

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE GÜNCELLENEN SONLU ELEMAN MODELİ
KULLANILARAK GELENEKSEL HIMİŞ KONAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Mehveş MERAL

**ŞUBAT 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE GÜNCELLENEN SONLU ELEMEN
MODELİ KULLANILARAK GELENEKSEL HİMİŞ KONAĞIN DİNAMİK
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

İnş. Müh. Mehveş MERAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04/01/2021

Tezin Savunma Tarihi : 02/02/2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmamı takip eden, gerek değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşarak yön gösteren gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Şahsımın bugünlere gelmesini sağlayan, bilgi ve birikimleriyle beni yetiştiren hayatıma dokunmuş bütün hocalarımı saygıyla anar, hepsine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Yüksek lisans eğitimimiz boyunca bütün zorluklara beraber göğüs gerdiğimiz ve birbirimize daima destek olduğumuz çok değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Esin ERTÜRK, Arş. Gör. Hasan Oğulcan MARANGOZ ve Arş. Gör. Muhammet SARI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatımı güzelleştiren, iyi günde ve kötü günde daima birlikte olduğumuz sevgili dostlarımın hepsine teşekkür eder, minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Yapmış olduğum tez çalışmasında yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN, Sayın Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ, Sayın Arş. Gör. Fatih Yesevi OKUR, Sayın Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN, İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN OKUR ve İnş. Müh. Zafer YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana olan inançlarını asla yitirmeyen, girdiğim ve gireceğim her yolda arkamda durup desteklerini esirgemeyen en değerli varlıklarım babam Turkey MERAL, annem Elif MERAL ve kardeşim Arda MERAL'e en içten teşekkürlerimi sunar, bu çalışmanın yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Mehveş MERAL
Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Deneyisel Modal Analiz Yöntemiyle Geliştirilen Sonlu Eleman Modeli Kullanılarak Geleneksel Hıf Konagm Dinamik Davrammm Belirlenmesi" bahk bu 9ahmay1 batan sona kadar dammam Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİ\$1K'm sorumlulugunda tamamlad1g1m1, verileri kendim toplad1g1m1, analizleri ilgili programlarda yapt1g1m1, baka kaynaklardan ald1g1m bilgileri metinde ve kaynak9ada eksiksiz olarak gosterdigimi, 9ahma silrecinde bilimsel aratırma ve etik kurallara uygun olarak davrand1g1m1 ve aksinin ortaya 9ıkmas1 durumunda her tirlil yasal sonucu kabul ettigimi beyan ederim. 02/02/2021

Mehve MERAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.2.1. Tarihi Yapıların Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar	3
1.2.2. Deprem Ahşap Yapılar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ile İlgili Çalışmalar	8
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	12
1.4. Yapı Malzemesi Olarak Ahşap.....	13
1.4.1. Ahşabın Fiziksel Özellikler	14
1.4.1.1. Özgöl Ağırlık.....	14
1.4.1.2. Nem Oranı	15
1.4.1.3. Isı İletkenliği.....	16
1.4.2. Ahşabın Mekanik Özellikler.....	16
1.4.2.1. Elastisite Modülü.....	16
1.4.2.2. Basınç Dayanımı.....	17
1.4.2.3. Çekme Dayanımı	18
1.4.2.4. Eğilme Dayanımı.....	19
1.4.2.5. Makaslama Dayanımı	20
1.4.2.6. Yarıлма Dayanımı	20
1.4.2.7. Sertlik	21

1.4.3.	Ahşabın Avantaj ve Dezavantajları	21
1.4.3.1.	Avantajları	21
1.4.3.2.	Dezavantajları	22
1.5.	Karkas Yapılar	22
1.5.1.	Ahşap Karkas Yapılar	23
1.5.1.1.	Hımsı Yapılar	24
1.5.1.2.	Bağdadi Yapılar	29
1.5.1.3.	Ahşap Kaplama Yapılar	30
1.6.	Deprem ve Ahşap Yapılar	30
1.7.	Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	32
1.7.1.	Teorik Modal Analiz	33
1.7.1.1.	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	33
1.7.1.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	34
1.7.2.	Operasyonel Modal Analiz Yöntemi	36
1.7.2.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi (GFOA)	38
1.7.2.2.	Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi (SAB)	39
1.7.2.3.	Modal Güvence Kriteri	39
1.8.	Sonlu Eleman Yöntemi	40
1.8.1.	Sonlu Eleman Modellemesi	42
1.8.1.1.	Mikro Modelleme	43
1.8.1.2.	Makro Modelleme	43
1.8.2.	Sonlu Eleman Model Güncellemesi	44
1.9.	Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz	45
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	49
2.1.	Giriş	49
2.2.	Geleneksel Hımsı Konak Hakkında Bilgiler	50
2.3.	Çevresel Titreşim Testleri	52
2.4.	Sonlu Eleman Modellemesi ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	59
2.5.	Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Analiz	68
2.5.1.	Yer Değiştirme	70
2.5.2.	Asal Gerilmeler	72
2.5.3.	Asal Şekil Değiştirmeler	75
3.	SONUÇLAR	80

4.	KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE GÜNCELLENEN SONLU ELEMAN MODELİ KULLANILARAK GELENEKSEL HİMİŞ KONAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Mehveş MERAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK
2021, 92 Sayfa

İnsanoğlunun yıllarca barınma ihtiyacını karşılamış olan Hımış yapılar, günümüzde tarihi yapı olarak nitelendirilmektedir. Ülkemizin aktif fay hatları üzerinde bulunduğu düşünüldüğünde, bu yapıların günümüzden geleceğe güvenle aktarılması için dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması son derece önemlidir. Bu tezin amacı, Rize ili Fındıklı ilçesinde bulunan bir geleneksel Hımış konağın dinamik kuvvetler altındaki dinamik davranışının elde edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle, yapının mevcut durumuna ait dinamik karakteristikleri (mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları) deneysel modal analiz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında, konağın sonlu eleman modeli oluşturulmuş, modal analizler sonucunda sayısal dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış, meydana gelen farklılıklar belirsiz parametreler dikkate alınarak güncellenmiş ve sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır. Daha sonra, güncellenmiş modelin dinamik davranışı, 1999 Kocaeli deprem kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Analiz sonucunda maksimum yer değiştirme, asal gerilme ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve geleneksel Hımış konağın dinamik davranışı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik Analiz, Deprem, Dinamik Karakteristikler, Hımış Konak, Deneysel Modal Analiz

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINING DYNAMIC RESPONSE OF THE TRADITIONAL HIMIŞ MANSION USING FINITE ELEMENT MODEL UPDATED WITH EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD

Mehveş MERAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2021, 92 Pages

Hımiş structures, which have met the housing needs of human beings for years, are now considered as historical structures. Considering that our country is located on active faultlines, it is extremely important to determine the structural behavior under dynamic effects and to take necessary precautions in order to safely transfer these structures from today to the future. The aim of this thesis is to determine the dynamic response of a traditional Hımiş mansion under dynamic forces in Fındıklı district of Rize province. for this purpose, first of all, the dynamic characteristics (mode shapes, natural frequencies and damping ratios) of the current situation of the building were obtained by using the experimental modal analysis method. After that, the finite element model of the mansion was created, and numerical dynamic characteristics were obtained as a result of modal analysis. Experimental and numerically obtained dynamic characteristics were compared, the differences that occurred were updated taking into account uncertain parameters, and the finite element model was updated. Then, the dynamic response of the updated model was determined by time-history analysis method using the 1999 Kocaeli earthquake records. As a result of the analysis, maximum displacement, principal stress and strain values were obtained and the dynamic response of the traditional Hımiş mansion was evaluated.

Key Words: Dynamic Analysis, Earthquake, Dynamic Characteristics, Hımiş Mansion, Experimental Modal Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Ahşaptaki nem ve mukavemet oranı 15
Şekil 1.2.	Basit bir ahşap iskelet sistemin basınç deneyi 18
Şekil 1.3.	Ahşabın çekme dayanımı deneyi..... 19
Şekil 1.4.	Liflere dik yönde eğilme dayanımı deneyi..... 20
Şekil 1.5.	Çift katlı bir ahşap karkas yapının cephe görüntüsü 24
Şekil 1.6.	Hıms ve bağdadi duvar sistemlerinden bir kesit 24
Şekil 1.7.	Rize’de bir göz dolma yapı örneği..... 26
Şekil 1.8.	Göz dolma sistem detayı 26
Şekil 1.9.	Orta dikme, yan çalma ve köşe dikme detayları 27
Şekil 1.10.	Muska dolma sistem 27
Şekil 1.11.	Kerpiç blok dolgulu bir yapı 28
Şekil 1.12.	Tuğla dolgu duvarlı ahşap karkas yapı kesiti 29
Şekil 1.13.	Ahşap karkas sistemde bağdadi duvar tipi 30
Şekil 1.14.	Çevresel titreşim testi yöntemiyle dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi 37
Şekil 2.1.	Geleneksel tarihi hıms konağın farklı cephelerden görüntüleri 50
Şekil 2.2.	Geleneksel tarihi hıms konağın plan ve kesit görünüşleri 51
Şekil 2.3.	Çevresel titreşim testi ve ivmeölçerlerin yapı üzerindeki konumları 53
Şekil 2.4.	GFOA yöntemi spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri..... 55
Şekil 2.5.	GFOA yöntemi spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması 55
Şekil 2.6.	SAB yöntemine göre kararlılık diyagramı 56
Şekil 2.7.	SAB yöntemine göre spektral yoğunluk fonksiyon diyagramı 56
Şekil 2.8.	Deneyssel olarak elde edilen ilk üç mod şekli..... 57
Şekil 2.9.	MGK sonuç grafiği 58
Şekil 2.10.	Tarihi hıms konağın sonlu eleman modellemesine ait bazı görünüşler 59
Şekil 2.11.	Ahşap-taş modelin eleman boyutları..... 61
Şekil 2.12.	Ahşap-taş model ve eşlenik blok model 62
Şekil 2.13.	Ahşap-taş ve eşlenik blok modelin ilk üç doğal frekansı ve ilgili mod şekilleri 62

Şekil 2.14.	Tarihi hımmış konağın eşlenik blok sonlu eleman modeli	64
Şekil 2.15.	Tarihi hımmış konağın SAP2000 sonlu eleman modeli.....	65
Şekil 2.16.	ANSYS ve SAP2000 sonlu eleman modellerinin mod şekilleri ve doğal frekansları.....	67
Şekil 2.17.	Kocaeli sismik tehlike haritası	69
Şekil 2.18.	1999 Kocaeli depreminin doğu-batı ve kuzey-güney yönlü ivme kayıt bileşenleri	69
Şekil 2.19.	Yatay doğrultu yönleri için yer değiştirme kontur diyagramları.....	71
Şekil 2.20.	Yapının x ve y yönlerinde zamana göre yer değiştirme grafikleri.....	72
Şekil 2.21.	Maksimum asal gerilmelerin kontur diyagramı	73
Şekil 2.22.	Maksimum asal gerilmelerin lokal ve genel zaman geçmişleri.....	73
Şekil 2.23.	Minimum asal gerilmelerin kontur diyagramı	74
Şekil 2.24.	Minimum asal gerilmelerin lokal ve genel zaman geçmişleri.....	75
Şekil 2.25.	Maksimum asal şekil değiştirme kontur diyagramı	76
Şekil 2.26.	Maksimum asal şekil değiştirmenin zamana göre lokal ve genel değerleri..	76
Şekil 2.27.	Minimum asal şekil değiştirme kontur diyagramı.....	77
Şekil 2.28.	Minimum asal şekil değiştirmenin zamana göre lokal ve genel değerleri	78

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Ahşap malzemenin ağırlığına göre sınıflandırılması.....	15
Tablo 1.2. Bazı ağaç cinslerinin Elastisite ve Kayma Modülü değerleri.....	17
Tablo 1.3. Farklı ağaç türlerinin sertlik dereceleri	21
Tablo 2.1. B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerin özellikleri	53
Tablo 2.2. GFOA yönteminden elde edilen dinamik karakteristikler	55
Tablo 2.3. SAB yönteminden elde edilen dinamik karakteristikler.....	56
Tablo 2.4. GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen dinamik karakteristikler	58
Tablo 2.5. Ahşap-taş model ve eşlenik blok model malzeme özellikleri	62
Tablo 2.6. ANSYS ve SAP2000 SE modelleri için kullanılan malzeme özellikleri	66
Tablo 2.7. ANSYS ve SAP2000 sonlu eleman modelleri için yay sabiti değerleri.....	66
Tablo 2.8. Sayısal ve deneysel olarak hesaplanan doğal frekans değerleri	68
Tablo 2.9. Hesaplamalar için seçilen güçlü yer kayıtları.....	70
Tablo 2.10. ANSYS modelinin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonuçları	79
Tablo 2.11. SAP2000 modelinin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonuçları	79

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Hareketin genlik vektörü
B	: Ortam veri matrisi
c	: Sönüm oranı
C	: Sönüm matrisi
E	: Elastisite Modülü
f_0	: Doğal frekans
F_D	: Sönüm kuvveti
F_I	: Atalet kuvveti
F_s	: Elastik şekil değiştirme kuvveti
$F(t)$	: Sisteme etkiyen dış kuvvet
G	: Kayma Modülü
G_k	: Ahşabın kuru ağırlığı
G_y	: Ahşabın yaş ağırlığı
$G_{xx}(\omega)$	: Etki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(\omega)$	: Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$H(\omega)$	: Frekans davranış fonksiyonu
k	: Rijitlik katsayısı
K	: Rijitlik matrisi
m	: Kütle
M	: Kütle matrisi
R	: Nemlilik derecesi
s_{ij}	: Tekil değerler
T_0	: Doğal titreşim
u_{ij}	: Tekil vektörler
$U(t)$	: Zamana bağlı yer değiştirme vektörü
$\dot{U}(t)$	: Zamana bağlı hız vektörü
$\ddot{U}(t)$	: Zamana bağlı ivme vektörü
ν	: Poisson Oranı
V	: Hacim
γ	: Birim hacim ağırlığı

ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
ω_i	: Serbest titreşim frekansı
$x(t)$	: Zamana bağlı sistemin yer değiştirmesi
$\dot{x}(t)$	: Zamana bağlı sistemin hızı
$\ddot{x}(t)$	: Zamana bağlı sistemin ivmesi
Ψ	: Kuvvetin etki yönü ile yıllık halkaların gidiş yönü arasındaki açı
φ	: Faz açısı
ψ_a	: Analitik mod şekli vektörü
ψ_e	: Deneysel mod şekli vektörünü



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsan, doğası gereği varoluşundan günümüze kadar geçen sürede daima barınma gereksinimi duymuştur. Bu gereksinimini karşılamak için de birçok farklı yöntemle başvurmuştur. Bu yöntemler de sürekli değişen ve gelişen teknoloji dolayısıyla daima farklılık göstermiştir. İlk başta doğanın ona sunduğu mağaralardan yararlanmıştır. Daha sonra ulaşabildiği materyalleri kullanmaya başlamış, etrafındaki taş, toprak, ağaç gibi ham maddelerden yararlanmıştır.

Tarihi geçmişe dayanan yapılarda sıklıkla kullanılan yapı malzemesi ahşap; lifli, anizotropik ve heterojen dokusu olan, mekanik ve malzeme özelliklerine çok iyi hâkim olan usta ellerde diğer yapı malzemelerine göre önemli avantajlara sahip organik bir malzemedir (Efe ve Çağatay, 2011). Doğal bir yapı malzemesi olan ahşap, inşaat mühendisliği alanında geçit ve köprüler, iskeleler, temeller, bina taşıyıcı sistem kurguları, çatılar ve duvarlar gibi yapı elemanlarının üretiminde kullanılmakta olan, medeniyetin ve toplumun gelişmesine katkı sağlayan en önemli malzemelerden biridir. Ahşap, basınç ve çekme kuvvetlerinin her ikisini de aktarabilir, yüksek bir yük taşıma kapasitesine ve çok iyi bir mukavemete sahip olmakla birlikte üretimi ve inşası nispeten kolaydır. Üstelik yöreden yöreye değişiklik gösteren boyut, kesit ve teknikte çokça kullanımı olan ahşap, bilhassa yüksek deprem riskine sahip Kuzey Anadolu Bölgesi'nde geçmişten günümüze en kullanışlı malzeme olarak tercih edilmiştir (Uzunoğlu, 2009).

Anadolu'nun orta, batı ve kuzey bölgelerinde ahşap taşıyıcı sistemli ev geleneği özellikle 16. yüzyılın ikinci yarısından sonra geliştiği ve 17. yüzyılda ise binaların tek katlıdan iki katlıya doğru yaygınlaştığı görülmektedir (Şahin Güçhan, 2007). Geleneksel Osmanlı ahşap karkas yapılarını, bir yığma temel kat üzerine, üst katı dolgu malzemesi kullanılarak inşa edilmiş hımiş tipi ve ahşap çıtalarla giydirme yapılmış bağdadi tipi yapı sistemleri olarak sınıflandırmak mümkündür. Hımiş tipi yapılarda dolgu malzemesi olarak taş, kerpiç, tuğla gibi yapı malzemeleri kullanılmaktadır. Ahşap karkas yapılarda temel kural, yapının bütün yükünü temel duvarlarına aktaran elemanlar olarak, ahşap yığma sistemlerin tersine, düşeyde ahşap dikmelerin, yatayda ise ahşap kirişlerin kullanılmasıdır. İskelet sistemlerin avantajları, taşıyıcı sistemin kesitlerinin küçültülmesi, mimari çözümün

yığmaya göre daha esnek olması ve diğer yapı malzemelerinin karma olarak kullanımına olanak vermesidir (Uzunoğlu, 2009).

Ülkemiz, dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmakta olup, tarihsel dönem deprem kayıtlarına göre M.Ö. 2000 yılından bu yana devamlı bir şekilde hasar verici büyük depremler etkisi altında kalmıştır. Geçmiş dönemlerde gerçekleşen birçok yıkıcı depremler olduğu gibi, gelecekte de sık sık oluşacak depremlerle büyük can ve mal kaybına uğrayabileceğimiz bir gerçektir. Bu nedenle mühendislik yapılarında özellikle tarihi yapılarda deprem etkisinin araştırılması bu yapıları geleceğe güvenle aktarmak adına büyük önem taşımaktadır.

Türkiye'deki tarihi kent dokusunun büyük bir kısmını oluşturan geleneksel ahşap karkas yapıların, ne yazık ki deprem davranışına ilişkin çalışmalar da Türkiye'de çok yaygın değildir (Şahin Güçhan, 2007). Mevcut ahşap binaların depreme karşı gösterecekleri davranışın daha iyi anlaşılması, gelecekteki depremlerde bu yapıların göreceği zararı azaltmak amacıyla yapıların onarım ve güçlendirmeleri için gereklidir (Meng vd., 2019). Bunun için tarihi yapıların sonlu eleman modellemesine dayalı sayısal yöntemlerle yapısal davranışlarının belirlenmesi önemlidir. Fakat sayısal yöntemler birçok belirsiz parametreye dayalı analiz süreçlerini içermektedir. Oluşturulan sonlu eleman modelinin yapının hali hazırda gerçek davranışını ne kadar temsil ettiği sorusuna cevap bulmak için yapı üzerinde hasarsız deneysel ölçümlerin yapılması oldukça önemlidir. Hasarsız ölçümler sonucunda elde edilecek veriler referans alınmalı ve sonlu eleman modelleri güncellenerek ileri analizlerde kullanılmalıdır.

