

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HAFİF RAYLI SİSTEMLERDEN KAYNAKLANAN
TİTREŞİMLERİN TARİHİ YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ:
ZEYNEP SULTAN CAMİİ ÖRNEĞİ

UFUK GÜLYÜZ

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

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HAFİF RAYLI SİSTEMLERDEN KAYNAKLANAN
TİTREŞİMLERİN TARİHİ YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ:
ZEYNEP SULTAN CAMİİ ÖRNEĞİ

UFUK GÜLYÜZ

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

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**THE EFFECTS OF VIBRATIONS FROM LIGHT RAIL
SYSTEMS ON HISTORICAL STRUCTURES: THE
CASE OF ZEYNEP SULTAN MOSQUE**

UFUK GÜLYÜZ

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING
PROGRAM**

ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 04/07/2024 tarih ve 2024/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan **Ufuk Gülyüz**'ün tez çalışması **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. ABDULLAH CAN ZÜLFİKAR

ÜYE

: PROF. DR. FERİT ÇAKIR

ÜYE

: DOÇ. DR. OSMAN KIRTEL

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

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

İMZA/MÜHÜR



Aileme

ÖZET

Tarihi mirasın korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması, toplumların kültürel kimliğini ve tarihini korumanın önemli bir parçasıdır. Özellikle İstanbul gibi tarih ve kültür açısından zengin bir şehirde bulunan tarihi yapıların korunması büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, tarihi yapıların yapısal davranışını ve performansını belirlemek için detaylı incelemeler ve doğru analizler yapılması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında İstanbul'un tarihi yarımadasında bulunan ve Osmanlı döneminin önemli eserlerinden biri olan Zeynep Sultan Camii'nin yapısal performansına odaklanılmıştır. Caminin yapısal durumunu değerlendirmek ve gelecek kuşaklara sağlam bir şekilde aktarılmasını sağlamak amacıyla kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın ilk aşamasında, caminin tarihi dokusunu yansıtan rölöve projeleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu model, caminin mimari özelliklerini ve yapısal yapısını en iyi şekilde yansıtmak için titizlikle hazırlanmıştır. Daha sonra, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu sağlamak amacıyla cami ve çevresine yerleştirilen ivme ölçerlerden elde edilen veriler kullanarak model kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon süreci, yapılan analizlerin ve sonuçların güvenilirliğini artırmak için oldukça önemlidir. Kalibre edilmiş model, gerçek dünya koşullarına daha yakın sonuçlar elde etmek için optimize edilmiştir. Son aşamada, kalibre edilmiş model üzerinde detaylı statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek caminin yapısal performansı belirlenmiştir. Bu analizler, caminin mevcut durumunu değerlendirmek ve olası riskleri belirlemek için yapılmıştır. Statik analizler, caminin taşıyıcı sistemini ve dayanıklılığını incelemekte; dinamik analizler ise yapıya etki eden dinamik yükleri ve titreşimleri değerlendirmektedir.

Bu çalışma, tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması konusunda önemli bir adım olup, kültürel mirasın korunması ve sürdürülebilirliğine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Sonuç olarak, Zeynep Sultan Camii'nin yapısal durumunu belirlemek için yapılan bu kapsamlı araştırma, tarihi yapıların gelecek kuşaklara sağlam bir şekilde aktarılmasına ve kültürel mirasın korunmasına büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Eleman Analizleri, Tarihi Yığma Yapılar, Hafif Raylı Sistem Titreşim Kayıtları, Sonlu Elemanlar Kalibrasyonu, Zeynep Sultan Camii

ABSTRACT

Preservation and transmission of historical heritage are crucial parts of safeguarding the cultural identity and history of societies. Especially in a city as rich in history and culture as Istanbul, the preservation of historical structures holds significant importance. Therefore, detailed examinations and accurate analyses are necessary to determine the structural behavior and performance of historical buildings.

This thesis focuses on the structural performance of Zeynep Sultan Mosque, an important artifact from the Ottoman era located in the historical peninsula of Istanbul. A comprehensive research has been conducted to assess the structural condition of the mosque and ensure its secure transmission to future generations. In the initial phase of this research, a finite element model was constructed using survey projects that reflect the historical fabric of the mosque. This model was meticulously prepared to accurately depict the architectural features and structural system of the mosque. Subsequently, to validate the accuracy of the created finite element model, data obtained from accelerometers placed around the mosque and its surroundings were used to calibrate the model. This calibration process is crucial to enhance the reliability of the analyses and results. The calibrated model was optimized to obtain results closer to real-world conditions. In the final stage, detailed static and dynamic analyses were conducted on the calibrated model to determine the structural performance of the mosque. These analyses were carried out to evaluate the current condition of the mosque and identify potential risks. Static analyses examined the load-bearing system and durability of the mosque, while dynamic analyses evaluated dynamic loads and vibrations affecting the structure.

This study represents a significant step towards the preservation and transmission of historical buildings to future generations, aiming to contribute to the conservation and sustainability of cultural heritage. Consequently, this comprehensive research on determining the structural condition of Zeynep Sultan Mosque holds great importance for securely transmitting historical structures to future generations and preserving cultural heritage.

Keywords: Finite Element Analyses, Historical Masonry Structures, Ambient Light Rail System Vibration Test, Finite Element Calibration, Zeynep Sultan Mosque

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. A. Can Zülfikar'a, saha çalışmalarım konusunda yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ferit ÇAKIR 'a ve sevgili Gül Kır'a, Betül Yazıcı'ya Fuat Aktürk'e, çalışmalarımız sırasında bize yardımcı olan vakıf çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti, Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	3
2. ZEYNEP SULTAN CAMİ	8
3. HAFİF RAYLI SİSTEM TİTREŞİM VERİLERİNİN ALINMASI	13
3.1. Hafif Raylı Sistem Titreşim Kayıtları	17
4. YAPININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ	20
4.1. Modelleme Teknikleri	20
4.2. Yapı Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	22
4.3. Sonlu Elemanlar Analizleri	24
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ	26
5.1. Statik Analizler	26
5.2. Modal Analizler	28
5.3. Dinamik Analizler	29
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	39

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Hz	: Hertz
OMA	: Operasyonel Modal Analiz (Operational Modal Analysis)
DIN	: Uluslararası Alman Standardı
PCPV	: Pik Bileşen Parçacık Hızı
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
UNESCO	: Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Caminin konumu.	8
Şekil 2.2: Caminin 1940'lı yıllarının görünüşü.	10
Şekil 2.3: Caminin 1940'lı yıllarının görünüşü.	10
Şekil 2.4: Caminin planı.	11
Şekil 2.5: Caminin günümüzdeki görünümü.	12
Şekil 3.1: Camii ve çevresinden görünüm.	15
Şekil 3.2: İvmeölçerlerin konumu.	15
Şekil 3.3: Hafif raylı sistem titreşim kayıtların toplanmasına yönelik saha çalışmaları.	16
Şekil 3.4: Camiye yakın konumdan(Gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan veriler.	17
Şekil 3.5: Camiye uzak konumdan(Dönüş yönü) geçen tramvaydan alınan veriler.	18
Şekil 3.6: Camiye yakın konumdan(Gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan verilerin x doğrultusundaki fourier spektrumları.	18
Şekil 3.7: Camiye yakın konumdan(gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan verilerin y doğrultusundaki fourier spektrumları.	19
Şekil 4.1: Yığma duvarları modellenme teknikleri.	20
Şekil 4.2: Homojenleştirme işlemi.	21
Şekil 4.3: Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.	21
Şekil 4.4: Yapının sonlu eleman modeli.	23
Şekil 4.5: Camiden elde edilen hakim frekans değeri.	24
Şekil 4.6: Zeynep Sultan Camisinin hakim modu.	25
Şekil 5.1: Toplam deformasyon.	26
Şekil 5.2: Tarihi cami yapısının maksimum kritik gerilmeleri.	27
Şekil 5.3: Tarihi cami yapısının minimum kritik gerilmeleri.	27
Şekil 5.4: Tarihi cami yapısının ilk altı moduna ait mod şekilleri.	28
Şekil 5.5: Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum tepe deplasman değeri.	29
Şekil 5.6: Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum asal gerilmeler.	30
Şekil 5.7: Dinamik analizler sonucunda elde edilen minimum asal gerilmeler.	30
Şekil 6.1: DIN 4150 alman normun'a göre yapı tipi-frekans-hız ilişkisi.	32
Şekil 6.2: T1 tramway hattından elde edilen verilerin karşılaştırılması.	33
Şekil 6.3: Öteleme oranlarına göre elde edilen performans seviyeleri.	35

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: Saykal marka ivmeölçerlerin teknik özellikleri.	14
Tablo 6.2: Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k (MPa).	34
Tablo 6.3: Dinamik analizler sonucunda elde edilen öteleme oranları.	35



1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, bir toplumun kültürel ve tarihi mirasının önemli bir parçasını oluştururlar. Bu yapılar, geçmişten günümüze uzanan birer tanık olarak, toplumların kimliklerini ve geçmişlerini yansıtan önemli yapıtlardır. Her biri kendine özgü mimari tarzları, estetik değerleri ve tarihsel anlamlarıyla, insanlığın ortak mirası olan bu yapılar, korunmaları ve gelecek kuşaklara aktarılması gereken değerli varlıklardır. Tarihi yapıların önemi, sadece mimari değerleriyle sınırlı değildir. Aynı zamanda, geçmişteki kültürel, sosyal ve ekonomik yaşamın izlerini taşıyan belgeler olarak da değerlidirler. Bu yapılar, bir zamanlar yaşanmış olayların, kültürel pratiklerin ve toplumsal yapıların somut birer ifadesidir. Dolayısıyla, tarihi yapılar sadece estetik açıdan değil, aynı zamanda tarih, sanat, sosyoloji ve antropoloji gibi alanlarda da büyük öneme sahiptirler.

Tarihi yapıların değerlendirilmesi ve korunması, çok yönlü bir süreç gerektirmektedir. Bu süreçte, yapıların mimari özellikleri, tarihsel ve kültürel bağlamları, yapı malzemeleri ve yapım teknikleri gibi birçok faktör dikkate alınmalıdır. Değerlendirme yöntemleri arasında, rölöve çalışmaları, yapısal analizler, malzeme analizleri, restorasyon projeleri ve koruma planları gibi farklı disiplinlerden gelen yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yöntemler, yapıların tarihsel ve fiziksel özelliklerini anlamak ve koruma stratejileri geliştirmek için önemli araçlar sağlamaktadır. Koruma yöntemleri ise, tarihi yapıların fiziksel ve kültürel bütünlüklerini korumayı amaçlamaktadır. Restorasyon, konservasyon, yeniden kullanım ve bilinçlendirme gibi farklı yaklaşımlar, tarihi yapıların korunması için uygulanan temel yöntemlerdir. Ancak, bu yöntemlerin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için, yapıların doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve ihtiyaçlarına uygun stratejilerin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında İstanbul'un tarihi yarımadasında bulunan ve Osmanlı Dönemi'nin önemli eserlerinden olan tarihi Zeynep Sultan Camii'ne odaklanılmıştır. Tarihi yarımada, şehrin kalbi konumundadır ve dünya üzerindeki en önemli tarihi bölgelerden biridir. Coğrafi konumu, tarih boyunca çeşitli medeniyetlerin ve kültürlerin birleşme noktası olmuştur. Tarihi yarımada, iki kıtayı birbirine bağlayan

eşsiz bir konuma sahiptir ve bu nedenle stratejik bir öneme sahiptir. Antik çağlardan günümüze kadar pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış olan bu bölge, bir açık hava müzesi niteliğindedir. Tarihi yarımada üzerinde pek çok önemli tarihi yapı bulunmaktadır. Bu yapılar arasında Ayasofya, Topkapı Sarayı, Sultanahmet Camii, Yerebatan Sarnıcı ve Kapalıçarşı gibi dünya çapında ün kazanmış yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar, mimari açıdan büyük bir öneme sahip olmanın yanı sıra, tarihi ve kültürel açıdan da büyük bir zenginliği temsil etmektedirler.

Zeynep Sultan Camii de İstanbul'un tarihi yarımadasında yer alan önemli bir tarihi yapıdan biridir. Cami, Osmanlı döneminde inşa edilmiş olup, tarihi ve mimari açıdan büyük bir öneme sahiptir. Cami, adını III. Ahmet'in kızı olan Zeynep Asime Sultan'dan almaktadır. 1769 yılında Sultan III. Ahmet'in kızı Zeynep Asime Sultan tarafından Ayazma Camii'nin de mimarı olan Mehmet Tahir Ağa'ya yaptırılmış olan cami barok tarzındaki önemli örneklerden biridir.

Zeynep Sultan Camii, İstanbul'un tarihi ve kültürel mirasının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bu nedenle, caminin yapısal durumunun değerlendirilmesi ve korunması büyük bir önem arz etmektedir. Cami, İstanbul'un tarihi yarımadasındaki diğer önemli yapılarla birlikte şehrin kimliğini ve tarihini yansıtan önemli bir sembol olarak kabul edilmektedir.

Zeynep Sultan Camii gibi önemli bir kültürel mirasın yapısal durumunun değerlendirilmesi ve korunması için geliştirilen metodoloji, bu alanda atılan önemli adımlardan biridir. Bu çalışma, tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu tez kapsamında, caminin rölöve projeleri kullanılarak 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu model, caminin mimari özelliklerini ve yapısal yapısını en iyi şekilde yansıtmak için özenle hazırlanmıştır. Daha sonra, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu sağlamak amacıyla cami ve çevresine yerleştirilen ivme ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak model kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon süreci, yapılan analizlerin ve sonuçların güvenilirliğini artırmak için oldukça önemlidir. Son aşamada, kalibre edilmiş model üzerinde detaylı statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek caminin yapısal performansı belirlenmiştir. Bu analizler, caminin mevcut durumunu değerlendirmek ve olası riskleri belirlemek amacıyla yapılmıştır. Statik analizler, caminin taşıyıcı sistemini ve dayanıklılığını incelemekte; dinamik analizler ise yapıya etki eden dinamik yükleri ve titreşimleri değerlendirmektedir.

