme değerleri P3 bölgesinde (1,399g) ölçülmüştür. P4 bölgesinde maksimum 0,0643g ve P5 bölgesinde 0,909g değerinde ivme ölçümleri alınmıştır. P1 ve P2 bölgesinde ise çok küçük ivme ölçüm değerleri alınmıştır.

Analiz sonuçlarıyla paralel olarak P1 ve P2 bölgelerinde X yönlü deprem etkimesi durumunda en düşük basınç, çekme ve düzlem içi kayma gerilmeleri edilmiştir. P1 ve P2 bölgelerinde alınan ölçümler analiz sonuçlarıyla birbirine paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. P3 bölgesinde en yüksek ivme değeri elde edilmiştir. Buna karşılık analiz sonuçlarında deformasyon taleplerinin de ilgili doğrultuda daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



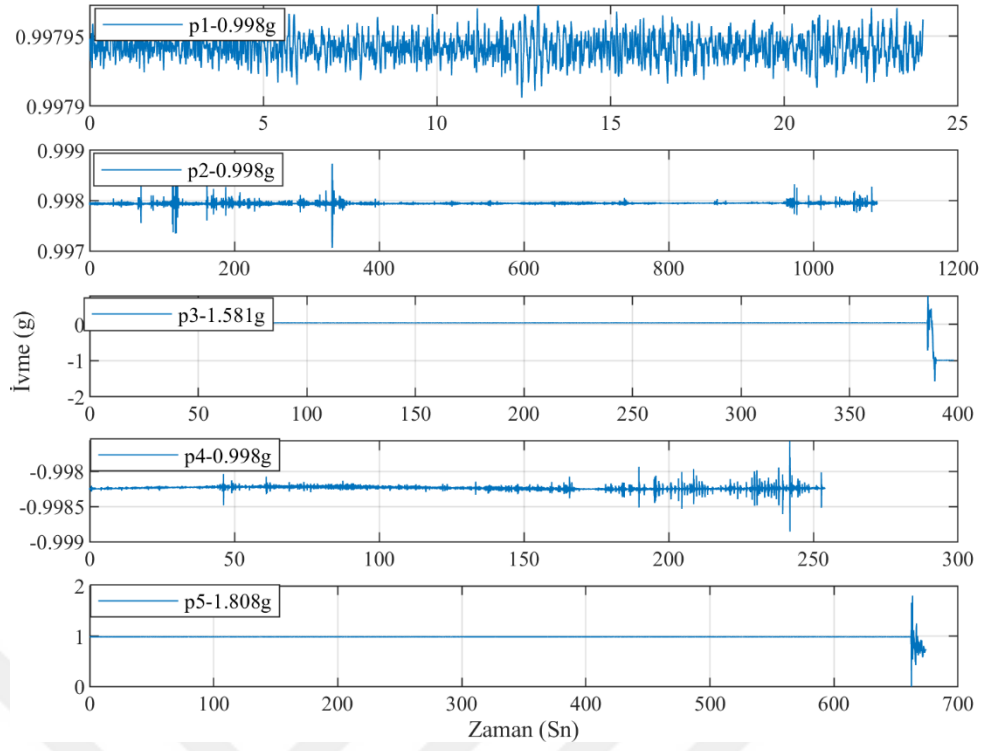
Şekil 52. X doğrultusunda alınan ölçümler

Y doğrultusunda alınan ivme ölçümleri X doğrultusunda alınan ivme ölçümlerinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. X doğrultusunda alınan ivme değerlerinin Y doğrultusunda alınan ivme değerlerinden P1, P2, P3, P4 ve P5 noktalarına göre sırasıyla %79,13, %6,12, %56,82, %69,67 ve %5,28 oranında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Burada dikkat çekilen noktaların P3 ve P5 noktaları olmasıdır. Çünkü P3 ve P5 noktalarında yatayda alınan her iki ivme bileşen değerlerinin oldukça yüksek çıkmıştır. Şekil 31’de P3 noktasında taşıt yüklerinden kaynaklı olarak oluşan normal gerilme değerlerinin bu bölgede ölçülen ivme değerlerine paralel olarak yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. P5 bölgesinde her iki doğrultuda alınan ivme ölçümlerinin yüksek olması ve aynı zamanda o bölgenin yatay deprem yüklemelerinde düzlem içi kayma gerilmelerinin (Şekil 48) yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca P4 bölgesinde de yüksek ivme değerlerinin alınması yatay deprem yüklemeleri sonucunda bu bölgede yüksek deformasyonların oluşmasıyla doğrulanmıştır.