Deneysel Modal Analiz (DMA), çeşitli mühendislik yapılarının dinamik davranışlarını gösteren ve doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik karakteristiklerin deneysel ölçümler yapılarak bulunmasını sağlayan etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, üzerinde çalışılan yapısal sistemlerin durum tespiti ve hasar tanılmasının yapılması, belirli zaman dilimlerinde yapı sağlığının izlenmesi, sonlu eleman model güncellemesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. DMA yönteminde yapılan hasarsız ölçümler, özellikle tarihi yapılarda avantaj sağlamaktadır. Bu yapıların dinamik karakteristiklerinin, yapıya herhangi bir yapay titreşim uygulanmadan, yapı zarar görmeden dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Mühendislik yapılarının çözümünde, deneysel olduğu gibi sayısal yöntemlere de başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de günümüzde sıkça kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu eleman yöntemi; düzgün veya karmaşık geometriye sahip

yapıların çözümünde, kabul edilebilir bir yaklaşımla sayısal sonuçlar elde edilen bir yöntemdir. Sonlu eleman yönteminde yapı, küçük ve birbirine bağlı sonlu elemanlara ayrılmaktadır. Yapıların analitik olarak çözümünün yapılması çok zor bir işlem olduğundan, bu yöntem kullanılarak sistemin daha basite indirgenmesi, problemlerin çözümünde kolaylık sağlamaktadır. Yapılacak analizler için önemli bir adım olan sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra, artık yapının mevcut davranışını ve dinamik karakteristiklerini sayısal olarak elde edebilmek mümkün olmaktadır.

Yapıların çözümü için oluşturulan sonlu eleman modelinin, yapının gerçek davranışını ne kadar temsil ettiğinin belirlenmesi önemli bir noktadır. Bunun için deneysel ölçümler yapılarak elde edilen dinamik karakteristiklerin, sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristiklerle karşılaştırılması gerekir. Karşılaştırma sonucu meydana gelen fark kabul edilebilir düzeyin üstünde hesaplandığında, sonlu eleman modelinin güncellenmesi gerekmektedir. Burada model güncelleme işleminin amacı ise, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki korelasyonu sağlamak ve yapının gerçek davranışını temsil eden sonlu eleman modeli oluşturmaktır.

Aktif fay hatlarının üstünde bulunan ülkemiz, daima bir deprem tehdidiyle karşı karşıyadır. Mühendislik yapılarının olası bir depreme karşı göstereceği dinamik davranışların belirlenmesi için çeşitli yazılımlarda zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda yapının yer değiştirme, gerilme gibi değerlerine bakılarak, deprem yükleri altında sismik performansı hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Ayrıca yapının hasar durumu belirlenebilmekte, gerekirse restorasyon çalışmaları yapılabilmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

1.2.1. Tarihi Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Gentile ve Saisi (2007), tarihi bir katedral olan Monza Katedrali'nin kulelerinin dinamik karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak belirlemişlerdir. Öncelikle çevresel titreşim testi yapılmış ve yapının dinamik karakteristikleri bulunmuştur. Daha sonrasında yapının sonlu eleman modellemesi yapılmış ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Deneysel veriler yardımıyla sonlu eleman model güncellemesi yapılmış, sayısal ve deneysel frekans

değerlerinde uyum sağlanmıştır. Dinamik karakteristiklerin, yapının hasar değerlendirmesi yapılırken dikkate alınacak önemli kriterler olduğu belirtilmiştir.

Gentile ve Gallino (2008), yaptıkları çalışmada güçlendirilmiş tarihi ahşap zeminli asma yaya köprüsünün dinamik davranışını sayısal ve deneysel olarak belirlemişlerdir. Çevresel titreşim testleri ve 18kN ağırlığında iki araçla canlı yük testi yapılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden elde edilen verilerle Piklerin Seçilmesi ve Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemleriyle dinamik karakteristikler bulunmuş ve sonuçlara bakılarak iki yöntem sonucundaki değerler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlara bakılarak köprünün sonlu eleman güncellemesi yapılmıştır. Güncellenen modelin sayısal modal analiz sonuçlarının, canlı yük testleri ve çevresel titreşim testleri sonuçlarıyla uyum sağladığı görülmüştür. Güncellenen model sonuçları, oluşturulan sonlu eleman modelinin köprünün gerçek davranışını yeterince temsil ettiğini ve yapısal güvenliği değerlendirmek için uzun bir süre temel model olarak dikkate alınabileceğini göstermiştir.

Bayraktar vd. (2008), Trabzon'da bulunan tarihi İskenderpaşa minaresinin dinamik karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar için çevresel titreşim testleri yapılmış, mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Sayısal olarak yapılan analiz ANSYS sonlu eleman programında yapılmıştır. Minarenin ilk 7 modu dikkate alınmıştır. Sayısal ve deneysel değerler arasında %27'lik bir fark elde edilmiş ve bu farkı %5 sınırına indirmek için sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Model güncellenmesinden sonra mod şekilleri ve frekans değerleri birbirlerine uyum sağlamıştır.

Bayraktar vd. (2009), Trabzon'da bulunan Ayasofya Cami Kulesi'nin Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi ile dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir. Modal analiz sonuçları sayısal ve deneysel olarak karşılaştırıldığında, mod şekillerinin ilk 5 modda iyi bir uyuma sahip olduğu, ancak sayısal frekansların deneysel frekanslardan daha büyük olarak elde edildiği görülmüştür. Oluşan farklılıkların nedeninin duvarlardaki düşey ve enine çatlaklar olabileceği belirtilmiştir.

Aras vd. (2011), İstanbul'da tarihi Beylerbeyi Sarayı'nın dinamik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edip karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Mod şekilleri, frekanslar ve sönüm oranları elde edilmiştir. Sayısal model, deneysel sonuçlarla uyum sağlaması

açısından güncellenmiş ve malzeme özellikleri değiştirilerek frekanslarda uygunluk sağlanmıştır.

Foti vd. (2012), İtalya’da tarihi Bari Kulesi’nin dinamik karakteristiklerini belirlemek için OMA yöntemini kullanmışlardır. GFOA ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemlerine ek olarak, bu yöntemlerden daha sonra kullanılmaya başlayan Kristal Netliğinde SAB yöntemi kullanılarak veriler ARTeMIS Extractor Pro yazılımında işlenmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Aynı zamanda sayısal analiz için SAP2000 programı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar OMA sonuçlarıyla karşılaştırıldıktan sonra Elastisite Modülü ve yoğunluk gibi malzeme özellikleri değiştirilerek sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır.

Bayraktar vd. (2013), çalışmalarında Artvin’de bulunan tarihi Sundura Camisinin restorasyonu ve minaresinin yeniden inşası sonrası dinamik özelliklerini belirlemişlerdir. Hassas ivmeölçerle çevresel titreşim testi uygulanmış ve sinyaller toplanmıştır. Toplanan sinyaller PULSE ve OMA yazılımlarında işlenerek caminin ve minaresinin doğal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Deney sonucunda beş mod elde edilmiş ve restore edilen caminin doğal frekanslarının yeniden inşa edilen minarenin doğal frekanslarına yakın olduğu belirlenmiştir. Minarenin sönüm oranlarının caminin sönüm oranlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun minarenin camiden daha narin olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Çalık vd. (2015), Trabzon’da yığma taş duvar üstüne inşa edilmiş yığma tuğla ve betonarme kubbeli iki tarihi caminin dinamik davranışlarını karşılaştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. OMA yöntemiyle toplanan sinyallerden camilerin mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları elde edilmiştir. Camilerin ilk beş modu dikkate alınmıştır. Yapılan karşılaştırmada mod şekillerinin uyumlu olduğu, betonarme kubbeli caminin frekans değerlerinin, yığma kubbeli camiden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu farkın betonarme kubbenin yapıyı yığma kubbeye göre daha rijitleştirmesinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir.

Szczepański vd. (2016), yaptıkları çalışmada, ahşap karkas binaların sayısal modal analiz sonuçlarını ve kullandıkları dolgu malzemesinin yapının davranışına etkisini belirlemeyi amaçlamışlardır. Mineral yün ve poliüretan köpük olmak üzere iki farklı dolgu malzeme kullanarak yapı sayısal olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analiz sonucunda ilk üç mod şeklinin doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında poliüretan köpük kullanılması durumunda değerlerin %70’den fazla bir artış sergilediği, yapıya olumlu bir etki yaptığı

görülmüştür. Yapının sertliğinin arttığı ve deprem gibi dinamik yüklere karşı daha fazla direnç göstereceği sonucuna varılmıştır.

Hökelekli vd. (2017), tarihi bir caminin sayısal ve deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Çevresel titreşim testiyle hassas ivmeölçerler yardımıyla enine ve boyuna doğrultuda ölçümler yapılmıştır. Daha sonra sonlu eleman modellemesi yapılan caminin sayısal modal analizi yapılmıştır. Dinamik karakteristikler sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmış, frekans değerleri arasındaki farkların ortalama %1.25 olduğu görülmüştür. Elastisite Modülü değeri değiştirilerek sonlu eleman model güncellemesi yapılarak fark %0.4'e indirilmiş, yapının daha gerçekçi davranış göstermesi sağlanmıştır. OMA yönteminin tarihi yapıların yapı sağlıklarının izlenmesi için çok önemli olduğu belirtilmiştir.

Güneş ve Anıl (2017), çalışmasında yığma bir yapının dinamik karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak belirlemiştir. Yapının sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımında oluşturulmuş ve sayısal modal analizi yapılmıştır. Daha sonra, yapının gerçek davranışını sergileyip sergilemediğini anlamak için deneysel olarak GFOA ve SAB yöntemleri kullanılarak çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda değerlerde farklılıklar gözlemlenmiştir. Farklılık oranının azalması için yapının Elastisite Modülü değeri değiştirilerek sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır.

Compan vd. (2017), çalışmalarında Almanya'da bulunan tarihi bir kilisenin, çevresel titreşim testi yapmışlardır. Çevresel titreşim testlerinde, GFOA ve SAB yöntemlerini kullanmışlardır. Yapının ilk 8 modu dikkate alınmıştır. Bu yöntemlere göre sonuçların uyum içinde olduğu, modal güvence kriterinin modlar için 0.76 ile 0.95 arasında olduğu hesaplanmıştır.

Altunışık vd. (2019a), yaptıkları çalışmada Rize ili Çayeli ilçesinde bulunan tarihi ahşap Buzlupınar Köprüsünün restorasyonundan sonra dinamik karakteristiklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bunun için tarihi yapılarda kullanımı tercih edilen çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Testler için tek yönlü ve üç yönlü ivmeölçerler kullanılmıştır. Elde edilen veriler PULSE ve OMA yazılımlarına aktarılmıştır. Yapılan testler sonucunda mod şekilleri, frekanslar ve sönüm oranları elde edilmiştir. Yapı, SAP2000 yazılımında da analiz edilip sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda doğal frekanslar arasındaki farkın %34.55 olduğu görülmüş, farkın kabul edilebilir %5 sınırına düşürülmesi ve yapının mevcut yapısal durumunu yansıtmaması için sonlu eleman model güncellemesi manuel olarak yapılmıştır. Güncelleme sonucunda elde

edilen altı moddan 4. mod farkı %4.26 iken diğer modlarda fark %1'in altına düştüğü görülmüştür.

Altunışık (2019b), çalışmasında seçmiş olduğu dört farklı tarihi yığma köprünün deneysel olarak dinamik karakteristiklerini (doğal frekans, sönüm oranı, mod şekli) belirlemeyi amaçlamıştır. Bu parametreleri OMA yöntemi kullanarak GFOA ve SAB yöntemleri ile elde etmiştir. Deneysel ölçümlerde ivmeölçerlerle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler PULSE yazılımına aktarılmıştır. Kullanılan iki yöntemde de köprülerin ilk üç doğal frekanslarının uyum içinde olduğu görülmüştür. Köprülerin ilk frekans değerlerinin hesaplanması için elde edilen formülasyon belirtilmiştir. Köprülere ait dinamik karakteristiklerin farklı parametrelere bağlı olarak değişebileceği görülmüştür. Köprülerde dinamik analizler için dikkate alınabilecek sönüm oranı seviyesi öngörülmüştür.

Kalkan vd. (2019), yaptıkları çalışmada tarihi bir ahşap caminin dinamik karakteristiklerini OMA yöntemiyle belirlemişlerdir. Bu analizde GFOA ve SAB yöntemlerini kullanmış ve doğal frekanslar arasında uyum olduğu fakat sönüm oranlarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Sönüm oranlarında doğrusallık olmadığı belirtilmiştir.

Tarihi yapılarının haricinde, diğer mühendislik yapılarının da deneysel ölçümlere dayalı yapısal davranışlarının belirlenmesiyle ilgili (Sevim vd., 2012a; Altunışık vd., 2014; Adanur vd., 2016; Altunışık vd., 2016a; Sevim vd., 2016; Altunışık vd., 2017a; Altunışık vd., 2017b; Günaydın vd., 2017; Altunışık vd., 2018a; Altunışık vd., 2018b; Altunışık vd., 2018c; Altunışık vd., 2018d; Altunışık vd., 2019f; Altunışık vd., 2019g; Genç vd., 2019; Altunışık vd., 2020; Günaydın vd., 2020), dinamik karakteristiklerinin belirlenmesiyle ilgili de (Sevim vd., 2010; Sevim vd., 2011; Altunışık vd., 2012a; Sevim vd., 2012b; Kudu vd., 2014; Altunışık vd., 2015a; Altunışık vd., 2015b; Bayraktar vd., 2015; Altunışık vd., 2016c; Altunışık vd., 2016d; Bayraktar vd., 2016; Altunışık vd., 2017c; Altunışık vd., 2017d; Altunışık, 2017e; Altunışık vd., 2017f; Altunışık vd., 2017g; Altunışık vd., 2018e; Altunışık vd., 2018f; Altunışık vd., 2018g; Altunışık vd., 2019c; Altunışık vd., 2019d; Günaydın vd., 2019; Kahya vd., 2019; Kalkan vd., 2019; Sunca vd., 2020) literatürde çokça çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar biraz daha ilerlemiş (Altunışık vd., 2017h; Hüsem vd., 2018; Altunışık vd., 2019e; Kahya vd., 2020; Nasery vd., 2020), deneysel ölçümlerin yapılarda hasar seviyelerini belirlemede kullanılacağı görülmüştür.

1.2.2. Deprem Ahşap Yapılar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ile İlgili Çalışmalar

Er Akan (2004), çalışmasında geleneksel ahşap yapıların depreme karşı davranışını göstermeyi amaçlamıştır. Çalışmasını gerçekleştirmek için Düzce'nin Gökaya ilçesinden örnek bir kerpiç dolgulu hımış yapı seçmiştir. Bu yapıyı gerçek ölçülerıyla SAP2000 yazılımında modellemiştir. Karşılaştırma yapabilmek için hımış yapıyla aynı ölçülerde biri dolgu içermeyen bağdadi diğeri kerpiç malzemeden daha hafif bir dolgu içeren bağdadi olmak üzere iki yapı daha modellemiştir. Deprem bölgesinde eşmerkezli ahşap karkas yapıların kullanımına ilişkin genel kuşkulara rağmen, ahşap çerçeveli yapıların binalardaki deprem yükleri için verimli yanal yük direnç sistemleri olarak kullanılabileceği, uygun şekilde inşa edilmiş geleneksel ahşap yapılarda yanal yük direncinin depreme dayanacak kadar yüksek olduğu belirtilmiştir. Yanal yükler altında yapılan analizler sonucunda, bağdadi yapılarının yanal kuvvetlere hımış yapısından daha iyi tepki verdiği, bağdadi yapıların hımış yapılara göre daha az yer değiştirme yaptığı görülmüştür.

Güçhan (2007), yaptığı çalışmada geleneksel ahşap çerçeveli evlerin deprem davranışını ve teknik özelliklerini belirlemeyi amaçlamıştır. Ülkemizde meydana gelen birkaç önemli deprem sonrası yapılarda görülen hasarlardan bahsetmiştir. İncelemeler sonucunda, yönetmeliğe uyulmaksızın yapılan yapılarda temel ve çerçeve arasındaki bağlantı zayıf olduğundan yıkılabildiği, sağlam ve kayalık zemin üzerine konumlanan evlerde deprem sonrası meydana gelen hasarın daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ahşap binalarda metal kelepçe, vida veya bağlantı yerine çivi kullanılmasının özellikle yapının esnekliğini artırdığı ve ahşap karkas sistemde kullanılan çıta ve alçı tekniğinin (bağdadi) yanal kuvvetlere karşı yapının direncini artırdığı belirtilmiştir. Bazı durumlarda da dolgu malzemesi olarak taş, tuğla veya kerpiç kullanılması binalara ağırlık verdiğinden ve bazen yapı elemanlarının zayıf harçla birleşmesinden bir deprem sırasında yapının tamamen yıkılabileceği de bahsedilmiştir.

Köylü (2008), yaptığı çalışmada Eskişehir Odunpazarı bölgesinde bulunan bir hımış yapıyı seçerek, SAP2000 yazılımında çerçeve modellemesi yapmış ve depreme karşı davranışını belirlemiştir. Modellediği ahşap çerçevede, çerçeve arasına dolgu malzemesi olarak kerpiç, tuğla, doğal taş, briket ve yton malzemeleri kullanmış ve ayrı ayrı analiz etmiştir. Analiz sonucunda en fazla gerilme değeri, dolgu malzemesi doğal taş kullanılan çerçevede elde edilmişken, en fazla yer değiştirme ise kerpiç dolgulu çerçevede elde edilmiştir. Aynı çerçeve bağdadi olarak modellenip aynı dolgu malzemeleriyle analiz

edildiğinde de en fazla gerilmenin doğal taş kullanılan çerçevede olduğu görülmüştür. Aynı zamanda yapının geometrik şeklinin yapının deprem kuvvetleri altındaki davranışını etkilediği görülmüştür. Son olarak hımış ve bağdadi yapı türlerinin taşıdığı risk durumları için öneride bulunulmuştur.

Kaplan (2013), gerçekleştirdiği çalışmada Sait Halim Paşa Yalısı'nın SAP2000 yazılımında 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'e (DBYBHY) göre Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) kullanarak üç boyutlu, 2007 DBYBHY'ye göre Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) kullanarak iki boyutlu ve Amerikan Deprem Şartnamesi (UBC 97)'a göre iki boyutlu olarak üç farklı deprem analizini yapmıştır. Analizlerin sonucu olarak UBC 97'ye ve EDYY'ye göre yapılan iki boyutlu analizlerin, MBY'ye göre yapılan üç boyutlu analizlere göre daha elverişsiz olduğu anlaşılmıştır. Yapılan üç analize göre de sistemde oluşan gerilmeler, güvenli sınırın altında kaldığından ve tepe deplasmanı müsaade edilen sınırın altında kaldığından sistemin taşıyıcı elemanlarının statik açıdan yeterli olduğuna karar verilmiş ve sistemde güçlendirmeye gerek duyulmamıştır. Bunun yanında birleşim bölgelerine bakıldığında deprem kuvvetlerini karşılayan diyagonal yapı elemanlarının ve ana dikmelerin birleşimlerinin güçsüz kaldığı ve çivili birleşim yerlerinin kontrolü sonucunda çekme kuvvetine karşı yetersiz olduğu görülmüştür. Son olarak ahşap yapıların incelenmesi yöntemleri hakkında önerilerde bulunulmuştur.

