

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL TİTREŞİMLERİN
TARİHİ YAPILARA ETKİSİ

GÜL KIR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL TİTREŞİMLERİN
TARİHİ YAPILARA ETKİSİ

GÜL KIR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR
II. DANIŞMANI
DOÇ. DR. FERİT ÇAKIR

GEBZE

2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**THE EFFECT OF URBAN VIBRATIONS
ON HISTORICAL BUILDINGS**

GÜL KIR

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING PROGRAMME**

**THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR
II. THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. FERİT ÇAKIR**

GEBZE

2022



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/02/2022 tarih ve 2022/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/02/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gül KIR'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/Deprem ve Yapı Mühendisliği programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ülgen MERT TUĞSAL

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Bora AKŞAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Kentleşmenin artmasıyla birlikte ulaşım ağlarına ihtiyaç da artmaktadır. Artan ihtiyaçtan dolayı şehir merkezlerinde yaygınlaşan toplu taşıma ve çeşitli titreşimler mevcut tarihi yapıların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarını etkileyebilmektedir. Trafik kaynaklı titreşimler tarihi yapılara yapısal hasar verebileceği gibi aynı zamanda bu binalarda bulunanlar için konfor zafiyeti de oluşturmaktadır. Yapılan son çalışmalarda, trafik kaynaklarının neden olduğu yer değiştirme, hız, ivme ve frekans içeriğinin çevre binalara etkisi araştırılmaktadır. Bu konuda farklı ülkeler tarafından geliştirilmiş uluslararası yönetmelikler mevcuttur. Ancak ülkemizde özellikle tarihi yapıların maruz kaldığı kentsel titreşimlerin değerlendirilebileceği ulusal bir yönetmelik mevcut değildir.

Bu çalışmada, kentsel titreşimlerin tarihi yapılar üzerindeki etkilerine odaklanılmış ve beş farklı kentsel titreşim kaynağının tarihi yapılar üzerinde oluşturacağı etkiler araştırılmıştır. Tarihi yapı olarak; ülkemiz ve dünya kültür mirası açısından oldukça önemli bir yerde olan Diyarbakır surları incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı sahalardan kentsel titreşim kayıtları alınmış ve Diyarbakır surlarının bir bölümü nümerik olarak modellenerek farklı sahalardan elde edilen veriler ile dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda farklı kentsel titreşimlerin tarihi yapı üzerinde oluşturacağı etkiler incelenmiş ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel Titreşimler, Çevresel Titreşim Etkileri, Sonlu Elemanlar Analizleri.

SUMMARY

With the increase in urbanization, the need for transportation networks is also increasing. Public transportation and various vibrations, which have become widespread in city centers due to the increasing need, can affect the structural and non-structural elements of existing historical buildings. Traffic-induced vibrations can cause structural damage to historical buildings, as well as create a lack of comfort for the occupants of these buildings. In recent studies, the effects of displacement, velocity, acceleration and frequency content caused by traffic sources on the surrounding buildings are investigated. There are international regulations developed by different countries on this subject. However, there is no national regulation in our country that can evaluate the urban vibrations to which historical buildings are exposed.

In this study, the effects of urban vibrations on historical buildings were focused and the effects of five different sources of urban vibration on historical buildings were investigated. As a historical building; Diyarbakır city walls, which are in a very important place in terms of our country and world cultural heritage, were examined. Within the scope of the study, urban vibration records were taken from different areas and a part of Diyarbakır city walls were modeled numerically and dynamic analyzes were carried out with the data obtained from different areas. As a result of the study, the effects of different urban vibrations on the historical structure were examined and the data obtained from the finite element analyzes were evaluated.

Key Words: Urban Vibrations, Environmental Vibration Effects, Finite Element Analysis.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu çalışmanın yürütülmesinde desteğini esirgemeyen, tüm bilgilerini benimle paylaşan ve bana yol gösteren değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR'a ve Doç. Dr. Ferit ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince bilgilerini benimle paylaşan Ezgi TEKERGÜL'e ve kayıtların işlenmesi konusunda desteğini esirgemeyen Ar. Gör. Arif ULU'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her zaman yanımda olan, desteklerini esirgemeyen ve bana olan güvenleri hiç azalmayan, alacağım 'İnşaat Yüksek Mühendisi' unvanını belki de benim kadar hak eden annem Neptün KIR ve babam Mustafa KIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte yanımda olan tüm sevdiklerime desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	3
1.2. Önceki Çalışmalar/Literatür Taraması	4
1.3. Taşınmaz Kültür Varlıklarının Korunması	11
1.4. Tarihi Taşınmaz Kültürel Varlıklarda Çevresel Titreşimlerin İncelenmesi	14
2. FARKLI SAHALARDAN ALINAN TİTREŞİM KAYITLARI	16
2.1. İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Treni	16
2.2. Pendik-Mithatpaşa Yük Treni	17
2.3. Pendik-Adapazarı Bölgesel (Banliyö) Treni (Ada Ekspresi)	19
2.4. İstanbul Kabataş-Bağcılar Tramvay Hattı (T1)	20
2.5. Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi Şehir İçi Trafik Hattı	23
3. DİYARBAKIR SURLARI'NIN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE TARİHÇESİ	26
3.1. Diyarbakır Surlarının Tarihi	26
3.2. Surların Yapısal Özellikleri ve Mimarisi	27
3.3. Surların Mevcut Durumu ve Hasar Analizi	29
3.4. Surların Sayısal Modelinin Hazırlanması	33
4. ÇEVRESEL TİTREŞİMLERİN DİYARBAKIR SURLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ	38
4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri	38
4.1.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Kalibrasyonu	38

4.1.2. Statik Analizler	40
4.1.3. Modal Analizler	42
4.1.4. Dinamik Analizler	44
4.1.4.1. İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Treninden Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri	44
4.1.4.2. Pendik-Mithatpaşa Yük Treninden Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri	46
4.1.4.3. Pendik-Adapazarı Bölgesel (Banliyö) Treninden Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri	49
4.1.4.4. İstanbul Kabataş-Bağcılar Tramvay Hattından Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri	51
4.1.4.5. Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi Şehir İçi Trafik Hattından Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri	54
5. ELDE EDİLEN VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	57
5.1. Sahadan Alınan Verilerin Değerlendirilmesi	57
5.2. Sonlu Elemanlar Analizlerinden Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kisaltmalar

Δt	: Zaman Aralığı
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı
Ψ_t	: Yığma Birimlerin Poisson Oranı
Ψ_h	: Harcın Poisson Oranı
c	: Kohezyon
E_d	: Yığma Duvarın Elastisite Modülü
E_t	: Yığma Elemanların Elastisite Modülü
E_h	: Harcın Elastisite Modülü
f_{co}	: Basınç Dayanımı
h	: Saat
t_t	: Yığma Eleman Kalınlığı
t_h	: Harç Kalınlığı
Hz	: Hertz
km	: Kilometre
m	: Metre
mm	: Milimetre
s	: Saniye
yy.	: Yüzyıl
MPa	: MegaPaskal
DIN	: Uluslararası Alman Standardı
EMA	: Deneysel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis)
ISO	: International Organization for Standardization
OMA	: Operasyonel Modal Analiz (Operational Modal Analysis)
PCPV	: Pik Bileşen Parçacık Hızı
PPV	: Pik Parçacık Hızı
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
UNESCO	: Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: 1890 yılında New York'ta kullanılan atlı tramvaylar.	1
1.2: İstanbul'da kullanılan atlı tramvay.	2
1.3: İstanbul'da kullanılan ilk elektrikli tramvay.	3
1.4: İstanbul'da kullanılan ilk benzinli otomobil.	3
1.5: a) Günümüzde Bozdoğan Su Kemerı'nin maruz kaldığı kentsel titreşimler, b) Günümüzde Dolmabahçe Sarayı'nın maruz kaldığı kentsel titreşimler.	3
1.6: Amasya Kapıağası Medresesi.	11
1.7: Tarihi Diyarbakır surları.	12
1.8: Afyonkarahisar tarihi Taşhan.	12
1.9: Edirne Selimiye Cami.	13
1.10: İstanbul Dikilitaş.	13
1.11: İzmir Saat Kulesi.	14
1.12: a) Operasyonel yük kullanılarak yapılan operasyonel modal analiz, b) Bir uyarıcı kullanılarak yapılan deneysel modal analiz.	15
2.1: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin ivme-zaman grafiği.	16
2.2: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin hız-zaman grafiği.	17
2.3: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin fourier genlik spektrumu.	17
2.4: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin ivme-zaman grafiği.	18
2.5: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin hız-zaman grafiği.	18
2.6: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin fourier genlik spektrumu.	19
2.7: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin ivme-zaman grafiği.	19
2.8: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin hız-zaman grafiği.	20
2.9: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin fourier genlik spektrumu.	20

2.10:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay kaydı için Caferağa Medresesi çevresi test noktası.	21
2.11:	Tarihi Caferağa Medresesi önünden alınan kayıtlar.	21
2.12:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin ivme-zaman grafiği.	22
2.13:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin hız-zaman grafiği.	22
2.14:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin fourier genlik spektrumu.	23
2.15:	Dağ Kapı Meydanı test sahası.	23
2.16:	a) Dağ Kapı Meydanı sur yapısı önü cihaz konumu, b) Dağ Kapı Meydanı sur yapısı çevresi cihaz konumu.	24
2.17:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin ivme-zaman grafiği.	24
2.18:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin hız-zaman grafiği.	25
2.19:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin fourier genlik spektrumu.	25
3.1:	Tarihi Diyarbakır surları.	26
3.2:	Diyarbakır surları planı, 1932.	28
3.3:	a) 1930'larda Diyarbakır surları genel görünümü, b) 1930'larda Diyarbakır surlarına ait burçlar, c) 1930'larda Diyarbakır surlarında meydana gelen hasarlar.	28
3.4:	Burçlarda gözlemlenen derz boşalmaları, çatlaklar ve bozulmalar.	29
3.5:	Burçlarda gözlemlenen derz boşalmaları, çatlaklar ve bozulmalar.	30
3.6:	Burçların giriş kapılarında oluşan yıkılmalar.	30
3.7:	Zamanla yıkılan döşemeler.	31
3.8:	Deprem sonucu yıkılıp ters döndüğü düşünülen duvar.	31
3.9:	Burçta yapılan bölgesel yıkımın drone görüntüsü.	32
3.10:	a) Taşların sökülmesiyle oluşan geçit, b) Ateş yakılmasından dolayı oluşan kirlenmeler.	32
3.11:	Tarihi Diyarbakır surları etrafındaki trafik durumu.	33
3.12:	Diyarbakır surlarına ait 3D modelleme.	34
3.13:	Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri.	34
3.14:	Drucker-Prager akma yüzeyi.	36

3.15:	Modelleme aşamasında kullanılan eleman modeli.	36
3.16:	Dinamik analizlerin yapıldığı sonlu elemanlar modeli.	37
3.17:	a) Newton-Raphson ilk iterasyon, b) Newton-Raphson sonraki iterasyon.	37
4.1:	Yapı içindeki cihazın yerleşimi.	39
4.2:	Çevresel titreşim kaydı alınan surda yapı içindeki cihazdan elde edilen hâkim frekans.	39
4.3:	Test ölçümlerinin yapıldığı burca ait sonlu elemanlar modelinden elde edilmiş frekans değeri.	40
4.4:	Yapıdaki maksimum düşey yer değiştirme (mm).	41
4.5:	Yapıdaki maksimum kritik gerilme (MPa).	41
4.6:	Yapıdaki minimum kritik gerilme (MPa).	42
4.7:	Mod şekilleri.	43
4.8:	İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).	44
4.9:	İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).	45
4.10:	İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).	45
4.11:	İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).	46
4.12:	Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).	47
4.13:	Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).	47
4.14:	Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).	48
4.15:	Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).	48
4.16:	Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) treni kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).	49
4.17:	Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).	50

4.18:	Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).	50
4.19:	Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).	51
4.20:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).	52
4.21:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).	52
4.22:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).	53
4.23:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).	53
4.24:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).	54
4.25:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).	55
4.26:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).	55
4.27:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).	56
5.1:	DIN 4150-3 Alman standardına göre yapı tipi-frekans-hız ilişkisi.	58
5.2:	İstanbul-Ankara yüksek hızlı treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.	58
5.3:	Pendik-Mithatpaşa yük treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.	59
5.4:	Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.	59
5.5:	İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.	60
5.6:	Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.	60

5.7:	Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki yatay tepe deplasmanları (mm).	61
5.8:	Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki maksimum kayma gerilmeleri (MPa).	62
5.9:	Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki maksimum asal gerilmeler (MPa).	62
5.10:	Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki minimum asal gerilmeler (MPa).	63
5.11:	Gömülü ray sistemi için izolasyon uygulama önerisi.	66
5.12:	Sultan 2.Abdülhamid Han'ın kabri önündeki tramvay hattında yapılan ilave izolasyon uygulamasının kesiti.	67
5.13:	Sultan 2.Abdülhamid Han'ın kabri önündeki tramvay hattında yapılan ilave izolasyon uygulaması.	67

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.	35
4.1: X yönü için katılım faktör hesaplaması.	43
4.2: Y yönü için katılım faktör hesaplaması.	43
4.3: Z yönü için katılım faktör hesaplaması.	43
5.1: Uluslararası yönetmeliklerde yer alan sınır değerler.	61
5.2: Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k (MPa)	64

1. GİRİŞ

Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde tarihi kültürel varlıklar kentsel titreşimlerin etkisi altındadır. Özellikle nüfusun yoğun olduğu alanlarda, kentsel kültürel miras olarak adlandırabileceğimiz birçok tarihi yapı yoğun araç trafiğinden kaynaklanan çevresel titreşimlere maruz kalmaktadır. Yoğun kentleşme oranıyla birlikte yer altı ve yerüstü ulaşım ağları mevcut tarihi yapıları etkilemekte ve bu ağlardan geçen araçların yarattığı titreşimler tarihi yapıların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarına hasarlar verebilmektedir. Birçok ülkede tarihi kültürel varlıkların ağır trafik yüklerine maruz kalması 1800'lü yıllarda başlayan endüstri devrimine kadar uzanmaktadır [Çolak, 2003]. Kent içi yolcu taşımacılığında atlı tramvaylar ve ardından motorlu tramvayların kullanılmasıyla birlikte, tarihi taşınmazların yoğun çevresel titreşimlere maruz kalması giderek artmaya başlamıştır [Web 1, 2022] (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: 1890 yılında New York'ta kullanılan atlı tramvaylar.

Tramvay hatları, ülkemizde de ilk olarak atlı tramvaylar şeklinde İstanbul'da Azapkapı-Galata, Aksaray-Yedikule, Aksaray-Topkapı ve Eminönü-Aksaray olmak üzere toplam 4 hatta çalışmaya başlamıştır [Web 2, 2022] (Şekil 1.2). İstanbul'dan sonra Osmanlı İmparatorluğu sınırları içinde yer alan Selanik, Şam, Bağdat, İzmir ve

Konya gibi büyük şehirlerde de atlı tramvay hatları kurulmuş ve çalışmıştır [Ayar, 2013].

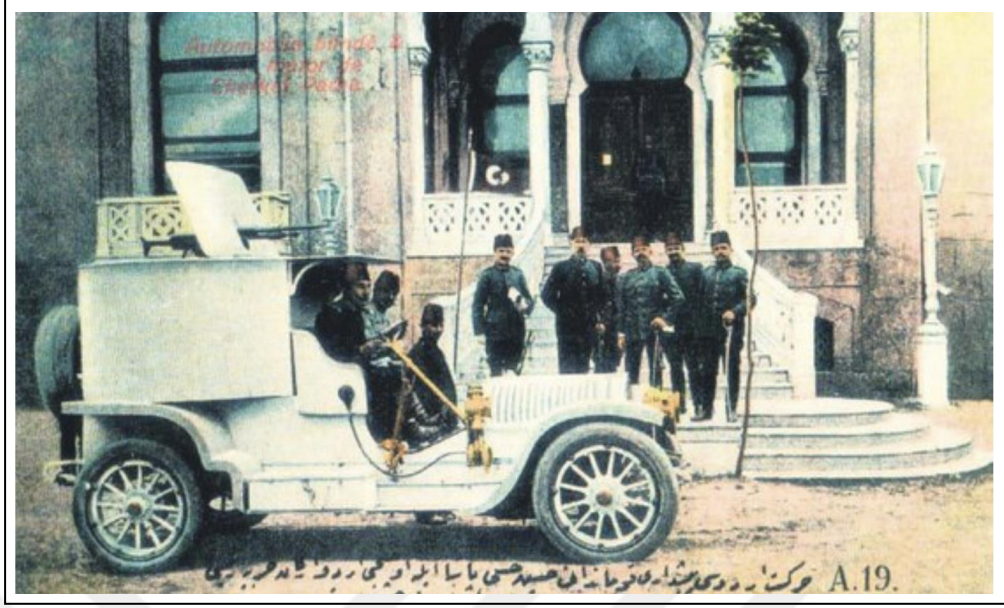


Şekil 1.2: İstanbul’da kullanılan atlı tramvay.

Motorlu tramvayların icadından sonra tüm dünyada atlı tramvaylar yerini elektrikli tramvaylara bırakmıştır. Ülkemizde de 1914 yılından itibaren elektrikli tramvaylar kullanılmaya başlanmış ve özellikle İstanbul’un birçok yerinde elektrikli tramvaylara geçilmiştir [Web 3, 2022], [Ayar, 2013] (Şekil 1.3). Ayrıca, benzinli motorların yaygınlaşmasıyla birlikte 1900’lü yılların ilk çeyreğinden itibaren tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de benzinli araçlarının kullanımı artmaya başlamıştır [Web 4, 2022] (Şekil 1.4).

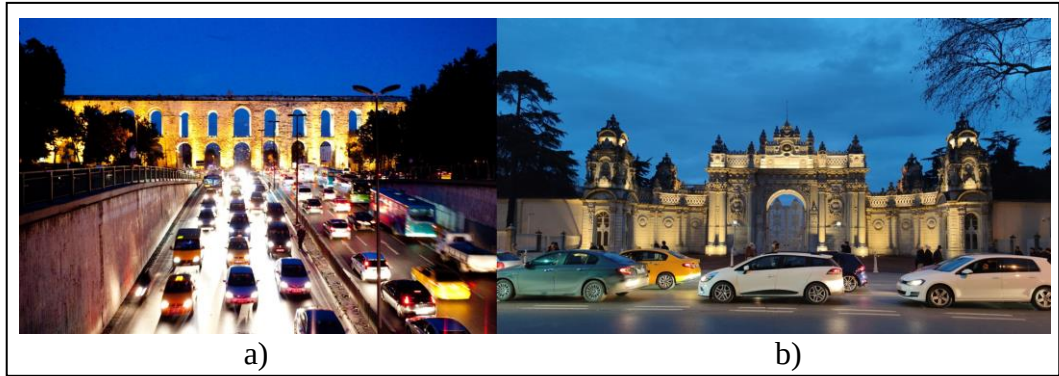


Şekil 1.3: İstanbul’da kullanılan ilk elektrikli tramvay.



Şekil 1.4: İstanbul'da kullanılan ilk benzinli otomobil.

Artan kent nüfusları paralelinde tramvay hatlarının çoğalmasına ve daha çok otomobilin kullanımına neden olmuştur. Tüm bu artışlar kentsel kültürel mirasın maruz kaldığı kentsel titreşimleri artırmış (Şekil 1.5) ve tüm dünyada kültürel mirasın korunması amacıyla çevresel titreşimlerin azaltılması ve tarihi yapıların kentsel titreşimlerden zarar görmemesi amacıyla yapılan çalışma sayısı çoğalmıştır.



Şekil 1.5: a) Günümüzde Bozdoğan Su Kemerî'nin maruz kaldığı kentsel titreşimler, b) Günümüzde Dolmabahçe Sarayı'nın maruz kaldığı kentsel titreşimler.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı, kentsel titreşimlerin tarihi yapılar üzerindeki etkileri araştırmak ve yüksek hızlı tren, yük treni, banliyö tren, tramvay ve karayolu trafiği

gibi farklı kaynaklardan alınmış çevresel titreşimlerin tarihi yapılar üzerinde oluşturacağı etkileri araştırmaktır. Çalışmanın ilk bölümünde, tarihi taşınmaz kültürel varlıklar hakkında genel bilgilendirme yapılarak konu ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Treni, Pendik-Mithatpaşa Yük Treni, Pendik-Adapazarı Bölgesel Treni (Ada Ekspresi), İstanbul Kabataş-Bağcılar Tramvay Hattı (T1) ve Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı üzerinden ivme kayıtları alınmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, “Taşınmaz Kültür Varlıkları” arasında en güçlü yapılar grubuna giren tarihi Diyarbakır Surları’nın bir bölümü sayısal olarak modellenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, farklı sahalardan alınan ivme kayıtları dikkate alınarak dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları ulusal ve uluslararası yönetmeliklerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise, farklı sahalardan elde edilen kayıtların fourier dönüşümleri alınmış ve elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası standartlarda önerilen sınır değerler dikkate alınarak çevresel titreşimlerin tarihi yapılar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçların, tarihi yapıların farklı titreşimler altındaki davranışını anlamak amacıyla oldukça faydalı olacağı ve literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2. Önceki Çalışmalar/Literatür Taraması

Patricia Ellis, İngiltere’nin Londra şehrinde Greenwich, Büyük Londra, Harrow-on-the-Hill ve Blackheath bölgelerindeki tarihi yapılara etkiyen trafik kaynaklı titreşimleri araştırmıştır. Bu çalışmayı insanların titreşime verdikleri tepki ve yapıların titreşime verdikleri tepki olarak iki ana başlık altında yürütmüştür. Çalışma sonucunda; yoğun titreşime maruz kalan yapılar, standartlara göre yapısal hasara neden olan titreşim seviyesinin altında olmalarına rağmen yapısal olarak sağlıklarının iyi olmadığı görülmüştür. Sağlam bir istatistiksel veri tabanı sağlamak gerektiği ve araştırmanın diğer yapı türleri ve yapı yaşlarını kapsayacak şekilde devam ettirilebileceği istenmiştir [Ellis, 1987].

Osama Hunaidi ve arkadaşları, yolların ve demiryollarının bitişiğindeki yapılarda oluşan titreşimlerin; yüksek düzeylere ulaştıklarında insanlarda şikayetlere

ve tarihi yapılarda olası hasarlara neden olduğunu belirtmişlerdir [Hunaidi et al., 1994].

Maurizio Crispino ve M. D'apuzzo, İtalya'nın Napoli kentinde Riviera di Chiaia Caddesi üzerinde bulunan ve 1826 yılında yapılmış olan Palazzo S. Teodoro binasında trafik kaynaklı titreşimlerin etkisini incelemişlerdir. Yapının içine ve yapı etrafına çeşitli sismometreler yerleştirilmiştir ve 3 boyutlu (X,Y,Z) trafik titreşim kayıtları alınmıştır. Alınan kayıtlar sonrasında pik parçacık hızı (PPV) değerleri İngiliz (ISO 2631) ve İsviçre standartlarına göre değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede hem İngiliz hem İsviçre standartlarına göre PPV değerlerinin sınır değeri aştığı görülmüştür [Crispino and D'apuzzo, 2001].

A. Pau ve arkadaşları, İtalya'nın Roma kentindeki Colosseum, Traian Sütunu ve Aurelian Duvarı'na etkiyen çevresel titreşimleri incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, çevresel titreşimlerin hasar yaratma riskini tespit etmekten ziyade titreşimlerdeki farklılıkları değerlendirmek üzerinedir. Yapılan çalışmalar sonucunda çevresel titreşimlerin, yapılara hasar verecek düzeyde olmadığı, ilgili yönetmeliklere göre limit seviyenin altında olduğu görülmüştür [Pau et al., 2005].

Ilgaz Candemir, kentlerde özellikle ana arterlere yakın tarihi eser niteliğindeki yapıların vibrasyondan arındırılması gerektiğinden bahsetmiş; eski omurgalarına bir de raylı sistemlerin zararlı yan etkilerinin aktarılmaması gerektiğini belirtmiştir [Candemir, 2005].

Piotr Tucholka, Kamil Kielbasinski ve Radoslaw Mieszkowski, Polonya'nın Varşova kentinde yoğun olarak kullanılan bir caddenin yakınındaki St. Catherine Kilisesi üzerinde trafik kaynaklı titreşimleri ve titreşimlerin bu tarihi yapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İnceleme sonuçları Polonya standartları ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların bu tarz yapılar için standartlarda belirtilen sınır koşulları aştığı görülmüştür [Tucholka et al., 2008].

Romualdas Kliukas ve arkadaşları, Litvanya'nın başkenti Vilnius'ta Arch-Cathedral Belfry yapısında trafiğin etkisini incelemişlerdir. Şehirde son 10 yılda artan trafiğin etkileri eski Vilnius kentinde öngörülememiştir. [Kliukas et al., 2008], Belfry yapısının bakımını garanti altına almak için ulaşım kaynaklı dinamik etkileri ve bunların yapıya olan sonuçlarını gösteren bir sistem kurulmasının önerilebileceğini belirtmiştir. Yapılan çalışmalarda, yapının doğal frekansı 1,3 Hz iken kent trafiğinin etkisiyle bu değer 10,8 Hz'e kadar çıkmıştır. Sonuç olarak, ağır yüklü bir kamyonun neden olduğu dinamik yükleme, normal şehir trafiğinin neden olduğu dinamik

yüklemeye göre 7 kat daha fazla etki etmektedir. Polonya standartlarına göre, bulunan bu frekans değerinin ağır yüklü bir kamyon geçmesi halinde tarihi yapıya zarar verebilecek seviyede olduğu görülmüştür.

A. Pau ve F. Vestroni, İtalya'nın Roma kentindeki Colosseum yapısının trafik kaynaklı titreşimlere karşı verdiği dinamik tepkiyi araştırmışlardır. Yapıdaki mevcut hasarlar ve yapılan trafik titreşim ölçümleri sonrasında bulunan değerler uluslararası standartlara göre değerlendirilmiştir. Yapılan testler ve analizler sonucunda, ölçülen titreşimlerin yapıda doğrudan hasar oluşturacak şiddette olmadığı fakat yapının zaman içindeki yorgunluğu ve diğer gerilmelerle birlikte güçsüz kısımlarda bozulmalara yol açabileceği tespit edilmiştir [Pau and Vestroni 2008].

Alemdar Bayraktar, Temel Türker, Barış Sevim, Ahmet Can Altunışık ve Faruk Yıldırım'ın yaptığı çalışmada, Trabzon'daki Ayasofya Kilisesi'nin tarihi çan kulesi üzerinde bir ortam titreşim testi gerçekleştirmişlerdir ve çevresel titreşimlerin bu tarihi yapıya etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel ölçümler farklı zamanlarda iki ölçüm düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk ölçümlerde on iki adet tek eksenli ivme ölçer kullanılmıştır. İkinci ölçümlerde ise çan yapısının eğilme ve burulma mod şekillerini, doğal frekanslarını ve sönüm oranlarını belirleyebilmek amacıyla dört adet üç eksenli ivme ölçer ve bir adet tek eksenli ivme ölçer kullanılmıştır. Yapılan ölçümler ve analizlerde, ilk beş doğal frekans ile karşılık gelen mod şekilleri hem teorik hem de deneysel modal analizlerden belirlenir ve birbirleriyle karşılaştırılır. Mod şekilleri arasında bir uyum sağlanmıştır fakat doğal frekanslar arasında bazı farklılıklar vardır. Bu farklılıkların kaynakları, duvarın elastisite modülündeki değişimler, üst duvardaki çatlaklar ve temel seviyesindeki sınır koşulları olduğu ortaya konmuştur [Bayraktar vd., 2009].