1.1. Literatür Özeti, Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu tezin temel amacı, tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılmasına yönelik önemli bir adım olan yapısal analizlerin doğru bir şekilde yapılmasını sağlamaktır. Özellikle, tarihi Zeynep Sultan Camii gibi kültürel mirasın önemli bir parçasını oluşturan yapıların yapısal durumunu belirlemek ve korumak hedeflenmektedir. Bu bağlamda, tez tarihi yapıların yapısal sağlamlığının değerlendirilmesi ve gelecek kuşaklara güvenle aktarılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tezin en önemli katkısı, tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilirliği açısından yapısal analizlerin doğru bir şekilde yapılmasına yönelik bir model sunmasıdır. Tez, sonlu elemanlar modeli oluşturulması, modelin kalibre edilmesi ve yapısal performansın belirlenmesi gibi adımları içeren kapsamlı bir metodoloji sunmaktadır. Bu metodoloji, tarihi yapıların yapısal analizlerinde kullanılabilecek güvenilir bir yol haritası sunarak bu önemli mirasın gelecek kuşaklara aktarılmasına katkı sağlamaktadır.

Tez, üç ana bölümden oluşmaktadır:

- Giriş ve Literatür Taraması: Bu bölümde, tarihi yapıların korunması ve yapısal analizlerin önemi vurgulanmakta, literatürdeki benzer çalışmalar incelenmektedir. Ayrıca, Zeynep Sultan Camii'nin önemi ve yapısal analizine yönelik çalışmalar özetlenmektedir.

- Metodoloji: Bu bölümde, tezin yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, modelin kalibre edilmesi ve yapısal performansın belirlenmesi adımları detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

- Sonuçlar ve Tartışma: Bu bölümde, elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve tezin amacına yönelik bulgular tartışılmaktadır. Ayrıca, yapılan çalışmanın sınırlamaları ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar üzerine öneriler sunulmaktadır.

Bu içeriklerin yanı sıra, tez ek olarak rölöve projeleri, ivme ölçer verileri, sonlu elemanlar modeli ve yapılan analizlerin ayrıntılı raporlarını da içermektedir. Bu şekilde, tez tarihi Zeynep Sultan Camii'nin yapısal durumunu değerlendirmek ve korumak için gerekli olan bilgi ve metodolojiyi sağlamaktadır.

Konu ile ilgili literatür özeti aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Akan (2010), çalışmasında Anadolu'daki ahşap sütunlu camilerin mimari ve taşıyıcı sistem özelliklerini incelemiş, ardından Ankara Ahi Elvan Camisi'nin matematiksel modelini ve analizini yapmıştır. Sonuç olarak, ahşabın maruz kaldığı yükler karşısında önemli bir zayıflığının olmadığı belirlenmiştir [**Akan, 2010**].

Aköz (2008), tez çalışmasında yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi üzerine durmuştur. Tarihi bir yığma yapının üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile statik ve dinamik analizlerini yaparak deprem güvenliğini değerlendirmiş ve güçlendirme ihtiyacı ile metotları hakkında önerilerde bulunmuştur [**Aköz, 2008**].

Çavuş ve Dayı (2013), çalışmasında Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin yapısal ve depreme karşı davranışını belirlemek için analiz yapmıştır. Türbe, SAP2000 bilgisayar programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır: sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketleri. Yapının deprem etkisi altındaki performansı incelenmiş ve analiz sonuçları, türbenin yapısal performansı hakkında genel bir fikir sunmuştur [**Çavuş ve Dayı, 2013**].

Anadut (2016), Yozgat'ta bulunan Elekçi Köprüsü ve Yozgat Saat Kulesi'nin dinamik davranışlarını değerlendirmek için bu yapıları SAP2000 programında makro modelleme tekniği ile modellemiştir. 13.03.1991 tarihli Erzincan depremi kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında dinamik analizler sonucunda, tarihi yapıların deprem etkisi altındaki davranışları belirlenmiştir [**Anadut, 2016**].

Çavuş (2013), "Tarihi Niksar Kulak Kümbetinin Deprem Altındaki Sismik Davranışının Değerlendirilmesi" adlı çalışmasında, restorasyonlarda geleneksel ve çağdaş malzemelerin birlikte kullanımının yapısal sorunlara yol açabileceğini tartışmıştır. Bu sorunları incelemek için yapı, SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve deprem etkisi altındaki performansı analiz edilmiştir [**Çavuş, 2013**].

Uğurlu, Günaslan ve Karaşin (2017), Diyarbakır'daki 16. yüzyıl Şeyh Mutahhar Camii'nin Dört Ayaklı Minaresi'ni incelemiştir. Minarenin sismik direncinin zayıf olmasına rağmen, sadece birkaç çatlak bulunmuştur. Çatlakların nedenini araştırmak için makro modeli oluşturulmuş ve SAP2000 programında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Dinamik ve statik yükler altında minarenin davranışı analiz

edilerek, zemin hareketleri ve malzeme özellikleri hesaba katılmıştır [Uğurlu, Günaslan, Karaşin ve Çavuş, 2017].

Usta ve Bozdağ (2021), Tarihi Başdurak Camii'nin deprem analizini yapmıştır. Mimari ölçülerine uygun şekilde SAP2000 yazılımı kullanılarak modellenen yapı, X ve Y yönlerinde deprem yer hareketi uygulanarak dinamik analizlere tabi tutulmuştur. Çeşitli deprem seviyelerinde sismik performansı değerlendirilen caminin deplasman, gerilme ve taban kesme kuvvetlerinin maksimum ve minimum değerleri analiz edilerek yapısal performansı hakkında bilgi verilmiştir [Usta ve Bozdağ, 2021].

Çoban (2018), Bayburt'ta bulunan tarihi Yakutiye [Yeni] Camii'nin üç boyutlu sonlu eleman modelini SAP2000 programında hazırlamış ve dinamik davranışını incelemiştir. Yapı, düşey yükleri güvenli bir şekilde taşıdığı belirlenmiş ve dinamik analizler, depreme karşı iyi bir performans gösterdiğini, ancak kauçuk izolatörler ile güçlendirilmiş modelin daha iyi performans sergilediğini ortaya koymuştur [Çoban, 2018].

Kishalı (2020), 18. yüzyılda inşa edilen ve Kocaeli, İzmit Hacıhasan mahallesinde bulunan Yeni Hamam'ın restorasyon projesi kapsamında yapısal davranışını incelemiştir. 1999 depremi ve bitişindeki betonarme yapının etkisiyle hasar gören yapı, 2016-2018 yılları arasında restore edilmiştir. Termal kamera görüntüleme, Schmidt beton test çekici sonuçları ve SAP2000 programıyla yapılan analizler, yapının kritik alanlarında hasar olduğunu ve kubbe ile kemerlerde yük birikmelerinin fazla olduğunu göstermiştir [Kishalı, 2020].

Kamanlı vd. (2019), Bu çalışma, tarihi binaların korunmasının önemini ve bu yapıların yapısal davranışlarının iyi bilinmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Konya'da bulunan Tarihi Sille Ak Camisi üzerinde yapılan analizler sonucunda, caminin en çok zorlanan kısımlarının kapı ve pencere boşluklarının kenarları, duvarların döşeme ile birleştiği kısımlar ve duvarların birleşim bölgeleri olduğu tespit edilmiştir. Duvarlarda basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı ve bu yönlerden güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, tarihi yapıların korunmasında yapısal analizlerin önemini göstermektedir [Kamanlı vd., 2019].

Başgül (2020), Bu çalışma, Kırşehir Cacabey Camisi'nin tarihçesi, mimari özellikleri, taşıyıcı sistemi, malzeme özellikleri, zemin durumu ve onarımlarını

incelemiştir. SAP2000 programı kullanılarak caminin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve düşey [statik] ile yatay [dinamik] yükler altında analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, yapı düşey yükler altında güvenli olup, yatay yükler altında düzensiz kütle dağılımı nedeniyle emniyet gerilmesi sınırına yaklaşmış, ancak risk oluşturmamaktadır. Çalışma, tarihi yapıların yapısal analizlerinin önemini vurgulamaktadır [Başgöl, 2020].

Zabin, Çarhoğlu ve Korkmaz (2013), bu çalışmada, Karaman Ermenek'teki Tol Camisi'nin deprem davranışı incelenmiştir. SAP2000 programı ile sonlu elemanlar modeli oluşturularak çekme gerilmesi, basınç gerilmesi, yer değiştirme ve kayma gerilme değerleri belirlenmiştir. 1999 Kocaeli, 1999 Düzce ve 1992 Erzincan depremlerinin verileri kullanılarak yapılan dinamik analizlerde, en yüksek gerilme, yer değiştirme ve kayma gerilmesi değerlerinin Kocaeli depreminde meydana geldiği tespit edilmiştir [Zabin vd., 2013].

Özbek ve Şener (2021), bu çalışmada, 1932 yılında İstanbul Eyüpsultan'da inşa edilen ve 2018'de yıkılan tarihi Fil Köprüsü'nün yapısal ve dinamik özellikleri incelenmiştir. Yerinde yapılan ölçümler ve hasarsız testlerle malzeme özellikleri belirlenmiş, köprü SAP2000 programında modellenmiştir. Titreşim periyotları ve mod şekilleri hesaplanmış ve serbest titreşim ölçümleriyle karşılaştırılmıştır [Özbek ve Şener, 2021].

Dikiciaşık (2011), bu çalışmada, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan alınan deprem verileri kullanılarak düzensiz bir yığma yapının deprem davranışı incelenmiştir. SAP2000 programı ile yapılan analizlerde, uzak ve yakın bölge depremlerinin sismik dalgalarının yapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, deprem dalgalarının mesafeye bağlı karakteristik değişimlerini de göz önüne alarak yapı davranışını ortaya koymuştur [Dikiciaşık, 2011].

Çelebi ve Aydın (2021), bu çalışmada, Erzurum Şenkaya'daki Yünören Köprüsü'nün büyük depremler altındaki performansı ve güçlendirme yöntemleri incelenmiştir. SAP2000 programı kullanılarak köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve yapılan analizlerde köprü ayaklarının ileri hasar seviyesinde olduğu belirlenmiştir [Çelebi ve Aydın, 2021].

Rojbin İzgi (2020), Bu yüksek lisans tezinde, Diyarbakır Surları'ndaki Yedikardeş Burcu ANSYS programı ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Üç farklı modelleme

yapılmış, statik ve dinamik analizlerle burcun deprem altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuçlara göre, Yedikardeş Burcu sınırlı hasar performans seviyesinde olduğu tespit edilmiştir [İzgi, 2020].

Erkal (2017), bu çalışmada, Küçük Ayasofya Camii ve bahçesinde trenden kaynaklanan titreşimler incelenmiştir. Titreşimlerin tarihi yapılar ve insanlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İnsanlar için konfor sınır değeri olan 0.3 mm/s ve tarihi yapılar için en düşük sınır değeri olan 1 mm/s'in bazı durumlarda aşıldığı belirlenmiştir. Homojen olmayan malzemelerden yapılan tarihi yapıların analizi ve hasar tahmini zorlaşmıştır. [Erkal, 2017].

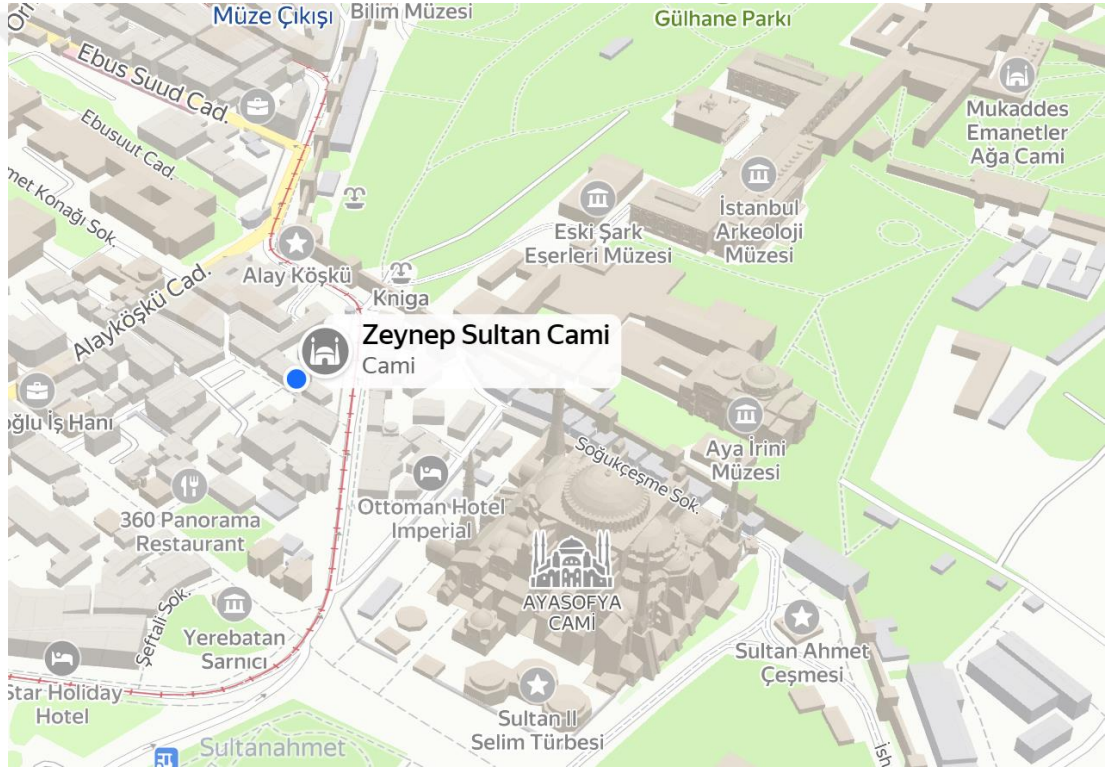
Onat ve Saygın (2015), bu çalışmada, tarihi Tağar Köprüsü makro modelleme tekniği ile üç boyutlu olarak modellenmiş ve ANSYS programı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizler yapılmıştır. Erzincan depremine ait ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizlerde, köprüde çatlakların oluştuğu ve zamanla büyüdüğü, ancak yapının performansını kritik seviyede etkilemediği belirlenmiştir. [Onat ve Sayın, 2015].