Bağbancı (2013), çalışmasında Bursa Cumalıkızık köyündeki geleneksel ahşap yapılardan örnek yapılar seçmiş ve bu yapıların mimari özellikleri, taşıyıcı sistemi, yapımında kullanılan malzemeleri, bağlantı detaylarını ve bozulma nedenlerini incelemiştir. Cumalıkızık'taki ahşap evlerdeki hasar nedenlerinin genellikle nem artışı, yanlış yapım teknikleri kullanılması ve yeni eklentiler yaparak hatalı onarım yapılması, yapıların ihmal veya terk edilmesi ve deprem gibi nedenler olduğunu belirtmiştir. Bursa, Türkiye'nin deprem riski en fazla olan bölgesi Marmara'da bulunduğu için buradan örnek yapılar seçmiş ve yapıların depreme karşı davranışlarını ALGOR sonlu eleman programında modellemiş ve analiz etmiştir. Analiz sonucunda deprem yüklerinin en fazla duvarların köşelerini, ahşap malzemelerin destek noktalarını ve kapı açıklıklarının köşelerini etkilediğini belirtmiştir. Maksimum çekme gerilmelerinin, yer değiştirmelerin fazla olduğu ahşap karkas sistemlerde çapraz yönlerde ve kerpiç yapı malzemesinde oluştuğunu ve çatı yüklerini taşıyan ahşap malzemeler de deprem yükleri nedeniyle aşırı çekme gerilmeleri etkisinde olduğunu belirtmiştir.

Aktaş vd. (2014), yaptıkları çalışmada ahşap çerçeve yapısının ve dolgu malzemelerinin etkilerini ve depreme karşı sergilediği davranışları deneysel olarak incelemiştir. Test edilecek duvarlar Safranbolu'daki ahşap yapılardan seçilmiştir ve laboratuvarında ahşap çerçeve malzemesi olarak sarıçam ve köknar, dolgu malzemesi olarak taş, kerpiç, kireç, alçı gibi malzemeler kullanılarak farklı boyutlarda ve farklı tiplerde sekiz çerçeve inşa edilmiştir. Bu sekiz çerçeve dolgulu ve dolgusuz ters çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Dolgu malzeme özelliklerini belirlemek için basınçlı yükleme testi yapılmıştır. Ayrıca ahşap numuneler liflere paralel ve dik yönlerde eğilme ve basınç altında test edilmiştir. Yapılan deneylere göre dolgulu ve kaplama sistemlerde, dolgusuz çerçeveye göre depreme dayanım sırasıyla 1.74 ve 2.25 kat artmıştır. Ama buna rağmen dolgu ve kaplamadan sonra ağırlıkla orantılı olarak etkiyen yanal deprem kuvveti de artmıştır. Dolgulu ve kaplamalı çerçeve sistemleri dolgusuz sisteme göre daha rijit olduğu ve daha küçük periyodlara sahip olduğu görülmüştür. Dolgu ve kaplama kullanılıncı hesaplanan taşıma kapasitesi ile sistemden beklenen kapasite oranı, dolgusuz sisteme göre azaldığı ama yine de beklenenden daha aşağıda kalmadığı tespit edilmiştir. Bağdadi duvar tipi kullanılan yapılar, dolgulu ahşap çerçeveye göre daha iyi performans göstermiştir. Yapılan deney sonuçlarına bakılarak hımmış yapılarda dolgunun kaldırılarak süngertaşı, perlit blokları gibi hafif dolgu malzemeleri kullanılması ya da yapılarda bağdadi tipi duvar yapılması önerilerinde bulunmuşlardır.

Poletti vd., (2015), çalışmalarında, eski binalarda bulunan kaymaya dayanıklı duvarlar olan geleneksel ahşap karkas duvarların sismik performansını incelemiştir. Bunun için bir deprem esnasında bir perde duvardan beklenen sismik yükleri basitleştirilmiş bir şekilde simüle edebilen, gerçek ölçekli duvarlarda statik döngüsel testlere dayanan deneyler yapmışlardır. Duvar dolgulu ahşap, çıta ve sıvalı ahşap çerçeve ve dolgusuz ahşap çerçeve gibi farklı duvar türlerini göz önünde bulundurmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda dolgusuz ahşap çerçeve duvarlarının, dolgu duvarlara kıyasla daha düşük yük kapasitesi, sertlik ve süneklik sunduğu, ancak farklı tepkileri nedeniyle sönümleme kapasitesinin biraz daha fazla olduğu görülmüştür. Geleneksel dolgu ahşap çerçeve duvarlarının, kontrollü hasarla birlikte daha yüksek yatay yer değiştirmeler sergileyerek genel olarak çok iyi hasar kapasitelerinin olduğu, dolgusuz ahşap çerçeve duvarlar söz konusu olduğunda, aynı yatay yer değiştirmeler, esas olarak merkezi bağlantılarda yoğunlaşan yüksek düzeyde hasara neden olduğu gözlemlenmiştir. Dolgunun olmayışıyla duvarların serbest çalıştığı ve bunun

da daha fazla kayma deformasyonlarına ve bağlantıların kesme deformasyonu dolayısıyla daha yüksek hasara neden olduğu belirtilmiştir.

Vieux-Champagne vd. (2017), gerçekleştirdikleri çalışmalarında ahşap çerçeve yapıların sismik hareketlere karşı gösterdiği davranışı ve sonunda görülebilecek hasarları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde kullanılacak olan ahşap dolgulu ev, Haiti’de yapılan evlere uygun taş dolgulu inşa edilmiştir. Serbest titreşim testleri yapılarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra $6 \times 6 \text{ m}^2$ genişliğinde olan sarsma masası deneylerine tabi tutulmuştur. Deprem analizinde iki farklı güçlü deprem ivmesi farklı ölçeklerde etki ettirilerek beş farklı analiz yapılmıştır. Bu farklı deprem ölçeklerinde meydana gelen maksimum yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda hiçbir deprem analizinde tamamen çökme ya da büyük bir hasarla karşılaşılmaştır. Özellikle perde duvarların yer değiştirmelerinin ve hasar durumlarının az olduğu görülmüştür. Bazı dolgu bölgelerinde çökmeler ve bağlantı noktalarındaki çivilerde gevşemeler gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda dolgulu ahşap çerçeveli yapıların deprem direncinin azımsanmayacak derecede olduğu sonucuna varılmıştır.

Ercan (2018), çalışmasında İzmir’de tarihi bir ev üzerinde yapılan güçlendirme çalışmasının yapısal güvenliğe etkisini araştırmıştır. Yapının dinamik karakteristikleri yapılan OMA ölçümleri ile belirlenmiştir ve bu sayede sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır. ABAQUS programında tarihi yapının güçlendirme öncesi ve sonrası olmak üzere iki adet sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Bu iki model 1999 Kocaeli depremine ait gerçek ivme verileri kullanılarak deprem analizine tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda güçlendirme öncesi ve sonrası gerilmeler ve yer değiştirmeler dahil yapının dinamik tepkileri karşılaştırılmış ve güçlendirme etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, güçlendirilmiş yapının sertliğinin ilk haline göre üç kat arttığı anlaşılmıştır.

Zhao vd. (2019), yaptıkları çalışmada Çin’de tek bölmeli ve tek katlı eski bir ahşap yapının karbon kompozitler ile güçlendirilmesinin sismik direncine etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Laboratuvar ortamında yapının 1/2 ölçekli örneği yapılmış ve güçlendirme öncesinde sarsma masasında El Centro, Taft ve Lanzhou depremlerinin ivmesine maruz bırakılmıştır. Hasar gören kısımlar bağlayıcı ile yapıştırılıp eklem yerleri karbon kompozitler ve bağlayıcı ile güçlendirilmiştir. Bina sismik tasarımı için Çin yönetmeliklerine göre, PGA sırasıyla 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g, 0.5g, 0.6g, 0.8g ve 0.9g olarak girilmiş, 0.3g’den sonra sadece El Centro depreminin ivmesi kullanılmıştır. Güçlendirilmiş modelin her PGA girişinden sonra çekiç testi uygulanmış ve dinamik

karakteristikleri belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda yapının 0.3g deprem girdisine kadar gözle görülür bir hasar almadığı, 0.4g değerinden sonra yer değiştirme yapmaya başladığı ve çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Çin deprem yönetmeliğine göre deneyler sonucunda “küçük deprem altında hasar görmez, orta deprem altında tamir edilebilir ve büyük deprem altında çökmez” gerekliliklerini karşıladığı için güçlendirilmiş eski ahşap yapının yeterli sismik kapasiteye sahip olduğuna karar verilmiştir. En son 0.9g girdisinde yapının artık yük aktarma kabiliyetinin kaybolduğu ve çöktüğü de görülmüştür.

Xie vd. (2019), bu çalışmada Çin geleneksel ahşap yapılarının deprem esnasında iyi performans sergilemesinin sebeplerini açık bir şekilde anlamak için, bir Çin geleneksel ahşap yapısını sarsma masa testleri ile incelenmişlerdir. Test için 1834 yılında yapılmış ahşap bir kule olan Xi'an Çan Kulesi'nin prototipi 1/6 ölçekli olarak aynı imalat yöntemleriyle yapılmıştır. Testler sonucunda geleneksel ahşap yapının 0.6g PGA'ya kadar olan tüm deprem girdilerinde yalnızca küçük hasarlarla deprem kuvvetlerini karşıladığı, bundan dolayı iyi sismik performansa ve mükemmel deformasyon kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Altunışık vd. (2019h), yaptıkları çalışmada Trabzon ili Sürmene ilçesinde bulunan tarihi bir ahşap caminin yapısal durum değerlendirmesini ayrıntılı bir şekilde yapmayı amaçlamışlardır. Üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulan caminin modal analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen sayısal dinamik karakteristikler, hasarsız deneysel ölçümler yapılarak elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılmıştır. Mod şekilleri benzerlik göstermiş fakat doğal frekans değerleri arasında %30'luk bir fark elde edilmiştir. Farklılıkları azaltmak için caminin malzeme özelliklerinde değişiklik yapılarak sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır. Güncelleme sonrasında fark %5'in altına indirilmiştir. Güncellenmiş modelin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizi SAP2000 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman güncellenmesinden sonra maksimum yer değiştirmeler, eksenel ve kesme kuvvetleri ile eğilme momentleri değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında, Rize ili Fındıklı ilçesinde bulunan geleneksel ahşap karkas taşıyıcı sisteme sahip hımış bir konağın dinamik karakteristiklerinin hasarsız deneysel yöntemlerle belirlenmesi, sonlu eleman modelinin oluşturulması, elde edilen farklılıkları

minimum düzeye indirmek ve yapının gerçek durumunu temsil eden sonlu eleman modelini oluşturmak için model güncelleme çalışmalarının yapılması ve güncellenen model üzerinden yapının gerçek dinamik davranışının elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının birinci bölümünde konu ile alakalı genel bilgilerden bahsedilmiştir. Öncelikle konu ile alakalı olmak üzere yapılan çalışmalara, tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve depremin ahşap yapılar üzerindeki etkisinin araştırılması olmak üzere iki farklı başlık altında yer verilmiştir. Tez kapsamında incelenen yapının taşıyıcı sistem yapı malzemesi ahşap olduğundan, ahşabın fiziksel ve mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir. Ahşap karkas yapıların farklı türlerinden ve bunların genel yapım tekniklerinden bahsedilmiştir. Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için yapılan teorik ve deneysel modal analiz yöntemlerine ait formülasyonlar verilmiş ve sonlu eleman model güncelleme işleminden bahsedilmiştir. Son olarak da doğrusal dinamik analiz yaparken kullanılan metot ve formülasyonlara yer verilmiştir.

İkinci bölümde, tez dahilinde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Rize ili Fındıklı ilçesinde bulunan geleneksel hımış yapının dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler frekans ortamında GFOA ve zaman ortamında SAB yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. İşlem sonucunda yapının mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları elde edilmiştir. Daha sonra yapının proje verileri dikkate alınarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan modal analiz sonucunda yapının sayısal dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış, sonlu eleman modeli belirsiz parametreler dikkate alınarak güncellenmiştir. Güncellenmiş modelin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizleri, 1999 Kocaeli depremi yer hareketi kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde verilmiştir. Son bölümde ise yararlanılan kaynaklara yer verilmiştir.

1.4. Yapı Malzemesi Olarak Ahşap

Günümüzde ağırlıklı olarak kullanılan yapı malzemeleri beton ve çeliğe nazaran ahşap, çok daha eski zamanlara dayanmaktadır. İnsanlığın ilk zamanlarından beri barınma ihtiyacını gidermek için kullanılan ve ham madde bakımından doğadan kolayca temin edilebilen ahşap doğal bir yapı malzemesidir. İnsanoğlunun ağaç kavuklarında başlayan

yerleşme macerası daha sonra saz, kamış gibi malzemelerle destek bulmuş, en sonunda da ahşap yığma ve karkas sistemine geçilmiştir. Yapılarda taşıyıcı iskelet malzemesi olarak kullanılmasındaki en temel gelişme, geçtiğimiz yüzyılın başlarına rastlamaktadır. Artan ve gittikçe yaygınlaşan sanayileşmenin ortaya çıkardığı ihtiyaçlar ile I. Dünya Savaşı öncesi ve savaş yıllarında değerli bir silah hammaddesi olan çeliğin yapı alanından çekilmesi, ahşap malzemenin değişik işlevlerdeki yapılarda ve daha ölçülü olarak kullanılması zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla, bugün kullanılan modern bileşim elemanlarının birçoğunun bulunması, ahşabın çeşitli dış etkilere karşı korunmasını sağlayan malzemelerinin ve kullanma yöntemlerinin geliştirilmesi de bu döneme rastlamaktadır.

Ahşap, doğaya bir zararı olmadan geri dönüşümü sağlanabilen, ağırlığına kıyasla mekanik özellikleri çok iyi olan, en uygun yöntemlerle işlendiğinde bir hayli uzun ömürlü olan ve değişik malzemelerle uyumlu sürdürülebilir bir yapı malzemesidir. Bu özellikleri sayesinde de geleneksel Türk evlerinde temel bir yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Çoğunlukla korunması için hiçbir işlem uygulanmamış olmasına rağmen geçmişte kullanılan ahşap yapı elemanları bugüne değin dayanıklılığını koruyabilmektedir.

1.4.1. Ahşabın Fiziksel Özellikleri

Ahşabın içindeki nem miktarı, özgül ağırlığı, ısı ve ses iletkenliği, depreme karşı dayanıklılığı, rengi ve kokusu gibi özellikleri fiziksel özellikleridir.

1.4.1.1. Özgül Ağırlık

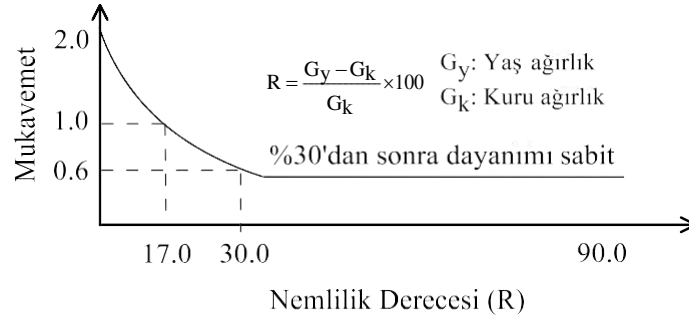
Özgül ağırlık, ahşap malzemesinin birim hacmindeki ağırlığının tespit edilmesiyle bulunmaktadır. Özgül ağırlık hakkında bilgi sahibi olunmasıyla, ağacın dayanımı ve çürüme olasılığı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. İçindeki su miktarına göre hacmi ve ağırlığı değişen ahşabın birim hacim ağırlığında, ahşapta bulunan havanın, suyun ve diğer maddelerin ağırlığı vardır (Öztunalı, 1975). Tablo 1.1’de ahşap malzemenin ağırlığına göre sınıflandırılmasını gösterilmektedir.

Tablo. 1.1. Ahşap malzemenin ağırlığına göre sınıflandırılması (Öztunalı, 1975).

Ağırlık Durumu	Ağırlığı (gr/cm ³)
Oldukça Hafif Ahşap	0.41-0.50
Hafif Ahşap	0.51-0.65
Orta Ağırlıkta Ahşap	0.66-0.75
Ağır Ahşap	0.76-1.00
Çok Ağır Ahşap	>1.00

1.4.1.2. Nem Oranı

Ahşap malzemede zamanla çeşitli değişimler olabilmekte ve bu değişimlerden biri olan renk değişimi malzemenin yaşlı olduğunu göstermektedir. Ahşapta renk farklılıklarının gözlenmeye başlanması ve buna bağlı olarak nem kaybının yaşanması ve darbe etkisi altında kalması gibi nedenler ahşap malzemenin dayanımını azaltabilmektedir. Günümüzde yapılan ahşap yapılar ile bunlara nazaran çok daha yaşlı olan ahşap yapılar karşılaştırıldığında taşıyıcı sistemler hakkında elde edilen verilere göre yapı malzemesinin mukavemetinin zaman geçtikçe azaldığı görülmektedir (Sonderegger vd., 2015). Herhangi bir ahşap malzemenin nem derecesi arttıkça mukavemeti azalmaktadır. Ama nem oranının %30 sınırını aşması halinde ise mukavemette değişiklik olmamakla birlikte bu değer mukavemet açısından sınır değer olarak kabul edilmektedir (Duman vd., 1988). Şekil 1.1’de ahşaptaki nem ve mukavemet arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Ahşaptaki nem ve mukavemet oranı (Duman vd., 1988).

1.4.1.3. Isı İletkenliği

Bir yapı malzemesi olan ahşabın temelini meydana getiren selüloz, ısıyı geçirmeyen malzeme olmasına rağmen ısıнын iletkenliği ahşap malzemedeki nem miktarına, cinsine ve lif doğrultusuna göre değişiklikler göstermektedir (Şenkal, 1996). Ahşap, ısıyı lif doğrultusunda, liflere dik doğrultuya göre daha fazla taşımaktadır. Isı iletkenlik katsayısı düşük olan ve kömürleşme özelliği bulunan ahşap, tutuşması kolay olsa da yangına 30-90dk dayanabilmektedir. Kuru olan ahşap ısıya maruz bırakıldığında genleşmekte, soğuğa maruz bırakıldığında ise büzüşmektedir. Bu genişleme ve büzülme miktarları, malzemenin anizotropik olması nedeniyle tüm yönde değişiklikler ortaya çıkarmaktadır (Gürel, 2018).