Alemdar Bayraktar, Ahmet Can Altunışık, Barış Sevim ve Temel Türker Trabzon'da yer alan İskenderpaşa Cami'sindeki tarihi yığma minare yapısında çevresel titreşimlerin yapıya olan etkisini incelemek için yapının çeşitli bölgelerine ivme ölçerler yerleştirmişlerdir. Aynı zamanda yapının analitik frekansını ve mod şekillerini belirlemek için bilgisayar ortamında matematiksel bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonrasında, oluşturulan bu modele 1992 yılında gerçekleşen Erzincan depremi titreşim kayıtları etkilmiştir. Yapılan analizler ve saha çalışmaları sonunda; analitik modelde 1-41 Hz aralığında değişen 25 doğal frekans elde edilmiştir. Bulunan ilk yedi mod eğilme ve burulma modları olarak sınıflandırılabilir. İvme ölçerlerden elde edilen frekanslar, matematiksel modelden elde edilen frekanslara göre

daha yüksek bulunmuştur. Sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanması için, modelde malzeme sınır koşulları değiştirildikten sonra bu fark %5'e kadar düşürülmüştür [Bayraktar vd., 2010].

Barış Sevim, Alemdar Bayraktar, Ahmet Can Altunışık, Sezer Atamtürktür ve Fatma Birinci Rize Çamlıhemşin'de 19.yy'da yapılan ve 1998 yılında restore edilen tarihi Mikron Kemer Köprüsü'nde çevresel titreşimlerin etkisinde lineer olmayan performans analizi yapmışlardır. Yapının çeşitli noktalarına ivme ölçerler yerleştirilmiş ve çevresel titreşim kayıtları alınmıştır. İlk olarak yapının doğal frekansı, mod şekilleri ve sönüm oranı bulunmuştur. Sonrasında bulunan bu değerler lineer sonlu eleman modeliyle karşılaştırılmıştır. Mod şekilleri birbiriyle uyumluyken, doğal frekanslar %8 ile %10 aralığında uymamaktadır. Lineer sonlu eleman modelinin sınır koşulları analitik olarak elde edilen sonuçlarla ve çevresel titreşim testleri sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde tekrar ayarlanmıştır. Sonuç olarak, yer değiştirme ve gerilme sonuçları yapıyı oluşturan taş malzemenin sınır değerleri içinde kaldığı gözlenmiştir [Sevim vd., 2010].

Giovanni Bongiovanni, Paolo Clemente, Dario Rinaldis ve Fernando Saitta İtalya'nın Roma kentinde trafik kaynaklı titreşimlerin tarihi yapılara etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada 5 farklı tarihi yapı üzerine çeşitli sismometreler yerleştirilmiş ve bu yapıların trafik kaynaklı titreşimlere karşı tepkileri kayıt altına alınmıştır. Çalışmada incelenen tarihi yapılar; Trajan Sütunu, Villa Farnesina, Lateran Dikilitaşı, Minerva Medica Tapınağı ve Antonina Sütunu'dur. Bu 5 tarihi yapının sonlu eleman modeli kurulup analizleri yapılmış ve yerinde alınan verilerle sonlu eleman modelinden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sahadan alınan pik genlik hızı değeri, Alman standardı olan DIN 4150'ye göre değerlendirilmiştir. Beş tarihi yapı için de elde edilen pik genlik hızları, Alman standardına göre yapısal hasara neden olabilecek limit değerlerin altında kalmaktadır. Fakat, bu tarihi yapıların malzemeleri ve yapım yöntemleri şimdiki standartlara göre uygun olmadığından ve bu bölgelerde son zamanlarda artan trafik yoğunluğundan dolayı yazarlar tarafından risk altında oldukları düşünülmektedir [Bongiovanni et al., 2011].

Meng Ma, Valeri Markine, Wei-ning Liu, Yang Yuan ve Feng Zhang Çin'in Chengdu şehrindeki metro hattının yakınında, 1911 yılında yapılmış olan şehitler anıtındaki tren kaynaklı titreşimleri incelemişlerdir. Yapının etrafında çeşitli yerlere ivme ölçerler yerleştirilmiş ve kayıtlar alınmıştır. Yapının aynı zamanda sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu model Beijing 5. Metro Hattı ile kontrol edilmiştir.

Çalışmalar sonucunda tren hızı 72 km/h olarak ölçülmüştür ve bulunan titreşim değerleri tüm şartlarda Çin standartlarını aşmaktadır. Titreşim değerlerini azaltmak için tren hızını düşürmek gerekir. Tren hızı 58 km/h'nin altında olduğu zaman kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür [Ma et al., 2011].

Renos A. Votsis, Nicholas Kyriakides, Christis Z. Chrysostomou, Elia Tantele ve Themis Demetriou, Kıbrıs Famagusta'taki (Gazimağusa) St. Nicholas Katedrali (Lala Mustafa Paşa Camii) ve Morphou (Güzelyurt)'daki St. Mamas Kilisesi'nde çevresel titreşimlerin etkilerini incelemişlerdir. İlk olarak yapılarda görsel muayene için ön çalışma yapılmıştır. Ardından, yapıların farklı bölgelerine ivme ölçerler yerleştirilmiş ve yapıların bilgisayar ortamında sonlu eleman modelleri kurulmuştur. Bu çalışma, sonlu eleman modellerinin güncellenmesine ve bu yapılar için uygulanan izleme stratejisinin planlanmasına ve ayrıca sismik kırılgenliklerinin araştırılmasına katkıda bulunmuştur [Votsis et al., 2012].

Gökhan Osmancıklı, Şenay Uçak, Fatma Nur Turan, Temel Türker ve Alemdar Bayraktar Trabzon'daki Ayasofya Çan Kulesi'nin 2010 yılında restore edilmiş hali için yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve restore sonrasındaki sonuçların restore edilmeden önceki dinamik özellikleri karşılaştırarak restorasyonun etkilerinin değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Restorasyon önceki dinamik özellikler, çalışmayı yürüten ekip tarafından 2009 yılında, yapı restore edilmeden önce belirlenmiştir. Restorasyon sonrası dinamik özellikler için ortam titreşim testleri yapılmış ve yapının sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Çalışma sonucunda restorasyon öncesi ve sonrasındaki mod şekillerinin yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Yapının sönüm oranının %2,69'dan %0,6'ya düştüğü bulunmuştur. Restorasyon projelerinin tam ölçekli ortam titreşim testi kullanılarak tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır [Osmancıklı vd., 2012].

İrem Ayhan Selçuk doktora tezi kapsamında; İzmir ili Ödemiş ilçesi Birgi Beldesi'nde bulunan on adet tescilli yapıda kontrollü olarak geçirilen kamyon, minibüs, ambulans, itfaiye, özel araç ve traktör ile oluşan titreşim düzeyleri yapının girişinde yola bakan iki köşesi ile orta noktasına sabitlenen sensörler ile ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, trafik kaynaklı titreşimlerin; uluslararası yönetmeliklere göre insan algısını aşan titreşimler (0,3-0,4 mm/s) olması fakat tarihi yapılar için hasara sebep olabilecek titreşim seviyesini (2 mm/s) aşmamasına rağmen, koruma bölgesindeki yapılar olduğu için titreşim seviyelerini azaltıcı önlemler alınması gerektiği görülmüştür. Yapıların zemin malzemelerinin mozaik kaplama, beton, ahşap,

taş dõřeme, kayrak taşı ya da toprak olması da titreşim dũzeyini artırıcı etkilere sahip faktõrlerdir. Yapının õnũnden geãen araã sayısı arttıka titreşim değerleri de artacağından õzellikle koruma altındaki yapıların planlaması yapılırken bu etkiyi dikkate almak gerektiği sonucu çıkarılmıştır [Ayhan Selçuk, 2013].

Meng Ma, Weining Liu, Chunyu Qian, Guohua Deng ve Yudong Li, Çin'in Xi'an şehrinde bulunan ve 1384 yılında yapılan tarihi an Kulesi ũzerindeki tren kaynaklı titreşimlerin etkisi incelemişlerdir. Bu yapının altında biri 2011'den beri faaliyette olan diğeri yapım aşamasında olan 2 adet metro hattı geãmektedir. Metro hattındaki titreşimlerin an kulesine etkisini incelemek için faaliyette olan hat için metro treni-ray hattı-zeminden oluşan bir ũ boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Bu hattan elde edilen veriler yapımı devam eden hatta sũperpoze edilmiştir. Yerinde õlũlen pik parça hızları ile geliştirilen sonlu eleman modelinden çıkan veriler kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmalarda metro treninden kaynaklanan titreşimlerin karayolu trafiğinden kaynaklı titreşimlere gõre daha az olduğunu gõstermiřtir [Ma et al., 2015].

Onur Onat ve Erkut Sayın yaptığı çalışmada, Tunceli ili Çemiřgezek ilçesindeki Tağar ayı ũzerinde bulunan tarihi Tağar Kõprũsũ'nũn doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Tarihi Tağar Kõprũsũ ANSYS programı ile ũ boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve 1992 yılında gerçekleşen Erzincan depreminin ivme kayıtları bu modele etkitilmiştir. Analizler sonucunda kõprũde hasarlar meydana gelmiş ancak oluşan bu hasarların yapının mevcut performansını sıkıntıya sokacak derecede olmadığı sonucuna varılmıştır [Onat ve Sayın, 2015].

Ivan Roselli ve arkadaşlarının "Transactions on Ecology and the Environment" dergisinde yayınlanan çalışmasında yapımı tahmini 4.yy olan Minerva Medica Tapınağı ve 2.yy'da yapılan Priscilla Yeraltı Mezarı'nda trafik kaynaklı titreşimlerin etkisi incelenmiştir. Minerva Medica Tapınağı gũneybatı tarafına çok yakın geãen tramvayların titreşimine; Priscilla Yeraltı Mezarı ise Via Salaria yolundaki trafik titreşimlerine maruz kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda binanın ve bina çevresinin çeşitli yerlerine sismometreler yerleştirilmiş ve pik bileşen parçacık hızları (PCPV) õlũlmũřtur. õlũlen PCPV değerleri Alman ve İşvire standartlarına gõre değerlendirilmiştir. İşvire standartlarına gõre tarihi yapılar için hasara sebep olabilecek PCPV değeri 1.5 mm/s'den kũũk; Alman standartlarına gõre ise PCPV değeri 1.5 mm/s ile 2 mm/s arasında olmalıdır. Yapılan alışmada PCPV değerleri 1.4 mm/s ile 1.5 mm/s aralığında õlũlmũř olup, bu değerlerin sınırı aşmadığı ancak,

İsviçre standartlarındaki limit değere çok yakın olduğu görülmüştür [Roselli et al., 2017].

Aykut Erkal, tren geçişlerinin Küçük Ayasofya Cami üzerinde oluşturduğu titreşimleri incelediği çalışmasında, yapının içine ve bahçesine çeşitli sismometreler yerleştirilmiş ve titreşim değerlerini ölçülmüştür. Banliyö treni, hızlı tren ve yük treninin geçtiği hatta düşey, kuzey-güney ve doğu-batı yönleri olmak üzere 3 yönde en yüksek partikül hızları kaydedilmiştir. Yapılan değerlendirmede tüm yönler için; insan konforu sınırı olan 0.3 mm/s ve tarihi yapılarda hasara sebep olabilecek en düşük titreşim seviyesi olarak kabul edilen 1 mm/s partikül hız değerlerinin aşıldığı görülmektedir [Erkal, 2017].

İtalya'nın Roma kentinde bulunan Amphitheatrum Flavium (Colosseum) yapısının kuzey duvarında trafik kaynaklı titreşimlerin tarihi yapıya etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda toplam 13 ivme ölçer kullanılmıştır ve bu ivme ölçerler yapının çeşitli yerlerinde konumlandırılmıştır. İvme ölçerlerden günün farklı saatlerinde ve farklı günlerde kayıtlar alınmıştır. Her konfigürasyon için en yüksek enerjili 5 dakikalık aralık, zaman ve frekans tanım alanlarında birer birer ayıklanmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda, zaman ve frekans tanım alanındaki sonuçların birbirlerine yakın olduğu bulunmuştur. Gelecekteki çalışmalarda, deneysel sonuçların yorumlanmasını doğrulamak ve hasar görebilirlik analizini gerçekleştirmek için uygun sonlu eleman modelinin kurulması önerilmiştir [Bongiovanni et al., 2017].

Rojbin İzgi yüksek lisans tez çalışmasında, tarihi Diyarbakır Surları'ndan Yedikardeş Burcu'nu incelemiştir. Tarihi burç yapısı, ANSYS programı ile sonlu eleman metodu kullanılarak üç farklı biçimde modellenmiştir. Yapının statik ve dinamik analizleri yapılmış ve burç yapısının deprem performansı değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Yedikardeş Burcu'nun sınırlı hasar performans seviyesinde olduğu tespit edilmiştir [İzgi, 2020].

Li Minghang, Ma Meng, Cao Zhonglei, Xia Qian ve Liu Weinnig, Pekin banliyö hattında bulunan ve yaklaşık 1000 yıllık geçmişi olan Probhutaratna Tapınağı'nda tren kaynaklı titreşimlerin etkisi ve yapının dinamik davranışı incelemişlerdir. Yapının dinamik davranışı incelemek ve tren yükleri altındaki en zayıf noktasını belirlemek için dinamik özellikleri ölçülmüştür. Dinamik ölçüm sonuçlarına göre serbest titreşim modları belirlenmiş ve yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelden elde edilen veriler ile sahadan alınan veriler karşılaştırılmıştır. Ortam titreşiminin baskın frekansının 4 Hz altında olmasına rağmen tren kaynaklı

titreşimlerin baskın frekansı 8 Hz ile 16 Hz arasında ölçülmüştür [Minghang et al., 2021].

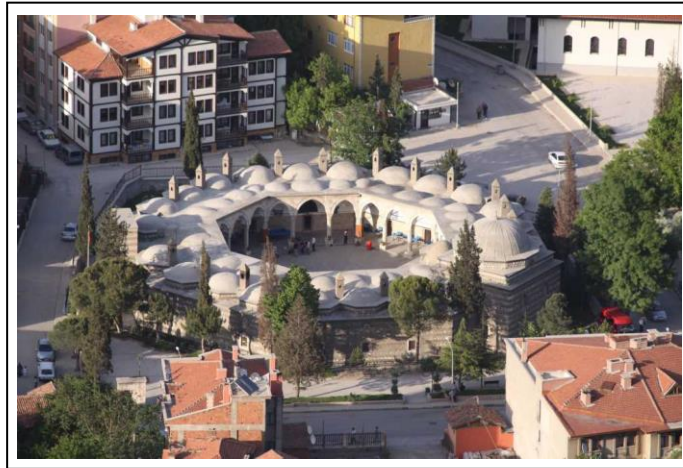
1.3. Taşınmaz Kültür Varlıklarının Korunması

Kültür ve Turizm Bakanlığı tarafından tescillenmiş tarihi taşınmazlara “eski eser” veya “kültürel varlık” denilmektedir. Tarihi yapılar açısından dünyanın en önemli koruma organizasyonu olarak kabul edilen The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) ise tarihi taşınmazlara “Kültür Varlığı” terimi kullanmaktadır. Kültür varlıkları; tarihi devirlerde bilimsel ve kültürel açıdan özgün değer taşıyan yer üstü, yer altı veya su altındaki bütün taşınır ve taşınmaz varlıklar olarak tanımlanmaktadır.

Taşınmaz kültür varlıkları; eğitim yapıları, askeri yapılar, ticaret yapıları, dini yapılar, anıtsal yapılar ve kültürel yapılar olarak alt başlıklara ayrılabilir.

- Eğitim Yapıları

Anadolu kültürü tarih boyunca eğitime önem vermiş, bu nedenle de eğitim yapıları yani medreseler kentlerimizin tarihsel odaklarını oluşturmuşlardır. Bu medreseler önceleri dinsel ağırlıklı olmakla birlikte gelişmelere de önem verilmiş, tıp (dâr-üş-şifâ), astronomi gibi dallarda özelleşen medreseler de yapılmıştır. Amasya Kapağası Medresesi, sekizgen plânlı özel bir mimarî sergilerken, daha çok görülen dikdörtgen açık ve kapalı avlulu medreseler de kültür varlıklarımızın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [Emre, 2016], [Web 5, 2022].



Şekil 1.6 Amasya Kapağası Medresesi.

- Askeri Yapılar

Anadolu coğrafyası, bulunduğu stratejik konum nedeni ile daima çatışmalara/savaşlara sahne olmuştur. Bu nedenle, yüzyıllar boyu önemli/stratejik noktalarda savunma yapıları yapılmıştır. Yapılan bu yapılara örnek olarak surlar (Diyarbakır Surları, İstanbul Surları) ve kaleler (Çanakkale Kilitbahir Kalesi) verilebilir.



Şekil 1.7: Tarihi Diyarbakır surları.

- Ticaret Yapıları

Anadolu, tarih boyunca çok önemli ticaret yollarının kilit noktasında yer almıştır. Bu ticaret yolları arasında büyük öneme sahip olan İpek Yolu ve Baharat Yolu üzerinde çok sayıda kervansaray inşa edilmiştir. Sonraki dönemlerde kent içi ticaretinin önem kazanmasıyla birlikte hanlar yapılmaya başlanmıştır. Afyonkarahisar tarihi Taşhan bu tür yapılara örnek olarak verilebilir [Web 6, 2022].



Şekil 1.8: Afyonkarahisar tarihi Taşhan.

- Dini Yapılar

Dini yapılar; tarihsel ve anı değerleri, simgesel özellikleri, mimari karakteristikleriyle kent kimliğini oluşturan önemli bir yapı grubudur. Bu yapılar kent dokusunda stratejik noktalarda bir odak konumunda olabileceği gibi kentlerin silüetinde de işaret ögesi olabilirler. İstanbul'daki Süleymaniye Camii ve Sultanahmet Camii, Edirne'deki Selimiye Camii, Köln'deki Köln Katedrali veya Vatikan'daki St. Pierre Katedrali dini yapılara örnek verilebilir [Yıldırım ve Yetim, 2020].



Şekil 1.9: Edirne Selimiye Cami.

- Anıtsal Yapılar

Bugün ülkemizde var olan birçok büyük ölçekli kültür varlığı bulunmaktadır. Bu yapılar, çok genel olarak bir dönemin mimarî biçimini, yapım tekniğini, estetik anlayışını, ait oldukları toplumun sosyo-kültürel, ekonomik ve politik niteliklerini yansıtan eserler olarak tanımlanabilir [Emre, 2016], [Web 7, 2022].



Şekil 1.10: İstanbul Dikilitaş.

- Kültürel Yapılar

Türkiye gibi çok zengin bir tarihsel geçmişi olan bir ülkede mimar i ürünlerin çeşitlenmesi de aynı derecede zengindir.  e me ve köprüler, saat kuleleri, Cumhuriyet Döneminin istasyon yapıları bu grup altında sıralanabilir [Web 8, 2022].



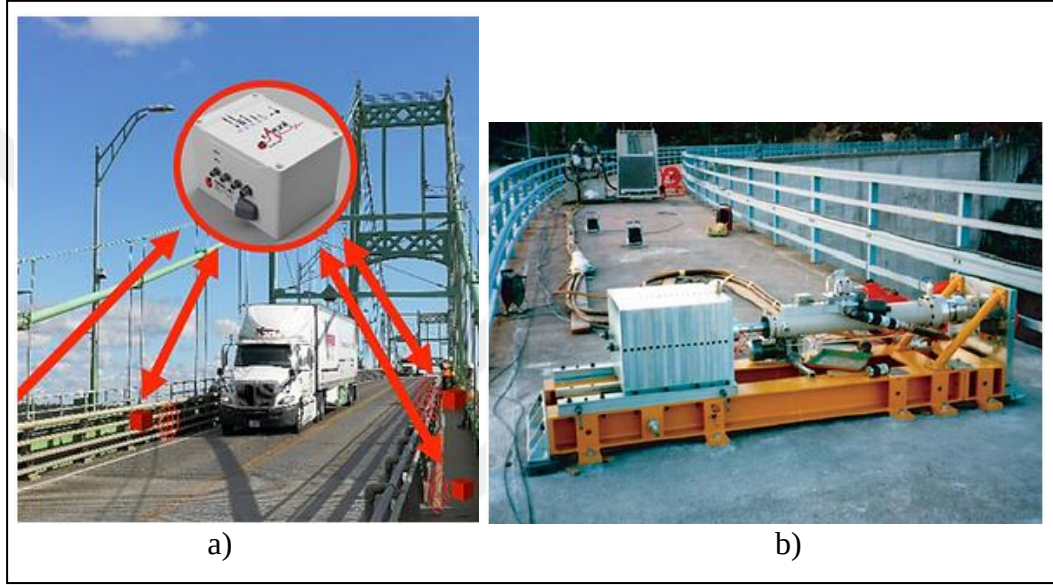
Şekil 1.11:  zmir Saat Kulesi.

1.4. Tarihi Taşınmaz Kültürel Varlıklarda  evresel Titre imlerin  ncelenmesi

Taşınmaz kültür varlıklarının korunması ve gelecek kuşaklara güvenle devredilmesi günümüzde üzerinde önemle durulan konuların başında gelmektedir. Ancak, basit geometrilerine rağmen tarihi taşınmazlar oldukça karmaşık davranışlar sergilemektedir. Bu nedenle öncelikle taşınmaz kültür varlıklarının davranışlarını doğru bir şekilde analiz etmek ve yapıların farklı yükler altındaki davranışlarını doğru bir şekilde anlamak oldukça önemlidir.

Analiz türlerini iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar; Deneysel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis - EMA) ve Operasyonel Modal Analiz (Operational Modal Analysis - OMA) olarak ayrılır. EMA, yapıya uygulanan bir etkiye karşılık yapının göstermiş olduğu tepkilerin  l  d   analiz türüdür. Ölçülen etki ve tepki sinyalleri arasında tanımlanan fonksiyon her bir yapı için karakteristik özellikte olan dinamik davranış parametrelerini içermektedir. OMA ise, çevresel titreşimlerin yapıya olan etkisinin incelendiği analiz türüdür ve mevcut yapıların dinamik davranış parametrelerinin tahribatsız muayenelerle elde edildiği deneysel bir yöntemdir.

Yapıların dinamik özellikleri hem zorlanmış hem de ortam titreşim testlerinden çıkarılabilir. Mod parametrelerinin EMA teknikleri ile tanımlanması, düşük frekans aralıklarına sahip büyük ölçekli yapıların mevcudiyetinde daha zor hale gelmektedir. Büyük ölçekli bir yapıya (köprü, baraj, vb.) kontrollü ve ölçülebilir bir uyarıcı kurmak karmaşık ve bazen uygulanabilir olmayan bir iştir. Bu sınırlamayı telafi etmek için, doğal ortam ve operasyonel yük (rüzgâr, trafik vb.) altında modal özellikleri türetmek için OMA olarak adlandırılan yenilikçi yöntem (ortam titreşim testi) uygulanır [Web 9, 2022].



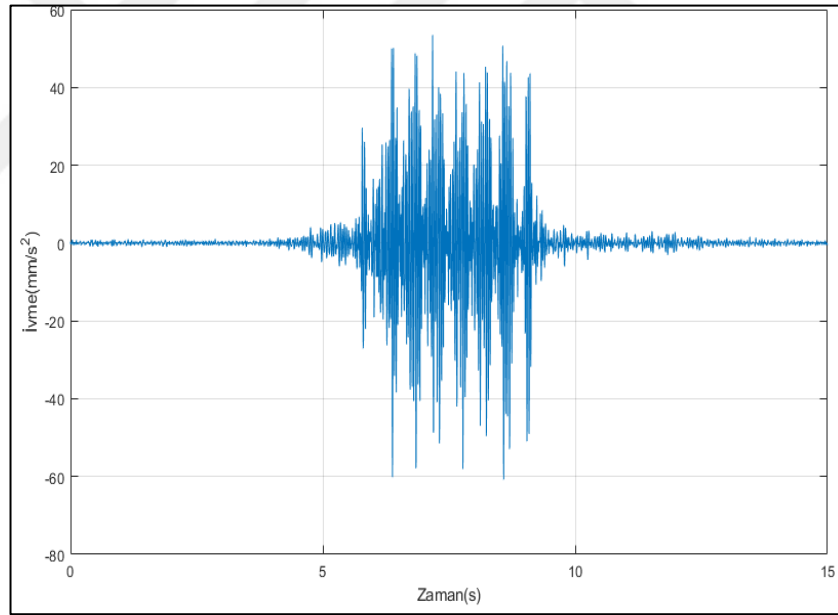
Şekil 1.12: a) Operasyonel yük kullanılarak yapılan operasyonel modal analiz,
b) Bir uyarıcı kullanılarak yapılan deneysel modal analiz.

2. FARKLI SAHALARDAN ALINAN TİTREŞİM KAYITLARI

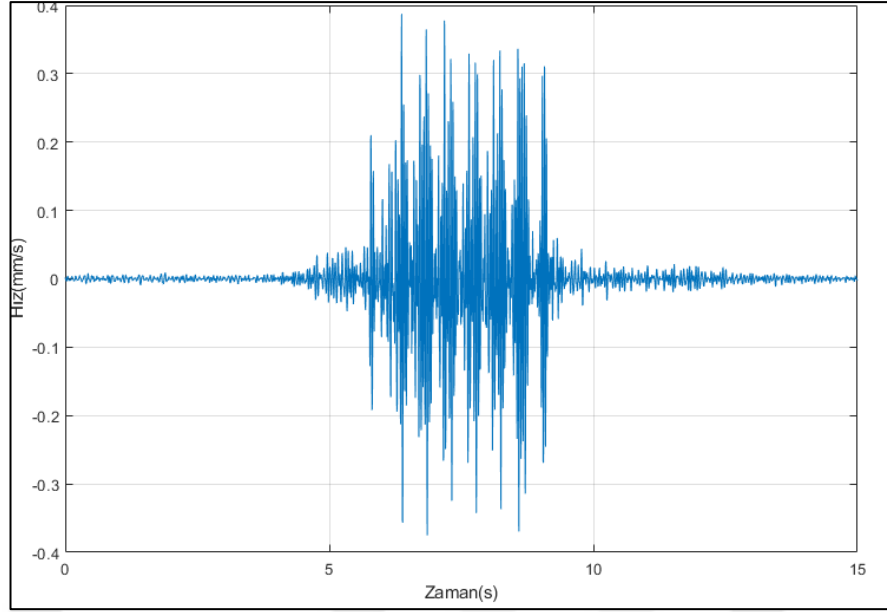
Çevresel titreşimlerin tarihi yapılara etkisinin araştırılması amacıyla farklı sahalardaki çeşitli kaynaklardan titreşim ivme kayıtları alınmıştır. Yüksek hızlı tren, yük treni, banliyö (bölgesel) treni, tramvay hattı ve şehir içi trafik hattından alınan bu ivme kayıtları, sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır.