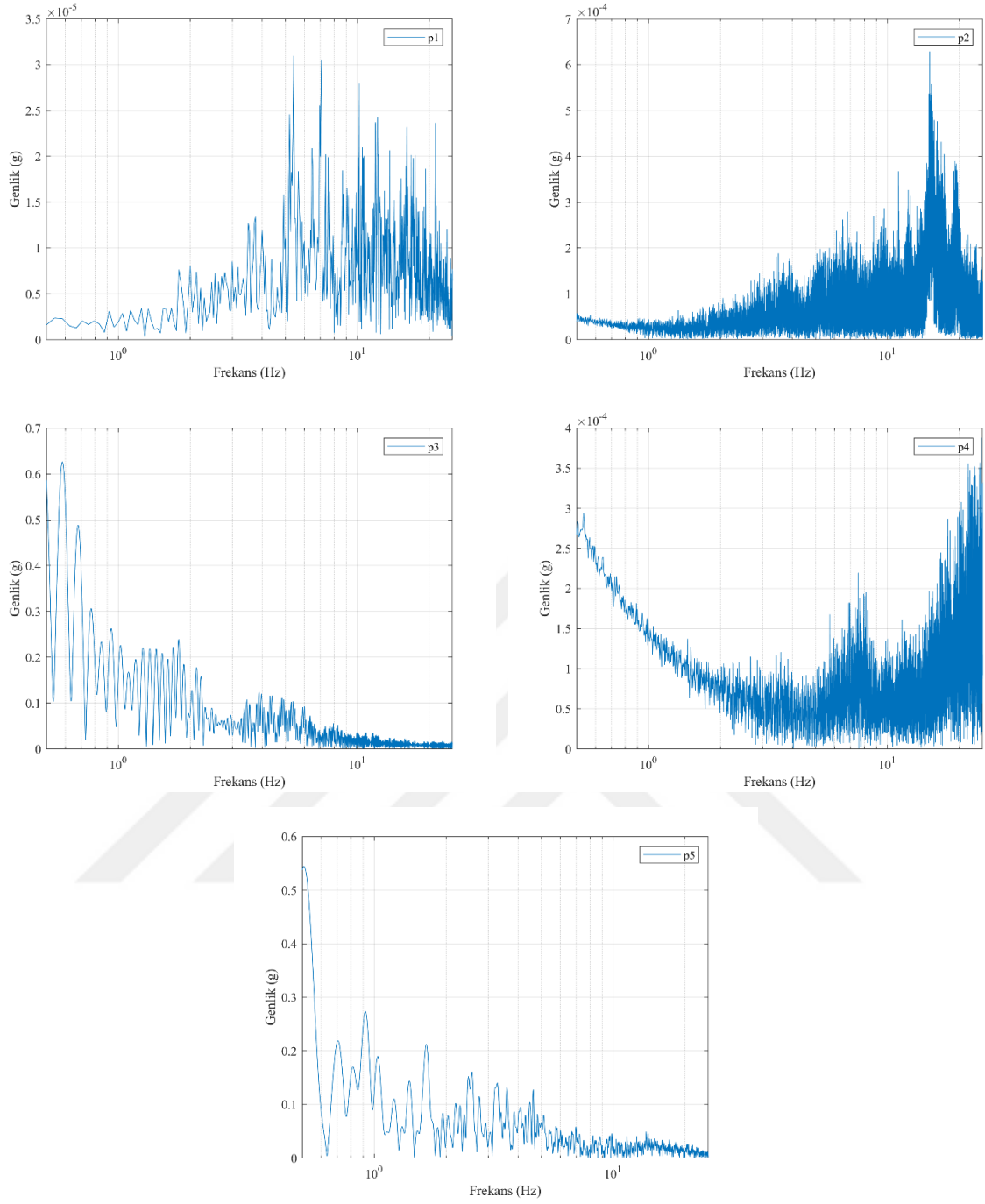
Şekil 53. Y doğrultusunda alınan ölçümler