Osmancıklı vd., (2012), Bu çalışmada, Trabzon'daki Ayasofya Çan Kulesi'nin restorasyon öncesi ve sonrası dinamik özellikleri kıyaslanmıştır. Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak yapılan titreşim testleri, restorasyon öncesi ve sonrası mod şekillerinin benzer olduğunu, ancak yapının sönüm oranının %2.69'dan %0.6'ya düştüğünü göstermiştir. Restorasyon sürecinde yapıların titreşim testlerinin dikkate alınmasının önemi vurgulanmıştır [Osmancıklı vd., 2012].

Sevim vd., (2010), Bu çalışmada, Çamlıhemşin/Rize'deki tarihi Mikron Kemer Köprüsü'nün titreşim etkileri altında lineer olmayan performans analizi yapılmıştır. 19. yüzyılda inşa edilen ve 1998'de restore edilen köprüye ivme ölçerler yerleştirilerek veriler kaydedilmiştir. ANSYS programında yapılan analizlerde, ilk modelde doğal frekanslar 3.8-14.6 Hz arasında bulunmuş, kalibrasyon sonrası %5 düşüş gözlenmiştir. Yer değiştirme ve gerilme sonuçlarının taş malzeme sınır değerleri içinde kaldığı belirlenmiştir [Sevim vd., 2010].

2. ZEYNEP SULTAN CAMİ

Zeynep Sultan Camii, İstanbul'un tarihi yarımadasında, Ayasofya, Yerebatan Sarayı ve Gülhane Parkı gibi önemli tarihi ve kültürel mekanlar arasında yer almaktadır. Bu cami hem mimari yapısıyla hem de bulunduğu konum itibarıyla, tarihi yarımada'nın zengin kültürel mirasının bir parçasını oluşturmaktadır. Zeynep Sultan Camii, bölgedeki diğer tarihi yapılarla birlikte, İstanbul'un geçmişine ışık tutan önemli bir eserdir ve ziyaretçilerine benzersiz bir deneyim sunmaktadır [Web 1, 2023].



Şekil 2.1: Caminin konumu.

Zeynep Sultan Camii 1769 yılında III. Ahmed'in kızı Zeynep Âsime Sultan tarafından Ayazma Câmii'nin de mîmarı olan Mehmet Tâhir Ağa'ya yaptırılmış barok tarzındaki câmidir. Mîmârî tarzına bulunduğu mekân göz önüne alınarak karar verilmiştir. Bu özel tarzı ve yapımında kullanılan malzemeler nedeniyle Bizans kiliselerini anımsatır [Web 1, 2023].

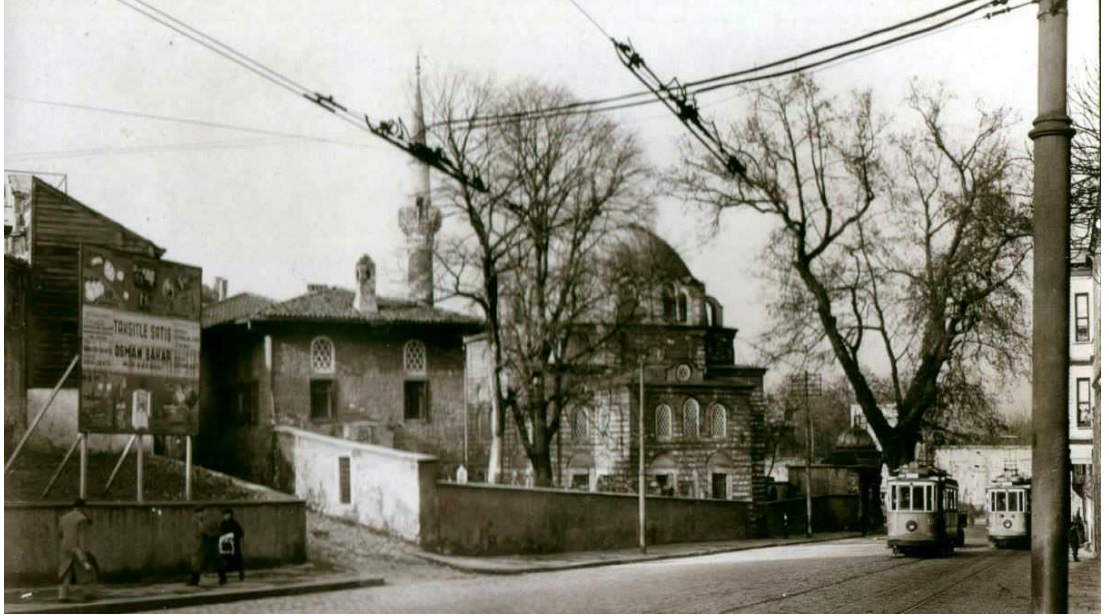
G l h ne'nin kar sısında bulunan c minin arka tarafında bugün de ilkokul olarak kullanılan mektep vardır. Eskiden sebil olarak kullanılan kısmı ise  u anda vakıflar tarafından kiraya verilmiş, büfe olarak i letilmektedir. C minin hemen önünde I. Abdülhamit'in k llyesinden, 1920'lerde Eminönü'den 4. Vakıf Han'ın yapımı nedeniyle buraya ta ınmı  olan  e me artık istimlak çalışmaları sırasında Taya Hatun Sokak'taki bugünkü yerine ta ınmı tır. Hemen  st tarafında ise Osmanlı Araştırmaları Vakfı bulunmaktadır **[Web 1, 2023]**.

Haz resinde Alemdar Mustafa Paşa'nın mezarı bulunmaktadır. Yeniçeri isy nını bastırmak için  stanbul'a gelen Alemdar Mustafa Pa a tahta II. Mahmut'u çıkarmış, kendisi de sadr zamı olmuştur. Ancak bir süre sonra yeniçeriler tekrar ayaklanıp Alemdar Mustafa Paşa'nın evini ku atmı , pa a da kendisiyle birlikte evini havaya u urmu tur. Cesedi yeniçeriler tarafından Yedikule Zindanları'na atılmıştır. 1900 yılında  stanbul'da ilk istiml k çalışması sırasında naa ı bir tören düzenlenerek Zeynep Sultan Camii'nin avlusuna defnedilmiştir. C minin bahçesine bir sıbyan mektebi yapılmış ve Alemdar Mustafa Paşa'nın ismi verilmiştir **[Web 1, 2023]**.

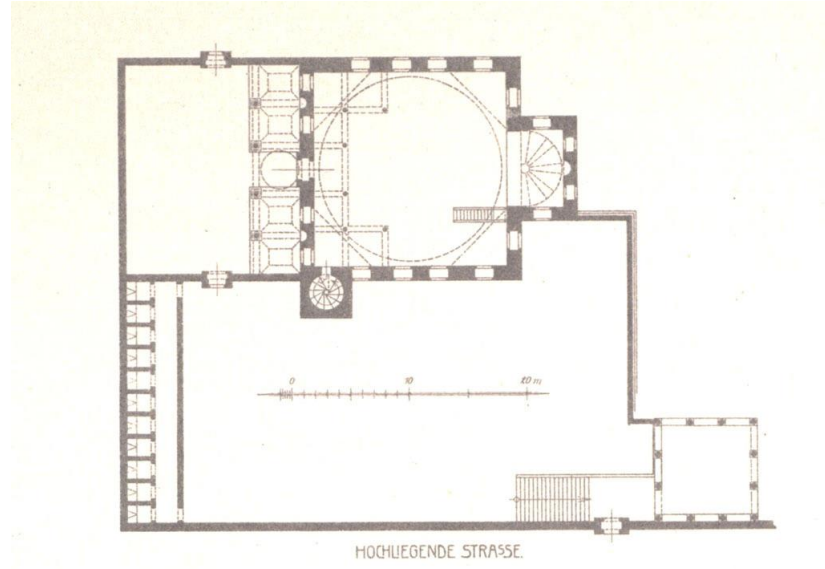
Ayrıca 1912 yılında yapılan istiml k çalışmaları neticesinde türbesi yıkılan Zeynep Sultan'ın naa ı, c minin bodrumunda 1950 yılına kadar kalmıştır. 1950'de dönemin vakıflar id resi tarafından Zeynep Sultan'ın naa ı bugünkü yerine defnedilmiştir. C minin bodrumu ise 1983 yılında restore edilmiş,  u an h len ib dete açık durumdadır. III. Selim'in sadr zamlarından Zeynep Sultan ile evli olan Melek Mehmet Paşa'nın kabri de c minin haz resinde yer almaktadır. Zeynep Sultan Camii 1958 yılında Vakıflar  d resi tarafından, 1983 yılındaysa c mii cemaati tarafından restore edilmiştir. Zeynep Sultan Camii 1958 yılında Vakıflar  d resi tarafından, 1983 yılındaysa c mii cemaati tarafından restore edilmiştir. Zeynep Sultan Camii 2014 yılı yaz aylarından beridir  l özel idaresi tarafından yaptırılan restorasyon çalışmaları sebebiyle kapalıdır. Tarihi caminin 1940'lı yıllara ait görünüş ve günümüzdeki hali ** ekil 2.2** ve ** ekil 2.3**'te sunulmuştur **[Web 1, 2023]**.



Şekil 2.2: Caminin 1940'lı yıllara ait görünüşü [Ülgen Ailesi Arşivi].



Şekil 2.3: Caminin 1940'lı yıllara ait görünüşü [Ülgen Ailesi Arşivi].



ZEİNEB SULTANE DSCHAMI
(AM SERAI)

Şekil 2.4: Caminin planı [Web 2, 2023].



Şekil 2.5: Caminin günümüzdeki görünüşü.

3. HAFİF RAYLI SİSTEM TİTREŞİM VERİLERİNİN ALINMASI

Operasyonel Modal Analiz (OMA), çevresel etkilerden (trafik, rüzgar, yaya hareketi, makine titreşimleri gibi) kaynaklanan titreşimleri kullanarak yapıların dinamik özelliklerini belirleyen bir yöntemdir. Çevresel titreşim testi olarak da bilinir [Bayraktar vd 2010; Soyöz vd 2011]. Yapıların çevresel etkilerle titreştiği varsayılarak, bu titreşimlere verdikleri tepkiler incelenir. Başlangıçta demiryolu rayları için kullanılmış, günümüzde ise birçok yapıda uygulanmaktadır [Turan 2012].

Operasyonel Modal Analiz (OMA) yönteminde, yapıya uygulanan kuvvetin tam olarak ne olduğu bilinmez. Bu yüzden ölçümler, yapının istenen titreşim oranlarına ulaşabilmesi ve tepkisinin belirlenebilmesi için uzun süreli olmalıdır. Yöntem, yapının belirli bölgelerine titreşim ölçerler bağlanarak, yapının zamana bağlı tepkilerini kaydeder. Ardından, farklı yöntemler kullanılarak yapının dinamik parametreleri hesaplanır [Bayraktar vd.2010; Türker 2011].

Ulaşım araçlarının hareketinden kaynaklanan titreşimler, çevresel titreşim olarak adlandırılır. Bu titreşimler belirli bir sınırı aştığında, hem insanlar hem de yapılar üzerinde zararlı etkiler yaratabilir. Özellikle tarihi yapılar için bu titreşimlerin yıkıcı etkisi kaçınılmazdır. Bölgedeki araç trafiğinin artması, trafik titreşim seviyelerinin de yükselmesine neden olabilir. Bu nedenle, koruma altındaki yapıların planlanması sürecinde bu faktörün dikkate alınması çok önemlidir. Kültürel miras alanlarında çevresel titreşimlerin etkisini inceleyen araştırmalar da bu sebeple artmaktadır. Titreşim değerlerinin belirlenmesi için saha ölçümleri ve ivmeölçerlerin kullanılması gereklidir. Bu tez kapsamında, Zeynep Sultan Camii'nin yanından geçen T1 tramvay hattının titreşim kayıtları incelenmiştir (Şekil 3.1) [Kır, 2022].

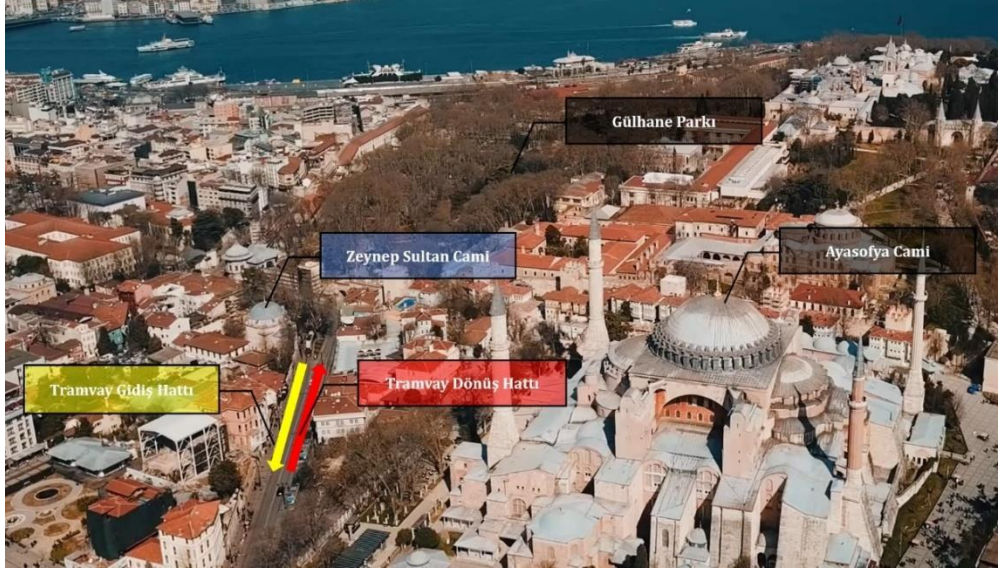
Zeynep Sultan Camii'nin ivme kayıtlarını almak için öncelikle saha çalışmaları gerçekleştirilmiş ve caminin mevcut durumu ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ardından, caminin tramvay hattına olan yakınlığı tespit edilmiştir. Titreşim verilerinin doğruluğunu artırmak amacıyla, hem yapıya hem de tramvay yolunun çeşitli noktalarına ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Bu yöntemle, özenle seçilmiş

noktalardan elde edilen veriler sayesinde camiye etki eden titreşimler daha doğru bir şekilde analiz edilebilmiştir.