2.1. İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Treni

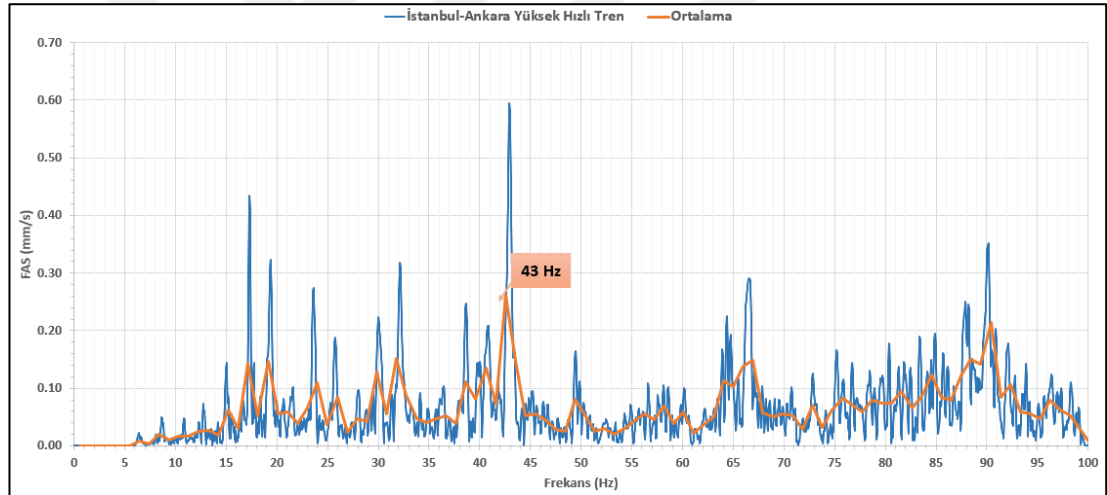
Çalışmanın birinci kısmında Sakarya/Adapazarı bölgesinden geçen yüksek hızlı trenden ivme kayıtları alınmıştır. Bu hat üzerinden alınan ivme kayıtları ile ivme-zaman, hız-zaman grafikleri ve fourier genlik spektrumları çizdirilmiştir.



Şekil 2.1: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin ivme-zaman grafiği.



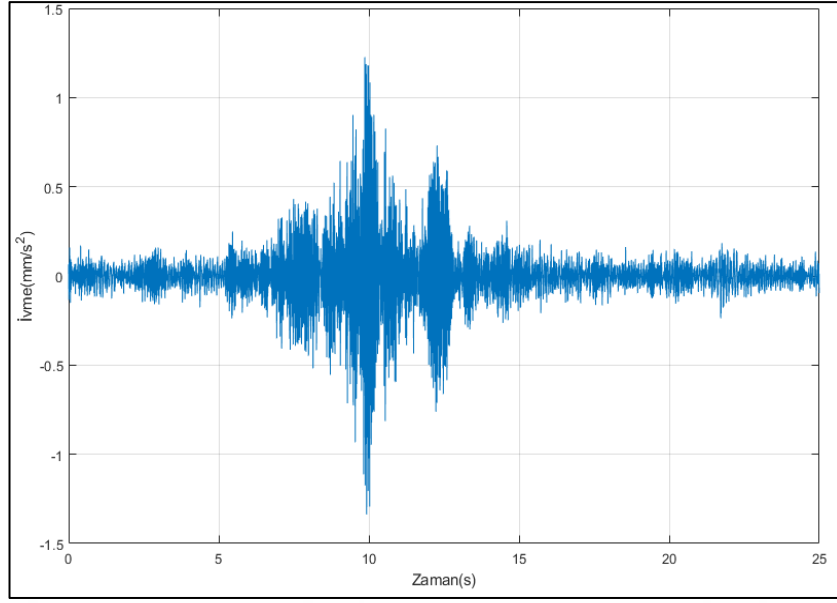
Şekil 2.2: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin hız-zaman grafiği.



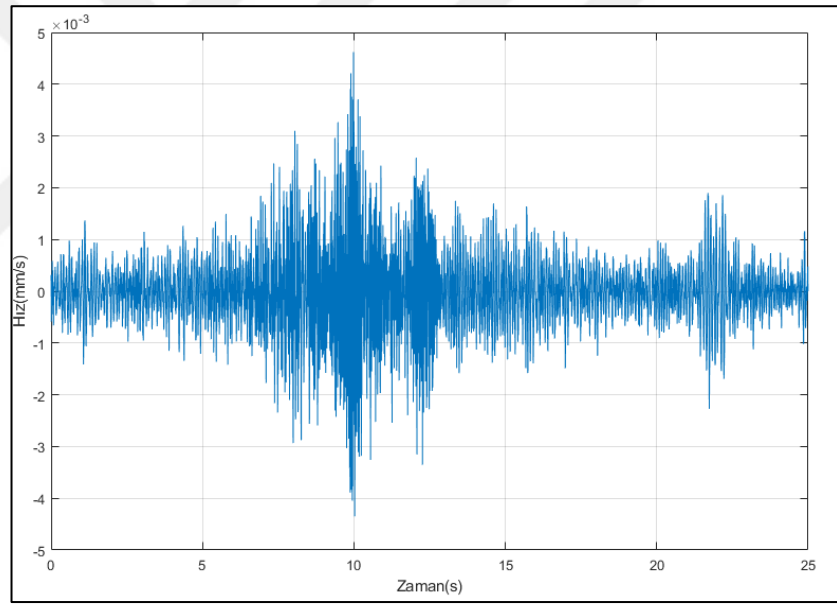
Şekil 2.3: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren verisinin fourier genlik spektrumu.

2.2. Pendik-Mithatpaşa Yük Treni

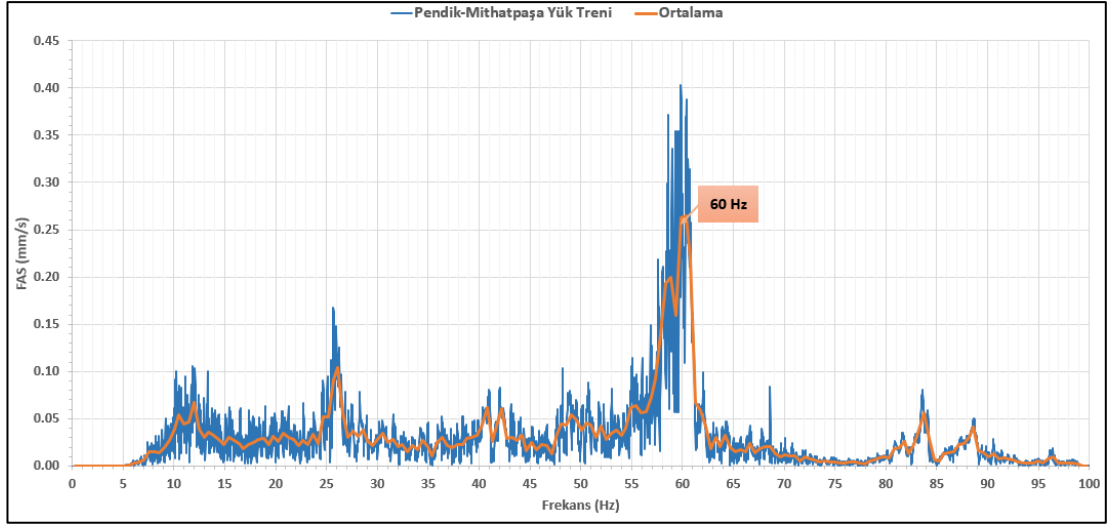
Çalışmanın ikinci kısmında Pendik-Mithatpaşa bölgesinden geçen yük treninden ivme kayıtları alınmıştır. Bu hat üzerinden alınan ivme kayıtları ile ivme-zaman, hız-zaman grafikleri ve fourier genlik spektrumları çizdirilmiştir.



Şekil 2.4: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin ivme-zaman grafiği.



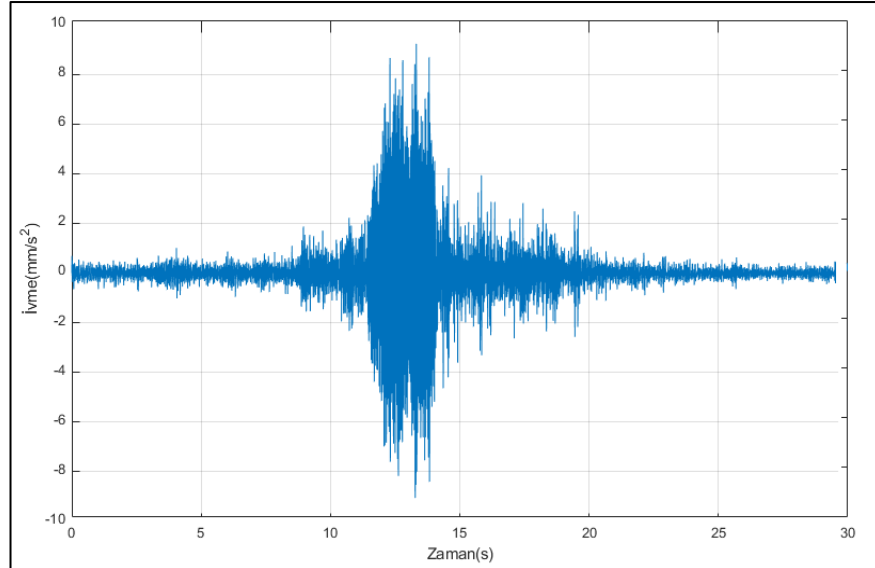
Şekil 2.5: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin hız-zaman grafiği.



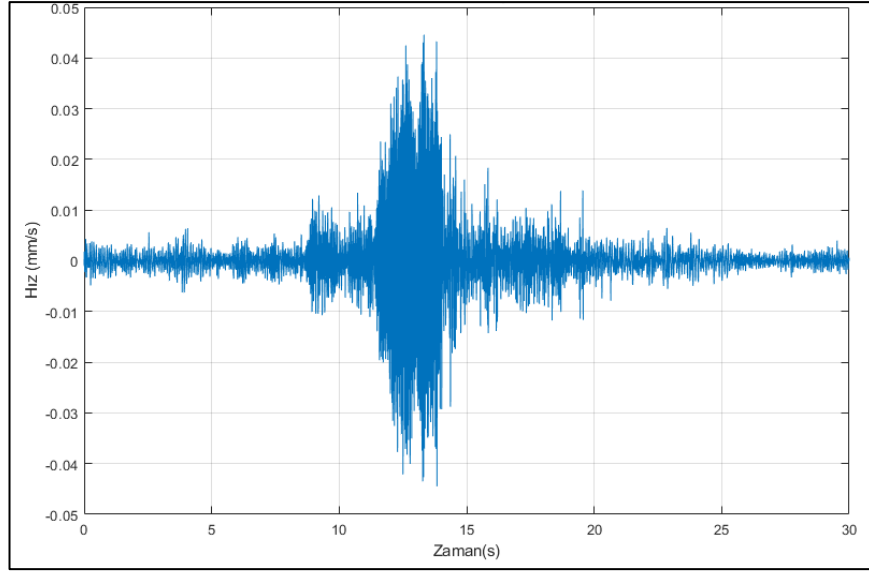
Şekil 2.6: Pendik-Mithatpaşa yük treni verisinin fourier genlik spektrumu.

2.3. Pendik-Adapazarı Bölgesel (Banliyö) Treni (Ada Ekspresi)

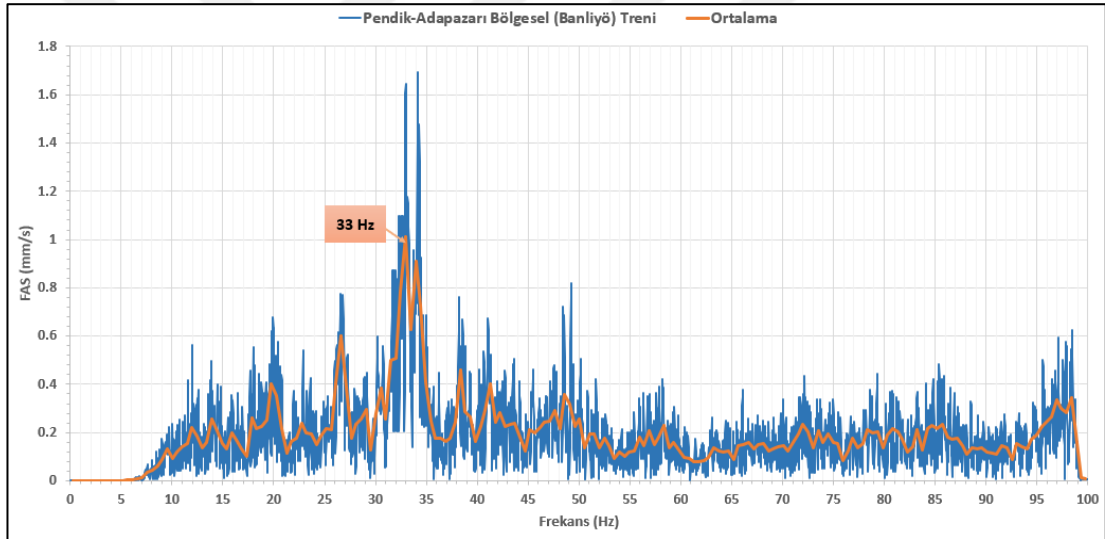
Çalışmanın üçüncü kısmında Pendik-Adapazarı bölgesinden geçen bölgesel trenden ivme kayıtları alınmıştır. Bu hat üzerinden alınan ivme kayıtları ile ivme-zaman, hız-zaman grafikleri ve fourier genlik spektrumları çizdirilmiştir.



Şekil 2.7: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin ivme-zaman grafiği.



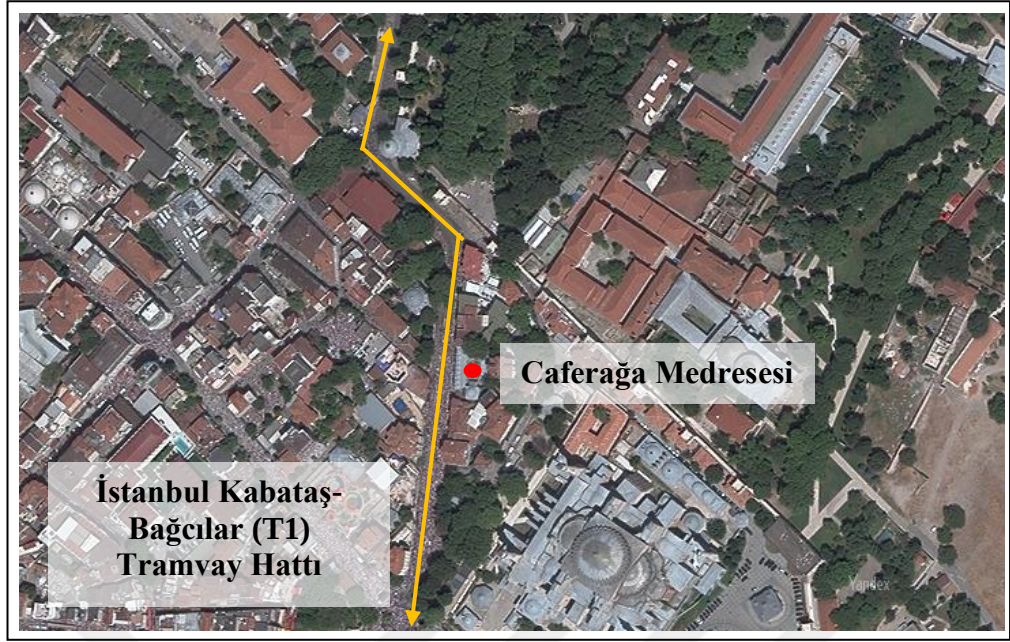
Şekil 2.8: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin hız-zaman grafiği.



Şekil 2.9: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren verisinin fourier genlik spektrumu.

2.4. İstanbul Kabataş-Bağcılar Tramvay Hattı (T1)

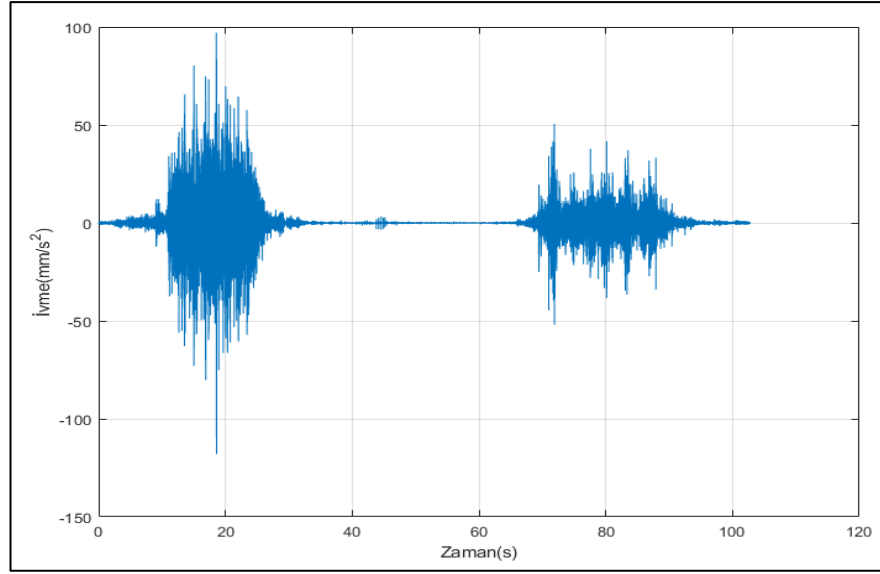
Çalışmanın dördüncü aşamasında İstanbul Fatih'te bulunan Kabataş-Bağcılar (T1) tramvay hattına yakın bir konumda bulunan tarihi Caferağa Medresesi önünden ivme kayıtları alınmıştır. Bu hat üzerinden alınan ivme kayıtları ile ivme-zaman, hız-zaman grafikleri ve fourier genlik spektrumları çizdirilmiştir.



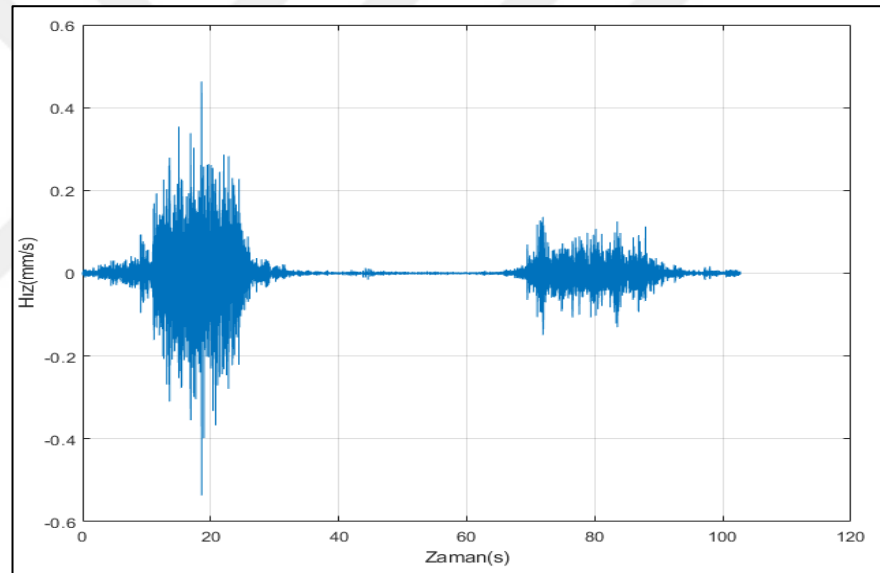
Şekil 2.10: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay kaydı için Caferağa Medresesi çevresi test noktası.



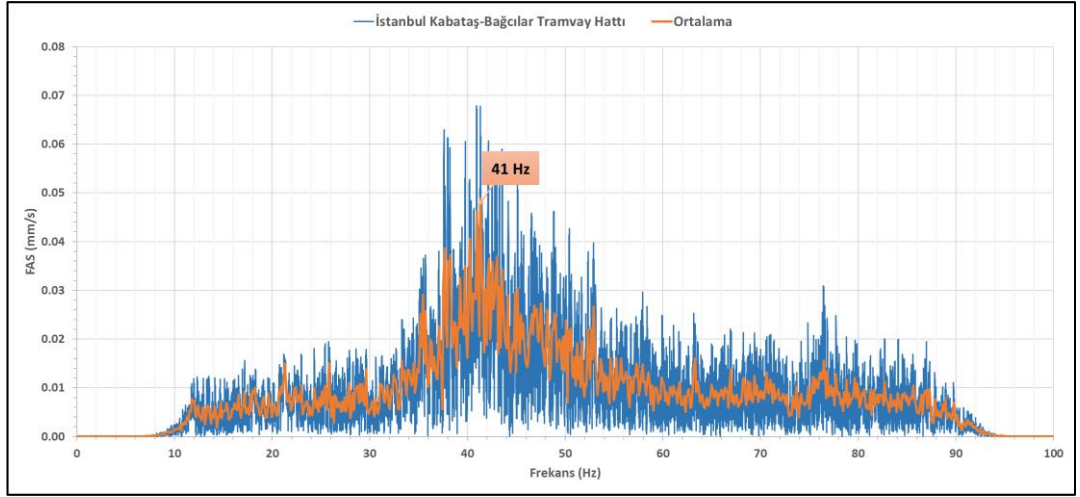
Şekil 2.11: Tarihi Caferağa Medresesi önünden alınan kayıtlar.



Şekil 2.12: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin ivme-zaman grafiği.



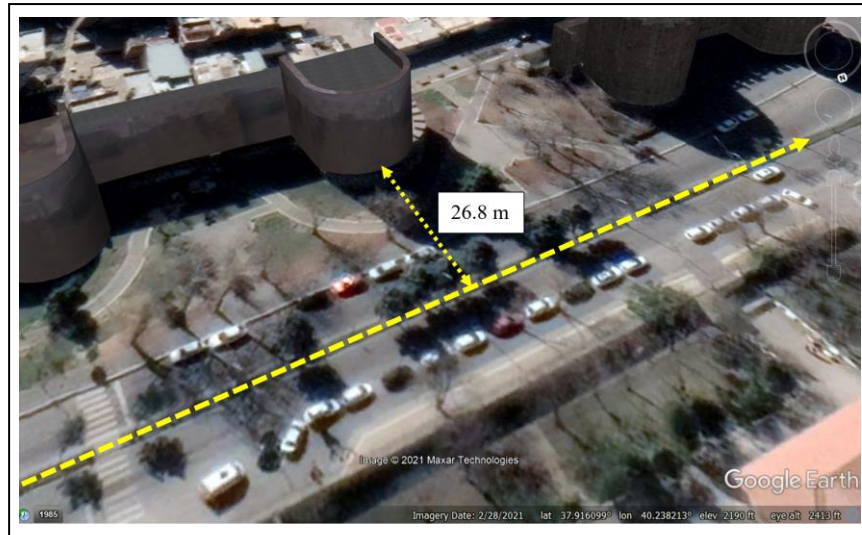
Şekil 2.13: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin hız-zaman grafiği.



Şekil 2.14: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay verisinin fourier genlik spektrumu.

2.5. Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi Şehir İçi Trafik Hattı

Çalışmanın beşinci aşamasında Diyarbakır ili Sur ilçesinde tarihi Diyarbakır Surları önündeki Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi üzerinden trafik kaynaklı çevresel titreşim kaydı alınmış ve çevresel titreşimlerin sur yapısına etkisi araştırılmıştır. Sur yapısı sonlu elemanlar modelinin kalibre edilebilmesi için cihaz, sur yapısının içine konumlandırılmıştır. Bu hat üzerinden alınan ivme kayıtları ile ivme-zaman, hız-zaman grafikleri ve fourier genlik spektrumları çizdirilmiştir.



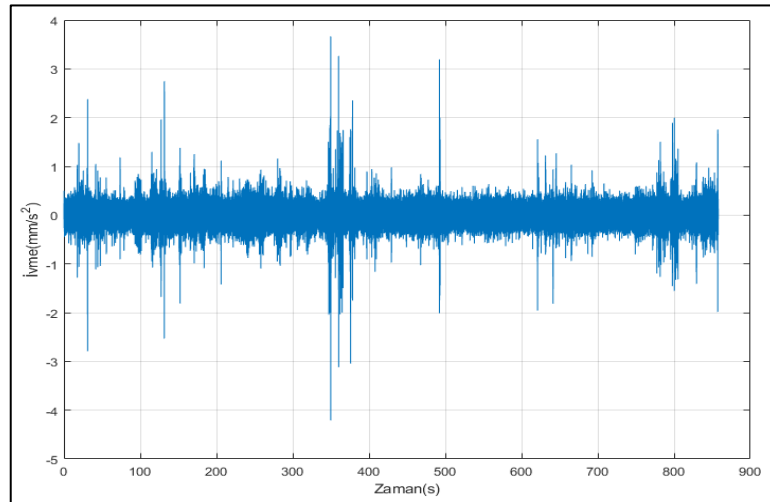
Şekil 2.15: Dağ Kapı Meydanı test sahası.



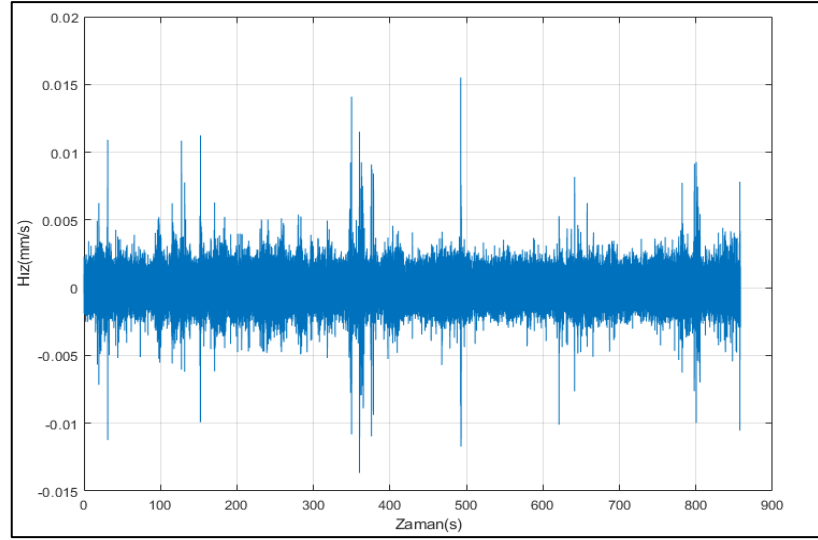
Şekil 2.16: a) Dağ Kapı Meydanı sur yapısı önü cihaz konumu, b) Dağ Kapı Meydanı sur yapısı çevresi cihaz konumu.

Cihaz, titreşimlerin frekans aralığının daha net bir şekilde belirlenebilmesi için saniyede 200 veri kaydedecek şekilde ayarlanmıştır. Zaman aralığı, $\Delta t = 0.005$ olarak belirlenmiştir.