Z doğrultusunda alınan ölçümler Şekil 54’te verilmiştir. P1, P2 ve P4 noktasında düşey titreşimlerin yer çekimi ivme değerine eşit olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde yatayda en düşük ivme değerlerinin ve Z yönünde de yer çekimi ivme değerlerine eşit düşeyde titreşim yaptığı görülmüştür. Zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçları da bu bölgelerde düşeyde ve yatayda tüm gerilme ve yer değiştirme değerlerinin sınırlı düzeyde kalması alınan ölçüm sonuçlarını doğrulamaktadır. P4 bölgesinde ise diğer noktalara nazaran düşey depremetki etmesi sonucunda sınırlı düzeyde deformasyon ve ivme değerleri elde edilmiştir. P4 noktasında alınan düşey yönlü ölçümler ise yer çekimi ivmesine eşit olmasından dolayı analiz sonuçlarını doğrulamaktadır. Yatay yönde alınan ölçümler gibi P3 ve P5 bölgelerinde alınan düşey ölçümlerde yer çekimi ivme değerinden yüksek değerlere ulaşmıştır. Düşey deprem etki etmesiyle P3 bölgesinde düşey deformasyon değerlerinin izin verilebilir sınır değerlerini aştığı ve P5 bölgesinde ise düzlem içi kayma gerilmelerinin izin verilebilir sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. Bu durumda analiz sonuçları P3 ve P5 bölgesinde alınan ölçümleri doğrular niteliği taşımaktadır. Ayrıca P3 ve P5 bölgelerinde alınan ivme değerlerinin etkili zaman aralıklarıyla zeminden alınan ivme değerlerinin etkin zaman aralıklarında birbirleriyle yaklaşık aynı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 54. Z doğrultusunda alınan ölçümler

P1, P2, P3, P4 ve P5 noktalarından alınan ivme ölçümleri frekans alanında çözülerek hâkim salınım ve genlik değerleri Şekil 54'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 55. Frekans-genlik eğrileri

Dijital ivmeölçerler ile köprünün belirli noktalarından alınan (P1, P2, P3, P4 ve P5) alınan ivme ölçümleri frekans alanında çözülerek frekans-genlik eğrileri Şekil 55'te olduğu gibi elde edilmiştir. P1, P2 ve P4 noktalarının P3 ve P5 noktalarına göre daha uzun frekans aralıklarında en büyük genlik değerlerine ulaştığı görülmüştür. P3 ve P5'in periyot değerlerinin diğer noktalara göre daha az olduğu bu da rijitliğinin daha az olduğunu düşündürmüştür. Bu da P3 ve P5 noktalarının deprem etkisinde hasara uğrayabileceği kanısını güçlendirmektedir. Tablo 7'de P1, P2, P3, P4 ve P5 noktalarına ait frekans ve periyot değerleri verilmiştir.

Ortalama frekans ve periyot değerlerinden daha yüksek frekans ve periyot değerleri P3 ve P5 noktalarında elde edilmiştir.

Tablo 7. Ölçüm Alınan Noktalara Ait Frekans ve Periyot Değerleri

Ölçüm Noktaları	Frekans (Hz)			Periyot (Sn)		
	1.mod	2.mod	3.mod	1.mod	2.mod	3.mod
P1	5,30	7,10	9,80	0,189	0,141	0,102
P2	15,50	17,45	19,30	0,065	0,057	0,052
P3	1,55	3,80	5,85	0,645	0,263	0,171
P4	7,80	9,75	20,40	0,128	0,103	0,049
P5	0,15	0,39	0,85	6,667	2,564	1,176
Ortalama	6,06	7,69	11,24	0,165	0,130	0,089