1.4.2. Ahşabın Mekanik Özellikleri

Ahşap malzemenin mekanik özellikleri arasında, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, makaslama dayanımı, yarıлма dayanımı, Elastisite Modülü ve sertlik gibi özellikler bulunmaktadır. Ahşabın mekanik davranışı mikrodan makro seviyeye kadar incelenmelidir. Bunun nedeni ise yüksek derecede anizotropiye sahip hücresel bir malzeme olmasıdır ve bu nedenle her doğrultuda değişik özellikler gösterebilmektedir. Her yönde eşit özelliklere sahip izotropik bir malzeme için elastik özellikler üç elastik sabitle; Elastisite Modülü (E), Kayma Modülü (G), Poisson Oranı (ν) tanımlanırken, ahşap anizotropik bir malzeme olması sebebiyle elastik davranışı tanımlamak için on iki sabite ihtiyaç duyulmaktadır: Elastisite Modülü (E_L, E_T, E_R), Kayma Modülü (G_L, G_T, G_R), Poisson Oranı ($\nu_{LT}, \nu_{TL}, \nu_{TR}, \nu_{RT}, \nu_{LR}, \nu_{RL}$) (Kaplan, 2013).

1.4.2.1. Elastisite Modülü

Elastisite Modülü; bir malzemeye belli bir sınıra kadar uygulanan gerilmeler altında meydana gelen şekil değişiminin, gerilmeyi oluşturan yükün kaldırıldıktan sonra malzemenin eski şekline gelme özelliğini ifade eden bir değerdir. Bahsedilen bu sınır elastik sınır olarak adlandırılır. Elastisite Modülü, bu sınır içindeki gerilme ve şekil değiştirme arasındaki orandan elde edilen bir değerdir.

Ahşap da orta düzeyde elastisiteye sahip bir yapı malzemesidir. Bu nedenle ahşabın karşılayabileceği yük sınırı aşıldığında deformasyon gösterir ve ahşap kırılır. Bu sınır ahşabın kırılma sınırıdır (Kaplan, 2013). Tablo 1.2’de bazı ağaç cinsleri için Elastisite ve Kayma Modülü değerleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Bazı ağaç cinslerinin Elastisite ve Kayma Modülü değerleri (TS647).

Ahşap Malzemenin Cinsi	Elastisite Modülü		Kayma Modülü (G) (kg/cm ²)
	Liflere Paralel E// (kg/cm ²)	Liflere Dik E [⊥] (kg/cm ²)	
İğne Yapraklı	100000	3000	5000
Meşe ve Kayın	125000	6000	10000

Ahşap malzemede Elastisite Modülünü etkileyen etkenler şunlardır:

- Yoğunluk arttıkça Elastisite Modülü değeri artar.
- Lif doygunluk noktasına kadar su miktarı arttıkça Elastisite Modülü değeri azalır.
- Ahşabın sıcaklığı arttıkça Elastisite Modülü değeri azalır.
- Liflerin gidiş yönü ile numune boyuna eksenini arasındaki açı arttıkça Elastisite Modülü değeri azalır.
- Kuvvetin etki yönü ile yıllık halkaların gidiş yönü arasındaki açı $\psi=90^\circ$ iken Elastisite Modülü değeri en yüksek, $\psi=45^\circ$ iken Elastisite Modülü değeri en düşüktür.
- Ahşap malzemede uzunluğun enine kesit yüksekliğine oranı 15’e kadar arttıkça Elastisite Modülü değeri azalır, 15’in üstünde arttıkça Elastisite Modülü değeri değişmez (Kaplan,2013).

1.4.2.2. Basınç Dayanımı

Ahşabın liflere paralel ve dik yönde gelen kuvvetlerin, ahşaba uygulamış olduğu basınca karşı ahşabın gösterdiği dirence basınç dayanımı denilmektedir. Bu direnç ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağına karar vermede etkilidir. Liflere paralel ve dik yönlerdeki basınç dayanımı, TS647’ye göre tespit edilmektedir. Kazık, direk ve sütun

gibi yapı elemanları, ahşabın liflere paralel yönde basınç gösterdiği elemanlardır ve bunların basınç dayanımı oldukça fazladır. Hatıl, taşıyıcı kiriş ve lentolar, ahşabın liflere dik yönde basınç gösterdiği yapı elemanlarıdır. Liflere dik basınç kuvveti boru biçimindeki hücrelerin çeperlerini ezeceği için, bu doğrultuda büyük bir dayanım yoktur ve liflere paralel basınç dayanımından oldukça düşüktür. Liflere paralel basınç kuvveti ise, boru demetlerinin birer kolon gibi basınca ve burkulmaya çalışmasına neden olur (Erkoç, 2004). Basınç dayanımını etkileyen etkenler şunlardır:

- Ahşap yapı elemanının yüksekliği artarsa basınç dayanımı azalır.
- Bütün ağaç türlerinde yoğunluk arttıkça bununla doğru orantılı olarak basınç dayanımı da artar.
- Kuvvetin etki yönü ile liflerin gidiş yönü arasındaki açı arttıkça liflere paralel basınç dayanımı azalır (Örs vd., 2001).

Şekil 1.2’de basit bir ahşap iskelet sistemin basınç deneyi verilmiştir.



Şekil 1.2. Basit bir ahşap iskelet sistemin basınç deneyi (Uzunoğlu vd., 2009).

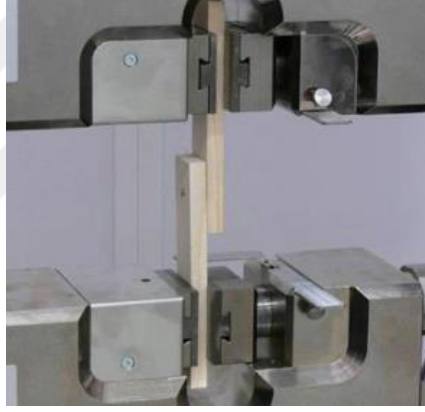
1.4.2.3. Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, ahşabın liflere paralel ve dik olmak üzere, birbirlerinin tersi yönlerde tesir eden ve lifleri birbirinden ayırmaya gayret eden iki kuvvete karşı ahşabın göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır.

Çekme dayanımının etkileyen etkenler şunlardır:

- Ahşap malzemenin çekme dayanımı ile yoğunluğu doğru orantılıdır. Yoğunluk, mukavemet bakımından en fazla çekme dayanımını sonra sırası ile eğilme, makaslama ve basınç dayanımını etkilemektedir.
- Nem bakımından incelendiğinde çekme dayanımı ile nem oranı arasında ters orantı vardır.
- Çekme direncinin yönü ve liflerin yönü arasındaki açı (0° - 45°) arttıkça, çekme dayanımı azalmaktadır.
- Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı azalmaktadır fakat bu azalma miktarı çok önemli olmamakla birlikte sıcaklık artışıyla nem miktarında artış olma durumunda, çekme dayanımında önemli miktarda azalma görülmektedir (Örs vd., 2001).

Şekil 1.3'te ahşabın çekme dayanım deneyi örneği verilmiştir.



Şekil 1.3. Ahşabın çekme dayanımı deneyi (URL-7).

1.4.2.4. Eğilmeye Dayanımı

Mesnetlenmiş olan bir ahşabın, bir veya iki yönden, liflere paralel olmayan yönde tesir eden ve ahşabı eğmeye çalışan kuvvetlere karşı gösterdiği dayanımdır. Eğilme dayanımı, ahşaptaki rutubet oranıyla bağlantılıdır. %3-5 oranındaki nem ahşaba en yüksek dayanımı sağlarken, nem oranı arttıkça her %1'lik orana karşı %4 oranında mukavemet azalmaktadır (Hiraoğlu, 2007). Ahşap malzemenin yoğunluğu arttıkça eğilmeye dayanımı da artmaktadır. Bunlara ilave olarak liflerin gidiş yönü eksenini ile ahşabın boyuna eksenini arasındaki açı (0° - 90°) arttıkça, eğilme dayanımı azalış göstermektedir. Şekil 1.4'te ahşabın liflere dik yönde eğilme dayanım deneyi verilmiştir.



Şekil 1.4. Liflere dik yönde eğilme dayanımı deneyi (URL-7).

1.4.2.5. Makaslama Dayanımı

Makaslama dayanımı, ahşabın birbirine kaynamış iki yüzünü bir düzlem üzerinde birbirine ters yönlerde kaydırarak lifleri koparmaya ve birbirinden ayırmaya uğraşan kuvvete karşı sergilenen direnç olarak ifade edilmektedir. Bilhassa malzemenin birleşim ve ek yerlerinde ve çentik açılmış bölümlerinde önem arz etmektedir. Yoğunluk, nem, lif yönü ve malzeme bünyesindeki kusurlar gibi faktörler makaslama dayanımı üzerinde etki göstermektedir. Yoğunluk ile makaslama dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Ahşaptaki nem %10 oranında olduğunda makaslama direnci maksimum düzeyde olup, bu oranın altına veya üstüne çıktığında ise azalmaktadır. Uygulanan kuvvetin yönüyle, liflerin yönü arasındaki açı 90° olduğunda makaslama direnci en düşük, açı 0° olduğunda ise en yüksek olmaktadır. Malzemedeki kusurlar, özellikle çatlaklar, kaynamamış ve çürük budaklar, makaslama dayanımını azaltıcı yönde etki yapmaktadır (Erkoç, 2004).

1.4.2.6. Yarılma Dayanımı

Yarılma dayanımı ahşap bir malzemeye vida, çivi gibi metallerin odun lifleri arasına girmesi, ahşabın da bu metalleri bünyesinde bulundurma kapasitesidir. Yarılma dayanımı ahşabın çeşidine göre değişiklikler göstermektedir. Özellikle meşe, kayın ve çınar gibi ağaç türlerinin yarılma dayanımları diğerlerine göre daha yüksektir.

1.4.2.7. Sertlik

Basınç direnciyle de doğrudan alakalı olan sertlik, ahşap malzemenin kesilmeye ve işlenmeye karşı gösterdiği dirençtir. Sertlik üzerinde malzemenin nem oranı, malzemenin cinsi ve iç yapısı gibi etmenlerin yanı sıra yoğunluk ile de ilişkilidir. Yoğunluk ile sertlik doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durumun tersine nem oranı ise sertlik ile ters orantılı bir ilişkiye sahiptir. Kuru bir ağaçta sertlik oranı en üst düzeydedir (Bozkurt, 1997). Tablo 1.3'te farklı ağaç türleri için sertlik derece değerleri verilmiştir.

Tablo 1.3. Farklı ağaç türlerinin sertlik dereceleri (Karabulut, 2000).

Sınıfı	Sertlik Derecesi (g/mm ²)	Ağaç Türleri
Çok Yumuşak Ağaçlar	<3.5 kg/mm ²	Kavak, Köknar, Söğüt, Balsa
Yumuşak ağaçlar	<4.9 kg/mm ²	Çam, Ladin, Huş, Kızılağaç
Orta Sert Ağaçlar	<5.9 kg/mm ²	Karaçam, Armut, Fındık, Ceviz, Karaağaç, Kestane
Sert Ağaçlar	<6.5 kg/mm ²	Meşe, Dişbudak, Porsukağacı, Akçaağaç, Gürgen
Çok Sert Ağaçlar	>6.5 kg/mm ²	Şimşir, Akgürgen, Karameşe, Kayacık, Zeytin

1.4.3. Ahşabın Avantaj ve Dezavantajları

Ahşabın yapı malzemesi olarak kullanımında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ahşap, yapıda kullanılırken bu artılar ve eksiler birçok yönden etkili olup sistem için önem arz etmektedir.

1.4.3.1. Avantajlar

Ahşap yapı malzemesinin diğer yapı malzemelerinden üstün olduğu ve avantaj sağladığı birçok durum vardır. Ahşap diğer bütün malzemelere (betonarme, çelik vb.) göre oldukça hafif bir malzemedir. Bunun sonucu olarak ölü yük azalmakta, temel ve diğer taşıyıcı elemanların boyutları küçülmektedir. Ahşap malzemenin hafif olması, atölyede

Üretilen ahşap yapı elemanlarının şantiyeye ulaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Hafifliğin yanı sıra, şok etkisine dayanıklı, titreşim emme özelliğine sahip, esnek bir malzemedir. Bu nedenle deprem etkilerine karşı dirençlidir. Deprem etkisiyle yıkıldığı süreçte ezici veya öldürücü bir tehdit oluşturmamaktadır. Montaj makineleri gereksinimi az, montajı kolay, çabuk ve ekonomiktir. Yapının elemanları sökülüp farklı binaların yapımında tekrar kullanılabilir. İşçiliği kolaydır ve şantiye ortamında dahi istenilen şekil verilebilmektedir. Birleşimi kolay bir malzemedir. Isı yalıtımı yönünden iyi bir malzemedir. Sesi emme kabiliyeti, elektriği iletme seviyesinin düşük olması ve elektrostatik yük aldırma özelliği ve uygun yalıtım malzemeleriyle, yüksek kalitede yalıtım sağlamaktadır. Kimyasal etkilere ve asitlere karşı dayanıklıdır. Kurutulmuş ahşap iyi bir elektrik yalıtkanlığına sahiptir. Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında kaynağı en kolay bulunan ve en çabuk yenilenebilen yapı malzemesidir. Geri dönüşüm özelliğine sahiptir ve çevre kirliliği oluşturmayan doğaya uyumlu bir maddedir.

1.4.3.2. Dezavantajlar

Ahşap malzemenin çeşitli avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Ahşap gerekli önem gösterilip korunmadığı zaman içerisine kolay bir şekilde su çeker, şişer ve büzüldükten sonra üzerinde çatlaklar oluşabilir. Bu durum ahşabın dayanımı için olumsuz bir durumdur. Her nokta ve doğrultudaki statik özellikleri eşit değildir. Anizotrop bir maddedir. Ahşap doğada kolayca bulunabilmekte ve kolayca işlenebilmektedir fakat ahşap olan malzemeleri işleyebilecek deneyim sahibi ustaların da oldukça azalmış olması, ahşabın bir diğer dezavantajdır. Malzemenin performansı hakkında incelemelerde bulunulurken çoğunlukla görünen dış kısma bakılır. İçerisindeki mantarlar ve bakteriler ahşabın bozulmasına ve çürümesine neden olabilmektedirler. Bu nedenle yapıdaki ahşabın içine bakılamadığından dolayı bu gibi olumsuz durumlar belirlenemeyebilir. Ahşap, ses yalıtımı yönünden zayıftır. Yangın dayanımının yüksek olmasına karşı kolay tutuşan bir malzemedir.

1.5. Karkas Yapılar

Karkas sistemler, taşıyıcı sistemi kolon, kiriş ve çerçeve gibi elemanlarından oluşan ve bu elemanlar sayesinde yükü güvenli bir şekilde zemine aktaran sistemlerdir. Bu sistemler

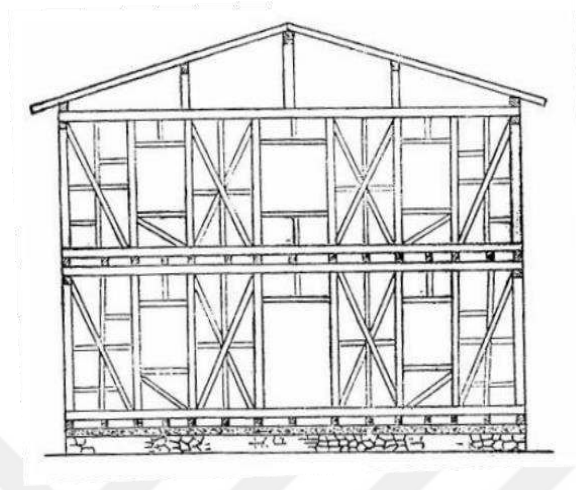
taş, tuğla, kerpiç gibi boyutu küçük olan malzemelerin bir araya gelmesi sonucu yapı elemanlarının oluşturulmasının aksine ahşap, çelik, betonarme gibi malzeme ile taşıyıcı iskelet ortaya çıkarılmaktadır. Karkas sistemler yığma sistemlerden, duvarların taşıyıcı değil taşınan eleman olması yönüyle ayrılmaktadır.

Betonarme karkas, demir ve betonla yapılmış yapılara denilmektedir. Beton malzeme basınca dayanıklı olmasına rağmen aynı davranışı çekme kuvvetine karşı gösteremez. Bu nedenle donatıyla birleştirilip dayanıklı hale getirilir. Yapının taşıyıcı elemanları olan kolon, perde, kiriş ve döşeme betonarme olarak yapılırlar. Yapıya etki eden yükleri döşemeler kirişlere, kirişlerde kolonlara veya perdelerle aktarır ve kolonlar sayesinde yük temele taşınmış olur. Çelik karkaslarda ise taşıyıcı elemanlarda yapısal çelik kullanılır. Çeliğin süneklik özelliğinin fazla olması ve deprem karşısında iyi bir performans sergilemesi, onu yapı malzemesi olarak kullanım tercihi sırasında başlara taşımıştır. Yapısal çelik kullanılan sistemlerin imalatları ve düzenlemesi sahada yapılır, kolon ve kirişleri düzenlenir.

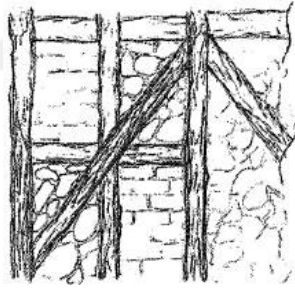
1.5.1. Ahşap Karkas Yapılar

Ahşap karkas yapılar; yatay ve düşey taşıyıcı elemanları sert ağaçtan yapılan karkas yapı türüdür. Geleneksel Anadolu evlerinin büyük bir bölümü bu sisteme iyi birer örnektir. Ahşap karkas yapım tekniği, Türkiye'nin, deprem riskinin de yoğun olduğu Kuzey ve Batı Anadolu, Marmara Bölgesi ve Orta Anadolu'nun kuzey kuşağında yaygın olarak uygulanmıştır. Karkas sistemin taşıyıcı elemanları; dikme, kiriş, payanda ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Sistemde temel duvarları, toprak ile temasta olan duvarlar kagir olarak inşa edilmektedir. Bu duvarlar moloz, kaba yonu ya da ince yonu taştan yapılarak karkas sistemin başlayacağı seviye hazırlanmaktadır. Ahşap karkas sistemlerin, kolon ve kirişlerden oluşan çerçevelerin doldurulması veya kaplanmasıyla meydana gelen hımış, bağdadi ve ahşap kaplama türleri bulunmaktadır. Taş bir temel üzerine inşa edilen ahşap karkasın arasına kerpiç, taş ya da tuğlalar doldurulmasıyla oluşturulan yapılar "hımış", ahşap iskeletin üzerine 2-3cm genişlikte çıta çakılarak sıvanan yapılar "bağdadi", iskeletin dıştan tahta ile kaplanması içten bağdadinin üzerinin sıvanmasıyla oluşturulan ve iç-dış kaplama arası boş bırakılan yapılar da "ahşap kaplamalı" olarak adlandırılmaktadır. Ormanların bulunduğu sahil bölgelerinde ahşaptan oluşan bağdadi yapıları tercih edilirken, iç kesimlerde daha az ahşap, hımış veya kerpiç ve taştan oluşan yığma yapılar tercih edilmektedir. İklim ve orman alanı, bu tür binaların dağılımında önemli bir etkiye sahiptir.