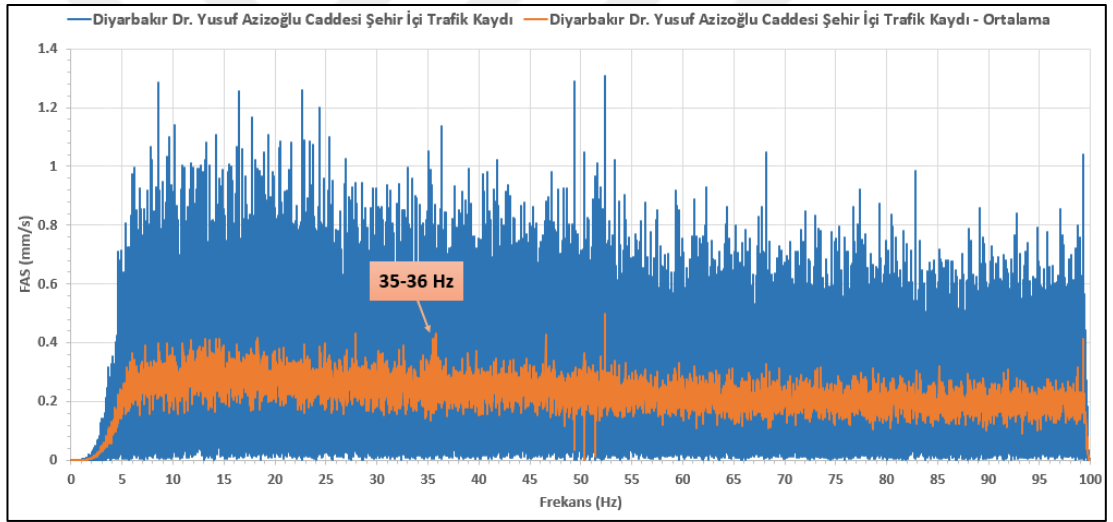
Bu tez çalışması kapsamında cihazlardan ivme olarak alınan kayıtlar yapılan integrasyon ile hız verisine dönüştürülmüştür. Yapılan bu integrasyondan sonra veriler Matlab’de ‘Detrend’ komutu ile düzeltilmiştir. İlgili norma göre zaman alanındaki en yüksek hız değeri alınmış ve FFT analizi sonucunda elde edilen pik değeri ile çarpılarak en yüksek genlik değeri bulunmuştur. Frekans değerleri 10 Hz-100 Hz aralığında filtrelenmiştir.



Şekil 2.17: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin ivme-zaman grafiği.



Şekil 2.18: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin hız-zaman grafiği.



Şekil 2.19: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı verisinin fourier genlik spektrumu.

3. DİYARBAKIR SURLARI'NIN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE TARİHÇESİ

3.1. Diyarbakır Surlarının Tarihi

Mezopotamya'nın kuzeyinde yer alan ve Tarihi İpek Yolu'nun en önemli ticaret merkezlerinden biri olan Diyarbakır, tarihi boyunca birçok açıdan önemli bir yaşam merkezi olmuştur. Yaklaşık 9000 yıllık geçmişe sahip olan şehre; Hurriler, Mittaniler, Asurlular, Urartular, Persler, Romalılar, Bizanslılar, Büyük Selçuklular, İnaloğulları, Artuklular, Eyyübiler, Akkoyunlular, Safeviler ve Osmanlılar gibi pek çok köklü medeniyet ev sahipliği yapmıştır. Önemli bir konumda olması nedeniyle şehrin savunulması ve korunabilmesi için şehrin çevresine surlar ve burçlar yapılmıştır. Çin Seddi ve İstanbul Surları'ndan sonra dünyanın en uzun ve en sağlam surlarından biri olan Diyarbakır Surları, uzaydan görülebilen ikinci tarihi yapı olma özelliğini taşımaktadır [Çidam, 2007]. Kuşbakışı olarak bir kalkan balığını andıran Tarihi Diyarbakır Surları, 4 Temmuz 2015 tarihinde Almanya'nın Bonn kentinde düzenlenen Dünya Miras Komitesi 39. Dönem Toplantısı'nda "Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzaj Alanı" ismiyle Türkiye'nin 14. miras alanı olarak UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne girmiştir.



Şekil 3.1: Tarihi Diyarbakır surları.

3.2. Surların Yapısal Özellikleri ve Mimarisi

Dünyanın en iyi korunmuş şehir surlarından biri olan Diyarbakır surlarının en önemli özelliklerinden biri, ana yapı malzemesinin yöresel malzeme olan bazalt taşı olmasıdır. Sur duvarlarının ve burçların dış yüzeylerinde ince yonu bazalt taşı, iç yüzeylerde ise genellikle daha az işlenmiş, kaba yonu taşlar kullanılmıştır. Burçların kubbe ve tonozlarında tuğla malzeme, bazı yazıtlarda ise kireç taşı kullanılmıştır [Toprak ve Kavak, 2013]. Toplam uzunluğu yaklaşık 5 km olan surların yükseklikleri 8 m ile 12 m; genişlikleri ise 3 m ile 5 m arasında değişmektedir. Kenti çevreleyen surların kuzeydoğu köşesinde İç Kale yer almaktadır. Surların ilk inşa edildiği bölgenin İç Kale'nin bulunduğu yer olduğu farklı kaynaklarda ifade edilmiştir [Şahin Güçhan, 2005]. Aşamalı olarak inşa edilen Diyarbakır surlarında toplamda 82 adet burç ve 4 adet ana giriş kapısı bulunmaktadır. Bu kapılar Dağ Kapı, Urfa Kapı, Yeni Kapı ve Mardin Kapı olarak isimlendirilmiştir. Burçlar genellikle 3 ya da 4 katlı olarak inşa edilmiş olup içlerinde üst katlara erişim için birer adet merdiven bulunmaktadır. Üst kat döşemelerinde kubbe, kemer ve tonozlar kullanılmıştır. Burçların ve sur duvarlarının kalınlığı yaklaşık 1.40-5.00 m arasında değişmektedir [Nabikoğlu ve Dalkılıç, 2003]. 1930 yılında şehrin hava almasına engel olduğu gerekçesiyle Valilik emriyle, Dağ Kapı civarındaki surların bir bölümü yıktırılmıştır. Fransız arkeolog ve gezgin olan Albert Louis Gabriel'in 1932 yılında Millî Eğitim Bakanlığı'na verdiği ayrıntılı raporla yıkımın durdurulmasına karar verilmiştir. Olay sonrasında yapılan incelemelerde 3 burcun yıkıldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda Albert Louis Gabriel 1932 yılında Diyarbakır'da çeşitli çalışmalar yapmış ve şehrin planını hazırlamıştır [Kejanlı ve Dinçer, 2011], (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Diyarbakır surları planı, 1932.

İngiliz arkeolog ve sanat tarihçisi Keppel Archibald Cameron Creswell'in 1930'larda Diyarbakır'da yaptığı araştırmalarda surların ve bazı burçların hasarlı olduğundan bahsetmiş [Creswell, 1932] ve bu hasarları fotoğraflarla belgelemiştir.

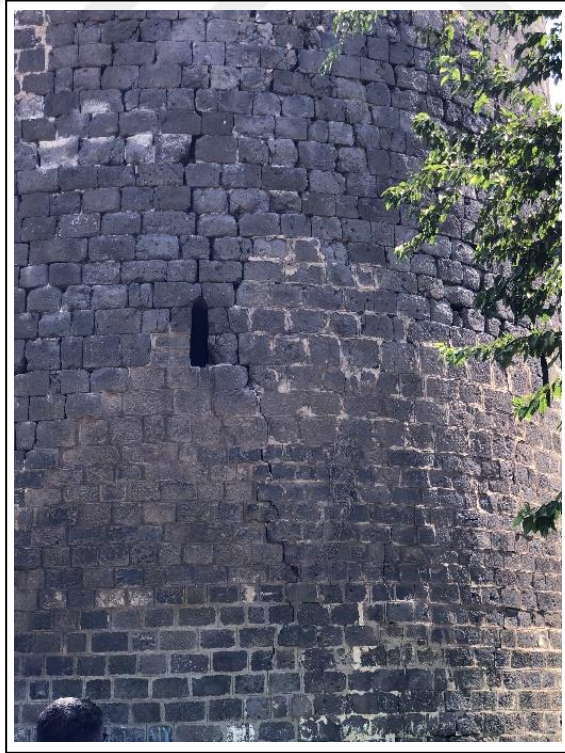


Şekil 3.3: a) 1930'larda Diyarbakır surları genel görünümü, b) 1930'larda Diyarbakır surlarına ait burçlar, c) 1930'larda Diyarbakır surlarında meydana gelen hasarlar.

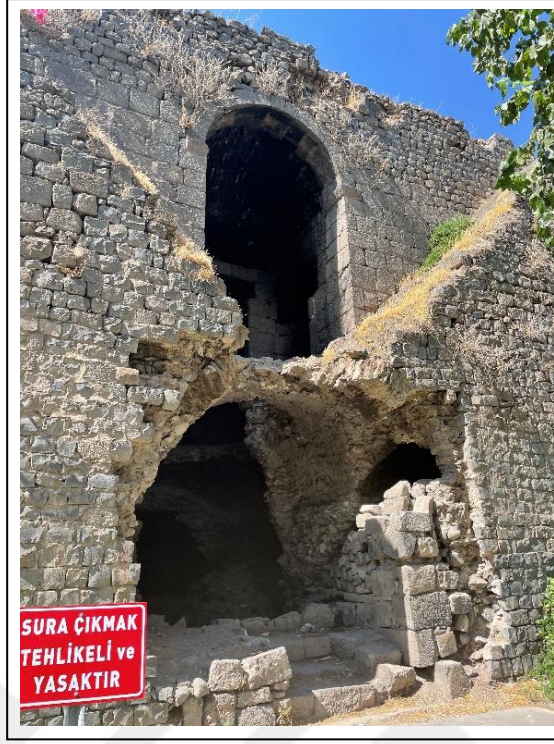
3.3. Surların Mevcut Durumu ve Hasar Analizi

Tarihi Diyarbakır surlarında yapılan incelemeler sonucunda birçok surda hasarlar ve mevcut durumda bozulmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu bozulmaların nedenleri incelenecek olursa; kötü kullanım/bakımsızlık, doğal afetler, insan kaynaklı bozulmalar, trafik gibi alt başlıklarda toplanabilir.

Surlarda doğal sebeplerden dolayı hasar gören kısımların göz ardı edilip zamanında onarılmaması sebebiyle bu hasarlar daha büyük sorunlara neden olmakta ve tehlike oluşturmaktadır. Yapıdaki en önemli problemlerin malzeme kayıplarına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Çeşitli nedenlerle yıkılmış duvarlar, yerinden oynamış taşlar can güvenliğini tehdit etmektedir. Ayrıca surların bazı bölümlerinde çevre koşullarından kaynaklı derz boşalmaları olduğu görülmüştür. Zamanla yapının tamamına yayılmış olan bu derz boşalmaları, bazı bölümlerde çatlamalara sebep olmuştur. Tonoz bölümlerinin bazı alanlarının yıkıldığı ve bazı tonozların tamamen boşta kaldığı tespit edilmiştir. Yine taş malzemelerin üzerindeki sıvaların dökülmesi, pullanma, aşınma gibi sorunlar olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4: Burçlarda gözlemlenen derz boşalmaları, çatlaklar ve bozulmalar.



Şekil 3.5: Burçlarda gözlemlenen derz boşalmaları, çatlaklar ve bozulmalar.



Şekil 3.6: Burçların giriş kapılarında oluşan yıkılmalar.



Şekil 3.7: Zamanla yıkılan döşemeler.

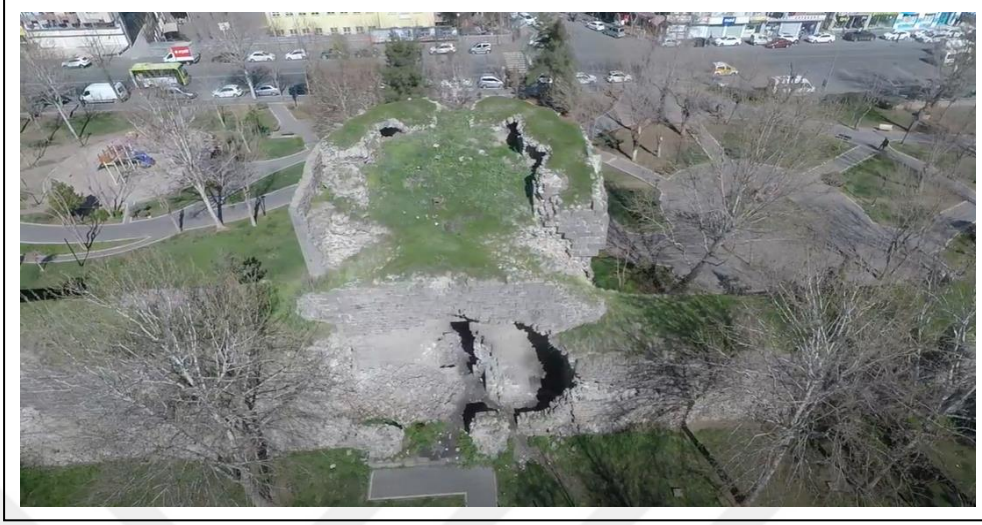
Doğal afetler, tektonik hareketler, depremler ve olağanüstü rüzgarlar surlarda yıkılmalara neden olmuştur. Albert Gabriel, Yeni Kapı'nın güneyindeki 178 metrelik uzun bölümün deprem sonucu ters döndüğünü düşünmektedir [Temel, 2012].



Şekil 3.8: Deprem sonucu yıkılıp ters döndüğü düşünülen duvar.

İnsan kaynaklı bozulma sebeplerinden en büyük ve en tahribatlı olanı surların bir bölümünün şehrin hava almasını sağlamak için bilinçli bir şekilde yıktırılmasıdır. Yıkımda çıkan taşların ev yapımında kullanılmasının teşvik edilmesiyle beraber, yıkımın durdurulmasından ardından da çevrede gecekondü yapımı için sur taşlarının sökülmesine devam edildiği gözlemlenmiştir. Böylelikle surların birçok bölümünde izinsiz kazı çalışmaları yapılmış ve geçitler oluşturulmuştur. Sur yakınlarına yapılan

evlerin bacalarından çıkan yoğun duman da yine sur duvarlarında ciddi kirlenmelere sebep olmaktadır.



Şekil 3.9: Burçta yapılan bölgesel yıkımın drone görüntüsü.



Şekil 3.10: a) Taşların sökülmesiyle oluşan geçit, b) Ateş yakılmasından dolayı oluşan kirlenmeler.

Sur yapılarının olduğu bölgede trafik yoğunluğu fazladır. Bu sebepten trafiğin neden olduğu titreşim ve araç çarpmaları sonucunda yapılar zarar görmüştür. Önceki tarihlerde bazı sur içlerinin otopark olarak kullanıldığı da bilinmektedir [Web 10, 2021].

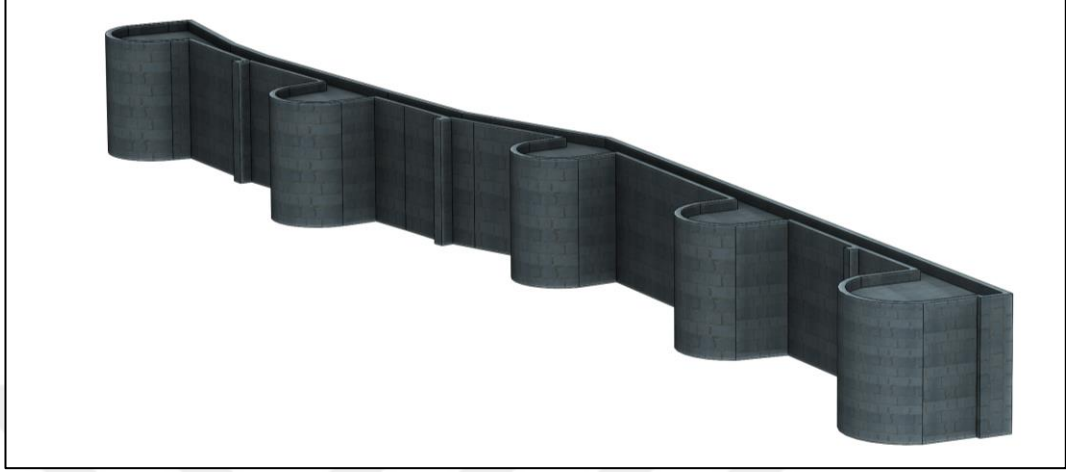


Şekil 3.11: Tarihi Diyarbakır surları etrafındaki trafik durumu.

3.4. Surların Sayısal Modelinin Hazırlanması

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler yapıların ve zeminlerin davranışlarının sayısal olarak analiz edilmelerini kolaylaştırmıştır. Sayısal (matematiksel) modelleme, yapının tamamının veya belli bir bölümünün çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışının gözlenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, sayısal modelleme çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi kullanımı oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi fiziksel bir yapının matematiksel olarak tanımlanmasıdır. Diğer bir ifadeyle, çeşitli mühendislik problemlerine çözüm arayan sayısal (nümerik) bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminin temeli, karmaşık problemleri basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Bu yaklaşımda, karmaşık problemler farklı büyüklükteki basit parçalara ayrılarak matematiksel olarak ifade edilir. Eleman olarak adlandırılan bu parçalar, köşelerini oluşturan düğüm noktalarıyla birbirine bağlanarak süreklilik sağlanır. Çözüm aşamasında ise her bir parça ayrı ayrı ele alınarak matematiksel denklemler yazılır ve problemin bütünü için çözüm üretilir. Diyarbakır surlarında çevresel titreşimlerin surlara etkisinin araştırılması amacıyla taşıyıcı sistem analizi ve yapısal değerlendirme çalışmaları kapsamında surların sayısal modelinin hazırlanmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında ANSYS Workbench programı tercih edilmiş ve Diyarbakır surlarının üç boyutlu modeli SolidWorks programı yardımıyla oluşturularak ANSYS Workbench programına aktarılmıştır. Sayısal modellerin doğruluğunu analiz etmek amacıyla sahadan elde edilen ivme kayıtları dikkate alınmış ve yapının hâkim periyodu ile

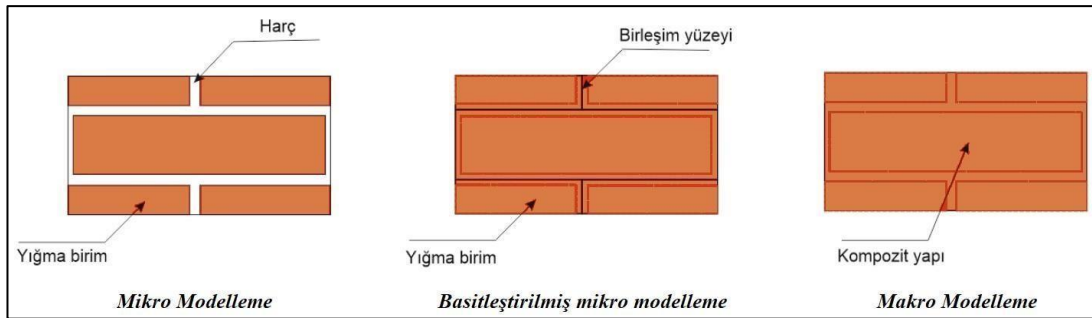
modellerden elde edilen hâkim periyodun birbiri ile uyumlu olması amacıyla sayısal modelde kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Ön değerlendirme ve kalibrasyon çalışmalarının ardından dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12: Diyarbakır surlarına ait 3D modelleme.

Sonlu elemanlar analizlerinde ele alınan parametreler ve yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Yapının sonlu elemanlar modeli hazırlanırken yapıdaki yığma birim sayısı, yığma birimlerin kendini tekrar düzeni, yapının geometrisi, yapının inşa tarihi ve yığma birimlerin düzeni dikkate alınmış ve yığma yapıların modellemesinde sıklıkla kullanılan makro modelleme tekniği tercih edilmiştir [Lourenço, 1996].



Şekil 3.13: Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri.

- Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme özellikleri olarak [İzgi, 2020] tarafından yapılan “Tarihi Yapıların Yapısal Analizi: Diyarbakır Surları Örneği” başlıklı yüksek lisans tezinde verilen değerler alınmıştır.

Tablo 3.1: Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Poisson Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Bazalt Taşı	20140	2280	0.236	57.66	6.625
Horosan Harcı	1100	1340	0.2	6.25	0.625
Harman Tuğlası	6085	1930	0.2	6.6	0.42

- Makro modelleme çalışmalarında yığma duvarların elastisite modülleri [İzgi, 2020]'den elde edilen veriler dikkate alınarak aşağıda verilen formül yardımıyla belirlenmiştir. Burada; E_t yığma elemanların elastisite modülünü, E_h harcın elastisite modülünü, t_t yığma elemanların kalınlığını, t_h harcın kalınlığını, Ψ_t yığma birimlerin Poisson oranını ve Ψ_h harcın Poisson oranını temsil etmektedir.

$$\frac{1}{E_d} = \frac{\Psi_t}{E_t} + \frac{\Psi_h}{E_h} + 2\Psi_t\Psi_h \left(\frac{\nu_t E_h - \nu_h E_t}{\Psi_t(1-\nu_h)E_t + \Psi_h(1-\nu_t)E_h} \right) \left(\frac{\nu_h}{E_h^2} - \frac{\nu_t}{E_t^2} \right)$$

$$\Psi_t = \frac{t_t}{t_t + t_h}$$

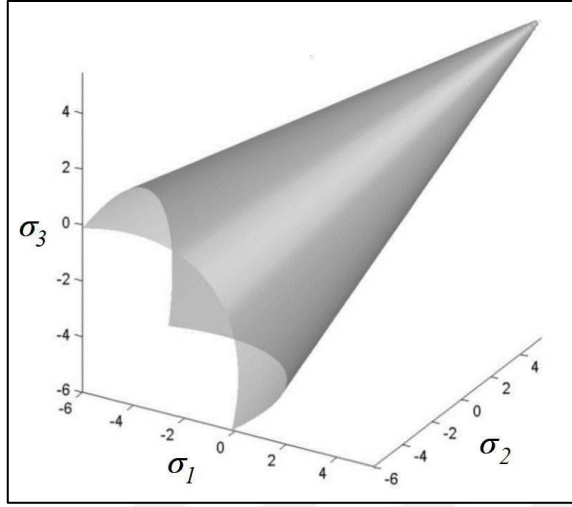
$$\Psi_h = \frac{t_h}{t_t + t_h}$$
(3.1)

- Yapısal analiz çalışmalarında surların davranışını daha iyi anlayabilmek amacıyla doğrusal olmayan malzeme modellemesi yapılmıştır.
- Yapıyı oluşturan malzemelerin kırılma durumları dikkate alınarak yığma duvarların çekme dayanımlarının düşük basınç dayanımlarının yüksek olması sebebiyle Drucker-Prager kırılma modeli [Drucker et al., 1957] tercih edilmiştir. Bu modelin oluşturulması için gerekli olan malzeme parametreleri (içsel sürtünme açısı ϕ ve kohezyon c) verilen denklemler yardımıyla elde edilmiştir.

$$\phi = 0,145f_{c0} + 49,71 \quad (3.2)$$

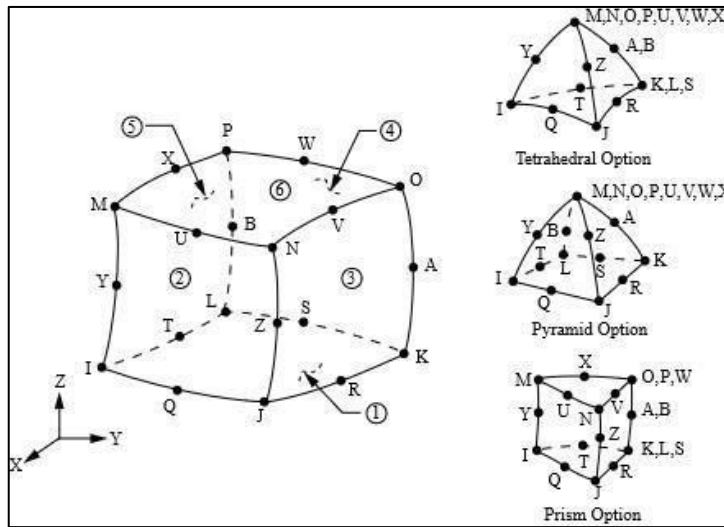
$$c = 0,1065 f_{c0} + 0,531 \quad (3.3)$$

* f_{c0} = Yığma birimin MPa cinsinden basınç dayanımı

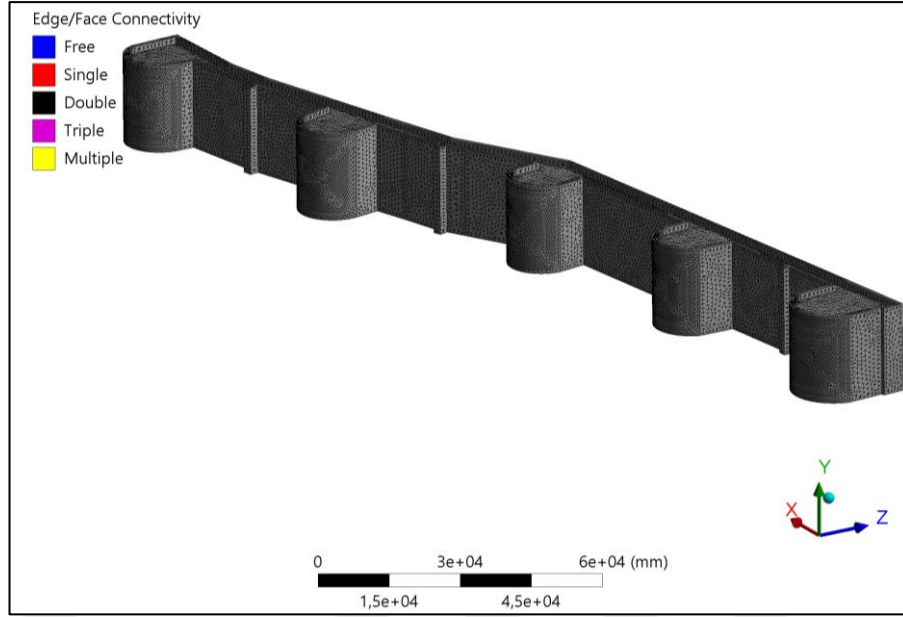


Şekil 3.14: Drucker-Prager akma yüzeyi.

- Yapının temel kısmı modellenmemiş, elastik zemin ve surların zemine ankastre bağlı olduğu kabulleri yapılmıştır.
- Modelleme aşamasında ANSYS kütüphanesinde bulunan 20 düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında 3 serbestlik derecesine sahip eleman modeli kullanılmıştır. İnceleme yapılan surların sonlu eleman modelinde 669848 düğüm noktası ve 374480 eleman kullanılmıştır.