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez kapsamında ulaştırma üst yapılarının mevcut deprem güvenliği durumunun değerlendirmesini hızlı hasar tanılama teknikleriyle yapılması hususu değerlendirilmiştir. Yapı sağlığı izleme sistemi verilen hızlı hasar tanılama teknikleri Erzurum İli sınırlarında bulunan Horasan Kırkgözeler köprüsü üzerinde uygulanmıştır. Değerlendirme sonuçları taşıt yükleri etkisini içeren zaman tanım alanında analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak yöntemin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yatay deprem yüklemesi altında köprüde oluşan basınç gerilmesi, çekme gerilmesi, düzlem içi kayma gerilmesi ve deformasyon değerlerinin güvenli bölgede kaldığı sonucuna varılmıştır. Yapı sağlığı izlemede en yüksek salınım ve ivme değerlerinin çıktığı lokal bölgelerde gerilme parametrelerinin maksimum düzeyde olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca tepki ivme değerlerinin zeminden üst noktalara çıkıldıkça arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu yatay deprem yüklemelerinde beklenen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Köprü yapısının zemininden alınan ivme ölçümleri frekans alanında çözümlenerek hâkim zemin periyotları elde edilmiştir. Zeminin hâkim periyodunun yaklaşık olarak 1sn, modal analiz sonucunda köprüye ait hâkim periyodun 0,25 sn ve köprüden alınan ölçümler sonucu hesaplanan hâkim periyot değerinin ortalama olarak 0,165 sn olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç köprüde herhangi bir yapı semin periyodunun hâkim modda çakışmadığını yani rezonans riskinin olmadığını göstermektedir. Ancak ölçümlerin alındığı P3 ve P5 noktalarında farklı salınım değerleri ortaya çıkmıştır. Bu bölgelerde ki hâkim periyot değerleri sırasıyla 0,645 sn ve 6,67 sn olarak elde edilmiştir. Bu durumun ilgili noktalarda rijitliğin diğer noktalara göre daha az olduğunu göstermektedir. Yapısal salınım değerlendirmesinde P3 ve P5 noktalarında muhtemel hasarların oluşabileceği beklenmektedir.
- Düşey deprem yüklemelerinde maksimum etki eden deprem için yapılan değerlendirmede köprüde oluşan sehim değerlerinin AASHTO 2014'e göre köprü için izin verilebilir sehim değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. P3 noktasında düşey depremlerden kaynaklı oluşan sehim değerinin maksimum 2,4 mm olduğu tespit edilmiştir. Köprüde ki izin verilebilen sehim değerinin ise yaklaşık 2 mm olduğu AASHTO 2014'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca P3 noktasında yapıya etki

eden maksimum depreme göre (Erzincan) Basınç ve çekme gerilmesi değerleri sırasıyla 32,34 MPa ve 1,217 MPa olarak elde edilmiştir. Malzeme basınç ve çekme dayanımı değerleri bu bölgede aşıldığından dolayı kısmi olarak hasarların oluşabileceği düşünülmüştür. Köprü yapısında P3 noktasında dijital ivmeölçerler ile düşey yönde yapılan ölçümler ivme değerlerinin yerçekimi ivme değerlerini aştığını göstermiştir. Ancak diğer P1, P2 ve P4 noktalarında yapılan düşey ivme değerlerinin yerçekimi ivme değeriyle aynı olduğunu göstermiştir. Bu durum P3 noktasında muhtemel hasarlar oluşabileceğini desteklemektedir. Ayrıca P3 noktasında taşıt yüklerinden kaynaklı olarak maksimum deformasyon değerleri de izlenmiştir.

- Maksimum olarak köprü yapısına etki eden düşey deprem yüklemelerinde P5 noktasında (Orta kolonun tabliyeye bağlandığı birleşim bölgesi) düzlem içi kayma gerilme değerlerinin 3,813 MPa seviyelerine çıktığı belirlenmiştir. AASHTO 2014'e göre köprü yapısında izin verilebilen düzlem içi kayma gerilmesi değerinin yaklaşık 3,25 MPa'dır. Düşey depremden kaynaklı düzlem içi kayma gerilmelerinin izin verilebilen limit değerini aştığı için P5 noktasında muhtemel hasarların oluşabileceği kanaati oluşmuştur.