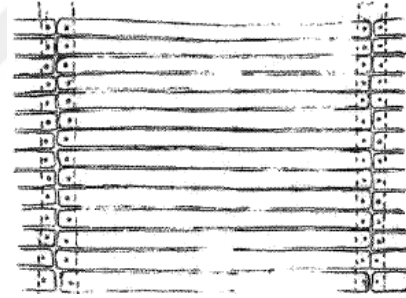
(Eldem, 1987; Aksoy, 2005; Doğan, 2010). Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da ahşap yapı sistemlerinden örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 1.5. Çift katlı bir ahşap karkas yapının cephe görüntüsü (Karaesmen, 1996).



(a) Hımiş duvar iç dokusu



(b) Bağdadi duvar dokusu

Şekil 1.6. Hımiş ve bağdadi duvar sistemlerinden bir kesit (Karaesmen, 1996).

1.5.1.1. Hımiş Yapılar

Kelime manası doldurmak olarak bilinen hımiş, ahşap çerçevelerde kullanılan bir yapım tekniğidir ve bu yapım tekniği çerçevenin boşluklarının tuğla, kerpiç veya taş gibi yapı malzemeleriyle doldurulması olarak tanımlanmaktadır.

Kolonlar, ikincil dikmeler, kirişler ve bağ kirişleri, hımiş yapısının ana parçalarıdır. Ahşap dikmeler arasındaki boşluklar doldurularak, yükleri çatıdan taşıyıcı sisteme aktaran duvarlar oluşturulmaktadır. Hımiş yapılarında dikey ahşap elemanlar (kolonlar, ikincil

dikmeler vb.) ve yatay ahşap elemanlar (kirişler, bağ kirişler vb.) birbirine çivi ile bağlanır. Genelde bir, iki veya üç katlı yapılardır. Hımış yapılarda yükseklikleri 1.0-1.5m arasında değişen tekil ve sürekli taş temel olmak üzere iki tür uygulama ile karşılaşılmaktadır. Tekil temel örnekleri daha çok ilçe ve köylerde, sürekli taş temel örnekleri ise genelde kentlerde uygulanmıştır. Yakın tarihte yapılmış hımış yapılarda ise çoğunlukla sürekli kagir temel kullanılmaktadır. Günümüzde bu binalar koruma altına alınmakta ve restore edilerek ayakta kalması sağlanmaya çalışılmaktadır (Doğan, 2010).

Geleneksel hımış yapılarını, yapısal sisteme ve duvar dolgusuna bağlı olarak iki kategoriye ayırmak mümkündür. Hımış yapısal sistemleri ayrıca payandalı ve payandasız olarak da ikiye ayrılmaktadırlar. Bu diyagonal elemanlar yapıya etki eden dikey olmayan yüklerin karşılanması açısından çok önemlidir. Bunun sebebi ise bu diyagonal elemanlar olmadığında hımış yapılarda titreşim hareketi sonucu kalıcı yer değiştirmeler ortaya çıkmasıdır (Köylü, 2008). Hımış duvar tekniğinde duvarın dolgusu için kullanılan malzemeler yöreden yöreye ve iklime göre değişebilmektedir. Taş dolgu duvar, kerpiç dolgu duvar, tuğla dolgu duvar, göz dolma, muska dolma gibi çeşitlerde görülebilmektedir.

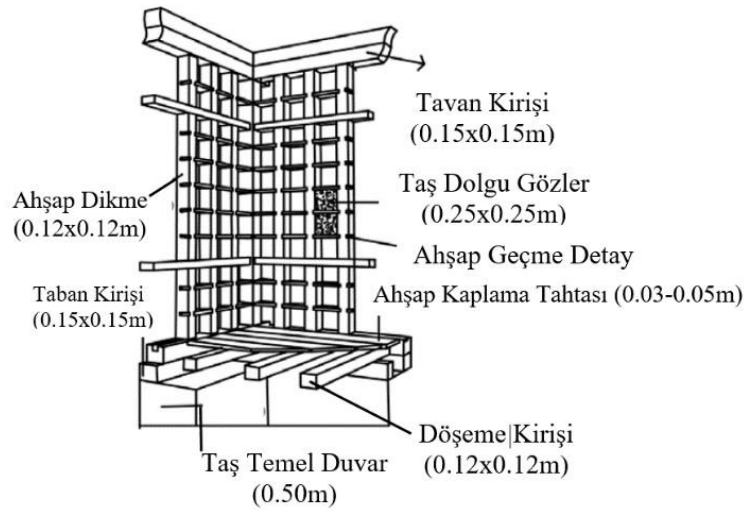
Taş dolgu duvarlar, alt sıralardan başlanmak suretiyle 10-15cm büyüklüğündeki yassı taşlar, kireç, çimento harcı ve hatta çamur kullanılarak ahşap aralarına üst üste sıralanmaktadır. Duvar kalınlığı genelde 20cm civarındadır. Duvar sıvalı, sıvasız veya tahta kaplama olarak yapılmaktadır. Duvarı dış tesirlerden korumak ve aynı zamanda binaya güzel bir görünüş vermek maksadıyla duvarlar dıştan ve içten sıvanmaktadır. Sıvanın ahşap iskeleti iyice tutması ve sonradan çatlayıp dökülmemesi için de duvar yüzlerine sıva teli kaplanması gerekmektedir. Bu bilgilere ek olarak taş dolgunun yapıyı ağırlaştırması ve depremin etkisinin daha fazla göstermesinin de bir dezavantaj olarak görüleceği söylenebilir.

Bu tez çalışmasında incelenen yapı Doğu Karadeniz bölgesinde olduğundan, özellikle bu bölgede yaygın olan taş dolgu duvarlarda göz dolma sistem ve muska dolma sistemlerden bahsedilmelidir. Göz dolma sistemler; ahşap bir karolaj içine taş malzeme doldurulması tekniği ile meydana getirilen sistemlerdir. Bu sistemler, normal karkas şeklinde başlamakta ve ek olarak yapının dayanımında olumlu bir etki yaratmak için esas taşıyıcı dikmeler ve taban kirişini birbirine bağlamak için “yan çalma” olarak bilinen çapraz bağlantılar uygulanmaktadır. Bu bağlantılar taban kirişine ve dikmelere uyacak ölçüde hazırlanmakta, geçme detayla sabitlenmektedir. Ahşap karkas oluşturulduktan sonra taban kirişin üzerine 15 ile 25cm aralıklar ile yaklaşık 10x10cm ölçülerinde ahşap dikmeler sabitlenmektedir. Ahşap dikmelerin arasında kalan boşlukların arasına ortalama 5cm kalınlığında parçalar

yerleştirilerek yaklaşık 30cm ölçülerinde bölmelere ayrılmaktadır. Bu şekilde taban kirişinden başlayarak tavan kirişine kadar devam eden kareye yakın dikdörtgen boşluklar oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu boşlukları doldurmak için çevrede bulunan taş malzemenin niteliğine göre tek parça taş kullanılabileceği gibi birden fazla taş parçası da bulunabilmektedir (Pınar, 2018). Şekil 1.7’de Rize’de bir göz dolma yapı örneği verilmiştir. Şekil 1.8’de göz dolma sistem detayları gösterilmiştir. Şekil 1.9’da ise orta dikme, yan çalma ve köşe dikme detayları gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Rize’de bir göz dolma yapı örneği (URL-2).



Şekil 1.8. Göz dolma sistem detayı (Güler vd., 2013).



Şekil 1.9. Orta dikme, yan çalma ve köşe dikme detayları (Pınar, 2018).

Muskalı dolma tekniği, göz dolma tekniği ile aynı temel prensiplere sahiptir. Fakat göz dolma tekniğinde göz olarak bahsedilen boşluklar üçgen şeklinde yapılmaktadır. 15 ile 25cm aralıklar ile 10x10cm ölçülerindeki dikmeler yerleştirilmektedir. Bu dikmelerin arasına ortalama 60°'lik açı ile yerleştirilen yaklaşık 5cm ölçülerindeki ahşap parçaları sayesinde muska denilen üçgen boşluklar elde edilmektedir. Bu boşluklar ve yerleştirilen parçaların ölçüleri mükemmel değildir ve bunun sonucu olarak oluşan üçgenlerin ölçüleri de kusurlar içermektedir. Yapıda çok fazla hassasiyet aranmamaktadır. Bağlantılar göz dolma tekniğinde geçmeli olarak yapılırken muskalı dolma tekniğinde sabitleme elemanı çividir. Göz dolma tekniğinden daha sonra ortaya çıkmasına rağmen birleşimlerde kullanılan çivi ya da benzeri metal malzeme yapının sökülüp yeniden takılabilmek özelliğini ortadan kaldırmıştır. Muskalı dolma tekniği yapım süresinin kısalması bakımından olumlu gibi görünse de yapım tekniği açısından bir gerileme olarak değerlendirilmektedir (Pınar, 2018). Şekil 1.10'da muska dolma sisteme örnek verilmiştir.



Şekil 1.10. Muska dolma sistem (Pınar, 2018).

Kerpiç dolgu duvarlar; ahşabın çok fazla kullanılamayacağı ve ahşap dolguya tercihen en basit ve uygun fiyata kerpicingin imal edilebileceği bölgelerde geniş çaplı bir uygulama alanı bulmaktadır. Daha çok İç Anadolu köy konutlarında ortaya çıkan bu yapı, ahşap karkas sistemin kerpiçle doldurulmasıyla oluşturulmaktadır. Dolgu olarak kullanılan kerpiç, kimi zaman kalıplarda yapılmakta olup, kimi zamanda kabaca el yordamıyla dökülmektedir. Duvarlarda genellikle sıva kullanılmaktadır fakat bazen sıvanın olmadığı veya söküldüğü yapılar da görülmektedir. Bu şekilde inşa edilen yapılar ısı yönünden etkin bir geçirimsizliğe sahiptir. Kerpiç blokların dikmeler arasına eğimli bir şekilde dizilmesi ile meydana gelen sürtünme kuvveti, deprem enerjisinin sönmelenmesine yaramaktadır ve deprem kuvvetinden doğan kesme kuvvetine karşı dayanıklı olmaktadır.

Kerpiç dolgu duvarlı ahşap karkas sistemlerde ana taşıyıcı dikmeler 1.00-1.50m, saplamalar 0.60-0.70m mesafe ile düzenlenmektedir. Kerpiç boyutları bölgelere göre farklılık göstermekle birlikte genelde 0.40x0.40x0.12m boyutundadır (Köylü, 2008). Şekil 1.11'de kerpiç dolgulu bir yapı örneği verilmiştir.



Şekil 1.11. Kerpiç blok dolgulu bir yapı (Işık, 2006).

Tuğla dolgulu duvarlar; taşa nazaran daha hafif ve daha iyi oturan bir yapı malzemesidir ve bundan ötürü tercihen kullanılması uygun olur. Ahşap karkas boşlukları, tuğla sıraların konulacağı vaziyete göre aralanmaktadır. Dolgu tuğlaları, duvar kalınlığına uygun olarak ya yarım tuğla ya da tam tuğla şeklinde yatay, dikey veya eğik olarak dizilmektedir. Tuğlaların arasında kireç harcı bulunmaktadır. Ayrıca genellikle 0.80-0.90m olan dikmeler arası boşluklar çapraz elemanlarla bölünmektedir. Kullanılan sıvanın ahşap iskelete iyice yapışması ve sonradan düşmemesi için ağaç malzeme üzerine ince kafesli bir

sıva teli germek faydalıdır. Şekil 1.12’de tuğla duvar dolgulu örnek bir yapıdan bir görüntü verilmiştir.



Şekil 1.12. Tuğla dolgu duvarlı ahşap karkas yapı kesiti (URL-4).

1.5.1.2. Bağdadi Yapılar

Bağdadi adı verilen kentsel tip ahşap yapı, Anadolu’nun tüm yörelerinde görülebilen bir tür duvar kaplamasıdır. Bu yapılar Doğu Karadeniz bölgesinde “çakatura” ismiyle bilinmektedir ve bölgede çok sık rastlanmayan duvar türüdür. Bu sistemde hem iç hem de dış duvar yüzeylerinde 2-3cm aralarla 3-4cm genişliğinde ve 1-2cm kalınlığında ahşap çıtalar yatay yönde çakılmaktadır. Yüzeyler arasındaki boşluk gevşek, hafif izolasyon malzemesiyle doldurulmakta veya boş bırakılmaktadır. Yüzeyler genellikle çamur ve samandan oluşan sıva ile kaplanmaktadır. Çivi kullanımı ile süneklik ve sönümlleme kapasitesi artırılmakta ve çıtalar dolgu çökmesini önlenmektedir. Öte yandan, konstrüksiyonları çok miktarda ahşap torna ve büyük işçilik katkısı gerektirmektedir. Bağdadi yapı sistemi yaygın olarak yapıldığı zamanda çağına göre, ısı kaybının önlenmesi ve bina duvarlarının hafifletilmesi gibi olumlu yönler sağlamıştır. 1970 Gediz depremindeki incelemelere göre “bağdadi” ahşap karkas yapıların deprem karşısında “hımış” ahşap karkas yapılara göre bariz şekilde daha iyi davrandıkları ve hasar seviyelerinin daha az olduğu görülmüştür (Bayülke, 2001). Şekil 1.13’te ahşap karkas sistemde bağdadi duvar yapılı bir yapı örneği verilmiştir.



Şekil 1.13. Ahşap karkas sistemde bağdadi duvar tipi (URL-3).

1.5.1.3. Ahşap Kaplama Yapılar

Ahşap karkas yapıların bir diğer türü olan ahşap kaplama yapılar; karkas sistemin dıştan tahta ile kaplanması, içten bağdadinin üzerinin sıvanmasıyla oluşturulan ve iç-dış kaplama arası boş bırakılan yapılardır. Bu yapılarda, tahta ile kapatılacak karkas binalar daha iskelet kısmı yapılırken dikme aralıklarının mevcut tahta uzunluklarına göre ayarlanması gerekmektedir. Bu maksat için 2-2.5cm kalınlığında ve 18-22cm genişliğinde rendelenmiş tahtalar kullanılmaktadır. Kaplama tahtaları, binanın aşağı kısmından başlanmak ve kenarları biri diğerinin üzerine bindirilmek suretiyle yatay sıralar halinde çivilenmektedir. Bu şekilde çivilenen tahtalardan yağmur, duvara nüfuz etmeden aşağı tarafa doğru süzülerek akıp gitmektedir. Bunların en basiti rendelenmiş tahtaların birbiri üzerine bindirilerek çivilenmesinden meydana getirilen yalı baskısı şeklinde olanıdır. Yapının durumuna, muhitin özelliğine uyularak geçme tahta kaplamalarda kullanılmaktadır (URL-1).

1.6. Deprem ve Ahşap Yapılar

Ülkemiz, Avrupa ve Afrika kıtalarının birbirlerine yaklaşmasının sonucunda oluşan, dünyanın önemli deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Genç bir ülke oluşumuzdan dolayı da deprem potansiyeli olan birçok aktif fay hattı bulunmaktadır. Bu durum depremi ülkemizin göz ardı edilemez bir gerçeği haline getirmektedir. Fay hatlarının çokluğuna bağlı olarak da geçmişten günümüze yıkıcı depremlerle karşılaşmakta, can ve mal kayıpları yaşanabilmektedir.

Depremin ahşap karkas yapılar üzerindeki etkilerine bakıldığında olumlu ve olumsuz durumlar gözlemlenmektedir. Ahşap karkas sistemler genel itibariyle hafif sistemler

olmalarından dolayı depreme karşı oldukça iyi bir dayanım sergilemektedirler. Ahşap malzeme üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik özellikleri belirleme çalışmaları sonucunda, ahşabın bu dayanıklılığı ortaya çıkmış ve deprem gibi yatay kuvvetler etkisi karşısında sağladığı avantajlar sayesinde, deprem kuşağında bulunan ülkemizde son yıllarda yapı malzemesi olarak ahşabın kullanılmasını artırıcı yönde etki etmiştir. Ayrıca maliyetinin düşük olması, kurulumunun basit olması ve işlenebilirliğinin rahat olması sayesinde ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılması yaygınlaşmıştır (Avlar, 2008; Yücel, 2018). Bu pozitif özelliklerine rağmen Türkiye’de bilinirliği oldukça az olan ahşap, bilhassa 1999 Marmara depremi sonucunda deprem karşısındaki performansı sebebiyle tekrar gündeme gelmiş, konut ve diğer mühendislik yapılarında tercih edilmesinde artış görülmüştür (Yücel, 2018).

Deprem, rüzgar gibi yatay kuvvetler etkisinde iyi performans sergilemek yapının inşasının iyi olmasına bağlıdır. Ahşabın kendisi, çekme, basınç ve eğilme kapasitesine sahip esnek bir malzemedir. Ek olarak, makine yapımı çivilerle bağlanan küçük boyutlu çoklu ahşap elemanlarına sahip modern dikme çerçeve yapısında, sistem oldukça esnektir ve bir sistem olarak iyi süneklik sergilemektedir (Dikmen, 2010).

Ahşap, deprem anında deforme olduktan sonra eski şekline dönebilen esnek bir malzemedir. Kirişler ve kolonlar yeterince güçlü ve esnekse, birim olarak çalışmak üzere birbirine bağlanmakta ve bunun sonucu olarak ahşap duvarlar depremlerin neden olduğu büyük yanal kuvvetlere dayanabilmektedir. Geleneksel Türk evinin ahşap çerçevesi, kendini taşıyan bir sistem olarak ayakta durabilmektedir. Ahşap elemanlar basitçe çivilenmekte veya geçmeli şekilde birbirine sabitlenmektedir. Ahşap elemanların birleşmesiyle oluşan çerçeveye, deprem dayanımının artması için diyagonal elemanlar eklenmektedir. Ardından çerçevede dolgu malzemesi kullanılarak duvar oluşturulmakta ve sistem sabitlenmektedir (Langenbach, 2000). Yapının inşasında elemanlar birbirine birçok çivi ile birleştirilmekte ve böylece çok fazla düğüm noktası elde edilmektedir. Bu düğüm noktaları ne kadar çoksa yapıda o kadar yük aktaran nokta oluşmuş ve çok fazla yük aktarma yolu meydana gelmiş demektir. Bu birleşim yerleri deprem enerjisinin dağıtılmasında büyük rol oynamaktadır. Düğüm noktalarından herhangi birine zarar gelse dahi, yükü aktarmak için geride fazlaca düğüm noktası bulunacaktır.

Ahşap karkas yapılarda tespit edilen hasarlar hafif hasarlı (dikey çatlakların çoğunlukla köşelere veya duvarların ortasına (0.5mm) yerleştirildiği), orta hasarlı (duvarlarda dikey ve yatay çatlaklar (2mm veya daha fazla), özellikle açıklıklarda köşe çatlakları, duvar deformasyonu, ahşap kirişler boyunca duvarların deformasyonu ve

duvarların kirişlerden ayrılması, çatının duvardan ayrılması), ağır hasarlı (kısmi veya toplam yapısal çöküş) şeklinde sınıflandırılabilir (Gülhan vd., 2000).