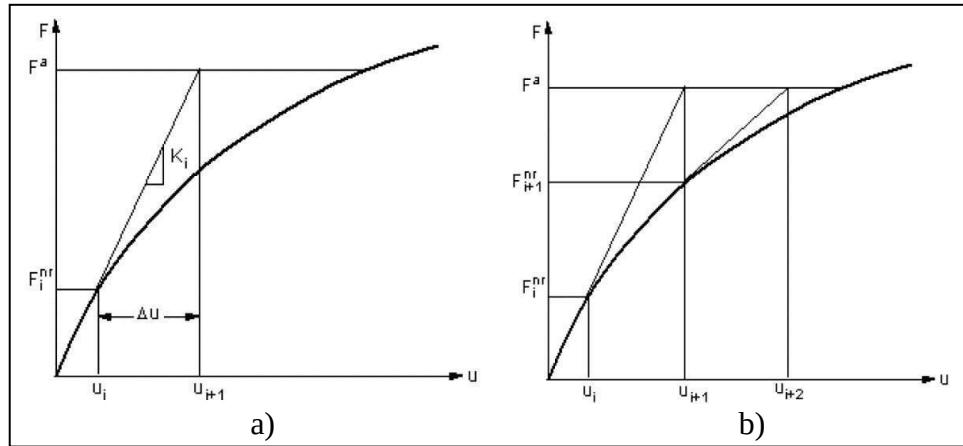


Şekil 3.15: Modelleme aşamasında kullanılan eleman modeli.



Şekil 3.16: Dinamik analizlerin yapıldığı sonlu elemanlar modeli.

- Modelleme aşamasında yapıda gözlemlenen hasarlar ve bozulmalar dikkate alınmayarak yapının hasarsız durumu dikkate alınmış ve analizler bu model üzerinden gerçekleştirilmiştir.
- Yapının taşıyıcı sistemindeki davranışını doğru gözlemleyebilmek amacıyla yapısal olmayan bazı detaylar basitleştirilmiştir.
- Analizlerde Newton-Raphson (N-R) iteratif yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.17: a) Newton-Raphson ilk iterasyon, b) Newton-Raphson sonraki iterasyon.

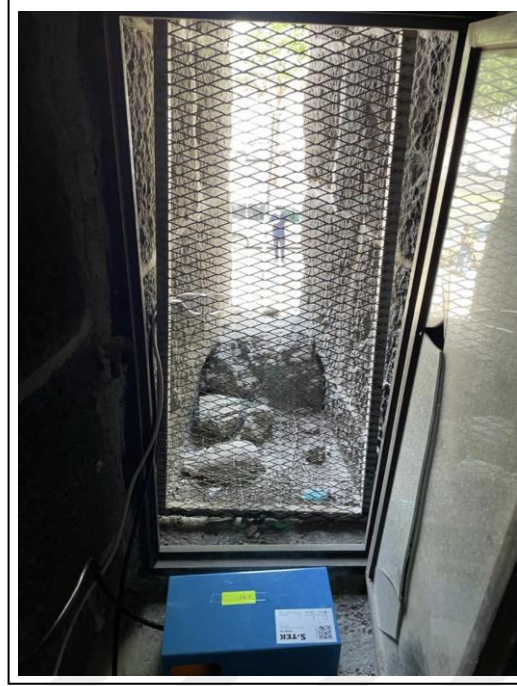
4. ÇEVRESEL TİTREŞİMLERİN DİYARBAKIR SURLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri

Sonlu elemanlar metodu, mühendislik alanında sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar metodunda sistem, daha küçük bileşenlere ayrılır. Sınır değer problemlerinin sonucunda cebirsel denklem sistemi elde edilir ve bu denklem sistemi çeşitli metotlar ile çözülür. Bu çözümde elde edilen sonuçlar temel fonksiyon cinsindendir ve bu fonksiyonlar yardımıyla asıl çözümün interpolasyonu yapılır. Bir sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi sonlu elemanlar analizi olarak adlandırılır. Karmaşık yapıların analizinde tercih edilen bir analiz yöntemidir.

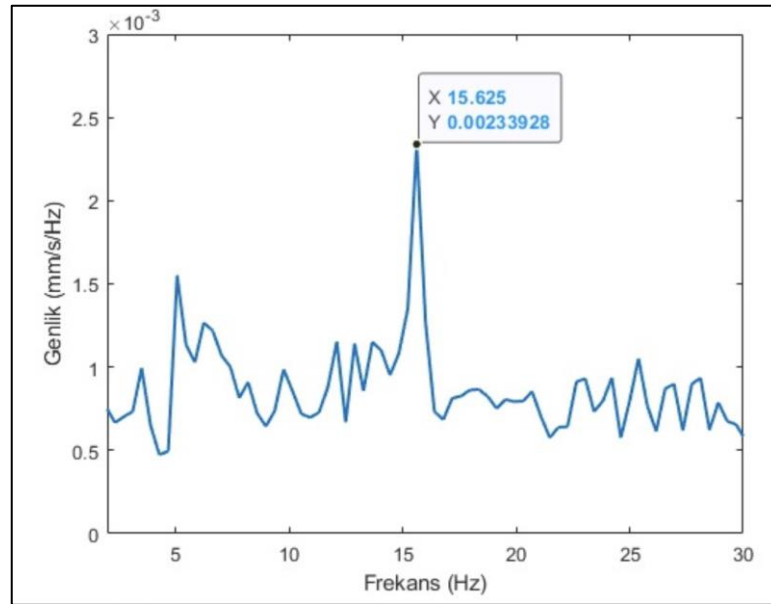
4.1.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Kalibrasyonu

Sonlu elemanlar analizlerinde öncelikle hazırlanan modelin doğruluğunu belirlemek amacıyla kalibrasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda amaç sahadan elde edilen çevresel titreşim verilerini kullanarak sonlu eleman modelini en doğru şekilde hazırlamaktır. Bu aşamada öncelikle sahadan alınan çevresel titreşim verileri incelenmiş ve kayıt alınan surun hâkim frekansı deneysel verilerle belirlenmiştir.



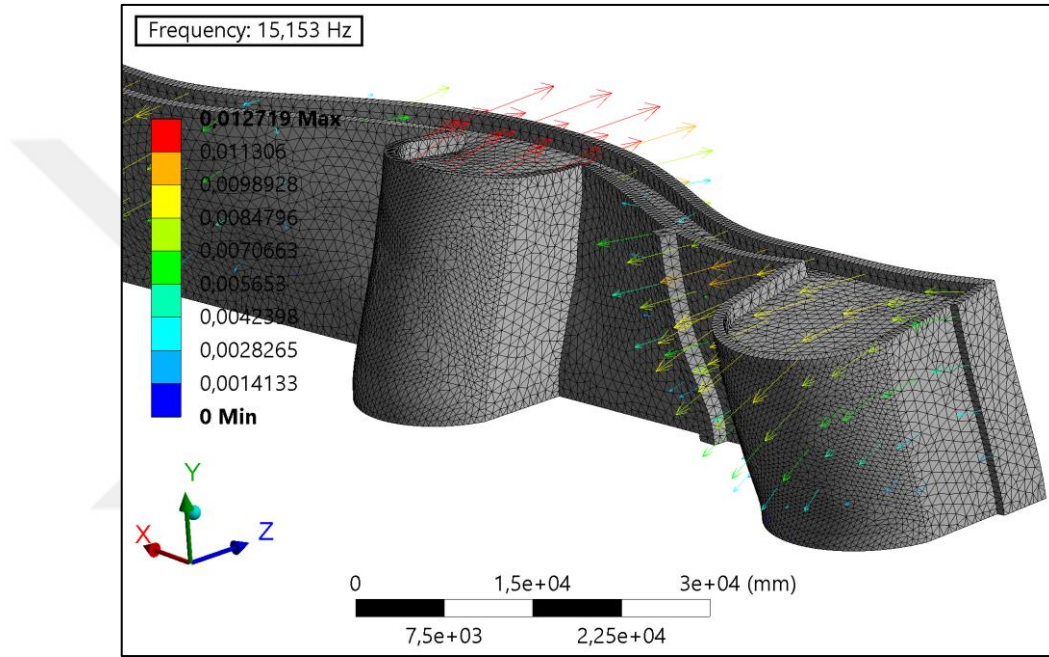
Şekil 4.1: Yapı içindeki cihazın yerleşimi.

Bu aşamada surun yola dik yönünde zayıf bir ataletle sahip olması nedeniyle hâkim frekansta sahadan alınan verilerin dik doğrultusundan elde edilen değerler dikkate alınmış ve yapı içindeki cihazdan elde edilen veri ile yapının hâkim frekansı 15.625 Hz olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2: Çevresel titreşim kaydı alınan surda yapı içindeki cihazdan elde edilen hâkim frekans.

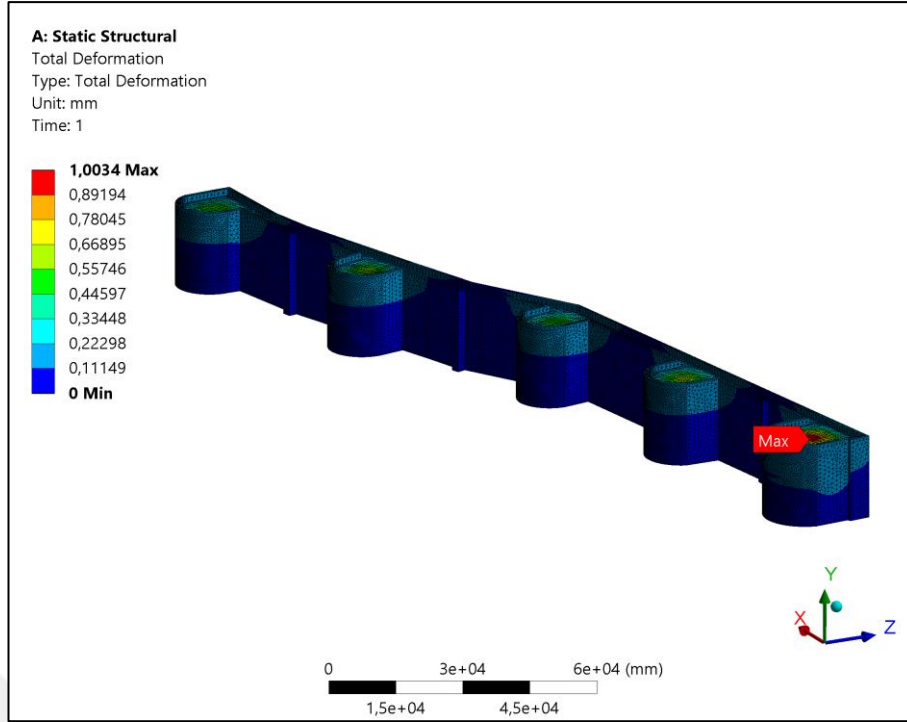
Yapı içindeki cihazdan elde edilen frekans değerleri sonlu elemanlar kalibrasyonu çalışmalarının kullanılmış ve sonlu elemanlar modeli ile deneysel verilerin uyumla hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu aşamada başlangıç modeli üzerinde kullanılan malzeme özellikleri revize edilmiş ve revize edilen model üzerinden 15.153 Hz frekans değeri belirlenmiştir. Bu değer yapı içindeki cihazdan elde edilen 15.625 Hz değerine yaklaşık %92 oranında yaklaşmıştır. Bu yaklaşım sonlu elemanlar modeli için yeterli görülmüş ve bundan sonra yapılacak analizlerde bu modelden elde edilen malzeme özellikleri ve mesh boyutları kullanmıştır.



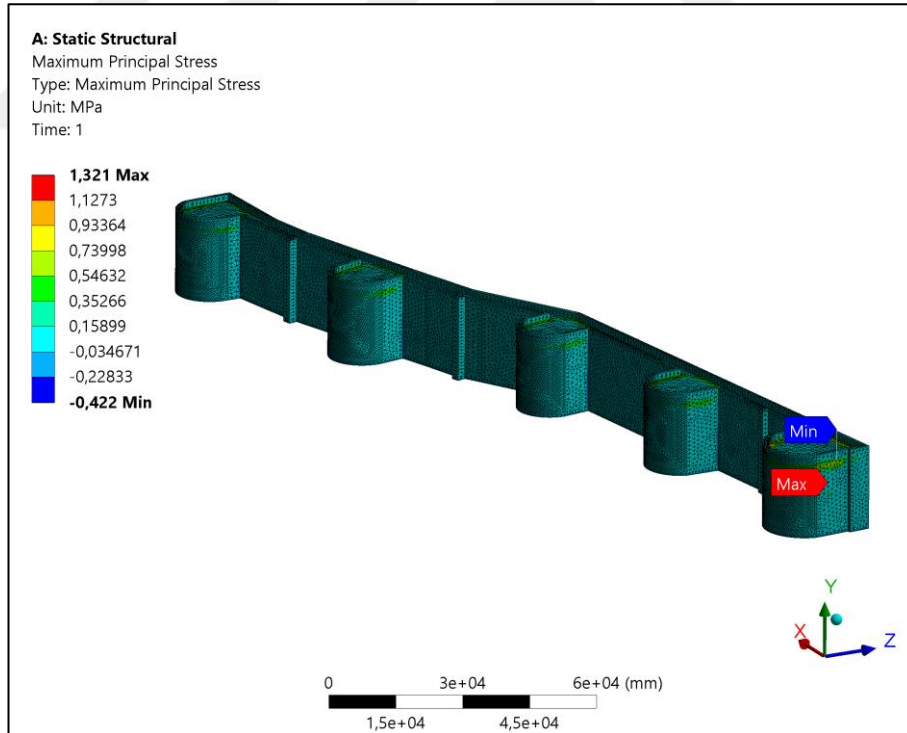
Şekil 4.3: Test ölçümlerinin yapıldığı burca ait sonlu elemanlar modelinden elde edilmiş frekans değeri.

4.1.2. Statik Analizler

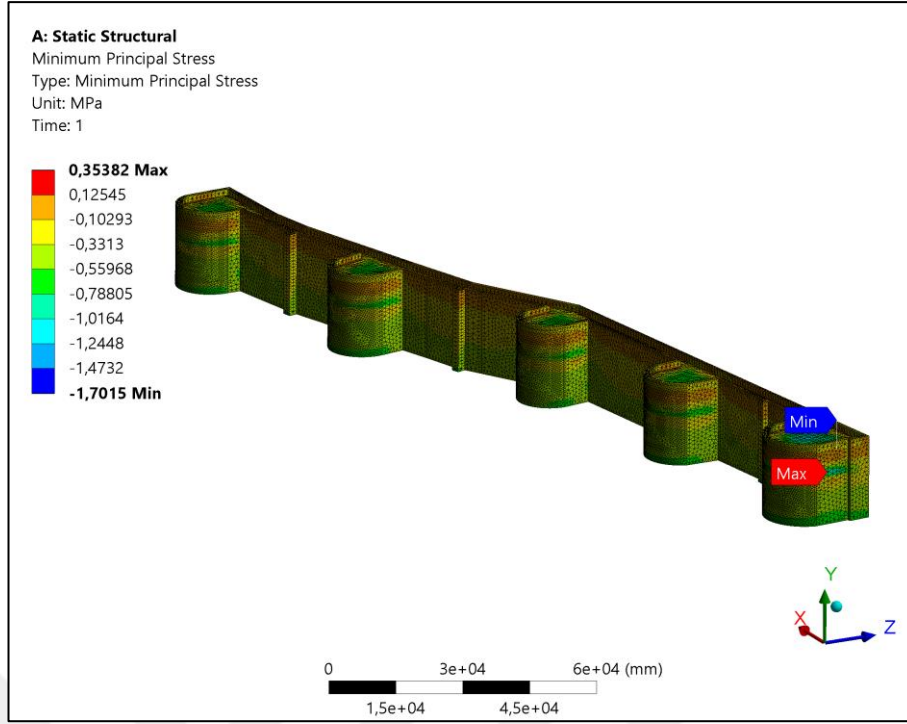
Tarihi taşınmazın yapısal davranışını gözlemlemek amacıyla hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde öncelikli olarak yapının kendi ağırlığı altındaki davranışını görmek amacıyla lineer statik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapının kendi ağırlığı ve kar yükü altında yapılan statik analiz sonucunda, yapıda oluşan maksimum düşey yer değiştirmeler ve kritik gerilmeler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.4: Yapıdaki maksimum düşey yer değiştirme (mm).



Şekil 4.5: Yapıdaki maksimum kritik gerilme (MPa).



Şekil 4.6: Yapıdaki minimum kritik gerilme (MPa).

4.1.3. Modal Analizler

Tarihi taşınmazın analizlerinde öncelikle yapının serbest titreşim periyotlarını elde etmek için modal analiz yapılmış ve analiz sonucunda mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenmiştir. Analizlerde 30 modda çözüm yapılmış ve yapının global olan ilk 6 moduna ait veriler incelenmiştir. 30 modda yapılan çözümde modal kütle katılım oranlarının yapının Z doğrultusunda (kısa kenar doğrultusunda) %92.2 ve X doğrultusunda (uzun kenar doğrultusunda) %90.8 değerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) tarafından önerilen %90 seviyesinin üstünde olması sebebiyle 30 modda çözüm yeterli görülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk 6 moda ait eksenlere göre elde edilen frekans, periyot ve kütle katılım oranları Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te ve ilk 6 moda ait mod şekilleri Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.1: X yönü için katılım faktör hesaplaması.

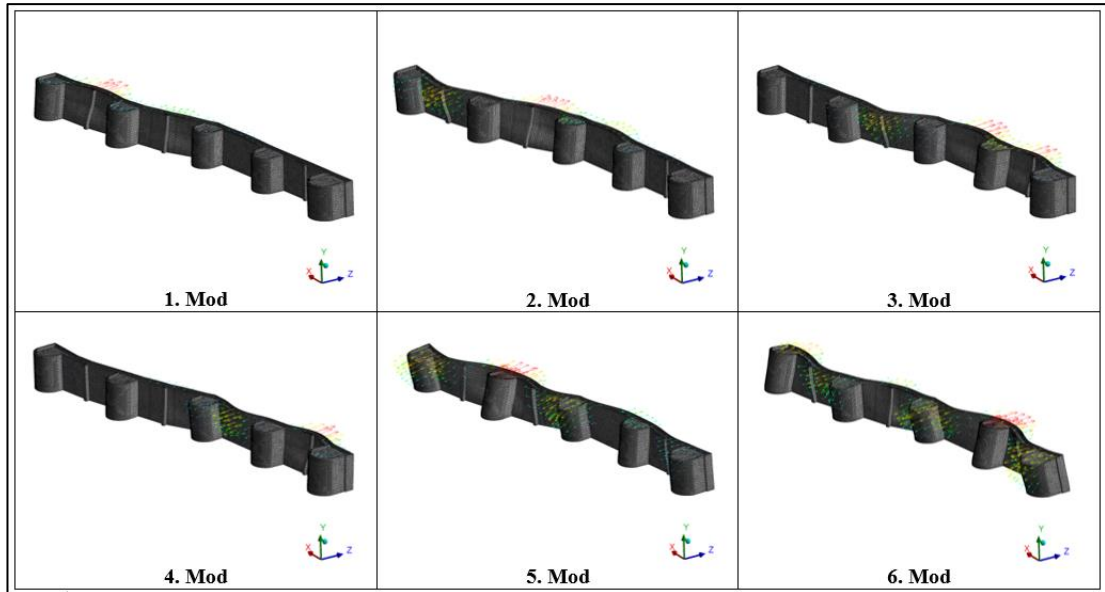
KATILIM FAKTÖR HESAPLAMASI - X YÖNÜ							
Mod	Frekans	Periyot	Katılım Faktörü	Oran	Etkin Kütle	Kümülatif Kütle Fraksiyonu	Etkin Kütle/Toplam Kütle
1	10.4783	9.5436E-02	31.6720	1.000000	1003.12	0.754534	0.257592E-01
2	10.6989	9.3468E-02	16.3580	0.51647	267.576	0.955801	0.687111E-02
3	11.1693	8.9531E-02	0.2153	0.0068	4.64E-02	0.955836	0.119074E-05
4	11.9528	8.3663E-02	6.2948	0.19875	39.6242	0.985640	0.101751E-02
5	14.2328	7.0260E-02	-4.1424	0.13079	17.1592	0.998547	0.440633E-03
6	15.1526	6.5995E-02	1.3897	0.04388	1.93115	1.000000	0.495903E-04

Tablo 4.2: Y yönü için katılım faktör hesaplaması.

KATILIM FAKTÖR HESAPLAMASI - Y YÖNÜ							
Mod	Frekans	Periyot	Katılım Faktörü	Oran	Etkin Kütle	Kümülatif Kütle Fraksiyonu	Etkin Kütle/Toplam Kütle
1	10.4783	9.5436E-02	0.16490	0.317166	0.027191	0.057294	0.698244E-06
2	10.6989	9.3468E-02	0.09386	0.18054	0.008810	0.075858	0.226238E-06
3	11.1693	8.9531E-02	0.13357	0.25691	0.017841	0.113450	0.458132E-06
4	11.9528	8.3663E-02	0.36020	0.69282	0.129747	0.386839	0.333180E-05
5	14.2328	7.0260E-02	0.51991	1.000000	0.270305	0.956396	0.694119E-05
6	15.1526	6.5995E-02	0.14385	0.27669	0.020694	1.000000	0.531404E-06

Tablo 4.3: Z yönü için katılım faktör hesaplaması.

KATILIM FAKTÖR HESAPLAMASI - Z YÖNÜ							
Mod	Frekans	Periyot	Katılım Faktörü	Oran	Etkin Kütle	Kümülatif Kütle Fraksiyonu	Etkin Kütle/Toplam Kütle
1	10.4783	9.5436E-02	108.430	1.000000	11757.8	0.621622	0.301931
2	10.6989	9.3468E-02	49.692	0.45827	2469.26	0.752169	0.634085E-01
3	11.1693	8.9531E-02	60.798	0.5607	3696.44	0.947596	0.949214E-01
4	11.9528	8.3663E-02	28.778	0.2654	828.163	0.991380	0.212665E-01
5	14.2328	7.0260E-02	-6.722	0.061989	45.1808	0.993769	0.116020E-02
6	15.1526	6.5995E-02	-10.856	0.10012	117.864	1.000000	0.302663E-02



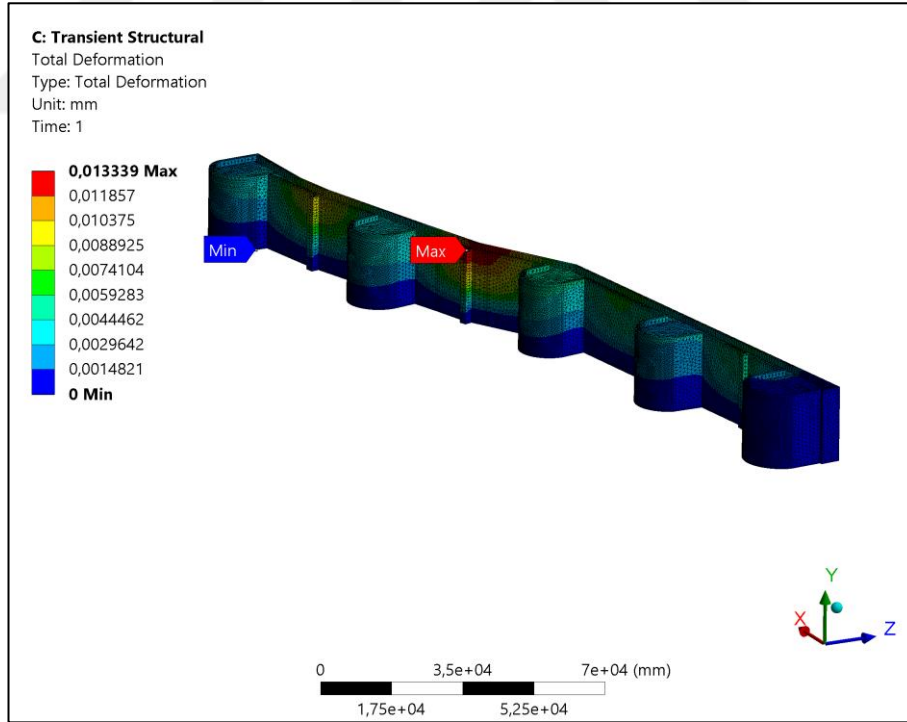
Şekil 4.7: Mod şekilleri.

4.1.4. Dinamik Analizler

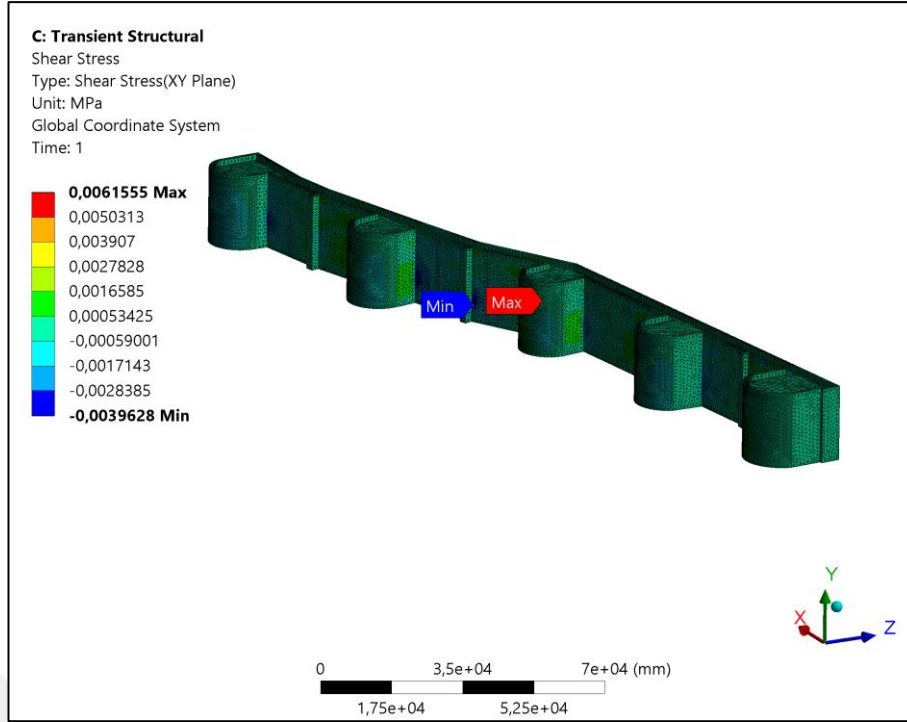
Sonlu elemanlar kalibrasyonunun ardından İstanbul-Ankara yüksek hızlı treni, Pendik-Mithatpaşa yük treni, Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) treni (ada ekspresi), İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı ve Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattından alınan titreşim ivme kayıtları dikkate alınarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sahadan alınan titreşim ivme kayıtları tarihi Diyarbakır surlarına etkilmiştir.