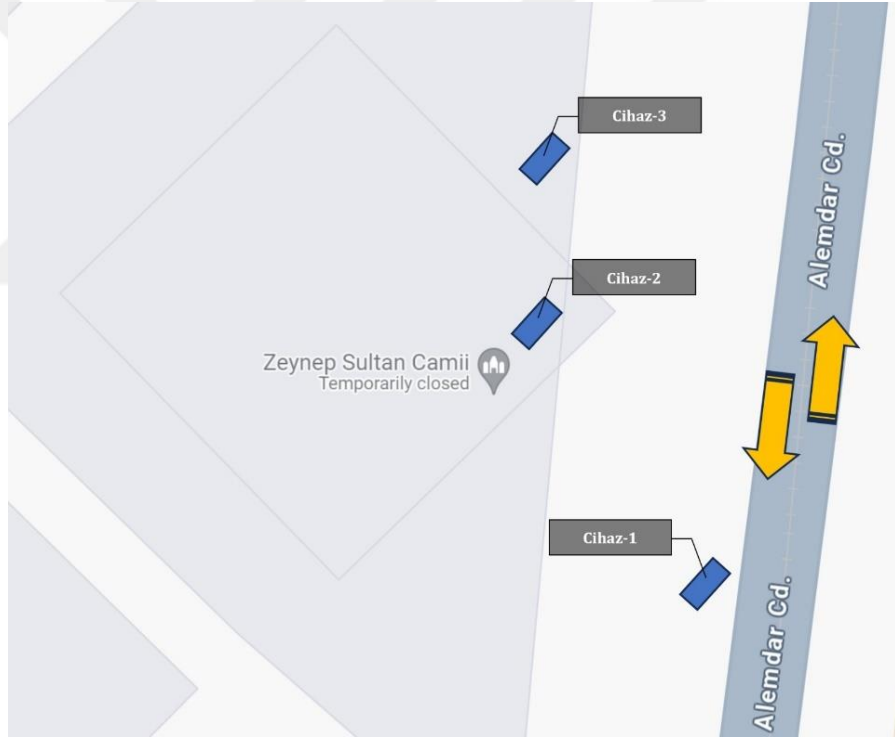
Zeynep Sultan Camisi'ne yerleştirilen yüksek hassasiyetli ivmeölçer cihazları ile Kabataş Bağcılar T1 tramvayının kayıtları alınmıştır. 2 katlı camide, kayıtların doğruluğu için yapının çeşitli yerlerine ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Alt kata 1 adet, bahçeye 1 adet ve tramvay yoluna 1 adet olmak üzere toplamda 3 adet yüksek hassasiyetli teknik özellikleri **Tablo 3.1**'de verilmiş olan Saykal marka ivmeölçer yerleştirilmiştir. Tramvay geçiş zamanlarına göre kayıtlar başlatılmış, yakın ve uzak tramvaya göre ayrı kayıtlar alınmıştır.

Tablo 3.1: Saykal marka ivmeölçerin teknik özellikleri.

İki ayrı mikro elektromekanik ölçüm teknolojisi
Hermetik mikro elektromekanik yapıyla mükemmel uzun dönem kararlılığı
3 eksen ivme ölçümü [X-Y-Z]
3 eksen eğim ölçümü [X-Y-Z]
Çok düşük gürültü seviyesi [$10 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, 2g ölçümleri]
$\pm 2\text{g} / \pm 4\text{g} / \pm 8\text{g}$ ölçüm aralığı [Kullanıcı tarafından programlanabilir]
24-bit örnekleme [$5 \mu\text{g}$ çözünürlük]
Doğrusallık dışılık $\pm 0.1\%$ FS
Saniyede 1000 örnek veri transferi [Kullanıcı tarafından programlanabilir]
Kullanıcı tarafından programlanabilir düşük geçiş ve yüksek geçiş dijital filtreler
IP68 Alüminyum Kasa



Şekil 3.1: Camii ve çevresinden görünüm.



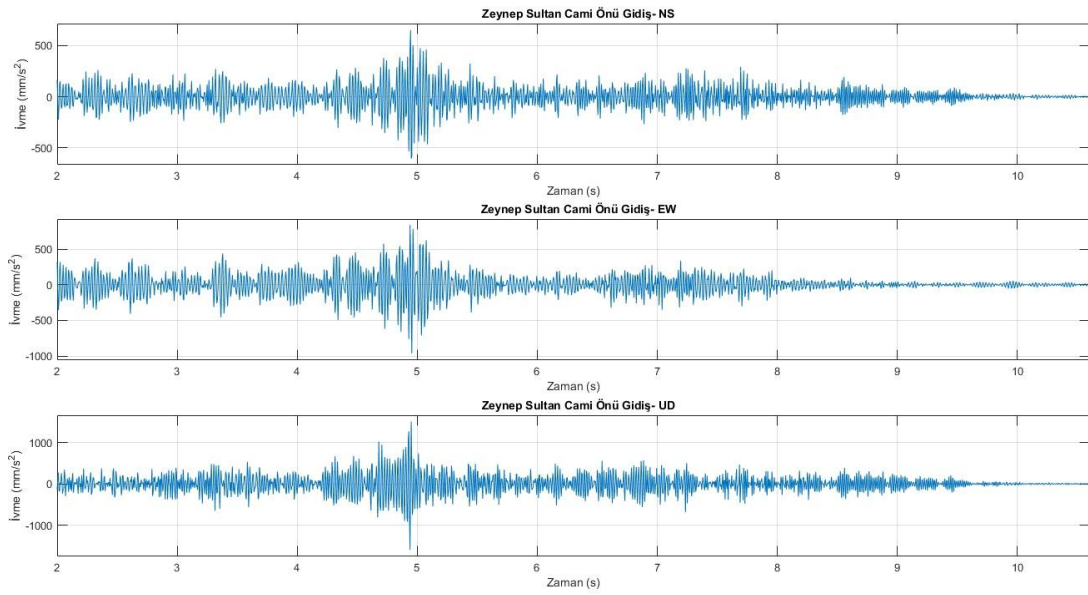
Şekil 3.2: İvmeölçerlerin konumu.



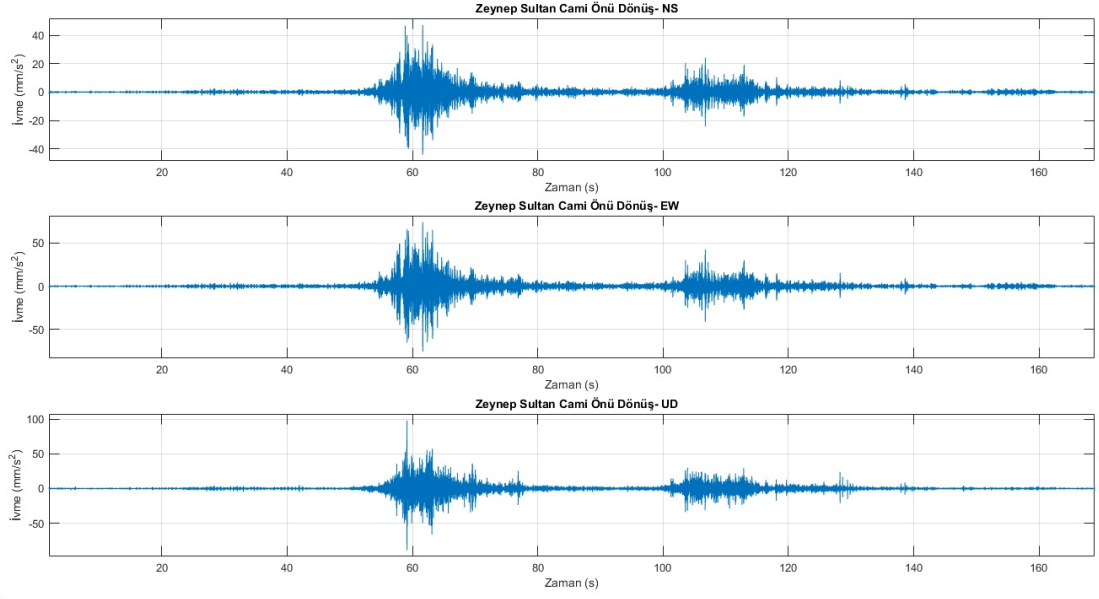
Şekil 3.3: Çevresel titreşim verilerin toplanmasına yönelik saha çalışmaları.

3.1. Hafif Raylı Sistem Titreşim Kayıtları

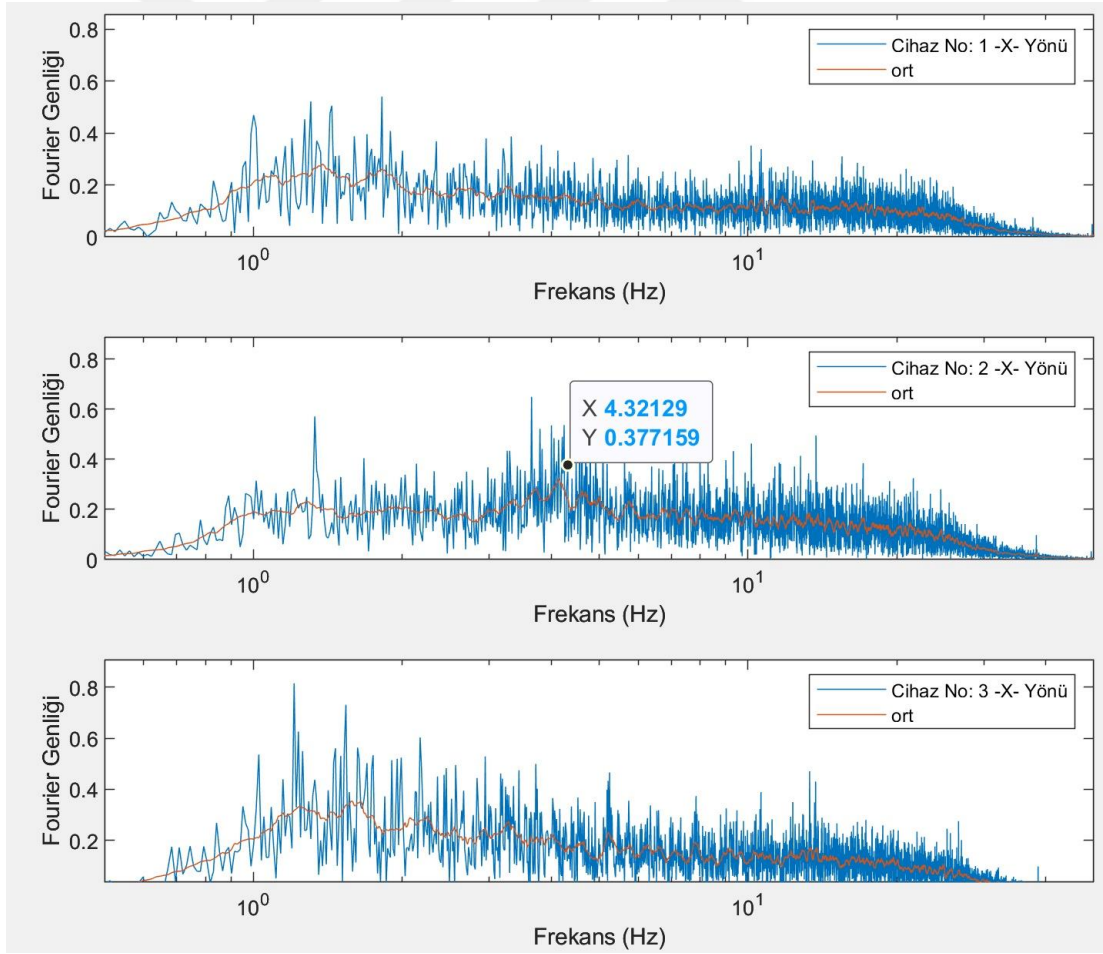
Zeynep Sultan Camii'nin yanında geçen T1 tramvay hattının cami üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla, çevresel titreşim kayıtları alınmıştır. Bu amaçla, üç adet ivmeölçer kullanılarak detaylı saha çalışmaları gerçekleştirilmiş ve tramvay hattından kaynaklanan titreşimlerin cami üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu çalışma, tarihi yapının korunması ve sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Hem yapı sağlığının korunması hem de çevresel titreşimlerin olumsuz etkilerinin minimize edilmesi için yapılan bu titiz incelemeler, kültürel mirasın geleceğe taşınmasında kritik bir rol oynamaktadır. Cami üzerine yerleştirilen ivmeölçerden alınan çevresel titreşim verileri **Şekil 3.4** ve **Şekil 3.5**'de ve Fourier genlikleri **Şekil 3.6** ve **Şekil 3.7**'de sunulmuştur.