Sonuç olarak köprü yapısının köşe açıklıklarında (P3) eğilme hasarlarının orta kolonun tabliyeye bağlandığı bölgede (P5) ise kesme hasarlarının oluşabileceği yapı sağlığı izleme ve zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. P3 bölgesinde özellikle ana taşıyıcı kirişlerde mantolama güçlendirmesi ve P5 bölgesinde kolon ve kiriş uçlarında yatay rijitliğin artırılması için CFRP sargı ile güçlendirilmesi gerektiği çalışma sonucunda önerilmiştir. Ayrıca köprü gibi uzun açıklığa sahip yapılarda düşey deprem yüklerinin dikkate alınarak değerlendirme yapılması gerektiği önerilmiştir. Ulaştırma üst yapı değerlendirmesinde kullanılacak deprem kayıtlarının herbirinin ayrı ayrı değerlendirilerek analize dahil edilmesi gerektiği de vurgulanmıştır. Bu tez kapsamında, Kırkgözeler Köprüsü özelinde ulaştırma yapılarının deprem öncesi ve sonrası hasar tanılama süreçlerinin etkinliği incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sismik etkiler karşısında yapısal bütünlüğün korunmasına yönelik olarak geleneksel gözlem temelli yöntemlerin yanı sıra, modern sayısal modelleme ve titreşim temelli analiz tekniklerinin bir arada değerlendirilmesinin önemli avantajlar sunduğu ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve mevcut köprü yapılarının performans esaslı değerlendirilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda ise, farklı köprü tipolojileri üzerinde benzer analizlerin gerçekleştirilmesi, yapay zeka destekli tanılama yaklaşımlarının entegrasyonu ve

gerçek zamanlı izleme sistemlerinin kullanımıyla daha kapsamlı ve ölçeklenebilir bir hasar tespit modelinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). 2014. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 7th ed., customary U.S. units. Washington, DC: AASHTO.
- AASHTO. 2002. Standard Specifications for Highway Bridges. 17th ed. Washington, DC: AASHTO.
- AFAD 2024, Republic of Turkey Ministry of Internal Affairs Disaster and Emergency Management Presidency.
- Ahmad, J., Gonz'alez-Lezcano, R.A., Majdi, A., Ben Kahla, N., Deifalla, A.F., El- Shorbagy, M.A. 2022. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*. 15(15):5111.
- Akg'ung'or, A.P., 2003. T'urkiye'deki Ulaştırma Sistemlerinin Analizi ve Ulaştırma Politikaları. *M'uhendislik Bilimleri Dergisi.*, 10(3):423-430.
- Alforno, M., Monaco, A., Venuti, F., Calderini, C., 2021. Validation of simplified micro-models for the static analysis of masonry arches and vaults. *Int J Archit Herit.* <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1808911>
- Anonim, 1995. DPT, Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Ulaştırma 'zel İhtisas Komisyon Raporu, Ankara.
- Bakırcı, M., Aydoğdu, M., 2023. Earthquake and transportation: Spatial reflections of Kahramanmaraş (PazarcıkElbistan) earthquakes on transportation. *Turkish Geographical Review*. 83: 115129.
- Barcel'ol, J.P., Pomares-Torres, J.C., S'anchez, A.G., & Torres, B., 2024. Mechanical behaviour of TRM and FRP-reinforced concrete voussoir masonry specimens. 28:14, 3368-3387, DOI: 10.1080/19648189.2024.2343874
- Calder'on, S., Arnau, O., Sandoval, C. 2019. Detailed micro-modeling approach and solution strategy for laterally loaded reinforced masonry shear walls. *Eng Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109786>
- Cancelliere, I., Imbimbo, M., and Sacco, E., 2010. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches. *Engineering Structures* 32: 776–792.
- Cavicchi, A. Gambarotta, L. 2005. Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fll interaction. *Eng Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.002>
- Celasun, H., "Betonarme K'opr'uler ve Hesap Metotları", 'ağlayan Kitabevi, 1974.
- Celep, Z., 2018. Deprem M'uhendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. İstanbul, Beta Basın Yayın Dağıtım, 2018
- Civera, M., Calamai, G., 2021. Zanotti Fragonara L. System identification via fast relaxed vector fitting for the structural health monitoring of masonry bridges. *Structures*. 30:277–93. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.073>.
- Cornaggia, A., Ferrari, R., Zola, M., Rizzi, E., Gentile, C., 2022. Signal Processing Methodology of Response Data from a Historical Arch Bridge toward Reliable Modal Identification. *Infrastructures*. 7 (74). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7050074>.