4.1.4.1. İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Treninden Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri

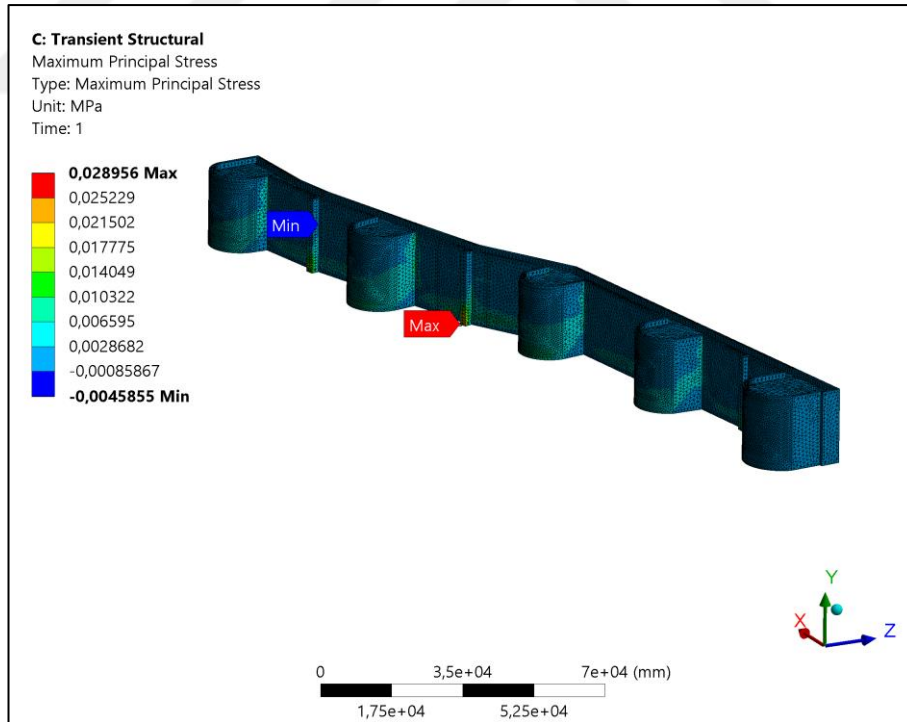
İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren hattından alınan kayıtların modele etkilmesiyle elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



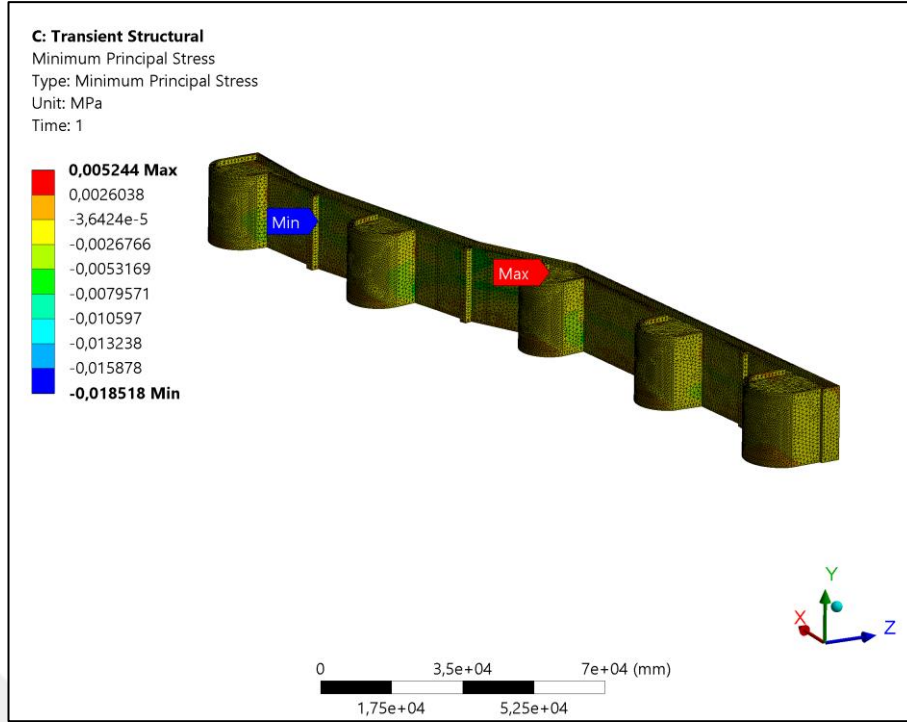
Şekil 4.8: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).



Şekil 4.9: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).



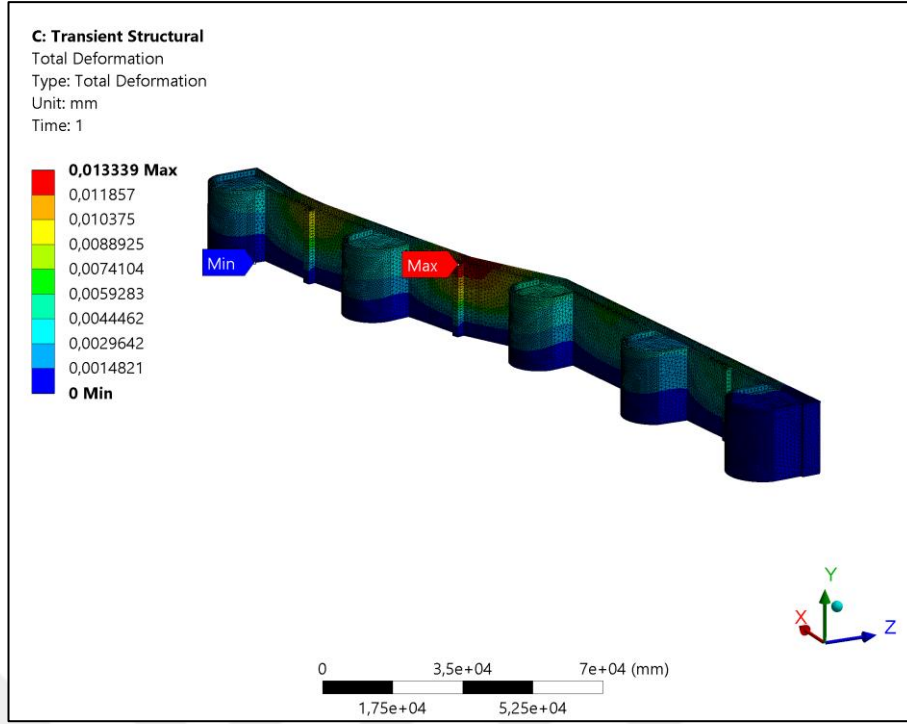
Şekil 4.10: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



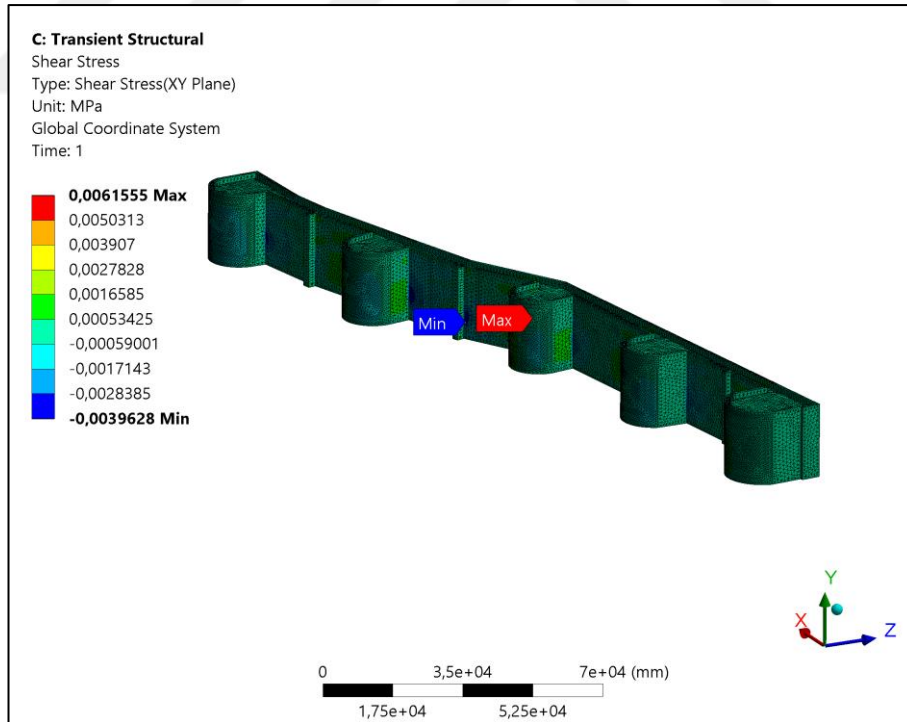
Şekil 4.11: İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

4.1.4.2. Pendik-Mithatpaşa Yük Treninden Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri

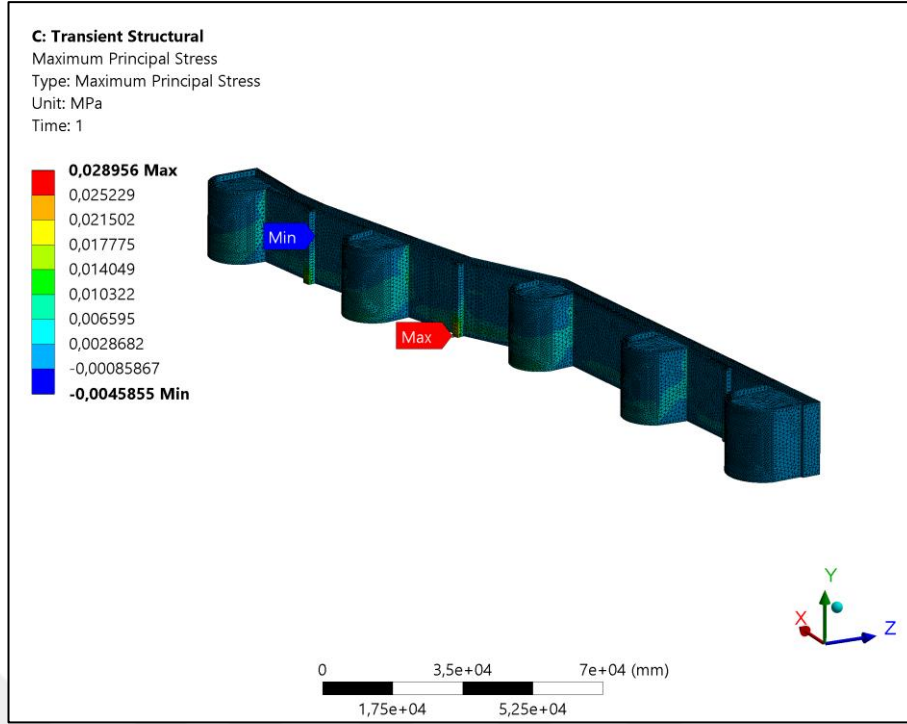
Pendik-Mithatpaşa yük treni hattından alınan kayıtların modele etkilmesiyle elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



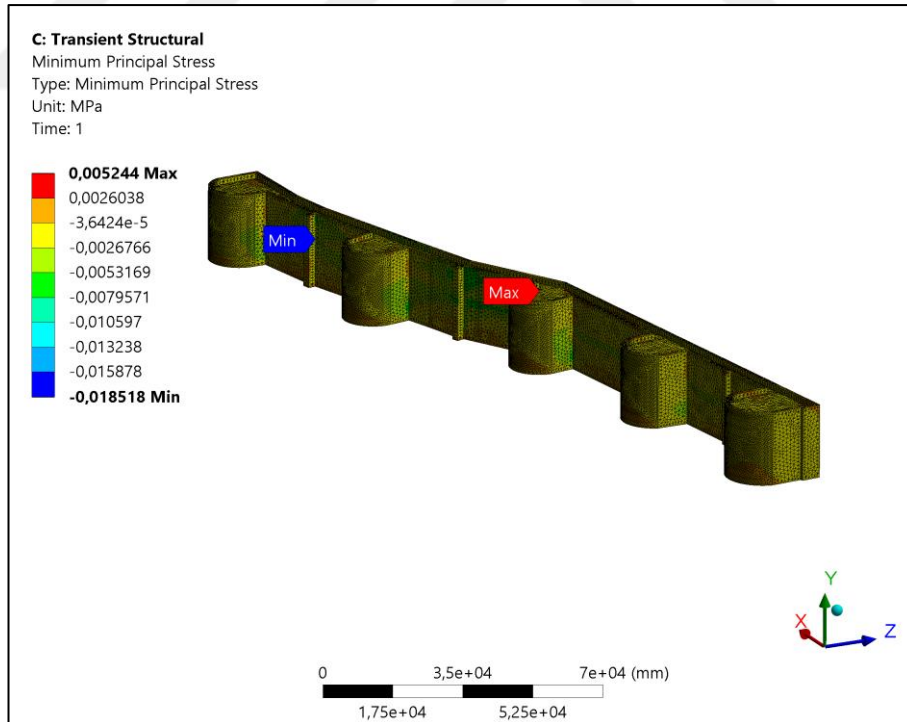
Şekil 4.12: Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).



Şekil 4.13: Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).



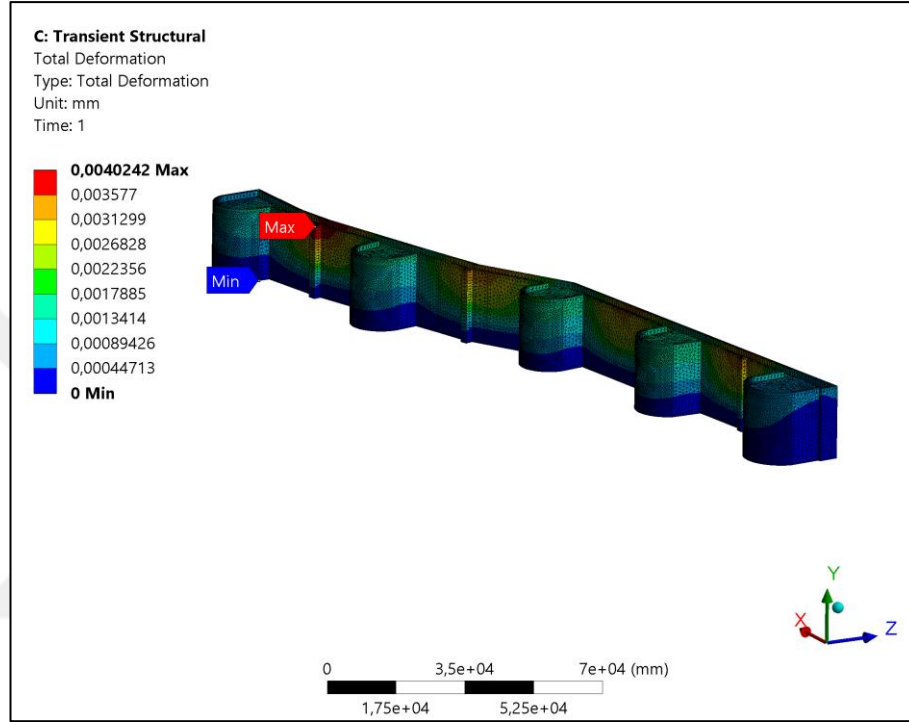
Şekil 4.14: Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



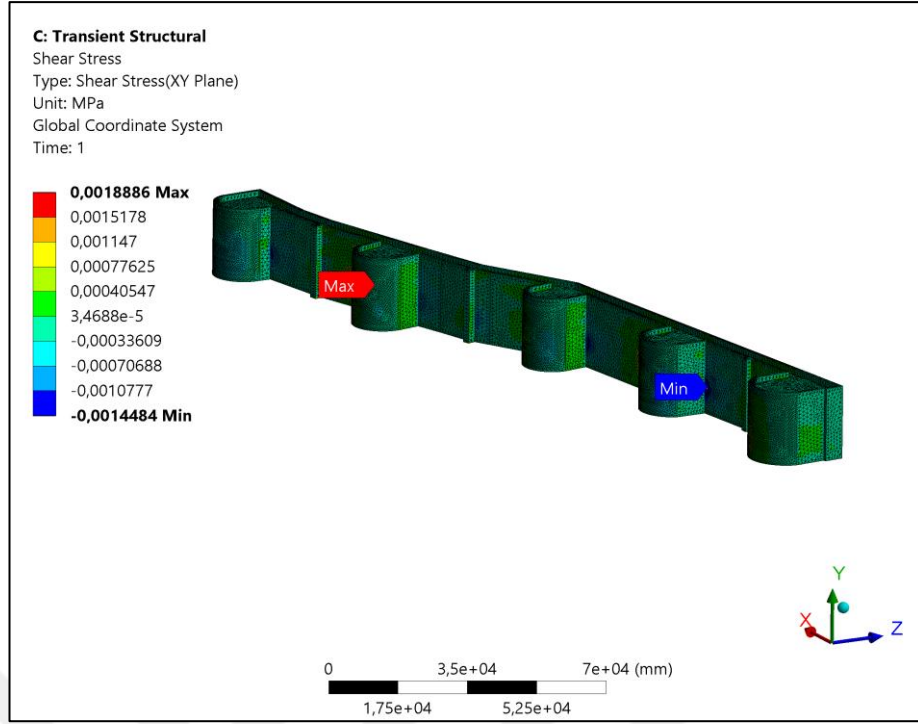
Şekil 4.15: Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

4.1.4.3. Pendik-Adapazarı Bölgesel (Banliyö) Treninden (Ada Ekspresi) Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri

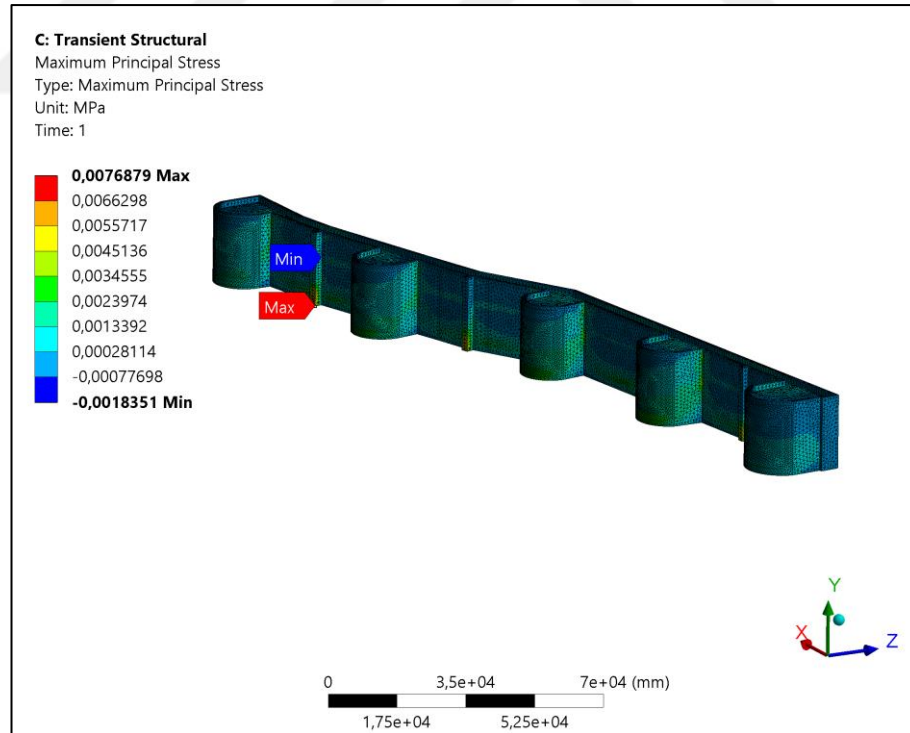
Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren hattından alınan kayıtların modele etkiltilmesiyle elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



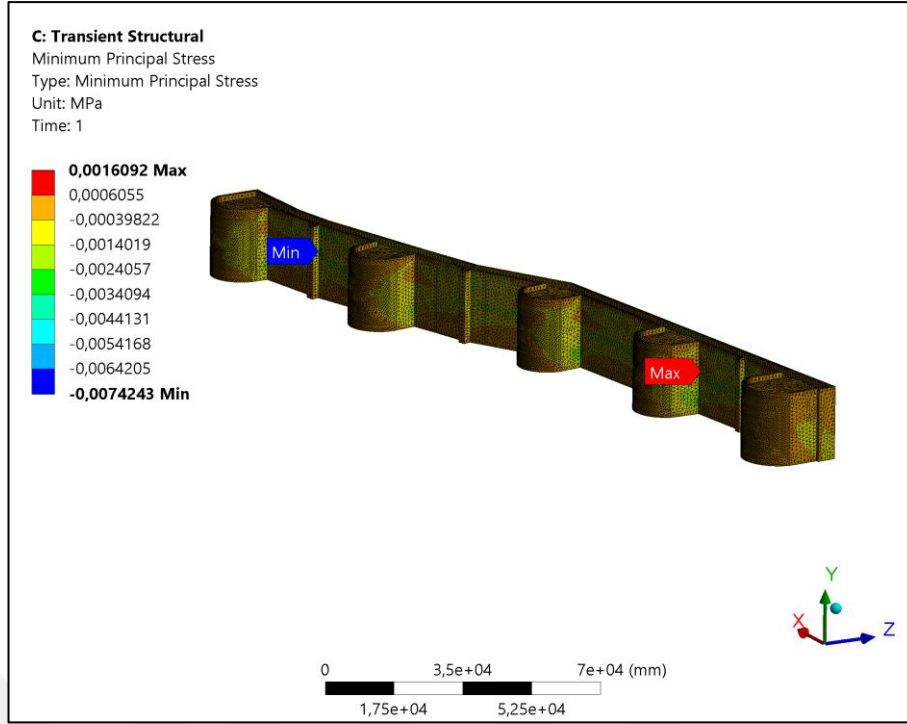
Şekil 4.16: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) treni kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).



Şekil 4.17: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).



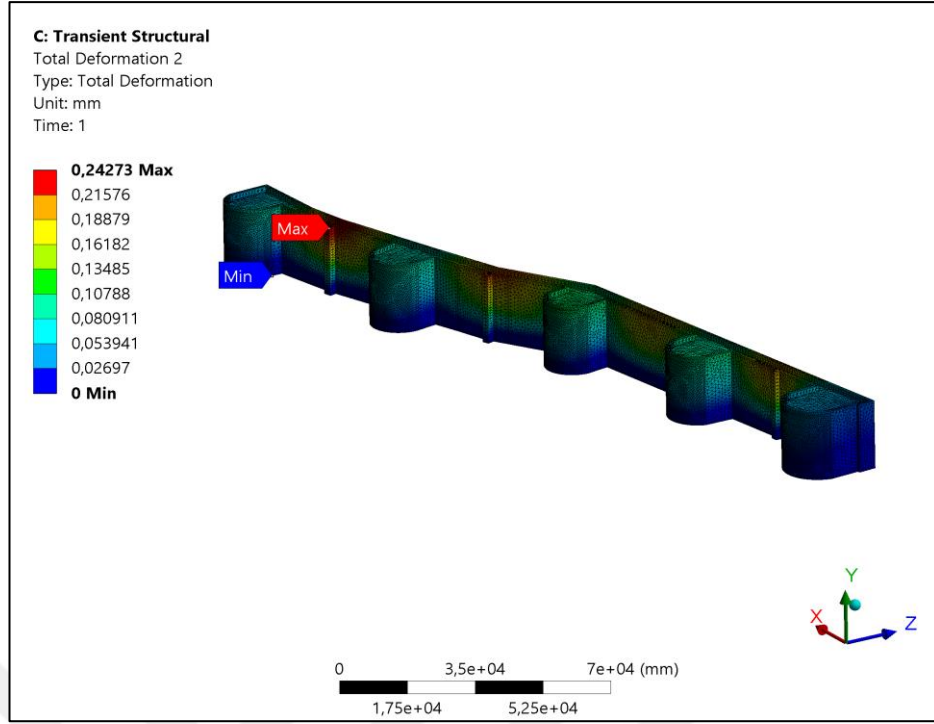
Şekil 4.18: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



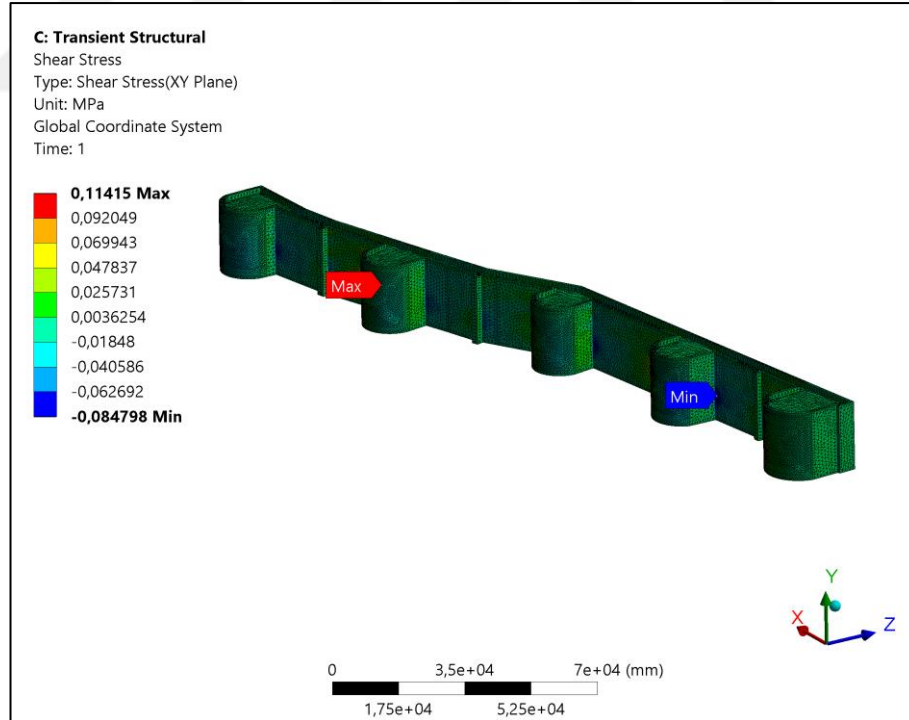
Şekil 4.19: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) banliyö treni kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

4.1.4.4. İstanbul Kabataş-Bağcılar Tramvay Hattından Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri

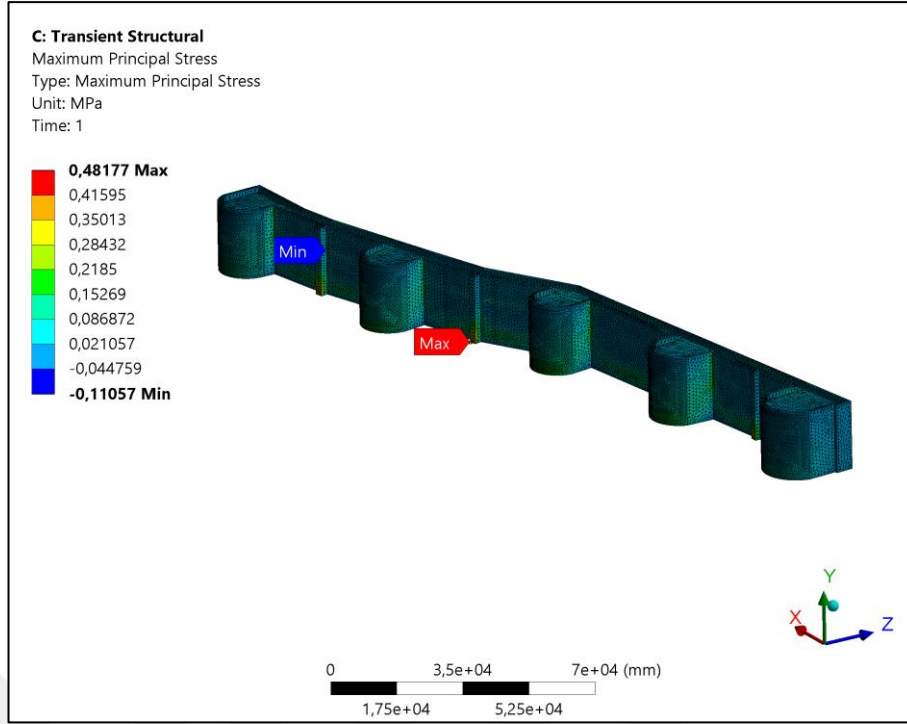
İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattından alınan kayıtların modele etkilmesiyle elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



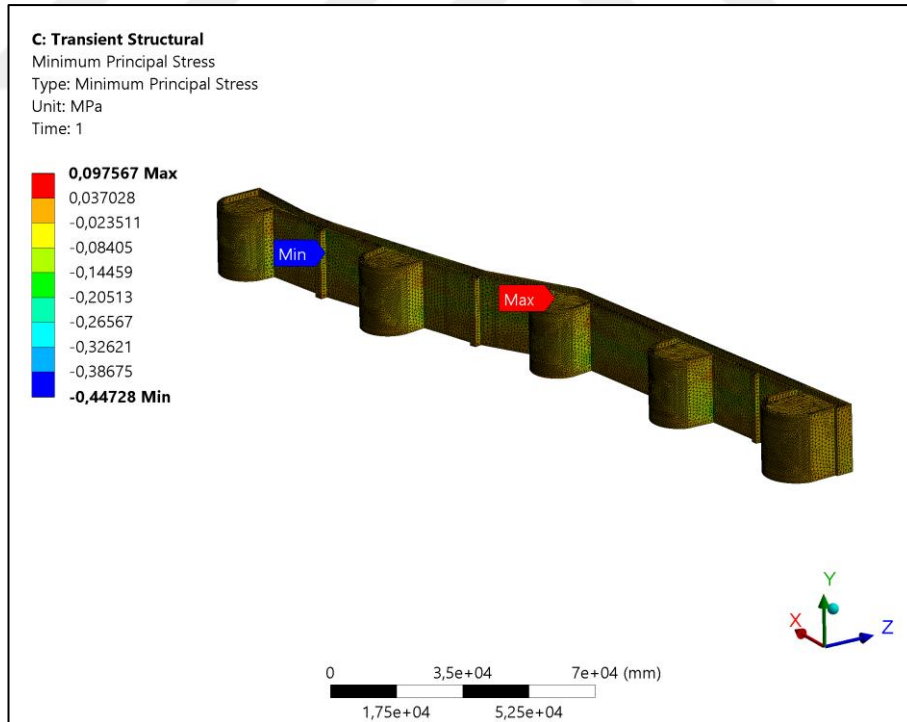
Şekil 4.20: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).