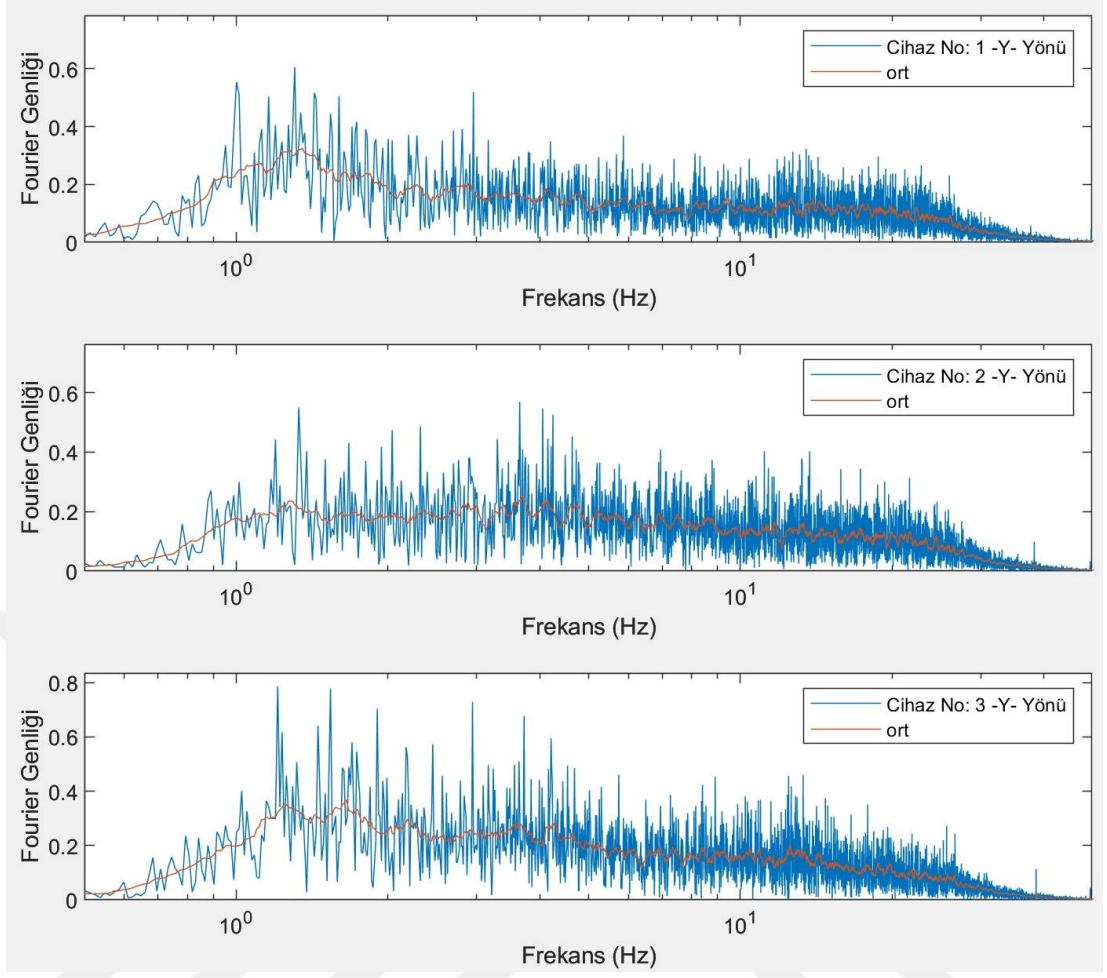
Şekil 3.4: Camiye yakın konumdan (Gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan veriler.



Şekil 3.5: Camiye uzak konumdan (Dönüş yönü) geçen tramvaydan alınan veriler.



Şekil 3.6: Camiye yakın konumdan (Gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan verilerin x doğrultusundaki fourier spektrumları.

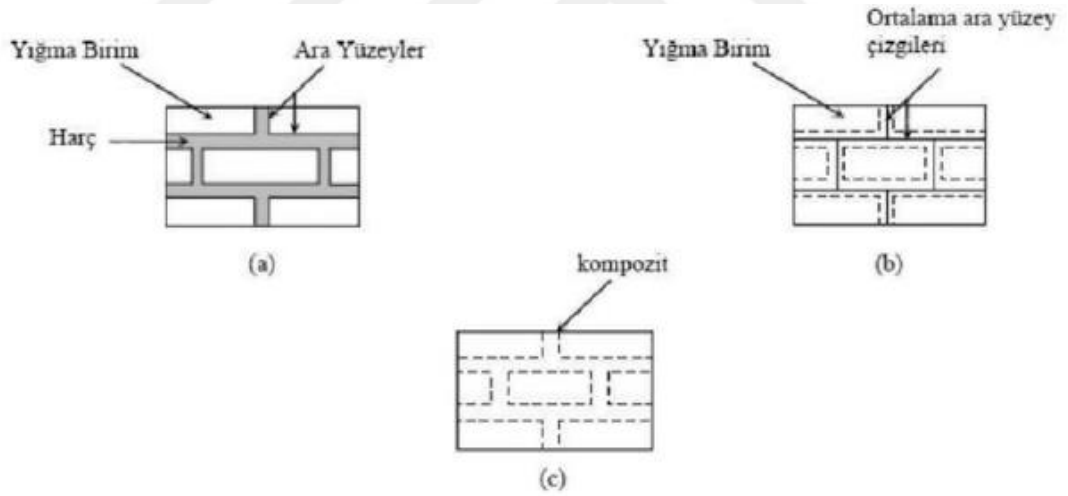


Şekil 3.7: Camiye yakın konumdan (Gidiş yönü) geçen tramvaydan alınan verilerin y doğrultusundaki fourier spektrumları.

4. YAPININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

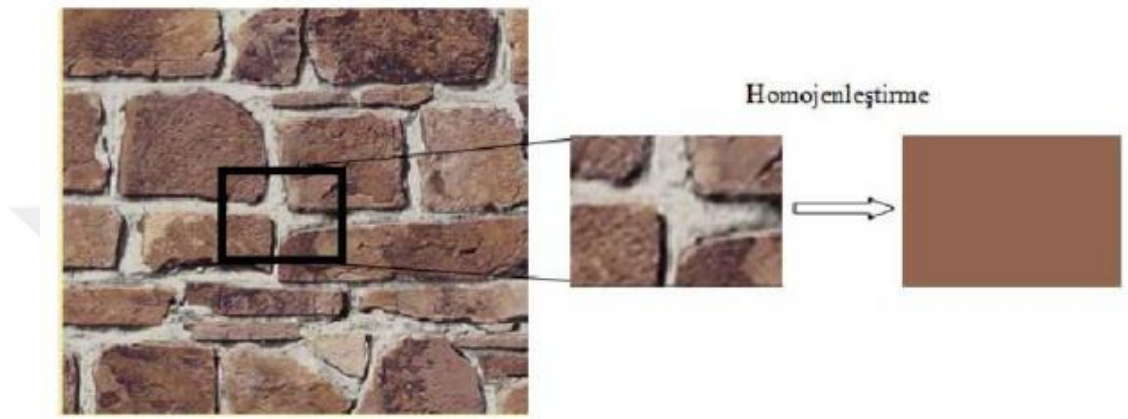
4.1. Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, betonarme yapılar için kullanılan yöntemlerden oldukça farklıdır. Bunun nedeni, betonarmenin heterojen bir malzeme olmasına rağmen yapılan kabullerle yapısal elemanların aynı çeşit sonlu elemanla modellenebilmesidir. Ancak yığma yapılarda taş ve tuğla gibi yığma birimlerle farklı karakteristiklere sahip harçların bulunması, tek tip sonlu eleman kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu durumda, modelleme tekniği hem gerçekçi olmalı hem de kabule uygun olmalıdır. Bu bağlamda, iki farklı modelleme yolu tercih edilebilir (Şekil 4.1)[Lourenco P., 1996].



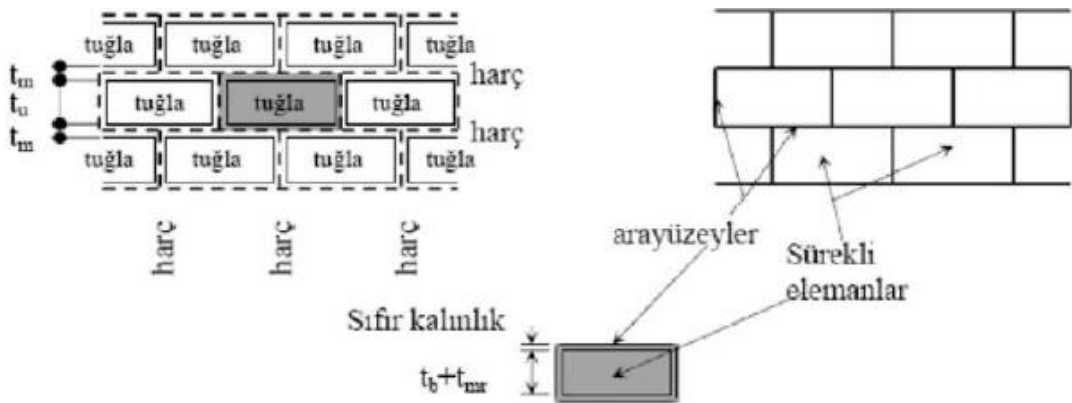
Şekil 4.1: Yığma duvarları modelleme teknikleri a) Mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, makro modelleme.

Homojenleştirme işlemi uygulanan yığma yapı elemanı, makro modelleme tekniğinde kompozit malzeme olarak düşünülmektedir. Bu işlem sonucunda, malzeme özelliklerinin yanı sıra mekaniksel özellikler de homojenleştirilmiş değerleri almaktadır. Tuğla ve harçtan oluşan bir duvar veya herhangi bir yapı elemanı için, homojenleştirme işlemi sonrasında tek bir malzeme özelliği elde edilebilmektedir (Şekil 4.2)[Anthoine A., 1997].



Şekil 4.2: Homojenleştirme işlemi.

Makro modelleme yönteminde, yığma birimlerin arasında harç olmadan homojen bir yapı olarak modellenmektedir. Tuğla ve harç birlikte modellenir, bu nedenle malzeme parametreleri farklı bir teknikle birleştirilerek dikkate alınmaktadır. Makro modelleme, yüksek gerilim değerlerinde fazla gerilme dağılımları meydana geldiği için yetersiz kalmaktadır. Bunun yanı sıra düşük gerilme değerlerinde şekil değiştirmeleri yeterli seviyede tahmin etmektedir [Doran ve Aktan, 2017].



Şekil 4.3: Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.

Basitleştirilmiş mikro modelleme, yığma bloklar ve düğümlerden meydana gelir. Bu yöntemde, harç tabakasının kalınlığının yarısı yığma birimlerin boyutlarına ilave edilerek genişletilir. **Şekil 4.3**'de [Ural A., 2009] görüldüğü üzere, yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılır ve harç tabakası ihmal edilmektedir. Oluşması muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde meydana geleceği kabul edilmektedir. Harcın Poisson etkisi göz ardı edilmesinden dolayı doğruluk payı düşüktür [Lourenco P., 2002].

Mikro modelleme, harç, harç-blok ve blok arasında mevcut olan ara yüz süreksiz düğüm noktalarının ayrı ayrı modellenerek detaylı bir şekilde analiz edilmesidir. Bu yöntemde harç ve elemanlar arasındaki ilişki iyi araştırılmalı ve tanımlanmalıdır. Blok ve harç için Poisson oranı, elastisite modülü ve diğer elastik olmayan malzeme özellikleri hesaba katılır [Lourenco P., 2002].

4.2. Yapı Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

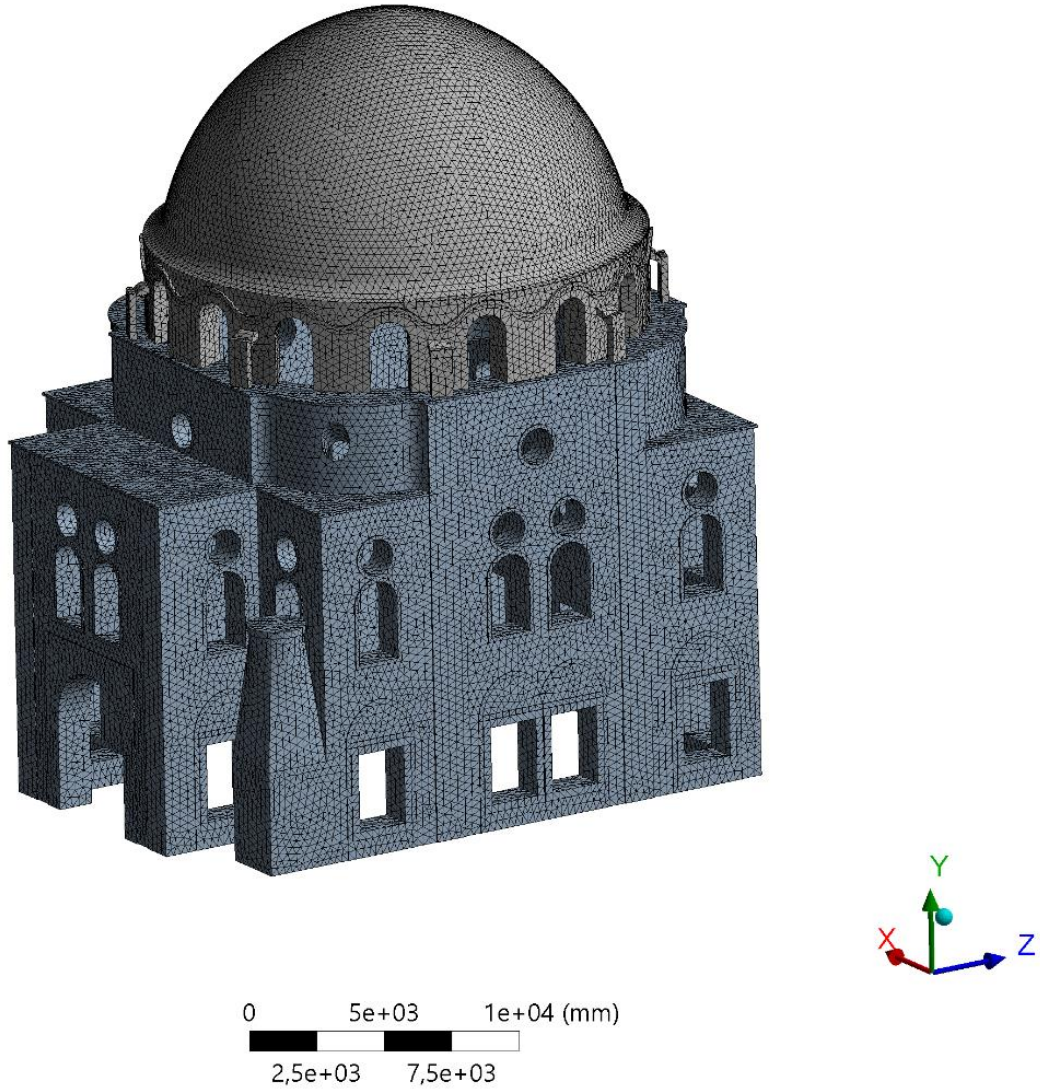
Zeynep sultan camii, Makro Modelleme Tekniği kullanılarak modellenmiştir. Yığma duvar elastisite modülü ve harç malzemesinin elastisite modülü ayrı değerler olarak tanımlanmamıştır. Camiyi oluşturan bütün elemanlar için tek bir malzeme kabulü yapılmıştır. Bu malzemenin elastisite modülü, yığma elemanların elastisite modülü olarak tanımlanmıştır ve özellikleri sahadan alınan titreşim kayıtlarına göre seçilmiştir.