- Cosenza, E. and Losanno, D., 2021. Assessment of existing reinforced-concrete bridges under road-traffic loads according to the new Italian guidelines. *Structural Concrete*. 22:2868–2881.
- Crisci, G., Ceroni, F., Lignola, G.P., Prota, A., 2022. Critical issues in existing RC deck stiffened arch bridges under seismic actions. *Engineering Structures* 272 (2022) 114980. 10.1016/j.engstruct.2022.114980
- Cucuzza, R., Aloisio, A., Di Bari, R., Domaneschi, M., 2024. Vulnerability assessment and lifecycle analysis of an existing masonry arch bridge. *Eng Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117422>
- Dong, C.Z., Catbas, F.N., 2021. A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. *Struct Health Monit.* 20:692–743. <https://doi.org/10.1177/1475921720935585>.
- Evcen, İ., Shafieezadeh, A., DesRoches, R., 2013. Betonarme köprü kolonları için farklı güçlendirme yöntemlerinin kırılma analizleri kullanılarak değerlendirilmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 25-27 Eylül 2013 – MKÜ – HATAY.
- Evren, G. ve Ögüt, S., 1997. “Türkiye Ulaştırma Politikası Bağlamında Demiryollarımız” 2. Ulusal Demiryolu Kongresi, 15-17. Aralık, İstanbul.
- Fawad, M., Koris, K., Salamak, M., Gerges, M., Bednarski, L., Sienko, Rafal., 2022. Nonlinear modelling of a bridge: A case study – based damage evaluation and proposal of structural health monitoring (SHM) system. *Archives of Civil Engineering*. 3. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.141903>
- Fraioli, G., Tang, Y., Yang, Y. and Sneed, L.H., 2024. System-level performance of earthquake-damaged concrete bridges with repaired columns. *Computers and Concrete*, Vol. 33, No. 4 (2024) 361-372 <https://doi.org/10.12989/cac.2024.33.4.361>.
- Fraioli, G., Tang, Y., Yang, Y., Sneed, L.H., 2024. System-level performance of earthquake-damaged concrete bridges with repaired columns. *Computers and Concrete* 33 (4): 361-372. <https://doi.org/10.12989/cac.2024.33.4.361>.
- Garmendia, L., Larrinaga, P., García, D., & Marcos, I., 2014. Textile-Reinforced Mortar as Strengthening Material for Masonry Arches. *International Journal of Architectural Heritage*. 8:5, 627-648, DOI: 10.1080/15583058.2012.704480.
- Gentile, C. and Saisi, A., 2013. Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation. *Construction and Building Materials*. 8: 1273–1285. 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.013
- Goodnight, J., Feng, Y., Kowalsky, M. and Nau, J., 2012. “The effect of load history on reinforced concrete bridge column behavior”, FHWA-AK-RD-12-09; Alaska Department of Transportation & Public Facilities, Fairbanks, AK, USA
- Guo, Y., Pan, H., Shen, A., Zhao, Z., Wu, H., Li, Z., 2023. Fracture properties of basalt-fiber-reinforced bridge concrete under dynamic fatigue loading. *Structures* 56. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105018>.
- Guo, Y., Pan, H., Shen, A., Zhao, Z., Wu, H., Li, Z., 2023. Fracture properties of basalt-fiber-reinforced bridge concrete under dynamic fatigue loading. *Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105018>
- Izhar, M.S., Umair, M., Ansari, M.I., 2022. Damage assessment of reinforced concrete bridges under the ground motions - a probabilistic approach. *Journal of Applied Engineering Sciences* 12(25): 179-184. 10.2478/jaes-2022-0024.