Geleneksel binaların depreme dayanıklılığının büyük bir kısmı, elastik olmayan davranışlarının ve malzemelerinin sürtünmesi ve çatlamasından kaynaklanan enerji kaybının doğrudan bir ürünüdür. Bu nedenle deprem esnasında çok fazla miktarda sıva düşmesi ve diğer aksaklıklar olabilmektedir. Yapı, nihai taşıma gücüne ulaşmış olsa bile depreme dayanıklılık kapasitesinin önemli bir kısmını kaybettiği anlamına gelmemektedir. Hatta betonarme yapılardaki kılcal çatlaklar, bulundukları yere bağlı olarak geleneksel binalardaki daha büyük çatlaklardan bile depreme karşı daha fazla savunmasız olduğu söylenebilir. Bu zamana kadar gerçekleşmiş depremlerin sonucunda ahşap yapılarda bazı hasarlar gözlemlenmiştir. Bu hasarlar şu şekilde sıralanabilir:

- Temeli kargir olan yapının çerçeve elemanlarını temele bağlamak için çoğunlukla herhangi bir cıvata kullanılmadığından temelin ahşap iskelele beraber çalışmaması ve temel oturma yaptıktan sonra yapının üst kısmında eğilme ortaya çıkması
- Ahşap karkas sistemde taş, tuğla, kerpiç gibi dolgu malzemelerinin yıkılması ve bunun sonucunda ahşabın zarar görmesi (Daha küçük tuğla panelli duvarların performansı büyük panelli olanlara göre depremlerde daha iyi olmuştur.)
- Yapının elemanlarını bir arada tutan ve dayanıklı hale getiren bağlantıların kopması veya gevşemesi
- Ahşap iskeleti oluşturan elemanların kırılması
- Ahşap çalıştığı için ahşap çerçeveli binalarda sıva dökülmesi
- Yanal yer değiştirmeler yapması

1.7. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yapılar deprem, rüzgâr, trafik, patlama gibi çok çeşitli dinamik yüklerin etkisinde kalmaktadır. Bu etkiler sonucunda da yapılarda farklı hasarlar meydana gelebilmektedir. Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları, her bir yapı için karakteristik özelliğe sahip dinamik parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan bu parametreler, yapının mevcut yapısal özelliklerine, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve hasar durumuna bağlı olarak elde edilmektedir

(Bayraktar vd., 2010). Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi teorik ve deneysel olarak yapılmaktadır.

1.7.1. Teorik Modal Analiz

Yapıların dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranlarının sayısal yaklaşımlar yardımıyla gerçekleştirilen modeller ve yaklaşık yöntemler kullanılarak belirlendiği çalışmaların tümüne teorik modal analiz denilmektedir. Bu maksatla sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar gibi sayısal yaklaşımlar kullanılabileceği gibi, yapı sistemi özelliklerine bağlı olarak belirlenmiş yaklaşık analitik yaklaşımlar da kullanılabilir. Teorik modal analiz formülasyonları bu bölüm içinde tek serbestlik dereceli sistemler ve çok serbestlik dereceli sistemler için açıklanmaktadır.

1.7.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir yapının düğüm noktalarının bağımsız yer değiştirebilme yeteneğine serbestlik derecesi ve bu yer değiştirmenin tek bir değişkenle ifade edildiği sistemler de tek serbestlik dereceli sistemler denilmektedir. Günlük hayatta karşılaşılan yapılar çok serbestlik derecesine sahip olmasına karşın bu sistemlerin çözümleri tek serbestlik dereceli sistemlerin süperpoze edilmesiyle yapılır. Serbest cisim diyagramından elde edilen denge denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (1)$$

Denklem (1) üzerinde gerekli ifadeler yerine yazıldığında tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2)$$

olarak elde edilir. Denklem (1)'de F_I atalet kuvvetini, F_D sönüm kuvvetini ve F_S ise yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı oluşan kuvveti temsil etmektedir. Denklem (2)'de m , c , k sırasıyla yapının kütle, sönüm katsayısını, rijitlik katsayısını, $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ ise sırasıyla

sistemin ivmesini, hızını ve yer değiştirmesini temsil etmektedir. $F(t)$ ise sisteme etkiyen dış kuvvettir.

Bir yapının mod şekilleri ve doğal frekansları, sistemin sönümsüz serbest titreşimine ait hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu durumda Denklem (2)'de dış kuvvet ve hız değerleri "0" kabul edilirse sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3) düzenlenirse Denklem (4) elde edilir:

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (4)$$

Denklem (4)'ten,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Denklem (5) elde edilir. Denklem (5)'teki ω , doğal açısal frekansı göstermektedir. Doğal frekans f_0 ve doğal titreşim T_0 aşağıdaki gibi yazılabilir (Chopra, 2006):

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} \quad (7)$$

1.7.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, eğer birden fazla parametrenin verilmesiyle belirlenebiliyorsa, bu tür sistemler çok serbestlik dereceli olarak isimlendirilir. Hareket denklemi; sisteme etkiyen atalet kuvvetleri, sönüm etkileri ve şekil değiştirme

sonucu meydana gelen elastik kuvvetlerle beraber dış kuvvetlerin dengesinden ibarettir (Celep, 2001). Çok serbestlik dereceli sistemlerin genel hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{x}(t) + [C]\{\dot{x}(t) + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (8)$$

olarak ifade edilir. Denklem (8)'de $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörünü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörünü, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörünü ve $\{F(t)\}$ ise kuvvet vektörünü temsil etmektedir. Yapıların dinamik karakteristik hesabında hızın ve dış kuvvetin olmadığı kabul edildiğinden sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$[M]\{\ddot{x}(t) + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (9)$$

Serbest titreşim hareketi basit harmonik hareket olup, Denklem (9)'da çözülebilmesi için yer değiştirme Denklem (10) yardımıyla elde edilir:

$$\{x(t)\} = \{A\} \sin(\varphi + \omega t) \quad (10)$$

Denklem (10)'daki $\{A\}$, hareketin genlik vektörünü, φ faz açısını göstermektedir. Bu denklemden,

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2 \{A\} \sin(\varphi + \omega t) \quad (11)$$

denklemini elde edilir. Denklem (10) ve Denklem (11), Denklem (9) üzerinde yazılırsa,

$$-\omega^2 [M] \{A\} \sin(\varphi + \omega t) + [K] \{A\} \sin(\varphi + \omega t) = 0 \quad (12)$$

denklemini elde edilir. Denklem (12) düzenlenir ise,

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{A\} = 0 \quad (13)$$

denklemini elde edilir. Bu sistemin sıfırdan farklı çözümü ancak katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması ile mümkündür. Bu kabul yapılarak yazılan Denklem (14) “Özdeğer Denklemi” veya “Frekans Denklemi” olarak adlandırılmaktadır.

$$|K - \omega_i^2 M| = 0 \quad (14)$$

Denklemde $\omega_i^2 = \lambda$ olarak kabul edilirse, özdeğer denkleminin son hali aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$|K - \lambda M| = 0 \quad (15)$$

Özdeğer denkleminin çözümünden serbestlik sayısı kadar; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i$ ile gösterilebilecek serbest titreşim frekansı elde edilir. Doğal frekansların büyükten küçüğe doğru sıralaması yapılır ve en küçük frekans temel frekans kabul edilip buna karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak kabul edilir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen modal vektörler normalleştirilir. Böylece $\{\Phi\}_r$ modal vektörleri ve $[\Phi]$ modal matris denklemi aşağıdaki şekilde oluşturulur (Avlar, 2008):

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\theta\}_1 \dots \{\theta\}_2 \dots \dots \dots \{\theta\}_n] \quad (16)$$

1.7.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

OMA yöntemi, mühendislik yapıların dinamik davranışlarını gösteren ve doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik karakteristiklerin deneysel ölçümler yapılarak bulunmasında etkili bir yöntemdir. Yapıların genellikle deprem, rüzgar, trafik ve yaya hareketleri gibi dinamik kuvvetler altında sürekli titreşim halinde olduğu bilinmektedir. Günümüzün gelişen şartlarına bağlı olarak ölçüm yapılırken artık herhangi bir yapay uyarıcı kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır ve yapıda çevresel etkiler altında oluşan titreşimler dikkate alınarak yapının bu etkilere gösterdiği tepkiler ölçülmektedir. Yani bu yöntemde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde giriş uyarımları bilinmeksizin sadece çıktı titreşim verileri kullanılmaktadır. Ölçümler sırasında çevresel titreşimler dikkate

1.7.2.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi

GFOA yöntemi, bir yapının dinamik karakteristiklerini tanımlamak için bilinen en basit ve hızlı yöntemdir. Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yönteminin geliştirilmiş halidir. GFOA yönteminin fikri, sistemin yanıtını, her mod için bir tane olmak üzere bağımsız TSD sistemlere yaklaşık olarak ayırştırmaktır (Brincker vd., 2000). Ayırıştırma, tekil değerleri TSD sistemlerin oto spektral yoğunluğunun ve tekil vektörleri mod şekillerinin tahminleri olarak göstermektedir. Tahmin edilen spektral yoğunluk matrislerinin her birinin ayırştırılmasıyla gerçekleşmektedir (Altunışık vd., 2011).

FOA tekniği, Hızlı Fourier Dönüşümü analizinden (HFD) alınan tek bir frekans hattını kullanmaya dayandığından, tahmini doğal frekansın doğruluğu HFD çözünürlüğüne bağlıdır ve modal sönümleme hesaplanmaz. Fakat GFOA tekniği, hem doğal frekansların hem de mod şekillerinin gelişmiş bir tahminini vermekte ve sönümleme oranlarını içermektedir. GFOA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayırık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). OMA yönteminde, bilinmeyen etki ve ölçülen tepki fonksiyonları arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)] * [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (17)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bağıntıda $[G_{xx}(\omega)]$ ve $[G_{yy}(\omega)]$ etki ve tepki sinyallerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonlarını, $[H(\omega)]$ ise frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bu ifadedeki * ve T, fonksiyonların eşlenik ve transpozisini göstermektedir. Bu bağıntıda etkinin beyaz gürültü olduğu varsayılarak etki sinyaline ait spektral yoğunluk fonksiyonu sabit kalmıştır. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayırık değerler olarak,

$$[G_{yy}(j\omega_i)] = U_i S_i U_i^H \quad (18)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; U_i , u_{ij} tekil vektörlerinden (mod vektörlerinden) oluşan birim matrisi, S_i , s_{ij} tekil değerlerden (özdeğerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir (Brincker vd., 2000).

1.7.2.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi adına çok kullanışlı bir yöntem olan SAB tekniği, korelasyonlara veya spektrumlara dönüştürmeye gerek olmadan direkt olarak zaman verileriyle çalışan bir yöntemidir. SAB algoritması, sağlam sayısal teknikler yardımıyla ölçümlere dayanarak durum uzayı matrislerini tanımlamaktadır. Yapının matematiksel açıklaması bulunduğunda, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi basittir (Uçak vd., 2016). Titreşim yapılarının modeli, bir dizi doğrusal, sabit katsayılı ve ikinci dereceden farklı denklemlerle tanımlanabilir:

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = F(t) = Bu(t) \quad (19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemden; M sistemin kütle matrisi, C sistemin sönüm matrisi ve K ise rijitlik matrisidir. $U(t)$ zamana bağlı yer değiştirme vektörünü, $\dot{U}(t)$ zamana bağlı hız vektörünü ve $\ddot{U}(t)$ ise zamana bağlı ivme vektörünü göstermektedir. $F(t)$ titreşim kuvvetini temsil etmektedir. Burada, $F(t)$ kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen B matrisi ve $u(t)$ vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, Denklem (19), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, Denklem (19) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum uzayı modeline dönüştürülmektedir (Yu vd., 2005).

1.7.2.3. Modal Güvence Kriteri

Modal Güvence Kriteri (MGK), bir modal ve başka bir referans modal vektör arasındaki tutarlılık derecesini (doğrusallık) aşağıdaki gibi ilişkilendiren bir skaler sabit olarak tanımlanmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Yapı tanı çalışmasında doğru kullanıldığı zaman çok güçlü bir tutarlılık indisi olan MGK değerinin sıfıra yaklaşması ortogonaliteyi

(tutarsızlığı), bire yaklaşması benzerliği göstermektedir. İki mod şekli arasındaki modal güvence kriteri,

$$MGK(\psi_a, \psi_e) = \frac{|\psi_a^T \psi_e|^2}{(\psi_a^T \psi_a)(\psi_e^T \psi_e)} \quad (20)$$

formülasyonu ile hesaplanır (Yu vd., 2005). Formülasyonda, ψ_a sayısal mod şekli vektörünü, ψ_e ise deneysel mod şekli vektörünü göstermektedir. MGK değeri aynı mod şekil vektörleri için bire yakın bir değer alırken, farklı mod şekil vektörleri için sıfıra yakın bir değer almaktadır.

1.8. Sonlu Eleman Yöntemi

Günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan sonlu eleman yöntemi ilk kez uçak gövdelerinin gerilme analizi için 1956 yılında geliştirilmiş olup, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra ilerleyen yıllarda da bu yöntem ve çözüm teknikleri geliştirilmiş ve şuan birçok problemin çözümü, yapısal davranışın ve hasar mekanizmasının araştırılması için başvurulan en iyi ve en yaygın yöntemlerden birisi haline gelmiştir.

Kısa bir zamanda çözülmeyen karmaşık problemlerin daha basit, aynı zamanda daha kısa zamanda çözüme kavuşturulması için bu problemlere eş değer, fakat biraz daha basite indirgenmiş problemlerin çözülmesi sonlu eleman yönteminin temelindeki fikirdir. Sonlu eleman gerilme analizinde gerçek geometrik cismin, tam anlamıyla formüle edilmesi zor olduğundan dolayı, bilgisayarda hesaplanması kolay olan elemanlardan oluşturulmaktadır. Bu yöntemde çözüm bölgesi, çok sayıda basit, küçük ve birbirine bağlı sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yani kısacası, oldukça büyük olan bir model daha kolay çözülebilen, birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçalara ayrılarak çözümü kolay bir hale getirilmektedir. Cismin boyutuna ve geometrisine uygun olarak seçilmiş elemanlara bölünmüş haline sayısal model denilmektedir. Modelde mümkün olduğunca çok sayıda eleman kullanmak, kuvvet dağılımının daha duyarlı ölçülebilmesi açısından önemlidir. Sayısal modelin küçük elemanlara bölünebilmesi için bir ağ yapısına ihtiyaç

duyulmaktadır ki “mesh” adı da verilen bu ağ yapısı düğüm noktalarının ortaya çıkardığı ızgara sistemidir. Bu ağ, yapının belli yükleme koşulları altında nasıl davranacağını belirleyen malzeme bilgileri ile programlanmıştır (Güler ve Şen, 2015; URL-5). Sonlu eleman analizi ile problemlerin çözülebilmesi için bilgisayara verilmesi gerekli olan bilgiler şunlardır (Liu vd., 2003):

- Cismin geometrik modeli
- Poisson Oranı ve Elastisite Modülü değerleri
- Sınır şartları ve yükleme koşulları
- Analiz tipi

Sonlu eleman analiz programına yukarıdaki bilgileri girdikten sonra modelde meydana gelen değişiklik durumları için matrisler oluşmakta, bu matrisler bilgisayar yardımıyla çözülmektedir. Bu yolla her bir elemandaki ve dolayısıyla elemanların oluşturdukları cismin tamamında, yapının çalışma koşulları altında oluşan yer değiştirme, kesit tesirleri, gerilmeler ve şekil değiştirmeler elde edilmektedir. Hesaplanan gerilme seviyesine göre yapının ilgili yük altındaki davranışı öngörülmektedir (URL-5; Güler ve Şen, 2015).

Sonlu eleman yöntemi kullanılarak analiz yapılan birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu analiz programlarında mühendislik yapılarının çözümü yapılırken birden fazla sonlu eleman tipi kullanılmaktadır. Bu eleman tiplerinden bahsetmek gerekirse (URL-6),

- Çubuk elemanlar, genellikle bir boyutu diğer iki boyutunun yanında ihmal edilecek kadar küçük olan iki eksenli basınç, eğilme ve kesme deformasyonu etkisindeki kolon, kiriş, düzlem çerçeveler, üç boyutlu çerçeveler ile kabloların modellenmesinde kullanılmaktadırlar.
- Kabuk elemanlar, bir boyutu diğer iki boyutunun yanında ihmal edilecek kadar küçük olan yapı elemanlarının modellenmesinde kullanılmaktadırlar. Kabuk elemanın orta yüzeyini oluşturan sonlu elemanlar, üç düğümle ya da dört düğümle tanımlanan kabuk eleman olabilmektedir.
- Düzlem elemanlar, kabuk elemanın özelliklerini göstermektedir. Kabuk elemandan farkı ise düğüm noktası etrafındaki dönme ihmal edilmiştir. Düzlem elemanlar, düzleme dik olan yükler için uygun değildir.
- Katı elemanlar, hiçbir boyutu diğer boyutuna göre ihmal edilmeyen, tüm boyutları önemli olan elemanlardır. En az dört yüze sahiptirler. Eleman yüzeyinin her bir köşesinin iç açısı 180° 'den küçük olmalıdır. En iyi sonuçlar, 45° ile 135° arasında

olduğu zaman elde edilmektedir. Uzun kenarın kısa kenara boyca uzunluk oranı fazla olmamalıdır. En iyi sonuçlar kenarların eşit olduğu ya da $en/boy < 4$ olduğu durumlarda elde edilmiş olup, en/boy oranı 10'u geçmemelidir.

Sonlu eleman yöntemiyle ilgili verilen bilgilerin özeti olması açısından yapısal bir analizde sonlu eleman yönteminin uygulanışı sırasıyla şu şekildedir (URL-5):

- Yapı, düğüm noktaları içeren daha küçük elemanlarla parçalara ayrılır.
- Her eleman için tipik özellikler tanımlanır.
- Oluşturulan küçük elemanlar düğüm noktalarından bağlanılarak bütün yapı için yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur.
- Sistem denklemleri düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için çözülür.
- Seçilen elemanların istenilen değerleri hesaplanır.

Sonlu eleman yönteminin diğer yöntemlere göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabilmesi, sistemde farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip cisimlerin modellenenebilmesi, karmaşık mesnetlenme koşulları ve yükler ile başa çıkabilmesi, uygulamada verimli olması ve elde edilen sonuçların hassaslığının kontrol edilebilmesi, lineer olmayan davranışın modellenenebilmesi ve statik yüklerin yanında dış yükün dinamik olarak da seçilebilmesi gibi avantajlardan bahsedilebilmektedir.

1.8.1. Sonlu Eleman Modellemesi

Tarihi yapılar, karmaşık sistemli yapılardır. Bu sistemin çalışmasını anlayabilmek için, tarihi yapıların yapısal analizlerinde genellikle sonlu eleman analiz yöntemi kullanılmaktadır. Çözümü yapılmak istenen sistemin sonlu eleman analizlerini yapabilmek için öncelikli olarak bu sistemin tamamı ya da belirli bir elemanın sayısal modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu modelin oluşturulması için de, kullanılabilecek farklı yöntemler bulunmaktadır. Sistemin modellenmesi için kullanılan yöntemler mikro modelleme ve makro modelleme teknikleridir. Mikro modellemede, yapıda kullanılan ve farklı özelliklere sahip tüm malzemeler ayrı bir şekilde modellenirken, makro modelde eşlenik malzeme özellikleri kullanılarak yapı örgüsü bir bütün olarak modellenmektedir.