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

- Yapının modellenmesi hususunda gerekli olan rölöve projesi kullanılmıştır. Rölöveler ışığında tarihi yapıya ait kat planı, üst görünüş ve kesitler baz alınarak yapı elemanlarının modellenmesi gerçekleştirilmiştir.
- Cami modellemesinde, pencere boşlukları, kemerler ve kubbeler gibi mimari elemanlar, rölöve plan ve kesitlerine uygun olarak modellenmiştir. Modelleme sürecinde yapının hasarsız olduğu varsayılmıştır.
- 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.

- Yapının temel kısmı modellenmemiş ve caminin zemine ankastre bağlı olduğu kabulü yapılmıştır.
- Tarihi caminin 3-boyutlu sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında 759106 düğüm noktası ve 476842 eleman kullanılmıştır. Modelleme aşamasında ANSYS kütüphanesinde bulunan 20 düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında 3 serbestlik derecesine sahip eleman modeli kullanılmıştır (Şekil 4.4).

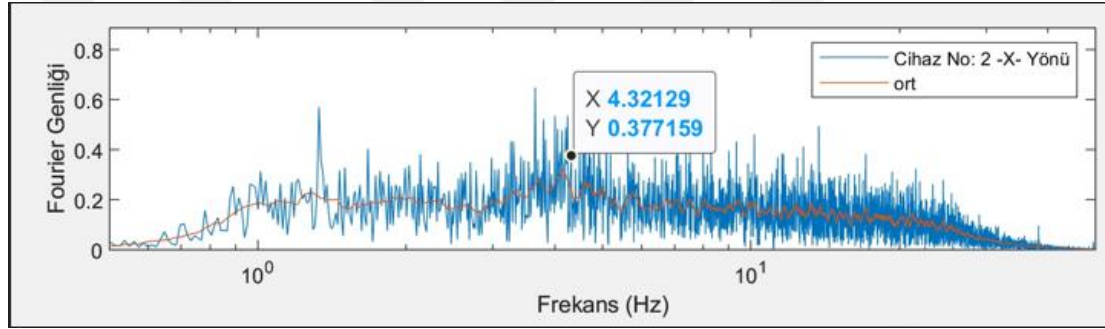


Şekil 4.4: Yapının sonlu elemanlar modeli.

4.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Kalibrasyonu

Analiz modelinin doğruluğunu belirlemek için model kalibrasyonu çalışması yapılmıştır. Bu hususta yapılan işlemin amacı saha verilerinin ışığında modelin doğru şekilde hazır hale gelmesidir. Sahaya yerleştirilen 3 adet yüksek hassasiyetli ivmeölçerden alınan veriler değerlendirilmiştir. Yapı modelinin hâkim davranışı doğrultusunda yer alan 3 numaralı ivmeölçerin kayıtları incelenmiştir.

Yapının hâkim mod hareket doğrultusunu dikkate alarak x yönünde 2 numaralı cihazın frekans değerleri model kalibrasyonu için baz alınmıştır (**Şekil 4.5**). Alınan pik frekans değerinin 4.32 Hz. olduğu gözlemlenmiş ve yapı modeli kalibre edilerek yapının frekansının aynı değere getirilmesi amaçlanmıştır (**Şekil 4.6**).

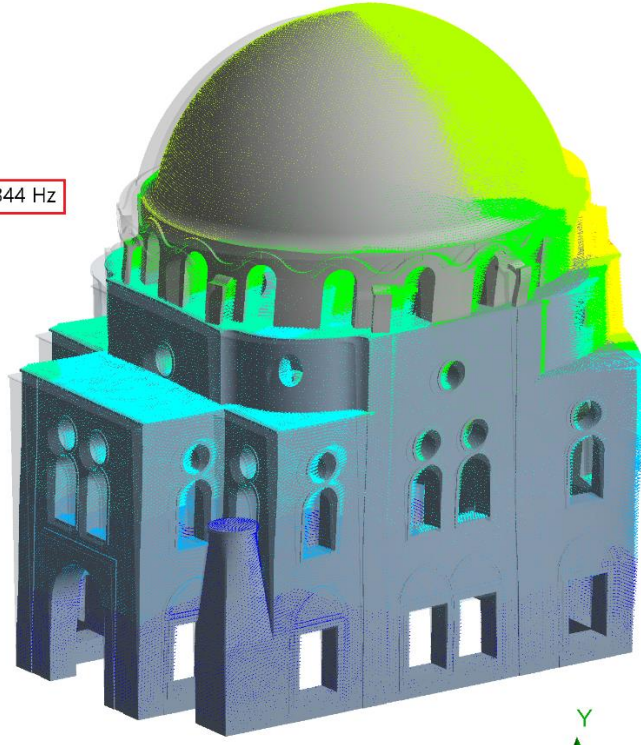


Şekil 4.5 Camiden elde edilen hâkim frekans değeri.

Kalibrasyon çalışması sonrasında revize edilmiş modelde hesaplanmış frekans değeri 5.13 Hz olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu veri **Şekil 4.5**'de verilen hakim frekans değeri ile karşılaştırılmış ve sahadan elde edilen veri ile sonlu elemanlar analizlerden elde edilen frekans değerinin %84,2 oranında uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu uyumun analizler için yeterli olduğuna karar verilmiş ve nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

B: Modal

Frequency: 5,1344 Hz



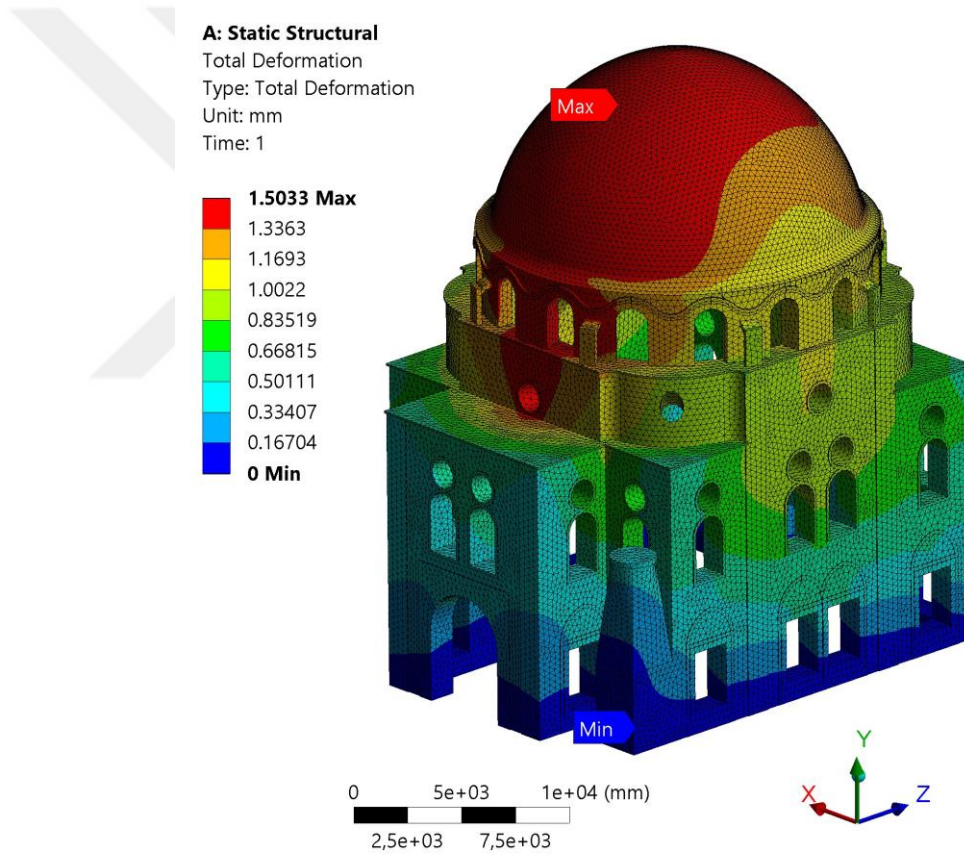
0 5e+03 1e+04 (mm)
2,5e+03 7,5e+03

Şekil 4.6: Zeynep Sultan Camisinin hâkim modu.

5. SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ

5.1. Statik Analizler

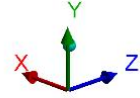
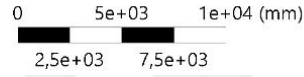
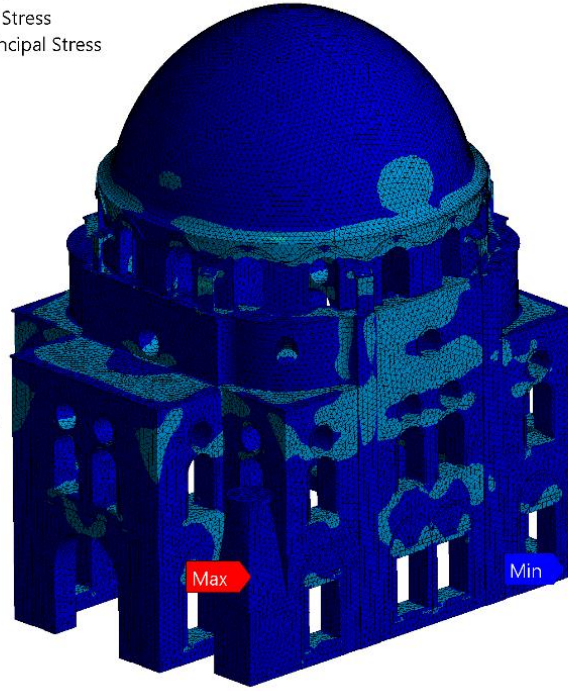
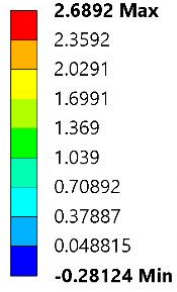
Tarihi caminin davranışını görmek için lineer statik analiz yapılmıştır. Hazırlanan model üzerine öncelikle sadece yapının kendi ağırlığı etkilmiş ve yapıda meydana gelen minimum ve maksimum kritik gerilmeler ve maksimum düşey yer değiştirmeler dikkate alınmıştır (Şekil 5.1-5.3).



Şekil 5.1: Toplam deformasyon (mm).

A: Static Structural

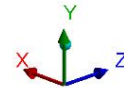
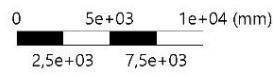
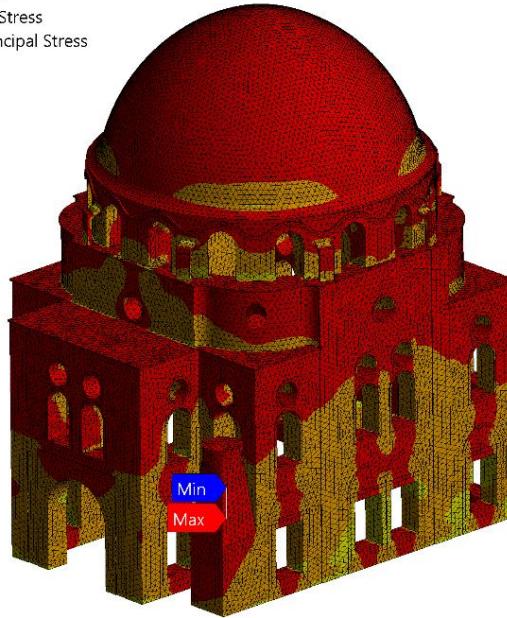
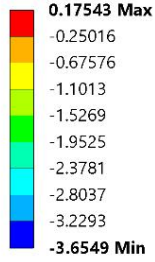
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress
Unit: MPa
Time: 1



Şekil 5.2: Tarihi cami yapısının maksimum kritik gerilmeleri (MPa).