Şekil 4.21: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).



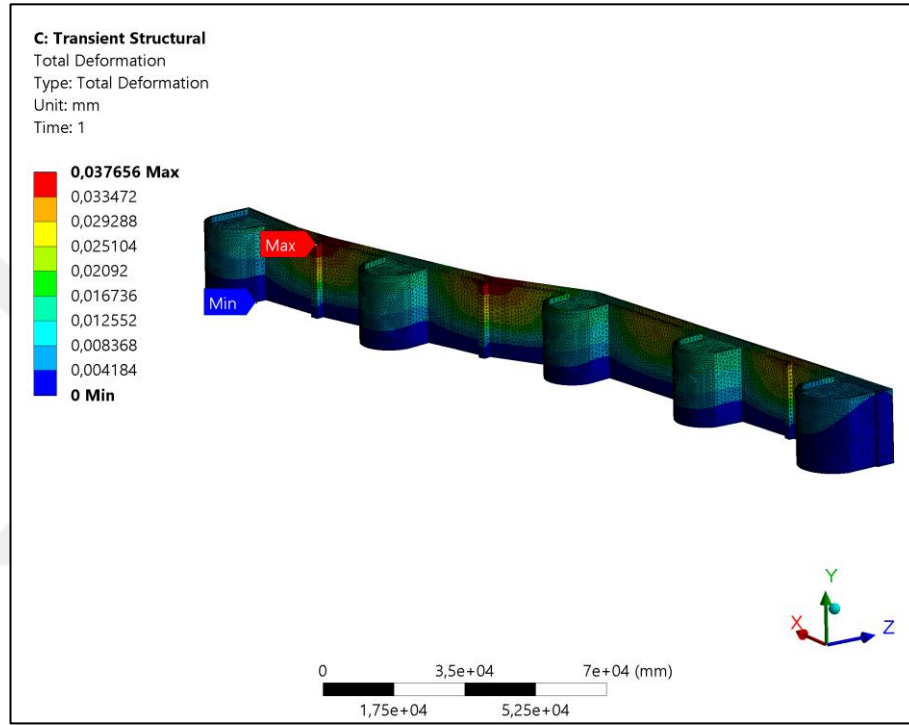
Şekil 4.22: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



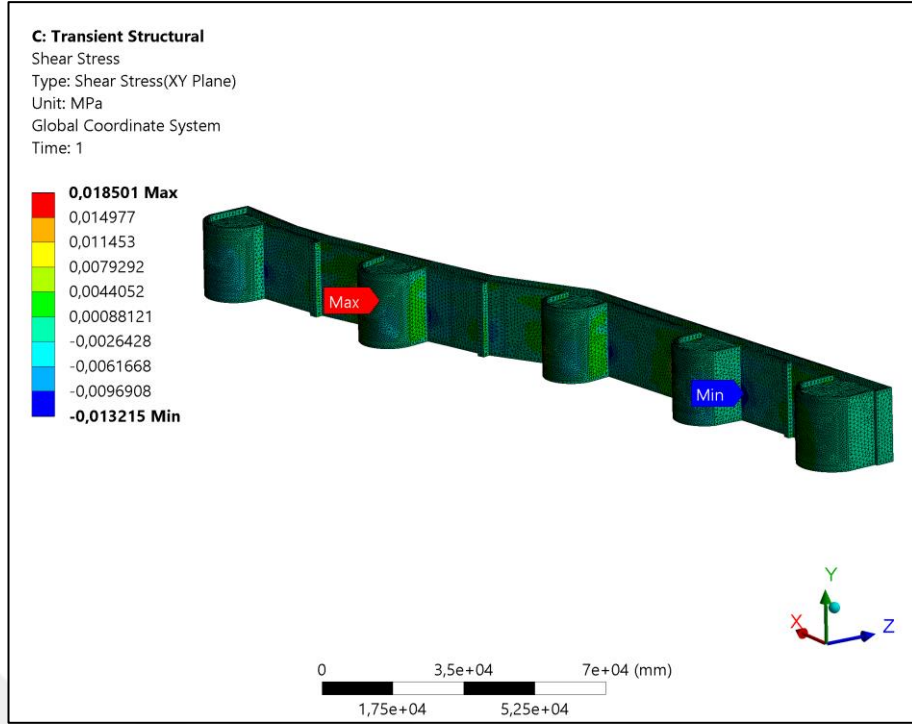
Şekil 4.23: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

4.1.4.5. Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi Şehir İçi Trafik Hattından Alınan Kayıtlara Göre Sonlu Eleman Analizleri

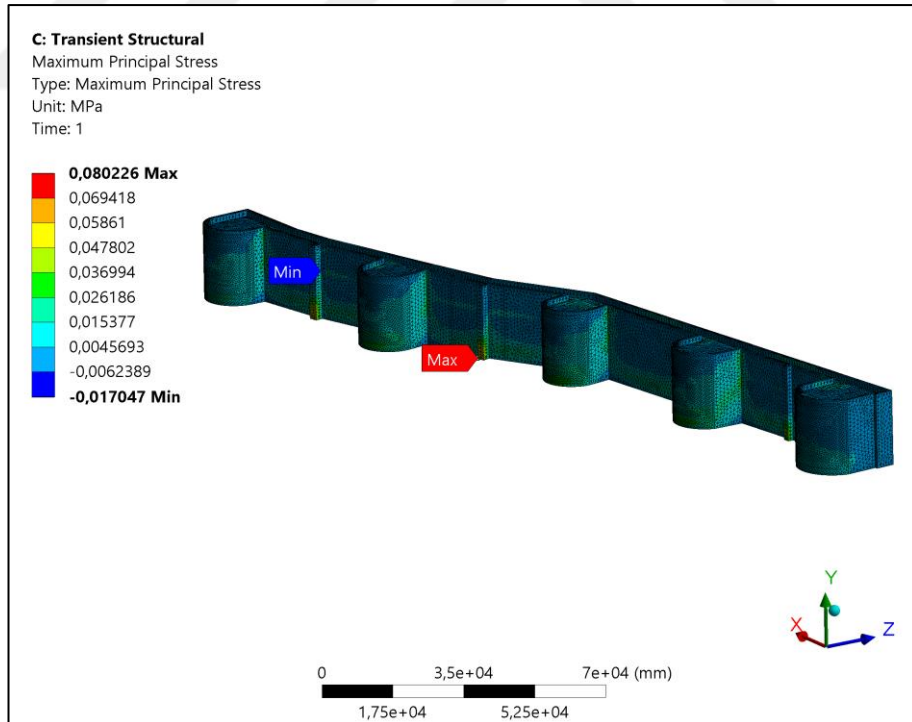
Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattından alınan kayıtların modele etkitilmesiyle elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.



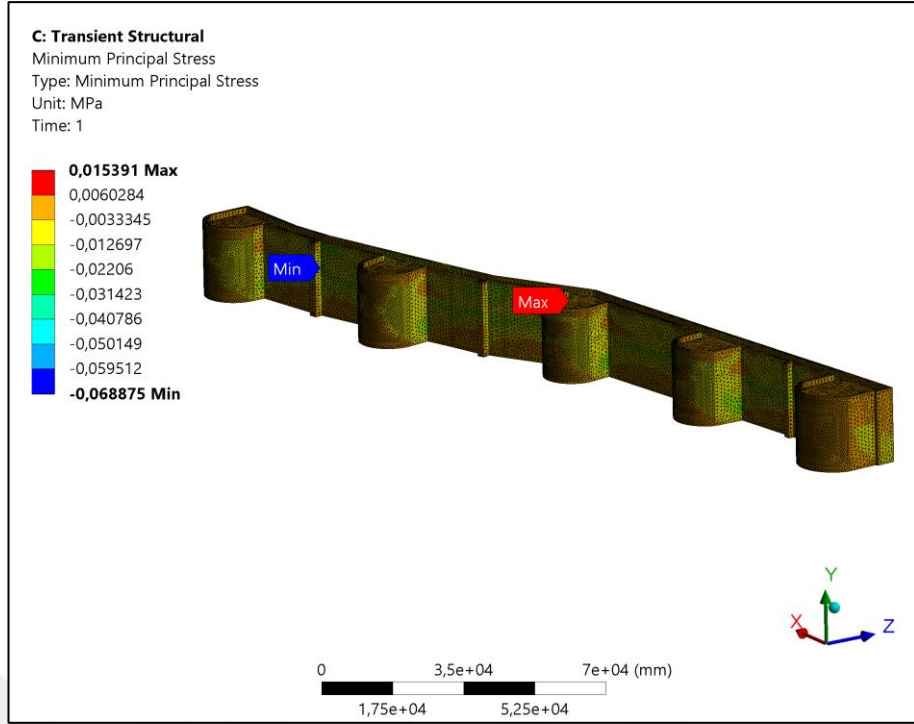
Şekil 4.24: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen toplam deformasyon (mm).



Şekil 4.25: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen kayma gerilmeleri (MPa).



Şekil 4.26: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



Şekil 4.27: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı kaydından elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

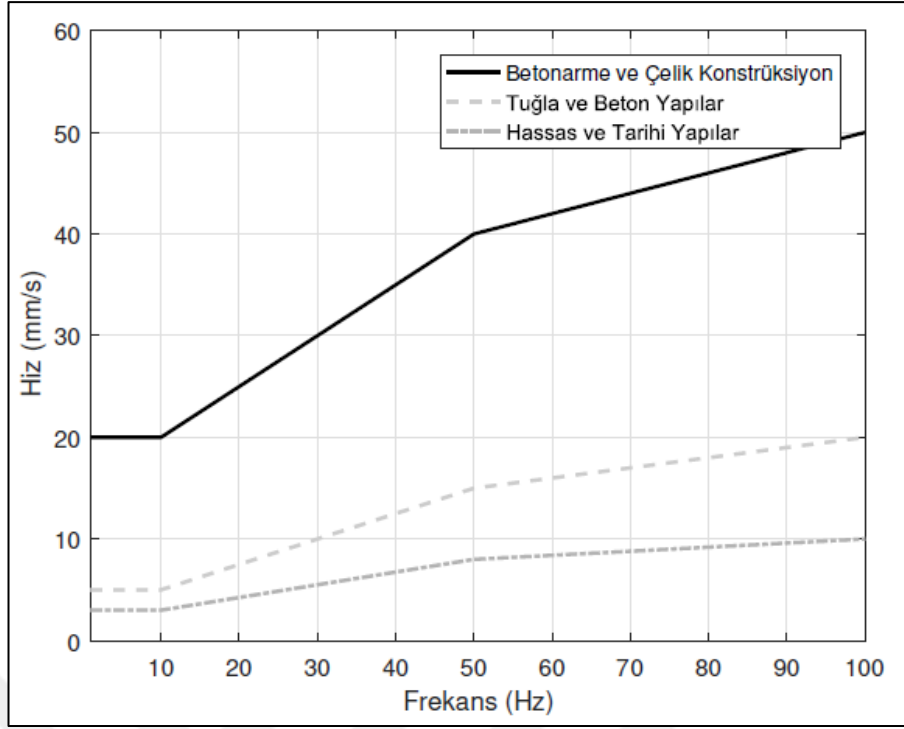
5. ELDE EDİLEN VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez kapsamında, farklı sahalardan yüksek hızlı tren, yük treni, banliyö treni, tramvay ve trafik kaynaklı titreşim ivme kayıtları alınmış ve bu titreşimlerin tarihi yapılara etkisi araştırılmıştır. Tarihi yapı olarak UNESCO Dünya Mirası Listesi'nde yer alan ve büyük öneme sahip Diyarbakır surları seçilmiştir. Sur yapısı, makro modelleme tekniğiyle modellenmiş, statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Farklı sahalardan alınan titreşim ivme kayıtları ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelenmiş ve yorumlanmıştır.

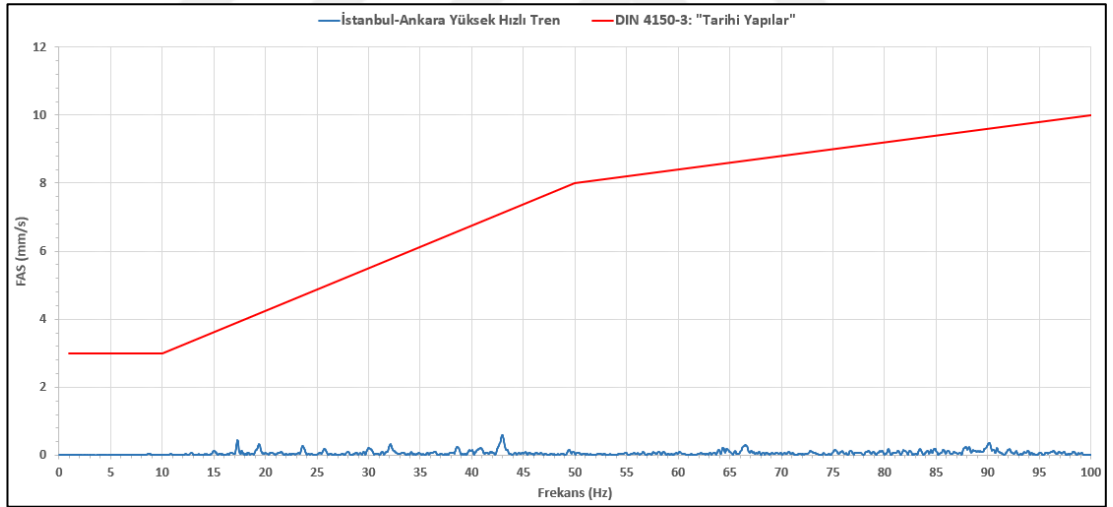
5.1. Sahadan Alınan Verilerin Değerlendirilmesi

Farklı sahalardan alınan kayıtlara ait fourier genlik spektrumları; Alman standardı olan “DIN 4150-3: Vibrations In Buildings - Part 3: Effects On Structures” göre değerlendirilmiştir. Alman normuna göre hassas ve tarihi yapılar için hasar verebilecek frekans seviyesi grafiği ile birlikte (Şekil 5.1)'de verilmiştir. Burada üç farklı yapı sınıfı, betonarme ve çelik konstrüksiyon gibi çok dayanıklı yapılar; yığma, tuğla ve beton gibi nispeten sağlam yapılar ve hassas ve tarihi yapılar temsil edilmektedir. Diyarbakır surları için tarihi yapılar kategorisi dikkate alınmış ve veriler verilen hassas ve tarihi yapılara ait sınır değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

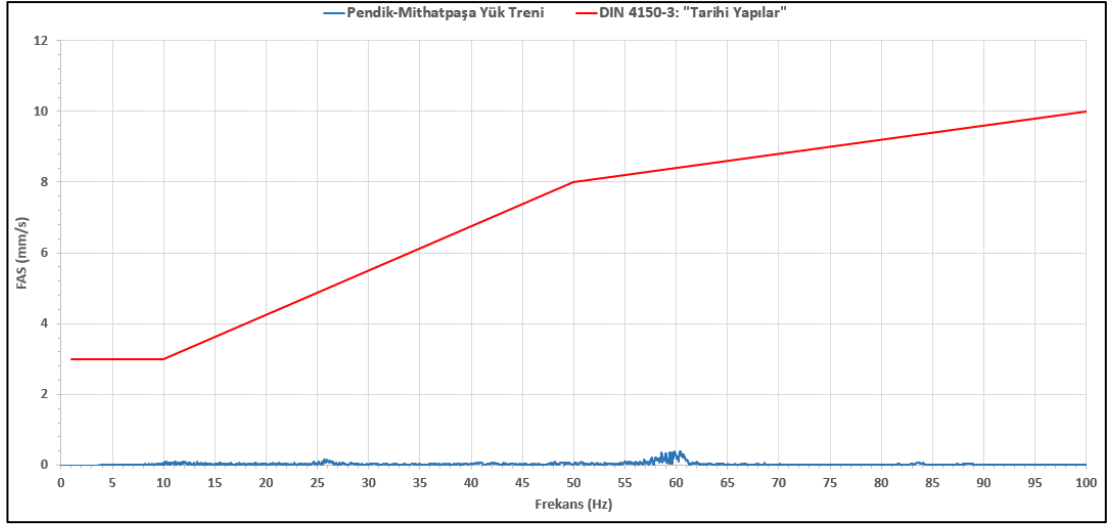
Elde edilen genliklere göre tarihi yapılarda hasara sebep olabilecek sınır değerinin aşılmadığı görülmektedir.



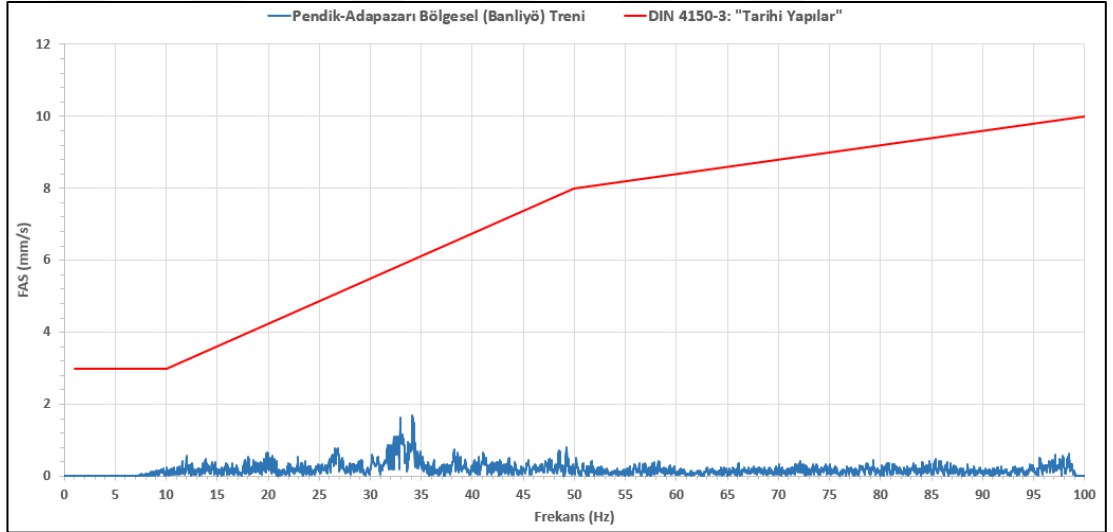
Şekil 5.1: DIN 4150-3 Alman standardına göre yapı tipi-frekans-hız ilişkisi.



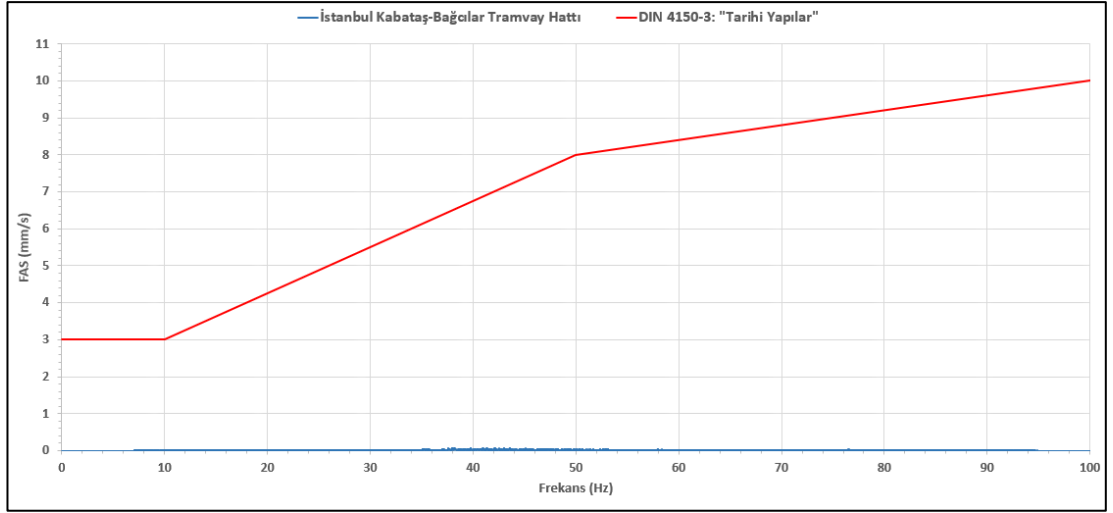
Şekil 5.2: İstanbul-Ankara yüksek hızlı treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.



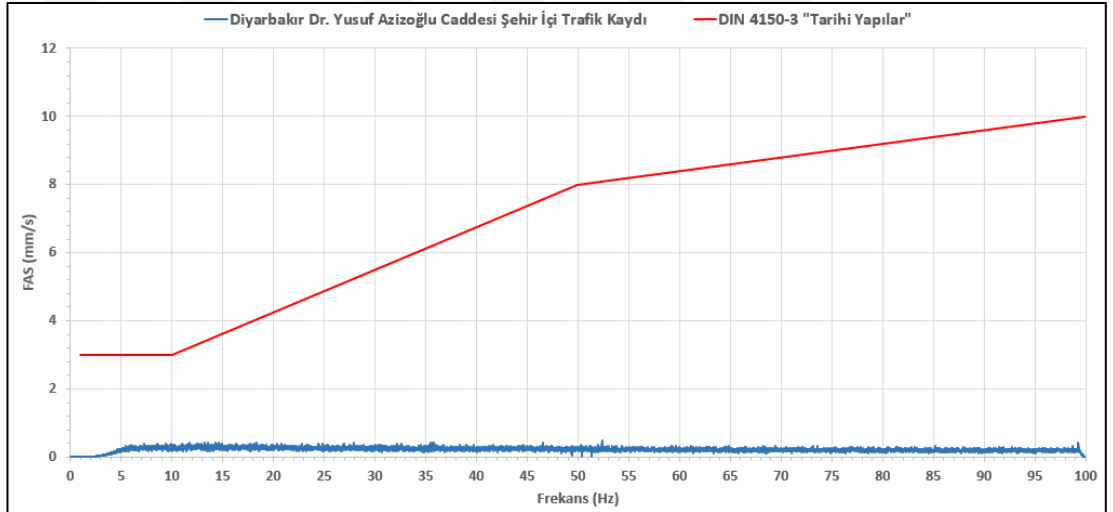
Şekil 5.3: Pendik-Mithatpaşa yük treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.



Şekil 5.4: Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) treni fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.



Şekil 5.5: İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.

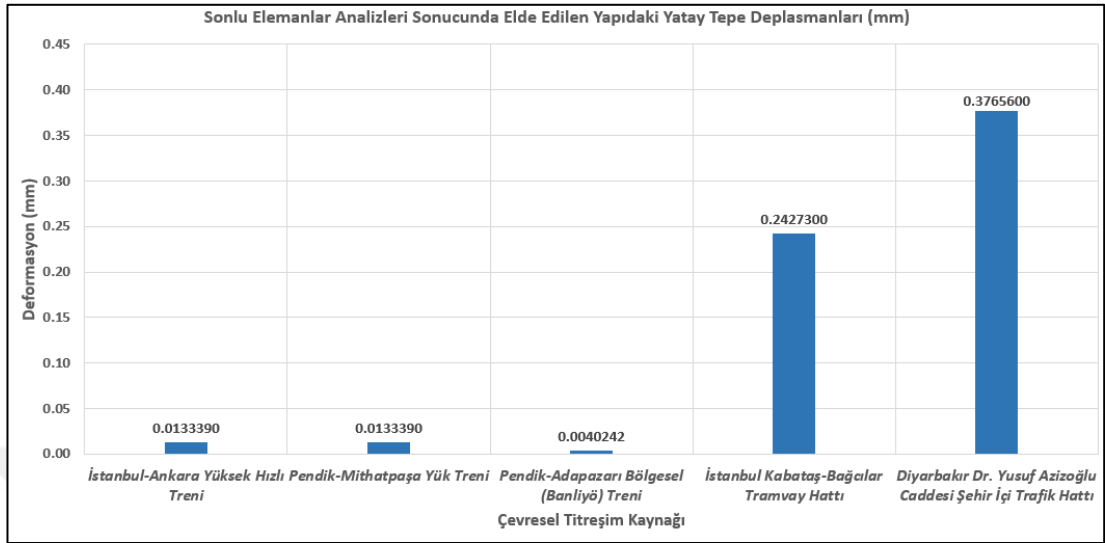


Şekil 5.6: Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattı fourier spektrumu ve DIN 4150-3 Alman normuna göre tarihi yapılar sınır değerleri.