1.8.1.1. Mikro Modelleme

Mikro modelleme, birbirlerine arayüzlerle bağlanan elemanların teşkil ettiği en gelişmiş modelleme tekniği olarak tanımlanmaktadır. Mikro modelleme tekniğinde yapı malzemeleri ayrı ayrı modellenmektedir. Bu modelleme tekniğinde malzemelerin Elastisite Modülleri, Poisson Oranları ve elastik olmayan malzeme özellikleri birbirinden bağımsız ve tam olarak tanımlandığı için sistem davranışı oldukça gerçekçi yansıtılır ki oldukça etkili ve gerçeğe yakın sonuçlar, özellikle küçük boyutlu (panel, duvar vb.) elemanların mikro modellemesinde görülmektedir. Ancak büyük boyutlu yapılarda bu tip modellemeler kullanıldığında büyük hesap yükü ve zaman ihtiyacı duyulmaktadır. Yani bu yaklaşım aslında çok basit görünse de, en büyük dezavantajı, yapının boyutu ve karmaşıklığı arttıkça üretilecek olan çok sayıda elemanın oluşmasıdır (Lourenço, 2000; Giordano vd., 2002).

1.8.1.2. Makro Modelleme

Karmaşık tarihi yapıların modellemesi için mikro modelleme pek uygun değildir. Yapının bütün olarak ele alındığı çalışmalarda makro modelleme tekniği kullanılmaktadır. Makro modeller, yapı yeterince büyük boyutlara sahip katı duvarlardan oluştuğunda uygulanabilmektedir ve küçük detaylar için kullanılması tercih edilmemektedir (Lourenço, 1996). Mikro modelleme tekniğinden çok daha basit olan makro modelleme tekniğinde yapının homojen, izotrop veya anizotrop sürekli bir malzeme olduğu düşünülmektedir. Bu yöntemde, yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri birleştirilmekte ve malzeme birleşik eşdeğer malzeme olarak kabul edilmektedir.

Malzemelerin elastik ve elastik olmayan özellikleri ile sınır şartları doğru tanımlandığında, makro modelde mikro model kadar gerçeğe yakın sonuçlar verdiği deneysel çalışmalar yardımıyla ispatlanmıştır. Buna ek olarak makro modelleme tekniği modelleme yönteminin analiz süresini ve analizin kapladığı bellek hacmini ciddi derecede azaltmaktadır. Bu yönüyle mikro modellemeden çok daha pratik bir tekniktir (Lourenço, 2000).

1.8.2. Sonlu Eleman Model Güncellemesi

Yapıların gerçek davranışını temsil eden sonlu eleman modellerinin oluşturulması için bazı durumlarda model güncelleme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için öncelikle DMA yöntemi kullanılarak yapının deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Daha sonra sayısal analiz yapıp, sayısal sonuçlar elde edilmektedir. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla elde edilen farklılıklar belirsiz parametreler dikkate alınarak kabul edilebilir seviyelere indirilmektedir. Başka bir deyişle, sonlu eleman model güncellemesi, bir yapının matematiksel bir modelini iyileştirmek için deneysel sonuçları kullanma sürecidir.

Bir yapının sonlu eleman modeli, gerçek bir yapının tüm fiziksel yönlerini gerçekten temsil edebilen ya da temsil etmeyen yüksek derecede idealleştirilmiş mühendislik planları ve tasarımları temelinde inşa edilmektedir. Sayısal modeli doğrulamak için deneysel çalışmalar yapıldığında, genellikle doğal frekanslar ve mod şekilleri, sayısal modelden beklenen sonuçlarla farklılıklar olduğu görülmektedir (Altunışık vd., 2012b). Sayısal ve deneysel analiz sonuçları arasında ortaya çıkan farklılıkların nedenleri olarak, yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin tam anlamıyla belirlenebilmesi konusundaki sorunlar ve bilgi yetersizlikleri, yapının yeterince düzgün temsil edilemeyen sınır şartları, yapı eleman boyutları ile bilgilerin yeterli olmayışı, kesit boyutları bir hayli büyük olan sistem elemanlarının iç kısmında kalan malzeme özellikleri hakkında bilgi sahibi olunamaması vb. sıralanabilir. Bu nedenlerden dolayı oluşturulan model gerçek modeli tam anlamıyla doğru şekilde temsil edemez (Birinci, 2010). Karşılaştırma sonucunda görülen fark, kabul edilebilir %5 sınırını aşmamış ise sonlu eleman model güncellemesine ihtiyaç duyulmaz. Fark bu sınırı aşıyor ise sonlu eleman modeli malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi bazı belirsizlik parametreler dikkate alınarak güncellenir ve sonlu eleman model güncellemesi yapılmış olur.

Sonlu eleman model güncellemesi manuel ve otomatik olarak yapılmaktadır. Manuel model güncelleme prosedüründe, güncellenecek belirsiz parametreler olarak malzeme özellikleri (Elastisite Modülü, malzeme yoğunluğu ve Poisson Oranı), geometrik özellikler (kesitler ve ek kütleler) ve sınır şartları seçilebilmektedir. Sınır koşulları ve malzeme özellikleri, model güncellemesi için sıklıkla kullanılan belirsiz parametrelerdir. Otomatik model güncelleme prosedüründe ise, model güncellemesinin yinelemeli bir yöntemi ve duyarlılığa dayalı bir parametre tahmini olan Bayesian parametre tahminine dayalı modal

duyarlılık yöntemi kullanılmaktadır. Belirsiz parametreleri dikkate alarak sayısal ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılık en aza indirilmektedir (Altunışık, 2018h).

1.9. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Sonlu eleman yöntemine göre analiz edilecek olan bir yapının doğrusal dinamik davranışını temsil edebilecek ve Denklem (19)'da verilmiş olan yapıya ait hareket denkleminin çözümünde farklı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu çözümler için kullanılan direkt integrasyon yöntemlerinde işlemler adım adım yürütülmektedir. Direkt integrasyonda herhangi bir t anında dinamik hareket denklemini sağlamak yerine, ayrı ayrı Δt zaman aralıklarında denklemin sağlanması amaçlanmaktadır. Her Δt zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişimini göstermektedir (Bathe, 1996).

Çözüm için başlangıç yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmelidir. Hareket denkleminin çözümü, başlangıçtan $t=T$ aralığı alınırsa, T zaman aralığı m eşit aralığa ayrılır ($\Delta t=T/m$). Başlangıç anındaki değerler bilindiğinden sonraki adımlar için aranan değerler de bulunabilir. Direkt integrasyon yöntemlerinden, Merkezi Farklar, Houbolt ve Newmark yöntemi en etkili yöntemlerdir.

Tez kapsamında yapılmış olan çalışmalarda, geleneksel ahşap karkas yapının yapısal davranışının belirlenmesi adına gerçekleştirilen dinamik analizlerde Newmark yöntemi kullanılmıştır. 1959 yılında geliştirilmiş bir sayısal integrasyon yöntemi olan ve zaman tanım aralığında çalışan Newmark yönteminin dayandığı hız ve yer değıştirme formülleri t ile $t+\Delta t$ zamanı arasında,

$$\dot{U}_t + \Delta t = \dot{U}_t + [(1-\gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (21)$$

$$U_t + \Delta t = U_t + \dot{U}_t(\Delta t) + [(0.5-\beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (22)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir (Chopra, 2006; Bathe, 1996). Buradaki U_t t anındaki yer değıştirme vektörünü, $\dot{U}_t$ hız vektörünü ve $\ddot{U}_t$ ise ivme vektörünü temsil etmektedir. $U_{t+\Delta t}$ $t=t+1$ anındaki yer değıştirme vektörünü, $\dot{U}_{t+\Delta t}$ hız vektörünü ve $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ ise ivme vektörünü temsil etmektedir. Bu denklemlerdeki β ve γ parametreleri, Δt zaman aralığındaki ivmenin

bir zaman adımı boyunca değişimini kontrol eden parametrelerdir. $\gamma = 1/2$ ve $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır. $\beta = 1/6$ seçildiği takdirde doğrusal ivme metodu, $\beta = 1/4$ seçildiğinde ise ortalama ivme metodu uygulanmaktadır (Chopra, 2006). Ortalama ivme metodunda küçük zaman aralıklarında ivme değişimi için yaklaşım yapılarak sabit ortalama bir değer kabul edilirken, doğrusal ivme metodu ise küçük zaman aralıklarında ivmenin doğrusal değiştiği kabulünü esas alır. Zaman adımının küçülmesi ile sonuçlarda hassasiyet artarken bir sınırdan sonra küçülmesi ise kararlılığı bozmaktadır (Üner, 2006).

Denklem (19)'da verilmiş olan hareket denklemi t ve $t+1$ anlarında yazıldığında,

$$M\ddot{U}_t + C\dot{U}_t + KU_t = F_t \quad (23)$$

$$M\ddot{U}_{t+1} + C\dot{U}_{t+1} + KU_{t+1} = F_{t+1} \quad (24)$$

denklemleri elde edilmektedir. Denklem (24)'ün Denklem (23)'ten çıkarılması halinde,

$$M\Delta\ddot{U}_t + C\Delta\dot{U}_t + K\Delta U_t = \Delta F_t \quad (25)$$

denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemde Δ , değişim operatörünü temsil etmek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\ddot{U}_t &= \ddot{U}_{t+1} - \ddot{U}_t \\ \Delta\dot{U}_t &= \dot{U}_{t+1} - \dot{U}_t \\ \Delta U_t &= U_{t+1} - U_t \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (23) ve Denklem (24) artımsal şekilde düzenlenir ise,

$$\Delta\dot{U}_t = (\Delta t)\ddot{U}_t + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_t \quad (27)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t) \dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{U}_t + \beta (\Delta t)^2 \Delta \ddot{U}_t \quad (28)$$

denklemleri elde edilmektedir. Denklem (28)'den $\Delta \ddot{U}_t$ çekilir ise,

$$\Delta \ddot{U}_t = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta U_t - \frac{1}{\beta (\Delta t)} \dot{U}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{U}_t \quad (29)$$

$\Delta \ddot{U}_t$ Denklem (29) ile ifade edilmektedir. Denklem (29) Denklem (27)'nin üzerinde yerine konur ise,

$$\dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{U}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{U}_t \quad (30)$$

denklemini elde edilmektedir. Denklem (29) ve Denklem (30), artımsal hareket denklemi Denklem (25)'te yerine konur ve düzenlenirse Denklem (31) elde edilmektedir.

$$\left(K + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} C + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} M \right) \Delta U_t = \Delta F_t + \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{1}{\beta (\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) U_t \\ & + \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Denklem (31) daha kısa şekilde ifade edilecek olursa,

$$\hat{K}_t \Delta U_t = \Delta \hat{F}_t \quad (32)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu denklemdeki $\hat{K}_t$ ve $\Delta \hat{F}_t$ ifadeleri,

$$\hat{K}_t = K_L + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} C + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} M \quad (33)$$

$$\Delta \hat{F}_t = \Delta F_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}_t + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \mathbf{U}_t \quad (34)$$

denklemleriyle ifade edilebilmektedir. Dinamik hareket denkleminin her Δt zaman aralığı için adım adım çözümünde ilk önce ΔU_t , Denklem (28)'den elde edilmektedir. Sonrasında, Denklem (29) ve Denklem (30) yardımıyla $\Delta \dot{U}_t$ ve $\Delta \ddot{U}_t$ bulunmaktadır. Bir sonraki adımın değerleri, Denklem (35) yardımıyla elde edilmektedir. İşlemler böylelikle çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} U_{t+1} &= U_t + \Delta U_t \\ \dot{U}_{t+1} &= \dot{U}_t + \Delta \dot{U}_t \\ \ddot{U}_{t+1} &= \ddot{U}_t + \Delta \ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, Rize ili Fındıklı ilçesinde bulunan geleneksel ahşap karkas bir hımış konağın doğrusal dinamik analizleri yapılarak yapının mevcut durumunun deprem karşısındaki davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, yapının hali hazırda gerçek davranışını belirlemek için çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Çevredeki rüzgar, taşıt vb. doğal titreşim kaynaklarından yararlanılarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ham verilerin GFOA ve SAB yöntemleri kullanılarak işlenmesi ve deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için OMA (2006) ve PULSE (2006) yazılımları kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar elde edildikten sonra, konağın röleve çizimleri kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Model, ilk başta mikro model olarak oluşturulması tasarlanmış, fakat ANSYS (2016) sonlu eleman yazılımında eleman ve düğüm noktası sınırı aşıldığından dolayı modelin makro model yöntemiyle oluşturulmasına karar verilmiştir. Bunun için öncelikle yapının bir duvarı mikro ve makro olarak modellenmiştir. Mikro ve makro modellere modal analiz yapılmıştır. Her iki modelin dinamik karakteristikleri yakın olana kadar eşlenik malzeme güncellenmeye devam edilmiş olup elde edilen malzeme özellikleri makro modelin tamamına uygulanmıştır. Sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristikler, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve bir uyum sağlandığı görülmüştür. Buna ilave olarak, eşlenik malzeme özellikleri tayininin teyidi olması açısından, yapı SAP2000 (2016) yazılımında mikro olarak modellenmiştir. SAP2000 yazılımında yapılan analiz sonuçları da deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve aradaki farkın kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Tüm bu yapılan çalışmalar sonucunda güncellenmiş modelin ANSYS sonlu eleman yazılımında, 1999 Kocaeli deprem ivmesi kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve değerlendirilmiştir.

2.2. Geleneksel Hımiş Konak Hakkında Bilgiler

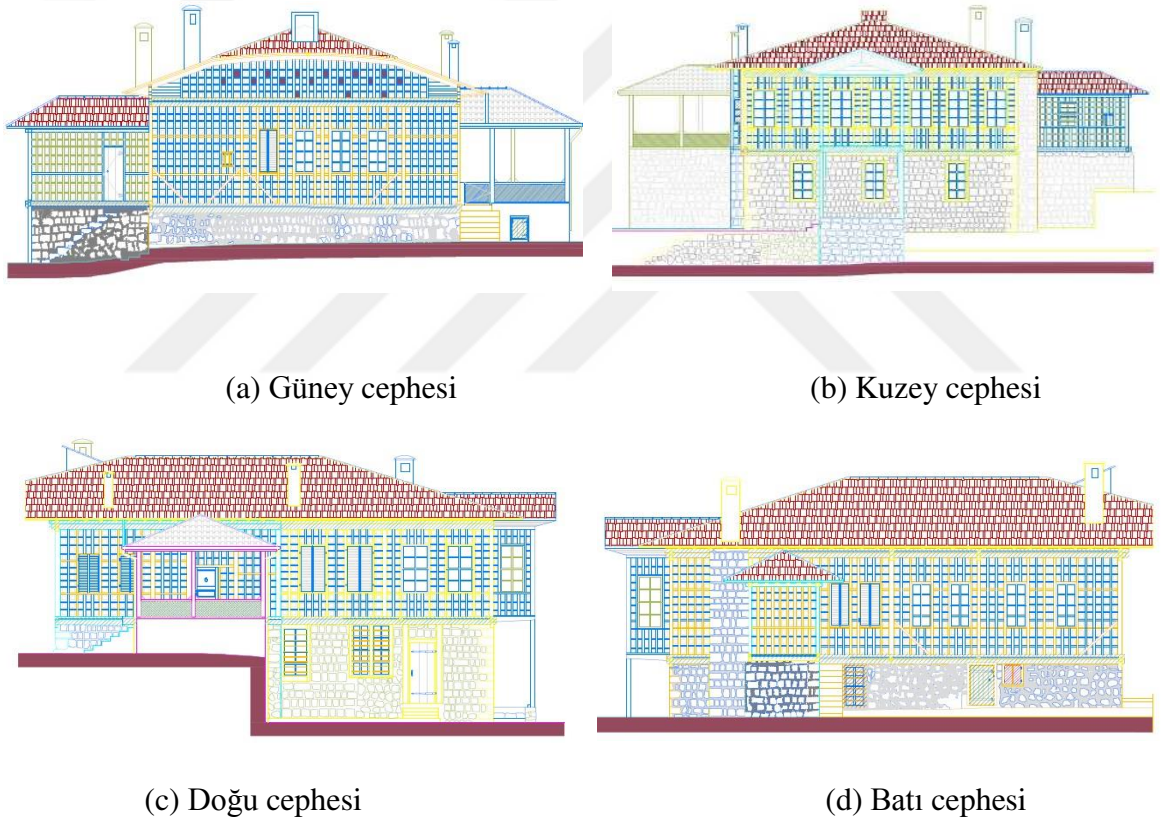
Yapı malzemesi olarak ahşabın kullanımı özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde, iklime bağlı olarak kolay elde edilmesinden dolayı göze çarpmaktadır. Taşıyıcı sistem malzemesi olarak ahşap kullanılan geleneksel hımiş yapılar da ağırlıklı olarak Doğu Karadeniz Bölgesinde inşa edilmiştir. Tez çalışması kapsamında seçilen örnek yapı, Rize ili Fındıklı ilçesine bağlı Çağlayan köyünde bulunan geleneksel bir hımiş konağıdır. İki katlı olan tarihi konağın, bodrum katı yığma duvarlı yapıda olup, üst katı ise taş dolgulu ahşap karkas (hımiş) yapıdadır. Yaklaşık 200 yıllık bir geçmişe sahip olan ve yıllara meydan okumuş bu konak, 2010 yılında restore edilmiştir. Şekil 2.1’de hımiş konağın farklı cephelerden görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1. Geleneksel tarihi hımiş konağın farklı cephelerden görüntüleri

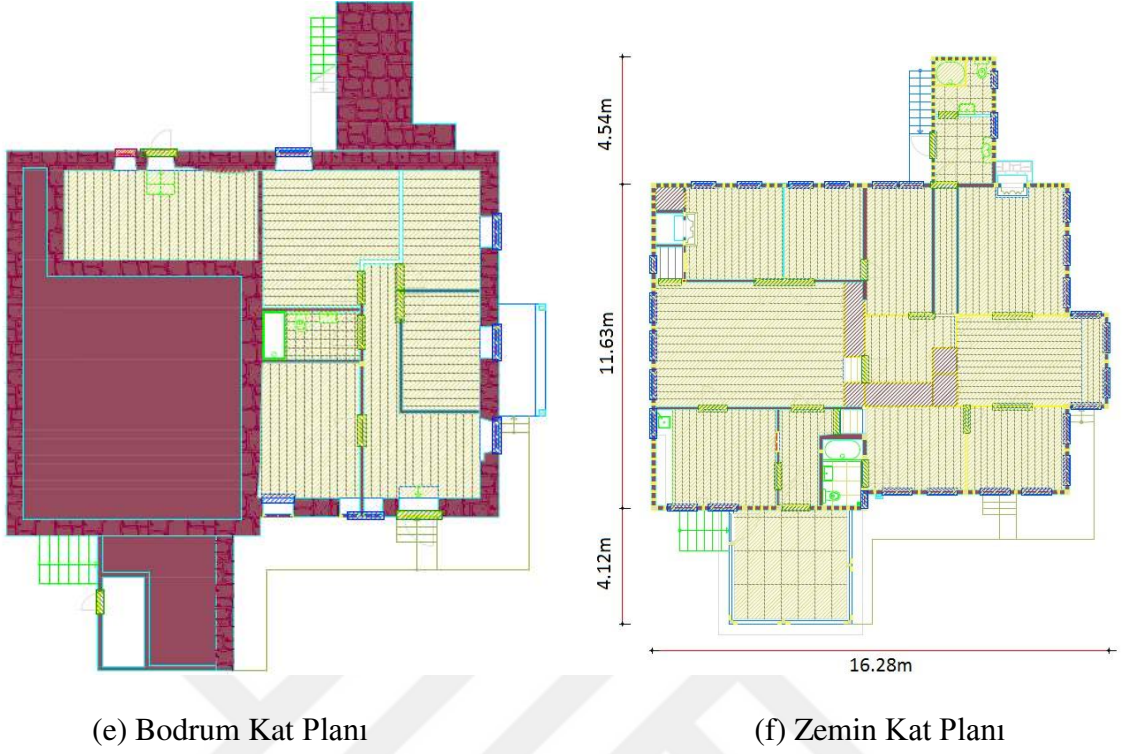
Yaklaşık olarak 200m² bir alan üstüne inşa edilen tarihi yapının toplam brüt alanı her iki kat dahil yaklaşık 285m²dir. Kat yüksekliklerine bakıldığında 20x16m plan büyüklüğündeki tarihi hımiş konağın bodrum katı 3.25m, zemin katı ise 3.7m yüksekliğindedir. Şekil 2.2.’de hımiş konağın kat planları ve cephe kesitleri verilmiştir.