- Kafaji, S., and Azzawi, R., 2023. Performance comparison of steel fiber reinforced concrete and conventional reinforced concrete cast-in-place half-scale concrete bridge decks under bending. *Advances in Bridge Engineering* 4 (23): 1-17. 10.1186/s43251-023-00103-3.
- Kamariotis, A., Chatzi, E., Straub, D. 2023. A framework for quantifying the value of vibration-based structural health monitoring. *Mech Syst Signal Process.* 184: 109708. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109708>.
- Karadağ, E.M. ve Pala, M. 2021. Sandık kesitli betonarme köprülerin taşıt yükü etkisindeki yapısal davranışı. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 8 (2021) 88-104.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 1982, Yol Köprüleri için Teknik Şartname, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası Yayın No:207, Ankara.
- Kaya, Y., and Şafak, E., 2015. Real-time analysis and interpretation of continuous data from structural health monitoring (SHM) systems. *Bull Earthquake Eng* (2015) 13:917–934 DOI 10.1007/s10518-014-9642-9.
- Kim, T.H., 2022. Seismic performance assessment of deteriorated two-span reinforced concrete bridges. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 16 (4): 1-13. 10.1186/s40069-022-00498-9.
- Kuncham, E. and Sen, S., 2024. Fatigue assessment of bridges using interacting filtering approach with sub-structured predictor model based on current health. *Structural Health Monitoring.* 1–19. <https://doi.org/10.1177/14759217241263838>.
- Lamouri, H., Mkhalef, M.E., Lamdouar, N., 2024. Reliability polynomial chaos metamodel for the dynamic behaviour of reinforced concrete bridges. *Advances in Bridge Engineering* 5 (27): 1-25. <https://doi.org/10.1186/s43251-024-00137-1>.
- Li, G., Tan, K.H, Fung, T.C, Del Linz, P., 2020. Mode I fracture characterisation of FRP-concrete interfaces under dynamic loading. *Compos Struct.* 254:112824.
- Li, H. and Ou, J., 2016. The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *J Civil Struct Health Monit.* 6:43–67 DOI 10.1007/s13349-015-0115-x.
- Li, H., Ou, J.P, Zhou, Z. 2009. Applications of optical fibre Bragg gratings sensing technology-based smart stay cables. *Opt Lasers Eng.* 47:1077–1084.
- Liu, B., Kawabe, D., Kim, C.W., Sarhosis, V., 2024. Full life-cycle vibration-based monitoring of a full-scale masonry arch bridge with increasing levels of damage. *Engineering Structures.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118466>.
- Liu, B., Kawabe, D., Kim, C.W., Sarhosis, V., 2024. Full life-cycle vibration-based monitoring of a full-scale masonry arch bridge with increasing levels of damage. *Engineering Structures.* 315 (2024) 118466.
- Liu, K., Zhou, H., Shi, G., *et al.*, 2013. Fatigue assessment of a composite railway bridge for high speed trains. Part II: conditions for which a dynamic analysis is needed. *J Constr Steel Res.* 82: 246–254.
- Mazzotti, C., Sassoni, E., Pagliai, G., 2013. Determination of shear strength of historic masonries by moderately destructive testing of masonry cores. *Constr Build Material*;54:421–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.039>.
- Mishra, M., Lourenço, P.B., Ramana, G.V., 2022. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering.* 48:103954. 10.1016/j.jobee.2021.103954.

- Modena, C., Tecchio, G., Pellegrino, C., Porto, F., Donà, M., Zampieri, P., & Zanini, M.A., 2015. Reinforced concrete and masonry arch bridges in seismic areas: typical deficiencies and retrofitting strategies. *Structure and Infrastructure Engineering*. 11:4, 415-442, DOI: 10.1080/15732479.2014.951859
- Mokarram, V., Banan, M.R., 2025. Strategic sensor placement in steel frames using random forests and deep neural networks for post-earthquake assessment. *Structures* 73 (2025) 108413
- Mousseau, S., Paultre, P., Mazars, J., 2008. Seismic performance of a full-scale, reinforced high-performance concrete building. Part I: experimental study. *Can J Civ Eng* 35:835–848
- Ni, Y., Mao, J., Wang, H., Xi, Z., Xu, Y., 2023. Toward high-precision crack detection in concrete bridges using deep learning. *J Perform Constr Facil.* 37(3).
- Nicolae, T., Gabriel, O., Dorina, I., Ioana, E., Vlad, M., Cătălin, B., 2008. Fibre Reinforced Polymer Composites as Internal And External Reinforcements For Building Elements, *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași Publicat De Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi” Din Iași Tomul LIV (LVIII), Fasc. 1.*
- Padgett, J.E., 2007. Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods. Dissertation. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia.
- Pellegrino, C., & Modena, C., 2010. Analytical model for FRP confinement of concrete columns with and without internal steel reinforcement. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 14, 693–705.
- Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., 1996. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley and Sons, New York.
- Qian, J., Zheng, Y., Dong, Y., Wu, H., Gu, H., Zhang, J., 2022. Sustainability and resilience of steel – shape memory alloy reinforced concrete bridge under compound earthquakes and functional deterioration within entire life-cycle. *Engineering Structures* 271. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114937>
- Rathore, M.M., Ahmad, A., Paul, A., Rho, S., 2016. Urban planning and building smart cities based on the internet of things using big data analytics, *Comput. Network*. 101: 63–80.
- Rizzo, P. ve Enshaeian, A., 2021. Bridge health monitoring in the United States: A review. *Structural Monitoring and Maintenance*. 8 (1): 1-50. DOI: <https://doi.org/10.12989/smm.2021.8.1.001>
- Ruiz, R., Todisco, L., Corres, H., 2023. Application of high-performance fibre reinforced concrete to precast girders for road bridges: Conceptual considerations and numerical analyses. *Structural Concrete* 24:4645–4659. 10.1002/suco.202200907.
- Safak, E., Cakti, E., Kaya, Y., 2010. Recent developments in structural health monitoring and data analysis. In: Garevski M, Ansal A (eds) *Earthquake engineering in Europe*, Springer, London, pp 331–355
- Sarhosis, V., Garrity, S.W., 2015. Sheng Y. Influence of brick-mortar interface on the mechanical behaviour of low bond strength masonry brickwork lintels. *Eng Struct*;88:1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.12.014>.
- Sengor, A.M.C., Gorur, N., Saroglu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, *Strike-Slip Deform. Basin Form. Sediment*. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0227>.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A.C., 2011. Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. *Finite Elem Anal Des*.