5.2. Sonlu Elemanlar Analizlerinden Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

Çalışmadan elde edilen sonuçlarında değerlendirilmesinde öncelikle sonlu elemanlar analizleri sonucunda yapıda oluşan maksimum tepe deplasmanları değerlendirilmiştir (Şekil 5.7). Değerlendirme çalışmalarında öncelikle elde edilen tepe deplasmanları dikkate alınarak öteleme oranları (drift ratio) hesaplanmış ve bu değerler uluslararası standartlarda yer alan sınır değerler (Tablo 5.1) ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, zaman tanım alanı analizlerinden elde edilen

öteleme oranlarının Hemen Kullanım (Immediate Occupancy) seviyesinin altında kaldığı belirlenmiştir.



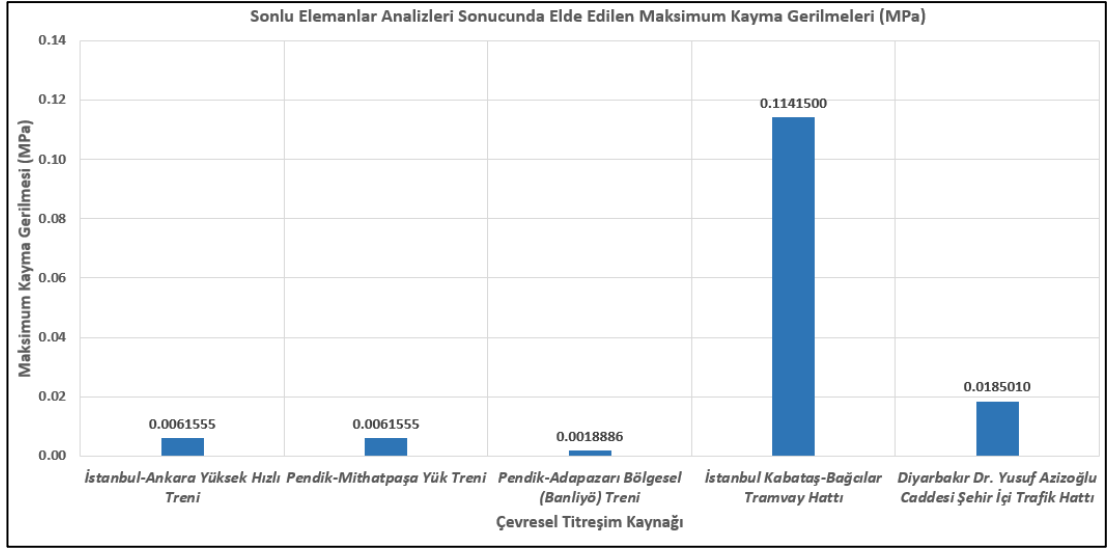
Şekil 5.7: Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki yatay tepe deplasmanları (mm).

Tablo 5.1: Uluslararası yönetmeliklerde yer alan sınır değerler.

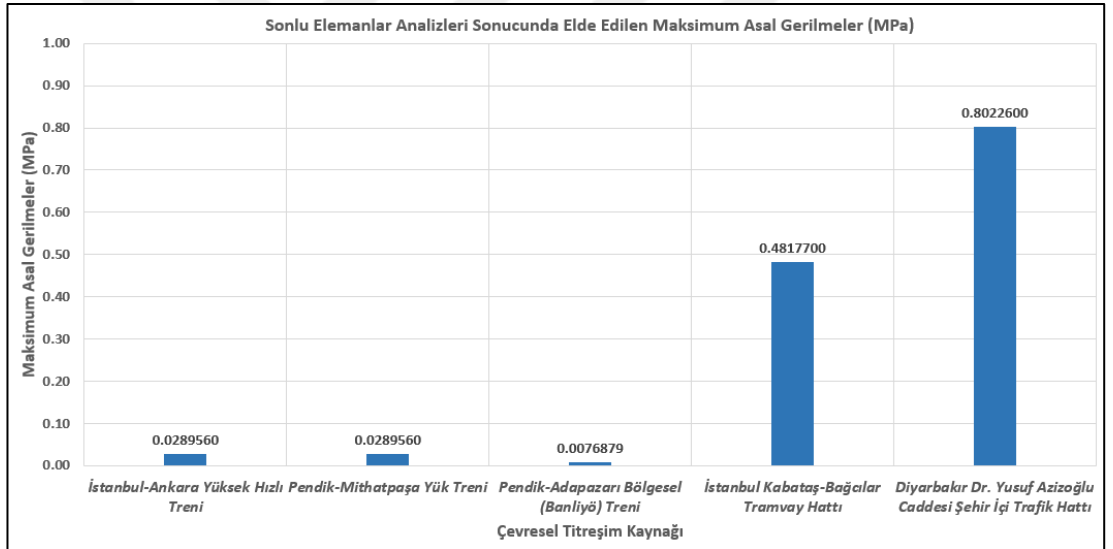
	Sınırlayıcı Davranış Modu	Birincil Elemanlar			İkincil Elemanlar	
		Hemen Kullanım (HK) (%)	Can Güvenliği (CG) (%)	Göçme Öncesi (GÖ) (%)	Can Güvenliği (CG) (%)	Göçme Öncesi (GÖ) (%)
FEMA 356 (2000) & FEMA 274 (1997)	Yatay Derz Kayması	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8
ASCE 41 (2006)	Salınım	0.1	0.3 h_{eff}/L	0.4 h_{eff}/L	0.6 h_{eff}/L	0.8 h_{eff}/L

h_{eff} = Yanal Kuvvet Bileşkesi Yüksekliği
 L = Duvar veya Payanda Uzunluğu

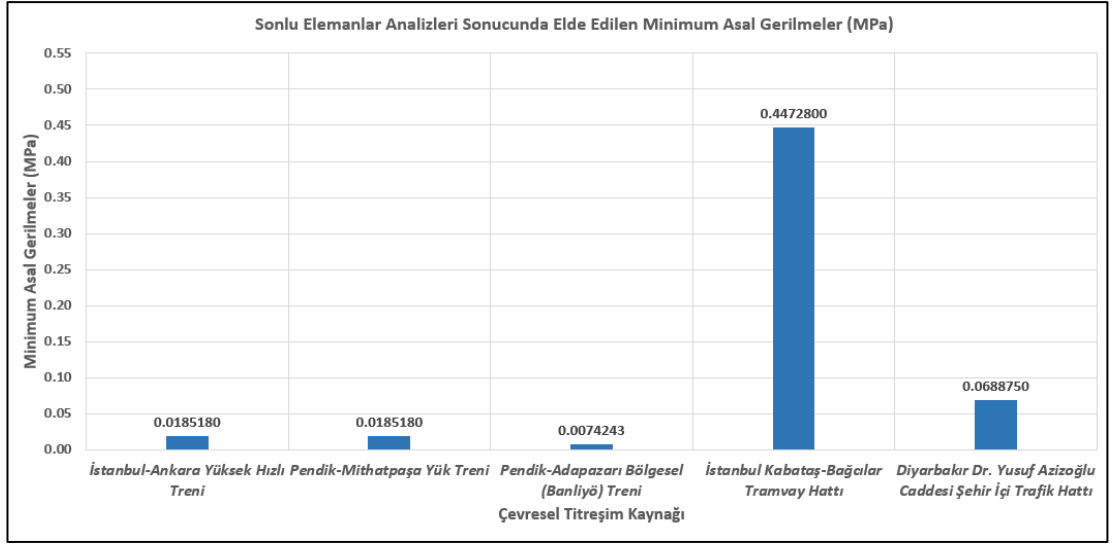
Değerlendirme çalışmalarının ikinci bölümde zaman tanım alanı analizlerinden elde edilen kritik gerilmeler incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde gerilmelerin genel olarak yapının burçlarını birbirine bağlayan surlar üzerinde yoğunlaştığı ve sur ve burç geçişlerinde gerilme yığılmalarının olduğu belirlenmiştir. Elde edilen gerilme değerleri incelendiğinde en yüksek gerilmelerin İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı ve Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoğlu Caddesi şehir içi trafik hattından elde edilen verilerde olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.8 – Şekil 5.10).



Şekil 5.8: Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki maksimum kayma gerilmeleri (MPa).



Şekil 5.9: Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki maksimum asal gerilmeler (MPa).



Şekil 5.10: Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yapıdaki minimum asal gerilmeler (MPa).

Ayrıca, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen gerilme değerler TBDY-2018’de verilen “Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı” tablosundaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma aşamasında Diyarbakır surlarını oluşturan yığma elemanların basınç dayanımları dikkate alınarak yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı 7.8-11.5 MPa olarak alınmıştır (Tablo 5.2). Alınan bu değer ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında farklı titreşim kaynaklarından gelen çevresel etkiler sonucunda surlarda oluşan gerilmelerin izin verilebilir sınırın altında olduğu görülmüştür.

Tablo 5.2: Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k (MPa).

Birim- Birim Sınıfı	Harç sınıfı	Harç basınç dayanımı, f_m (MPa)*	Kargir birim basınç dayanımı, f_b (MPa)					
			5	10	15	20	25	30
Grup I	Genel amaçlı harç	M10-M20	3.4-4.2	5.5-6.8	7.3-9.0	8.9-11.0	10.4-12.9	11.9-14.6
		M2.5-M9	2.2-3.3	3.6-5.3	4.8-7.1	5.9-8.7	6.9-10.1	7.8-11.5
		M1-M2	1.7-2.1	2.8-3.4	3.7-4.5	4.5-5.5	5.2-6.4	5.9-7.3
Grup II ve Kesme taş		M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0
Tuğla (Grup I)	İnce tabakalı harç**		2.9	5.3	7.5	9.6	11.6	13.5
Tuğla (Grup II)			2.2	3.5	4.7	5.7	6.7	7.6
Beton (Grup I), Gazbeton			3.1	5.7	8.0	10.2	12.3	14.4
Beton (Grup II)			2.6	4.6	6.5	8.3	10.0	11.7

(*) Harçlar M harfini takip eden rakam MPa cinsinden karakteristik basınç dayanımlarını gösterecek şekilde isimlendirilmiştir.

(**) İnce tabakalı harç, birimler arası harç tabakası 0.5 mm ile 3.0 mm olan harç.

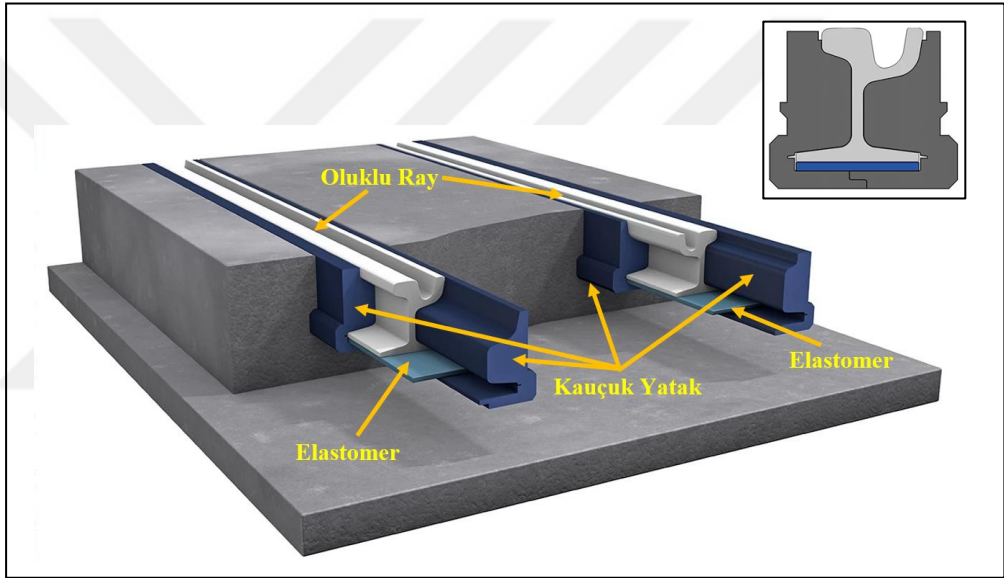
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kentlerdeki ulaşım ağlarının artmasıyla birlikte, tarihi yapıların maruz kaldığı çevresel etkiler de aynı oranda artmaktadır. Yoğun kentleşme oranıyla birlikte yer altı ve yerüstü ulaşım ağları mevcut tarihi yapıları etkilemekte ve bu ağlardan geçen araçların yarattığı titreşimler tarihi yapıların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarına hasarlar verebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında farklı kentsel titreşimlerin tarihi yapılar üzerindeki etkileri araştırılmış ve yüksek hızlı tren, yük treni, banliyö tren, tramvay ve şehir içi trafiği gibi farklı kaynaklardan alınmış çevresel titreşimlerin tarihi bir yapı üzerinde oluşturacağı etkiler incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, tarihi taşınmaz kültürel varlıklar hakkında genel araştırmalar yapılmış ve konu ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, İstanbul-Ankara yüksek hızlı treni, Pendik-Mithatpaşa yük treni, Pendik-Adapazarı bölgesel treni (ada ekspresi), İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı (T1) ve Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoglu Caddesi şehir içi trafik hattı üzerinden ivme kayıtları alınmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, “Taşınmaz Kültür Varlıkları” arasında en güçlü yapılar grubuna giren “Askeri Yapılar”ın önemli bir örneği olan Diyarbakır surlarının bir bölümü sayısal olarak modellenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, farklı sahalardan elde edilen ivme kayıtları dikkate alınarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise, farklı sahalardan elde edilen kayıtların fourier dönüşümleri alınmış ve elde edilen sonuçlar Alman standardı olan DIN 4150’ye göre yorumlanmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen yatay tepe deplasmanları ve kritik gerilmeler ulusal ve uluslararası standartlarda önerilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

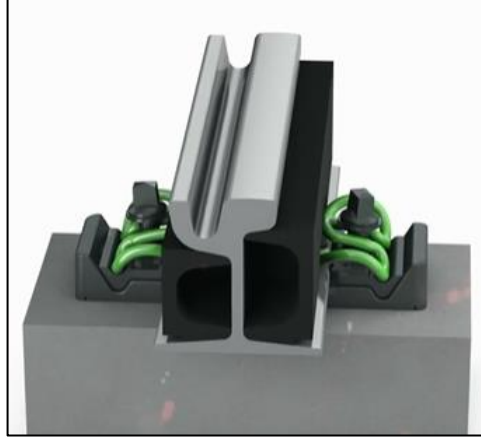
Yapılan tüm analiz ve değerlendirmeler sonucunda, İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren kaydı, Pendik-Mithatpaşa yük treni kaydı, Pendik-Adapazarı bölgesel (banliyö) tren kaydı, İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattı ve Diyarbakır Dr. Yusuf Azizoglu Caddesi şehir içi trafik kaydı için kayıtların DIN 4150 Alman standartlarında tarihi yapılar için verilen sınırın çok altında kaldığı görülmüştür. Ancak, tarihi yapıların yapım yılları, yapım teknikleri, malzemelerin zaman için performanslarını kaybetmeleri, yapılardaki hasarlar, makro-mikro çatlaklar ve malzeme kayıpları gibi birçok sebebin tarihi yapıları zayıf duruma düşürmesi sebebiyle kentsel titreşimlerin

tarihi yapılar üzerindeki etkilerinin zarar verici seviyelere ulaşabileceği düşünülmektedir. Özellikle, gün geçtikçe artan çevresel titreşim etkileri göz önünde bulundurulduğunda bu durumun ciddi sorunlara yol açacağı düşünülmektedir. İleride daha riskli durumlarla karşılaşmamak adına çevresel titreşimlerin yoğun olduğu bölgelerdeki tarihi yapıların titreşim kaynağından izole edilmesi gerekmektedir. Çözüm olarak, yapı etrafına sönümleyici bir sistem yapılması veya yoğun titreşim oluşturabilecek hatların tarihi yapılardan uzaklaştırılması önerilmektedir. Böylece titreşim kaynağından tarihi yapıya gelebilecek olumsuz etkilerin önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Bir diğer çözüm yolu ise yol kaplamalarının altında uygun sönümleyiciler yerleştirilerek titreşimlerin sönümlenmesinin sağlanmasıdır.



Şekil 5.11: Gömülü ray sistemi için izolasyon uygulama önerisi.

Tramvay hattı yapımı sırasında tramvay hattından gelecek tüm zararlı etkileri minimize etmek, titreşimin daha ilk aşamada yok edilmesi sağlamak ve titreşimi kolay sönümleyebilmek amacıyla gömülü ray sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Bu aşamada rayı saran ve çevreleyen yüksek kalitede reçine bazlı kauçuk malzemelerin kullanılması ve ray pedi (elastomer) kullanılarak rayların etrafında oluşacak vibrasyon, gürültü ve kaçak akımların izole edilmesi sağlanmalıdır (Şekil 5.11).



Şekil 5.12: Sultan 2.Abdülhamid Han'ın kabri önündeki tramvay hattında yapılan ilave izolasyon uygulamasının kesiti.



Şekil 5.13: Sultan 2.Abdülhamid Han'ın kabri önündeki tramvay hattında yapılan ilave izolasyon uygulaması.

2018 yılında Kabataş-Bağcılar (T1) tramvay hattı üzerindeki Sultan 2. Abdülhamid Han'ın kabrinin olduğu Divanyolu Caddesi üzerinde Türbedar Sokak ile Bab-ı Ali Caddesi arasında kalan 75 metrelik ray hattı bölümüne yapılan mevcut ray izolasyonu üzerine ilave izolasyon uygulaması tüm tramvay hatlarına uygulanabilir [Web 11] (Şekil 5.12 ve Şekil 5.13). Bu tür uygulamaların çevresel etkilerden kaynaklı titreşimlerin sönümlenmesine ve tarihi yapılara etkiyen yüklerin azaltılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ayar M., (2013), “Osmanlı'da İlk Elektrikli Tramvay ve Şehir Elektriği İşletmesi: Şam'da Elektrikli Tramvay ve Şehir Aydınlatması”, Türk Kültürü İncelemeleri Dergisi, Sayı: 29, 107-144.

Ayhan İ., (2013), “Tarihi Yapıların Korunmasında Ve Koruma Amaçlı İmar Planlarının Hazırlanmasında Bir Belirleyici Olarak Trafik Kaynaklı Titreşimlerin Ölçülmesi Ve Modellenmesi”, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Baştürk G., (2014), “Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi Ve Dünya Örnekleri İle Karşılaştırılması”, Ulaştırma Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.

Bayraktar A., Altunışık A. C., Sevim B., Türker T., (2011), “Seismic Response Of A Historical Masonry Minaret Using A Finite Element Model Updated With Operational Modal Testing”, Journal Of Vibration And Control, 17(1), 129-149.

Bayraktar A., Türker T., Sevim B., Altunışık A. C., Yıldırım F., (2009), “Modal Parameter Identification Of Hagia Sophia Bell-Tower Via Ambient Vibration Test”, Journal Of Nondestructive Evaluation, 28(1), 37-47.

Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F. (2017), “Dynamic Characteristics Of The Amphitheatrum Flavium Northern Wall From Traffic-Induced Vibrations”, Annals of Geophysics, 60(4), 0439.

Bongiovanni G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F., (2011)., “Traffic-induced vibrations in historical buildings”, In Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium (pp. 812-819).

Candemir I., (2010), “Raylı Sistemlerde Gürültü ve Vibrasyon Sorunları, Çözüm Seçenekleri ve Fayda Analizleri”, Türkiye Mühendislik Haberleri, 461-462, 2010/3-4.

Creswell K. A. C., (1932), “Early Muslim Architecture”, Vol. I Umayyads and Vol. II Early Abbasids, Umayyads of Cordova, Aghlabids, Tulunids and Samanids. Oxford: The Clarendon Press, 1932-40.

Çolak M., (2003), “XX. Yüzyıl Başlarında İstanbul'da Trafik ve Tramvay”, Osmanlı Araştırmaları, Istanbul, Turkey, 22, 177-185.

Çıdam F. B., (2007), “Diyarbakır Kent Dokusunun Turizm Ve Rekreasyon Kaynaklarının Peyzaj Mimarlığı Açısından Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı.

Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. J., (1957), “Soil Mechanics And Work Hardening Theories Of Plasticity”, Trans. ASCE, 122, p. 338-346.

Ellis P., (1987), “Effects Of Traffic Vibration On Historic Buildings”, Science Of The Total Environment, 59, 37-45.

Emre G., (2017), “Kültürel Mirasın Korunması”, İstanbul: İstanbul Üniversitesi (e-kitap).

Erkal A., (2017), “Tren Geçişlerinin Küçük Ayasofya Cami Üzerinde Ve Yanındaki Serbest Zemin Yüzeyinde Oluşturduğu Titreşimlerin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering, 22(3), 361-374.

Gönül Ö., (1970), “Elements From Ancient Civilizations In Anatolian Seljuk Art”, Anadolu, (12), 27-32.

Hunaidi O., Rainer J. H., Pernica G., (1994). “Measurement And Analysis Of Traffic-Induced Vibrations”, In Proceedings of 2nd International Symposium on Transport Noise and Vibration, 103-108.

Işık N. (2017), “Geleneksel Yığma Yapılarda Taşıyıcı Sistem Hasarları ve Nedenlerinin Tespiti ile Güçlendirme ve Tamamlayıcı Müdahale Önerileri; Diyarbakır; Suriçi Örneği”, Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

İzgi R., (2020), “Tarihi Yapıların Yapısal Analizi: Diyarbakır Surları Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaláb Z., Hrubešová E. (2015), “Evaluation Of Seismic Effect Of Traffic-Induced Vibrations”, Acta Montanistica Slovaca, 33-37.

Kejanlı D. T., Dinçer İ. (2011), “Diyarbakır Kale Kenti'nde Koruma ve Planlama Sorunları”, Megaron, 6(2).

Kliukas R., Jaras A., Kačianauskas R., (2008), “Investigation Of Traffic-Induced Vibration In Vilnius Arch-Cathedral Belfry”, Transport, 23(4), 323-329.

Li M., Ma M., Cao Z., Xia Q., Liu W., (2021), “Dynamic response analysis of train-induced vibration impact on the Probhutaratna pagoda in Beijing”, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 20(1), 223-243.

Lourenço P.B., (1996), “Computational Strategies for Masonry Structures”, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.

Ma M., Markine V., Liu W. N., Yuan Y., Zhang F., (2011), “Metro Train-Induced Vibrations On Historic Buildings In Chengdu, China”, Journal of Zhejiang University-Science A, 12(10), 782-793.

Nabikoğlu A., Dalkılıç N., (2012), “Diyarbakır Surlarının Günümüzdeki Durumuna Yeni Bir Bakış”, Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (15), 23-35.

Onat O., Sayın E., (2015), “Tarihi Tağar Köprüsünün Doğrusal Olmayan Sismik Analizi”, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, 1-3/10/2015.

Osmancıklı G., Uçak Ş., Turan F. N., Türker T., Bayraktar A., (2012), “Investigation Of Restoration Effects On The Dynamic Characteristics Of The Hagia Sophia Bell-Tower By Ambient Vibration Test”, Construction and Building Materials, 29, 564-572.

Pau A., De Sortis A., Marzellotta R., Vestroni F., (2005), “Health Monitoring Of Cultural Heritage Using Ambient And Forced Vibrations”, WIT Transactions on The Built Environment, 82.

Pau A., Vestroni F., (2008), “Vibration Analysis And Dynamic Characterization Of The Colosseum”, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 15(8), 1105-1121.

Roselli I., Fioriti V., Bellagamba I., Mongelli M., Tatì A., Barbera M., De Canio G., (2017), “Urban transport vibrations and cultural heritage sites in Rome: the cases of the temple of Minerva Medica and of the Catacomb of Priscilla”, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 223, 335-43.

Sevim B., Bayraktar A., Altunışık A. C., Atamtürktür S., Birinci F. (2011), “Assessment Of Nonlinear Seismic Performance Of A Restored Historical Arch Bridge Using Ambient Vibrations”, Nonlinear Dynamics, 63(4), 755-770.

Standart 1, German Standard DIN4150-3, (1999), Structural Vibration-Part 3: Effects Of Vibration On Structures.

Standart 2, FEMA 356, (2000), Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings.

Standart 3, ASCE 41-17, (2017), Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.

Standart 4, TBDY, (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.

Şahin Güçhan N., Ünay A. İ., Böke H., Gökçe F. (2005), “Diyarbakır Kent Surları Koruma Sorunları”.

Temel M., (2012), “Uluslararası Diyarbakır Surları Sempozyumu”, Diyarbakır, Diyarbakır Valiliği.

Toprak V., Kavak O., (2012), “Suriçi Diyarbakır Tarihi Binalarındaki Silindirik Kaya Kolonların Jeolojik İncelemesi”, Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (11), 23-36.

Tucholka P., Kielbasinski K., Mieszkowski R., (2008), “Tracing Seismic Surface Waves Induced By Road Traffic In Urban Environment: Example Of St. Catherine's Church Hill In Warsaw”, *Geologija*, 50, S79-S84.

Votsis R. A., Kyriakides N., Chrysostomou C. Z., Tantele E., Demetriou T., (2012), “Ambient Vibration Testing Of Two Masonry Monuments In Cyprus”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 58-68.

Yıldırım D. Y., Yetim Ş., (2020), “Dini Yapılar ve Kent Kimliği İlişkisi Üzerine Bir Değerlendirme: Trabzon Örneği”.

Web 1 (2022), <http://tribecatrib.com/content/citys-first-railroad-new-york-and-harlem-line-began-downtown> (Erişim Tarihi: 14/01/2022).

Web 2 (2022), <https://pbs.twimg.com/media/DOxT9mFX0AAxxzr?format=jpg&name=large> (Erişim Tarihi: 14/01/2022).

Web 3 (2022), <https://epochtimestr.com/index.php/20-subat-1914-istanbulda-ilk-elektrikli-tramvay-sefere-basladi> (Erişim Tarihi: 14/01/2022).

Web 4 (2022), <https://www.uzmanlar.com/otomotiv/otomobil-tarihi/turkiyeye-ilk-otomobil-ne-zaman-getirildi> (Erişim Tarihi: 14/01/2022).

Web 5 (2022), <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/amasya/gezilecekyer/kapi-agasi-buyuk-aga-medreses> (Erişim Tarihi: 16/01/2022).

Web 6 (2022), <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/afyonkarahisar/gezilecekyer/tashan839789> (Erişim Tarihi: 16/01/2022).

Web 7 (2022), <https://www.birdakikadageziyorum.com/wp-content/uploads/2018/02/dikilita%C5%9F.jpg> (Erişim Tarihi: 18/01/2022).

Web 8 (2022), <https://www.kulturportali.gov.tr/portal/tarihin-taniklari--saat-kuleleri> (Erişim Tarihi: 16/01/2022).

Web 9 (2022), <https://www.sensequake.com/blog-ema-vs-oma> (Erişim Tarihi: 16/01/2022).

Web 10 (2021), www.diyarbakir.bel.tr (Erişim Tarihi: 07/11/2021).

Web 11 (2022), <https://www.metro.istanbul/haber/detay/istanbulda-raylar-abdulhamid-han-cin-yenilendi> (Erişim Tarihi: 08/02/2022).

ÖZGEÇMİŞ

Gül KIR, 2014 yılında Habire Yahşi Anadolu Lisesi'ndeki eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018 yılında lisans eğitimini başarıyla tamamlamasının ardından aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deprem ve Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı. Sektörde, yapısal tasarım mühendisi ve saha şefi görevlerinde bulunmuş olup kariyer hayatına devam etmektedir.