A: Static Structural

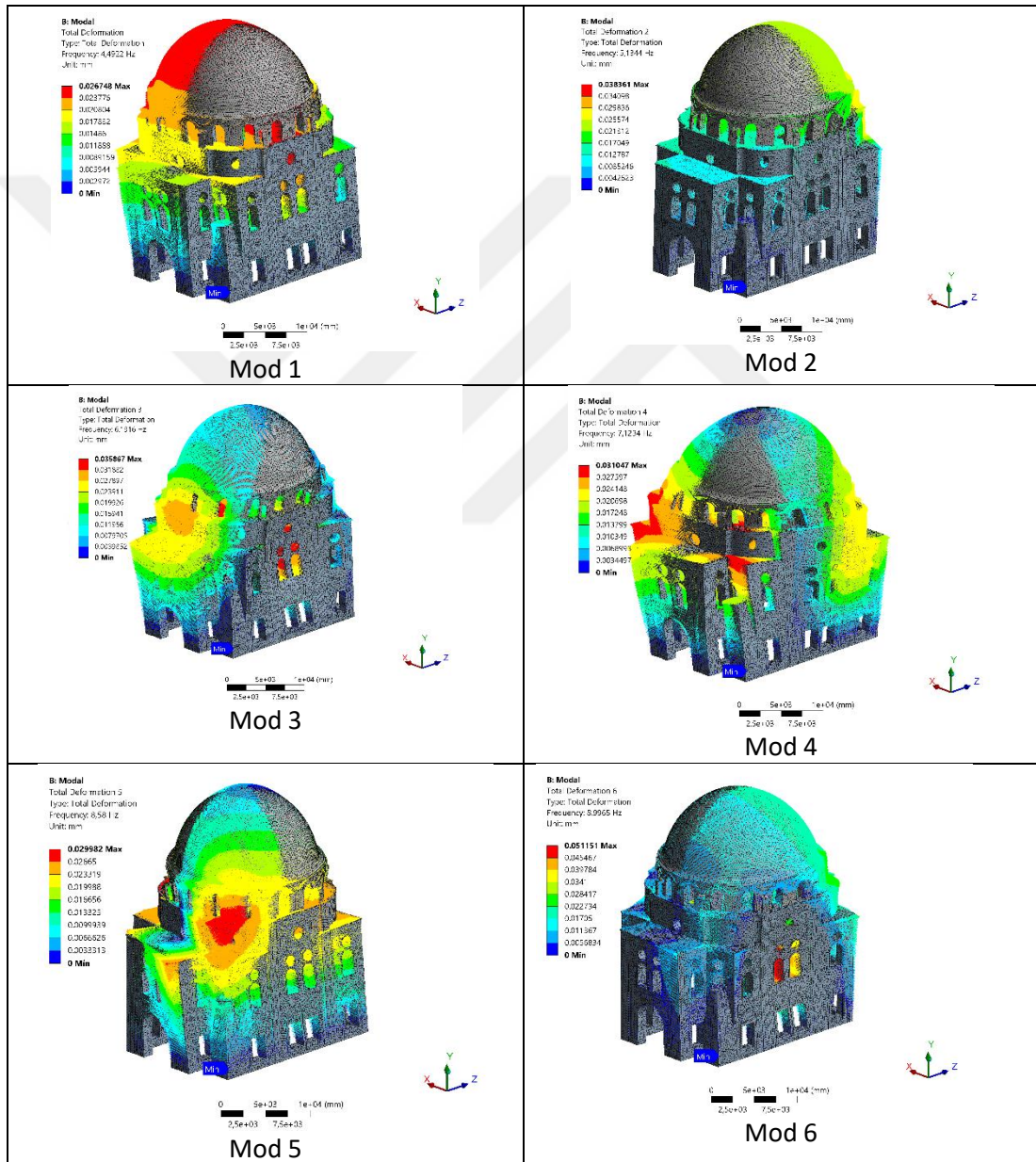
Minimum Principal Stress
Type: Minimum Principal Stress
Unit: MPa
Time: 1



Şekil 5.3: Tarihi cami yapısının minimum kritik gerilmeleri (MPa).

5.2. Modal Analizler

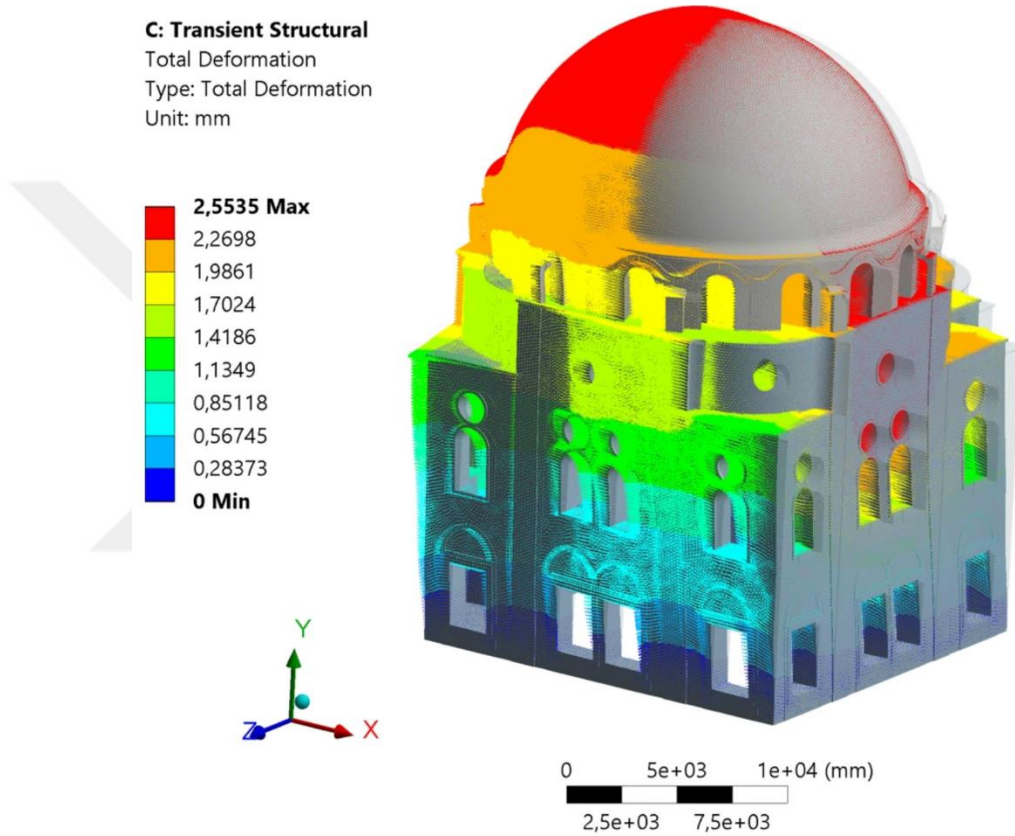
Yapının modal davranışını gözlemlemek, modal kütle katılımlarını görmek ve serbest titreşim periyotlarını elde etmek için yapıda modal analiz yapılmaktadır. Analiz sonucunda mod şekilleri, modal kütle katılımları ve titreşim periyotları gözlemlenmiştir. Analizde 30 modda çözüm yapılmıştır. İlk 6 moda ait mod şekilleri ve frekans verileri Şekil 5.4’te verilmiştir.



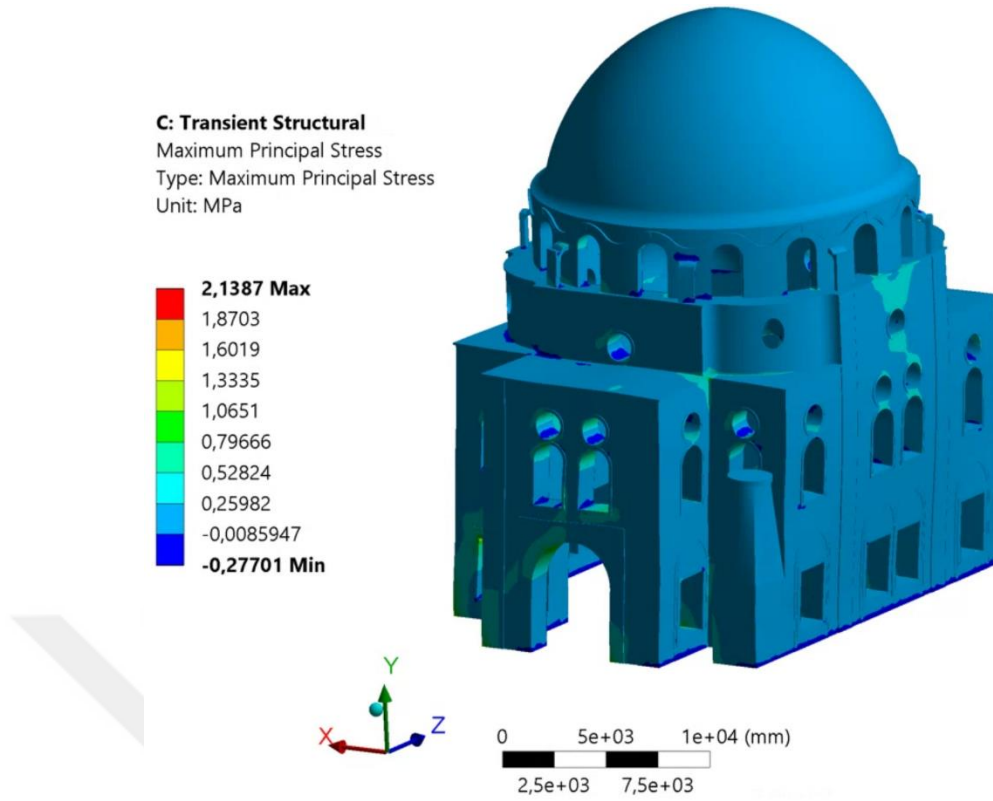
Şekil 5.4: Tarihi cami yapısının ilk altı moduna ait mod şekilleri.

5.3. Dinamik Analizler

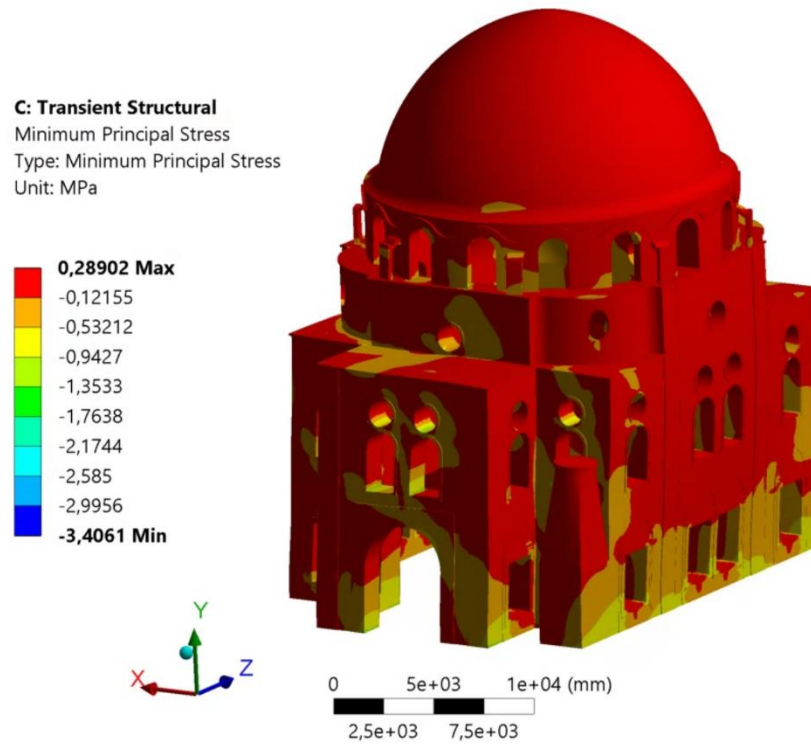
Yapının model kalibrasyonu yapıldıktan sonra, yapıda dinamik analiz yapılmıştır. Analiz aşamasında T1 tramvay hattı yanına konumlandırılan alınan çevresel titreşim kayıtları yapıya etki ettirilmiştir. Dinamik analiz sonucunda yapıda gözlemlenen toplam deformasyon, kayma gerilmeleri, maksimum asal gerilmeler ve minimum asal gerilmeler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.5-5.7).



Şekil 5.5: Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum tepe deplasman değeri (mm).



Şekil 5.6: Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum asal gerilmeler (MPa).



Şekil 5.7: Dinamik analizler sonucunda elde edilen minimum asal gerilmeler (MPa).

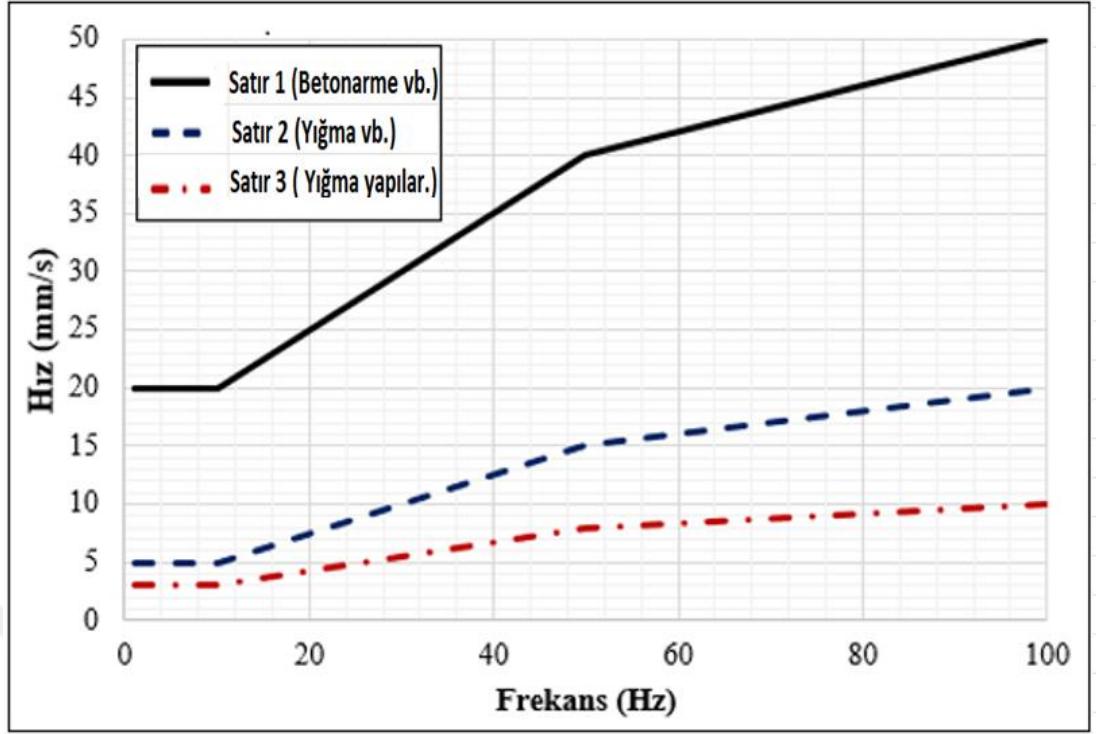
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarihi yapıların korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması, kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, İstanbul'un tarihi yarımadasında yer alan Zeynep Sultan Camii'nin yapısal performansını inceleyerek, bu önemli mirasın korunmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, caminin mimari özelliklerini yansıtan rölöve projeleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bu modelin doğruluğu, cami ve çevresine yerleştirilen ivme ölçerlerden elde edilen verilerle kalibre edilmiştir. Bu süreç, yapılan analizlerin güvenilirliğini artırmış ve modelin gerçek dünya koşullarına daha yakın sonuçlar vermesini sağlamıştır.