<https://doi.org/10.1016/j.fnel.2010.12.011>

- Shokrieh, M.M. and Mohammadi, A.R.G., 2021. Nondestructive testing (NDT) techniques in the measurement of residual stresses in composite materials: An overview. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. 71-109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818817-0.00016-0>
- Shuang, Z., Wenliuhan, H.S., Liu, Y.H., Inoue, N., & Zhai, Z.P., 2024. Seismic Response Control for Bridge Piers with Semi-Active MR Damper Based on Displacement Feedback. Journal of Earthquake Engineering. 28:3, 849-865, DOI: 10.1080/13632469.2023.2220419.
- Sucuoğlu, H., Nurtuğ, A., 1995. Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation. Earthquake engineering & structural dynamics 24 (9), 1195-1213.
- Taly, N., “Design of Modern Highway Bridges”, Mc Graw-Hill, 1998.
- Torra, V., Carreras, G., Casciati, S. *et al.*, 2014. On the NiTi wires in dampers for stayed cables. Smart Struct Syst 13(3):353–374
- Tören, A., 2011. I ve Kutu Kesitli Çelik-Betonarme Kompozit Köprü Kirişlerinin Analitik İncelenmesi. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uğurlu, O., Çelebi O., and Aydın, A.C., 2024. Assesment of the Historical Erzurum Karaz Bridge in terms of Structural Earthquake Perspective. Natural Hazards. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4697589/v1>.
- Uluğ, N.İ., 2008. Öngerilmeli Bir Köprü Tasarımı ve Performans Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Umar, F. ve Yayla, N., 1997. Yol İnşaatı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Wang, J.H., Sun, Y.P., Takeuchi, T., 2021. Seismic fragility and post-earthquake reparability of circular reinforced concrete bridge columns with low-bond high-strength reinforcements. Structures 34: 840-855. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.021>.
- Wu, R.Y. and Pantelides, C.P., 2017. “Rapid seismic repair of reinforced concrete bridge columns”, ACI Struct. J., 114(5), 1339.
- Zhang, M.Y, *et al.*, 2023. Probability-based surface deterioration assessment of bridge pylon and state updating using inspected crack length distribution. Struct Infrastruct Eng 2023.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hilal Çodur ÇELEBİ
Uyruğu:	
Eğitim	
Lise:	Adnan Menderes Lisesi (2007)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2011)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2018)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	
Eserler	
ULUSLARARASI DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER H.Çodur Çelebi, A. Atalay., 2025. Performance Evaluation of the Kırkgözeler Bridge under Combined Vehicle and Seismic Loads in Erzurum, Turkey. Civil Engineering Beyonds Limits. 2: 1997. https://doi.org/10.36937/cebel.2025.1997	