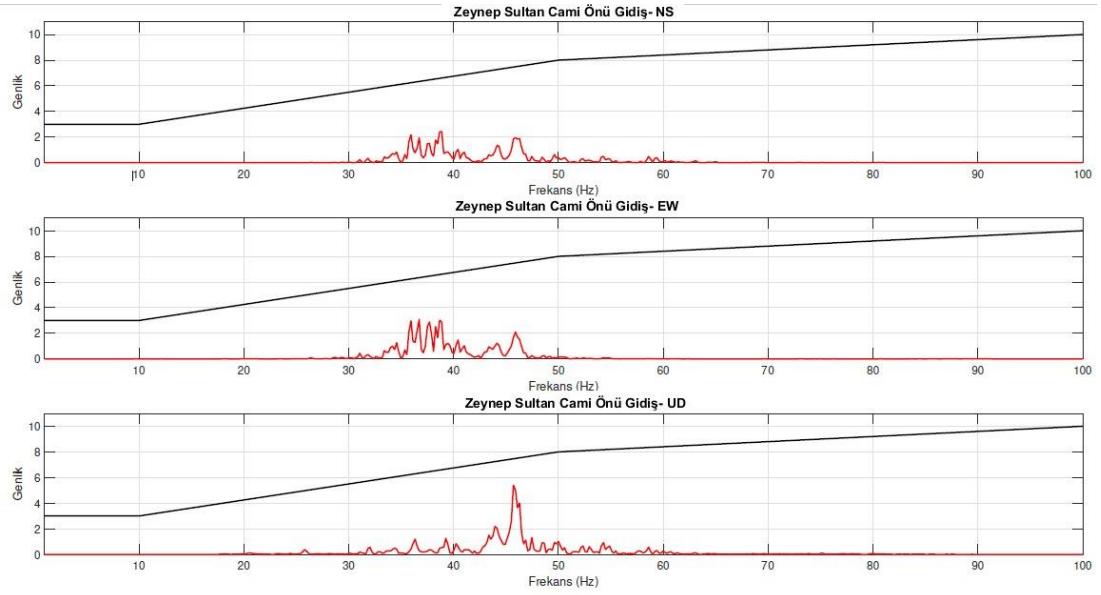
Sonraki aşamalarda, kalibre edilmiş model üzerinde detaylı statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Statik analizler, caminin taşıyıcı sistemini ve dayanıklılığını değerlendirirken; dinamik analizler, yapıya etki eden dinamik yükler ve titreşimleri incelemiştir. Bu analizler, caminin mevcut yapısal durumunu ve olası risklerini belirlemekte önemli rol oynamıştır. Tez kapsamında tarihi caminin 3D sonlu elemanlar modeli oluşturularak model kalibrasyonu yapılmış ve kalibre edilmiş model üzerinde statik, modal ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanı analizinde T1 tramvay hattı üzerinden alınan çevresel titreşim verileri alınmış ve bu veriler ışığında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Değerlendirme çalışmalarının ilk aşamasında, sahadan alınan veriler ve farklı tren hatlarından elde edilen kayıtlar dikkate alınarak yapılan analizler, DIN 4150-3: Vibrations in Buildings - Part 3: Effects on Structures Alman normuna göre değerlendirilmiştir. DIN 4150 Alman normu, frekansa bağlı olarak titreşimlerin yapı türlerine göre etkilerini gösteren referans değerler sunmaktadır (**Şekil 6.1**).



Şekil 6.1: DIN 4150 alman normu'na göre yapı tipi-frekans-hız ilişkisi.

Şekil 6.1'de, Satır-1 betonarme ve çelik konstrüksiyon gibi çok dayanıklı yapıları; Satır-2 yığma, tuğla ve beton gibi nispeten sağlam yapıları; Satır-3 ise tarihi yapıları temsil etmektedir. Tez kapsamında incelenen tarihi Zeynep Sultan Cami için Satır-3 kategorisi dikkate alınmış ve T1 tramvay hattından alınan veriler, Şekil 6.1'de verilen Satır-3'e ait sınır değerler çerçevesinde değerlendirilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi, tramvay hattından gelen etkiler kuzey-güney, doğu-batı ve yukarı-aşağı yönlerde ayrı ayrı incelenmiş ve sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda T1 tramvay hattından gelen titreşimlerin yapıyı olumsuz yönde etkilemediği belirlenmiştir.



Şekil 6.2: T1 tramvay hattından elde edilen verilerin karşılaştırılması.

Değerlendirme çalışmalarının ikinci aşamasında sonlu elemanlar modelinden elde edilen verilerin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [TBDY-2018] ile kıyaslamaları yapılmıştır. Bu aşamada TBDY-2018’de verilen “Tablo 11.2 – Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı, f_k [MPa]” kullanılmıştır. Bu tabloda bazalt ve tuğla elemanlar kargir birim olarak dikkate alınmış ve Horasan harcının mekanik dayanımı da dikkate alınarak **Tablo 6.1**’de görüldüğü gibi tuğla yapıların karakteristik basınç dayanımı olarak 15 MPa değeri kabul edilmiş ve yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı ise 7.5 MPa olarak alınmıştır.

Tablo 6.1: Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı, f_k (MPa), (TBDY, 2018).

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.

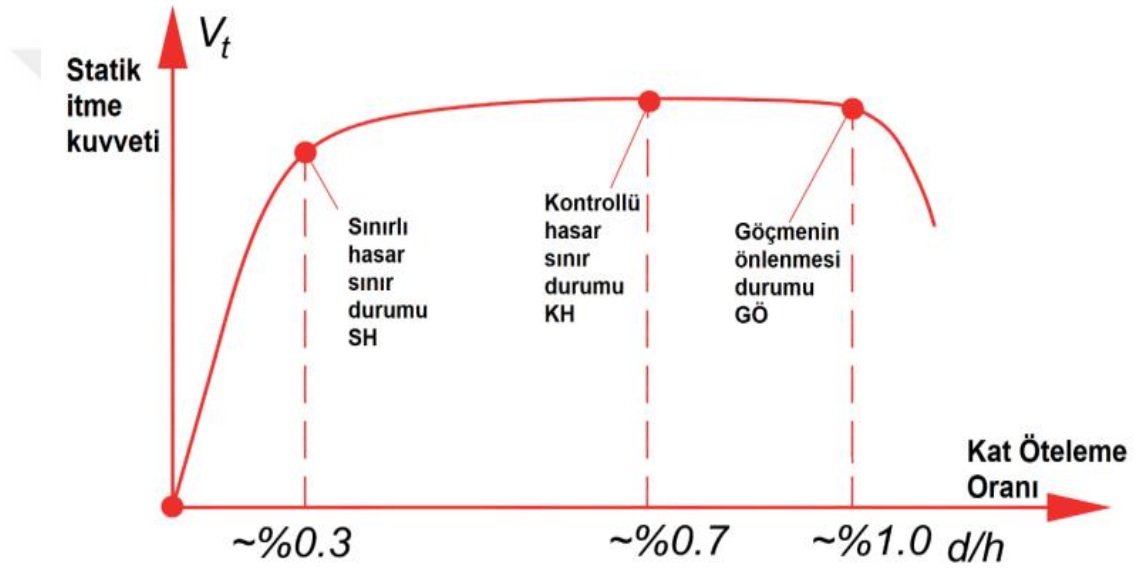
Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen veriler TBDY 2018'den elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında tramvay hattından gelen etkiler sonucunda camide oluşan asal gerilmelerin izin verilebilir sınırların altında kaldığı görülmektedir.

Değerlendirme çalışmalarının son aşamasında dinamik analizlerden elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerleri üzerinden öteleme oranı karşılaştırması yapılmıştır. Özellikle mod birleştirme analizleri sonucunda elde edilen maksimum yatay deplasmanlar kullanılarak hesaplanan öteleme oranlarını aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 6.2).

Tablo 6.2: Dinamik analizler sonucunda elde edilen öteleme oranları.

Parametre	Kubbe
Yatay Deplasman (mm)	2.55 mm
Yükseklik (mm)	9800 mm
Öteleme Oranı (d/h) (%)	0.02

Elde edilen öteleme oranları Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan "TARİHİ YAPILAR İÇİN DEPREM RİSKLERİNİN YÖNETİMİ KILAVUZU"nda verilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3: Öteleme oranlarına göre elde edilen performans seviyeleri.

Tez kapsamında incelenen tarihi caminin dinamik analizler sonucunda elde edilen öteleme oranı %0.02 olarak belirlenmiş ve bu değerin Sınırlı Hasar [SH] seviyesinin oldukça altında kaldığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, Zeynep Sultan Camii'nin yapısal durumunu belirlemeye yönelik olup, tarihi yapıların geleceğe sağlam bir şekilde aktarılması ve kültürel mirasın korunması konusunda önemli bir adım teşkil etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, Zeynep Sultan Camii'nin korunmasına ve sürdürülebilirliğine yönelik katkılar sunarak, toplumların kültürel kimliğinin ve tarihinin yaşatılmasına olanak sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Akan, A.E., (2010), “Tarihi ahşap sütunlu camilerin sonlu elemanlar analizi ile taşıyıcı sistem performansının belirlenmesi”, SDU International Technologic Science, 2, (1), 41-54.

Aköz A. H., (2008), “Deprem Etkisi Altındaki Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Anadut H. O., (2016), “Tarihi Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi.

Anthoine A., (1997), “Homogenization of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain or 3d Modeling”, International Journal of Solids and Structures, 13, 319-326.

Başgöl, M., (2020), “Tarihi cacabey medresesinin yapısal davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, D.M., (2010), “Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi”, İMO Teknik Dergi, 2010 5185-5205, Yazı 337.

Çavuş, M., (2013), “Tarihi niksar kulak kümbetinin deprem altındaki sismik davranışının değerlendirilmesi”, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7, 80-90.

Çavuş, M., ve Dayı, M., (2013), Tarihi Niksar kırk kızlar türbesinin sismik davranışı. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 2, 25-34.

Çelebi, O., ve Aydın, A. C., (2021), “Tarihi Şenkaya Yünören köprüsünün deprem performansının incelenmesi”, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 284-300.

Dikiciaşık Y., (2011), “Uzak ve Yakın Bölge Depremleri Altında Düzensiz Yığma Bir Bina Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

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.

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

Kamanlı, M., Jaihoon, E. H., ve Ünal, A., (2019), “TBDY 2018’e göre tarihi sille ak caminin statik analizi”, Selcuk University Journal of Engineering Sciences, 18(3), 134-151.

Kishalı, E., (2020), “İzmit tarihi yeni hamam restorasyon projesi:Yapısal değerlendirme”, Mimarlık ve Yaşam, 5(1), 215-234.

Kır G., (2022), “Kentsel Titreşimlerin Tarihi Yapılara Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

Lourenco P., (1996), Computational Strategies for Masonry Structures, 1369-1369

Lourenco P., (2002), “Computations on Historic Masonry Structures, Progres in Structural Engineering and Materials”, 301-319.

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 BellTower By Ambient Vibration Test”, Construction and Building Materials, 29, 564- 572.

Özbek, M., ve Şener, S., (2021), “Tarihi Fil Köprüsü’nün yapısal ve dinamik özelliklerinin incelenmesi”, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(1), 47-61.

Özbek, M., ve Şener, S., “(2021)”, Tarihi Fil Köprüsü’nün yapısal ve dinamik özelliklerinin incelenmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(1), 47-61.

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

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.

TBDY, (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Türkiye

Turan, F.N., (2012),“Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Türker, T., (2011). “Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi”. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Uğurlu, M. A., Günaslan, S. E., ve Karaşın, A., (2017), “Dört ayaklı minarenin modellenmesi ve yapısal analizi”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8(2), 413-422.

Ural A., (2009), “Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Usta, P., ve Bozdağ, Ö., (2021), “Tarihi Başdurak Camisinin deprem analizi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi”, 27(3), 244-250.

Soyöz, S., Taciroğlu, E., Orakçal, K., Luş, H., (2011). Depreme Karşı Güçlendirme Öncesi Ve Sonrasında Bir Binanın Dinamik Özelliklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Vakıflar Genel Müdürlüğü, (2017), Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu.

Zabin, P., Çarhoğlu, A. I., ve Korkmaz, K. A., (2013), “Ermenek tol medresesinin deprem etkisi altındaki davranışının incelenmesi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 5(3), 1-7.

Web 1, (2023), https://tr.wikipedia.org/wiki/Zeynep_Sultan_Camii, (Erişim Tarihi: 08/10/2023)

Web 2, (2023), https://dome.mit.edu/bitstream/handle/1721.3/65903/154619_cp.jpg?sequence=1&isAllowed=y, (Erişim Tarihi: 08/10/2023)

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk GÜLYÜZ, 2003 yılında Şehit Öğretmen Necmeddin Kuyucu Anadolu Lisesi'nde lise öğrenimine başlayıp 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği lisans bölümünü kazanarak öğrenim hayatına devam etti. 2013 yılının Ağustos ayında lisans öğrenimini tamamladı ve yüksek lisans öğrenimi için Gebze Teknik Üniversitesi'ne başvurdu. 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Deprem ve Yapı Mühendisliği yüksek lisans bölümünde öğrenimine başladı.