Doğu Karadeniz Bölgesinin arazi yapısında genel olarak eğim bulunmaktadır. Bu eğimden dolayı da binaların toplam yüksekliği zeminden farklı olmaktadır. Bodrum katı yığma duvarlardan oluşan geleneksel tarihi hımiş konağın zemin katı yaklaşık 20x20cm boyutundaki kare ahşap çerçevelerden meydana gelmektedir. Oluşan bu çerçevelere taş malzemeler doldurulmuş ve sistem tamamlanmıştır. Sistemin oluşması için kullanılan ahşap elemanların kullandıkları yönde derinlik ve genişlik ölçülerine bakıldığında; dikey yönde kullanılan ahşap elemanın derinliği 14cm, genişliği ise 7cm'dir. Yatay yönde kullanılan ahşap elemanların ise derinliği 14cm, genişliği 3cm'dir. Duvar inşası için yatay ve dikey ahşap elemanlar arasına 14cm derinliğe sahip taş elemanlar ile doldurulmuştur.



Şekil 2.2. Geleneksel tarihi hımiş konağın plan ve kesit görünüşleri

Şekil 2.2'nin devamı



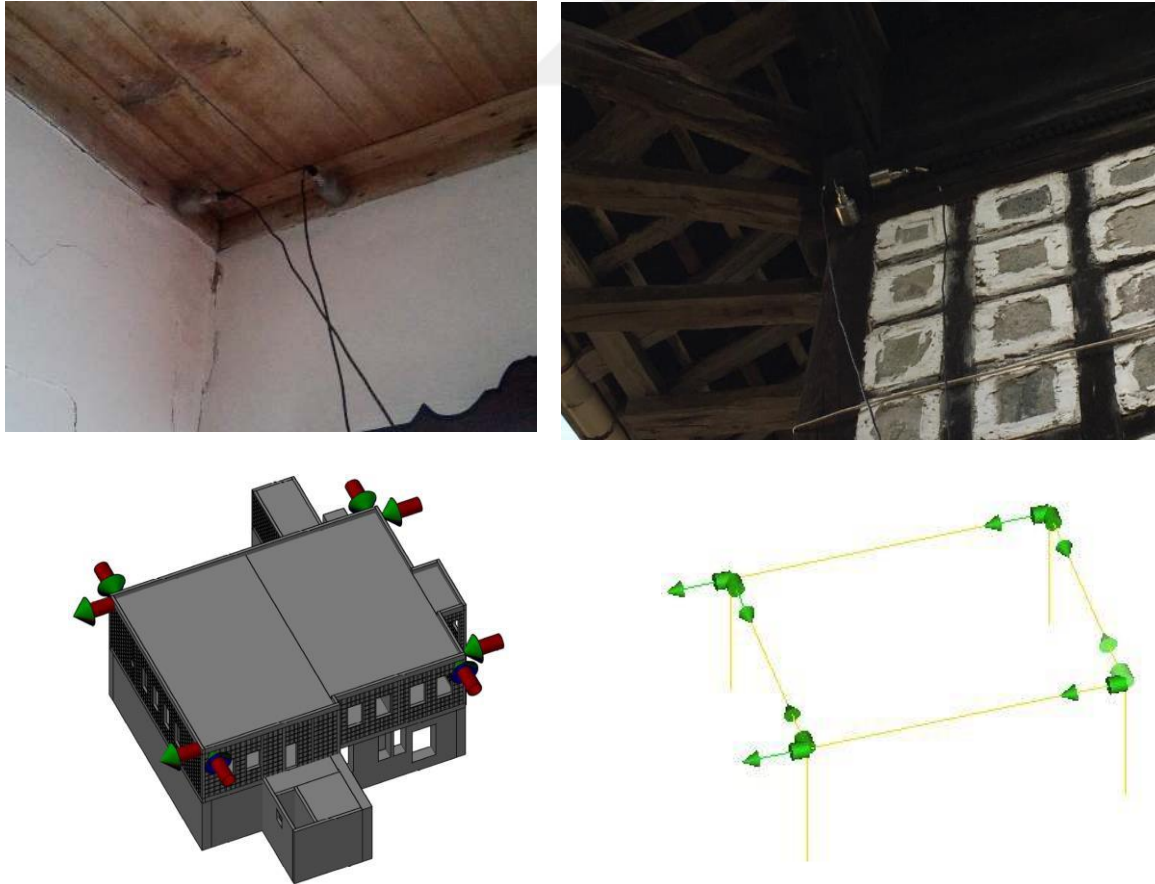
2.3. Çevresel Titreşim Testleri

Tarihi hımiş konağın dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi kapsamında çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Konağın titreşim testleri için 10 V/g hassasiyete sahip sekiz adet B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer, PULSE ve OMA yazılımları kullanılmıştır. Ortamda meydana gelen titreşim hareketleri sonucunda ivmeölçerlerden elde edilen sinyaller veri toplama ünitesinde biraraya getirilerek PULSE yazılımına iletilmiştir. Testler için kullanılan ivmeölçerlerin özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ardından, iletilen sinyaller OMA yazılımına aktarılarak işlenmiş, konağın dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Aynı zamanda OMA'da işlenen veriler, çalışma ekibinin 1512 Tübitak Tekno Girişim Sermaye Desteği programı kapsamında hazırlanmış olduğu DynaMo (2018) yazılımı ile birlikte de işlenmiş ve aynı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2.3'te B&K 8340 tipi ivmeölçer gösterilmiştir.

Tablo 2.1. B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerin özellikleri (URL-8).

Model	B&K 8340
Hassasiyet	10 V/g
Frekans Aralığı	0.1-1500 Hz
Maksimum İvme	± 0.5 g
Çalışma Sıcaklığı	-51 ile 74°C arası
Boyutlar	50.3x50.3x91.9mm
Toplam Kütle	775 gram

Özellikleri verilen ivmeölçerlerin yapıya yerleştirilmesi, zemin katın tavanına her köşeye iki yönde koyularak yapılmıştır. Şekil 2.3'te konakta yapılan çevresel titreşim testinden görüntüler ve ivmeölçerlerin yapıda konumları verilmiştir. Testlerde yapıya dışardan bir titreşim uygulanmamış, ortamdaki titreşim hareketlerinden faydalanılmış olup, frekans aralığı 0-12.5H olarak seçilmiştir. Ölçüm süresi 30 dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Çevresel titreşim testi ve ivmeölçerlerin yapı üzerindeki konumları

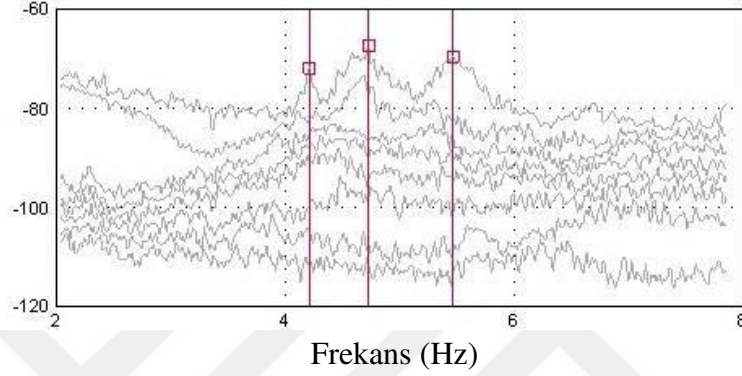
Çevresel titreşim testlerinde, ivmeölçerler ile veri toplama ünitesi arasında gerçekleşen sinyal transferi tek eksenli sinyal kabloları yardımıyla yapılmıştır. Veri toplama ünitesine aktarılmış olan ham sinyalleri bilgisayar yazılımlarına iletme amacıyla bağlantı kablosundan faydalanılmıştır. Aktarılan ham sinyaller yazılımlarda işlenmiştir. İşlenmiş olan sinyaller iki yöntem kullanılarak ayrıştırılmıştır. Bu yöntemler GFOA ve SAB yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Her iki yöntemle yapının dinamik karakteristikleri olarak bilinen doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda bu dinamik karakteristikler yapının ilk üç modu için elde edilmiştir.

Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA) yöntemi GFOA yönteminin gelişmemiş halidir ve bu yöntemin temelleri, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) analizinden alınan tek bir frekans hattını kullanmaya dayandığından, tahmini doğal frekansın doğruluğu HFD çözünürlüğüne bağlıdır ve modal sönümleme hesaplanmaz. Bu nedenle GFOA yöntemi tercih edilmektedir çünkü FOA yöntemine göre frekansların, mod şekillerinin ve sönümleme oranlarının gelişmiş bir tahminini barındırır. Bu yöntemle yapının modları, yanıtların spektral yoğunluk spektrumlarından hesaplanan Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri grafiklerinde tepe noktaları alınarak elde edilir. Bu grafikten elde edilen modlara ait mod şekilleri anında sunulur. SAB algoritmasında ise, sağlam sayısal teknikler yardımıyla deneysel ölçümlere dayanılarak durum uzayı matrisleri tanımlanır. Durum uzayı modeli, kararlı modları ayırt etmek için kararlılık diyagramları oluşturulur. SAB yönteminde, bütün ölçüm zamanı süresince gelen sinyaller, boyutlarına göre birkaç alt kümeye ayrılır. Daha sonra, her alt küme için sinyallerin ortalaması, SAB yönteminin girdileri olarak kabul edilir.

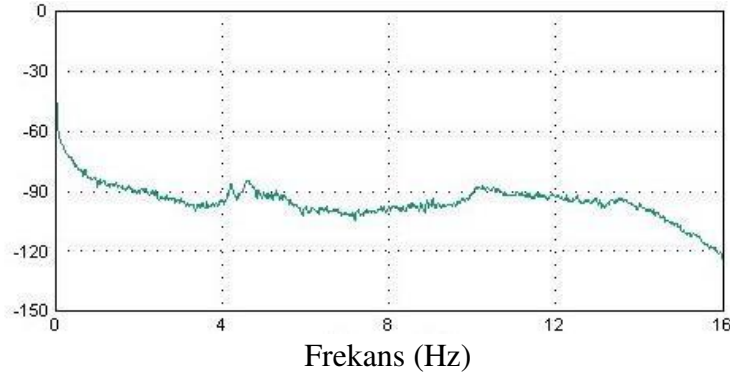
Çevresel titreşim testleri yapıldıktan sonra elde edilen sinyallerin GFOA yöntemi ile ayrıştırılmasıyla elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri diyagramı Şekil 2.4'te, spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekil 2.4'te verilen diyagramdaki tepe değerler binanın titreşim frekanslarını göstermektedir. İlk üç doğal frekans 4.0-5.5 Hz aralığında elde edilmiştir. Tablo 2.2'de GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler verilmiştir.

Tablo 2.2. GFOA yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristikler

Mod Sayısı	Frekans (Hz)	SönümOranı (%)
1	4.23	1.10
2	4.74	0.43
3	5.49	1.68

[dB(1m/s²)/Hz] Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri

Şekil 2.4. GFOA yöntemi spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

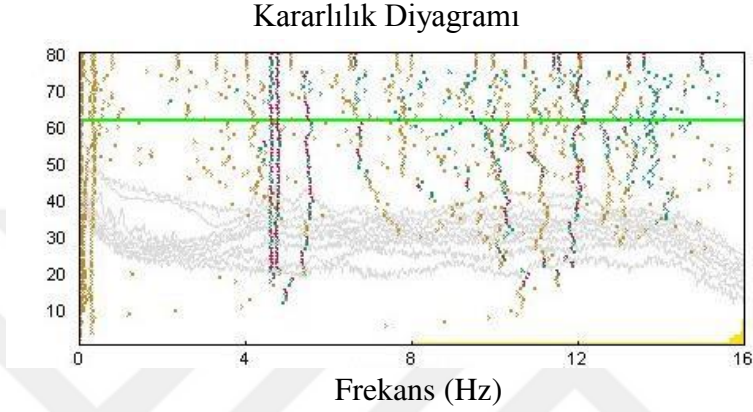
[dB(1m/s²)/Hz] Spektral Yoğunluk Matrislerinin Ortalaması

Şekil 2.5. GFOA yöntemi spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

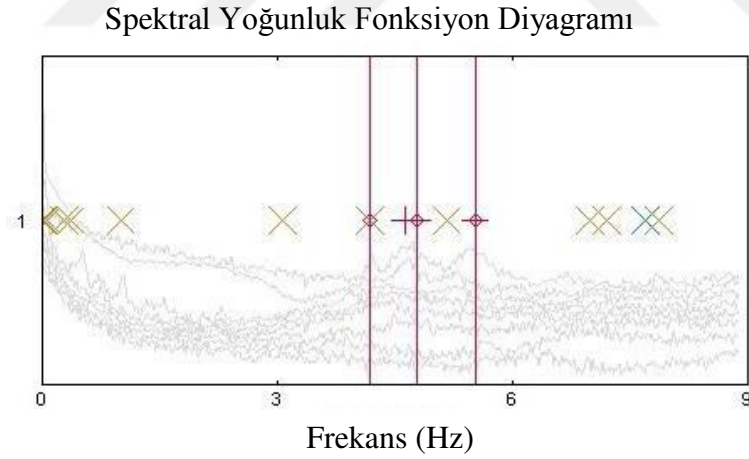
SAB yöntemine göre yapının kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyon diyagramları elde edilmiş ve bunlar sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir. İlk üç moda ait doğal frekans değerleri 4.0-5.5 Hz aralığında elde edilmiştir. Tablo 2.3’te ilk üç mod için doğal frekans ve sönüm oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3. SAB yönteminden elde edilen dinamik karakteristikler

Mod Sayısı	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	4.19	1.36
2	4.79	3.49
3	5.54	1.20

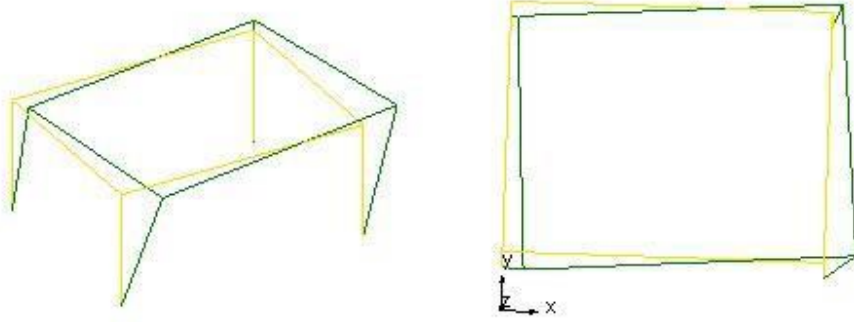


Şekil 2.6. SAB yöntemine göre kararlılık diyagramı

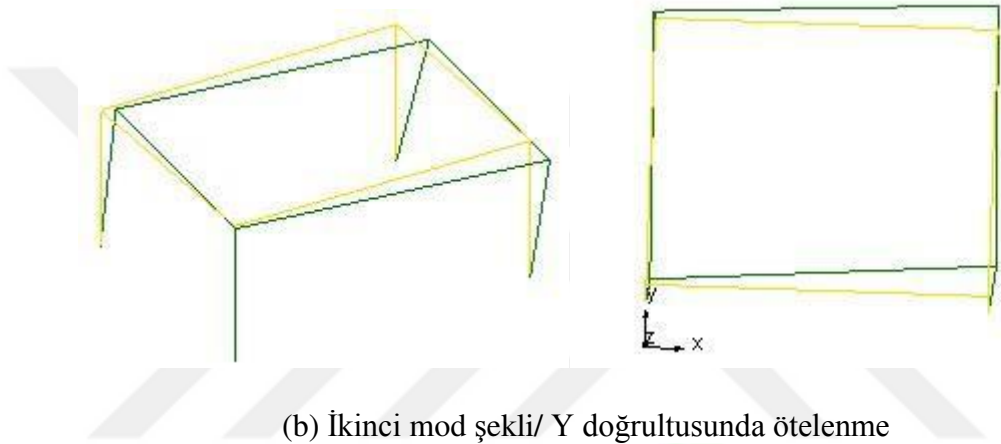


Şekil 2.7. SAB yöntemine göre spektral yoğunluk fonksiyon diyagramı

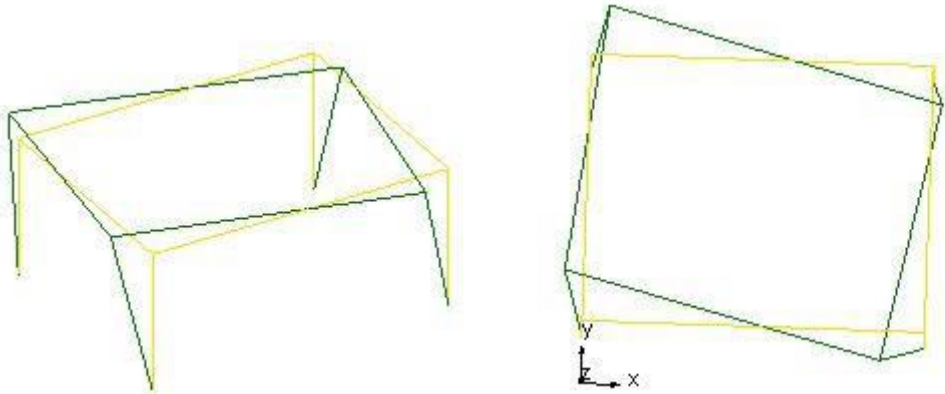
Yapının deneysel olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi kapsamında ilk üç mod şekli dikkate alınmıştır. Birinci ve ikinci mod şekli yatay doğrultuda ötelenme, üçüncü mod şekli ise burulma olarak elde edilmiştir. Analiz soncunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



(a) Birinci mod şekli/ X doğrultusunda ötelenme



(b) İkinci mod şekli/ Y doğrultusunda ötelenme



(c) Üçüncü mod şekli/ Burulma

Şekil 2.8. Deneysel olarak elde edilen ilk üç mod şekli

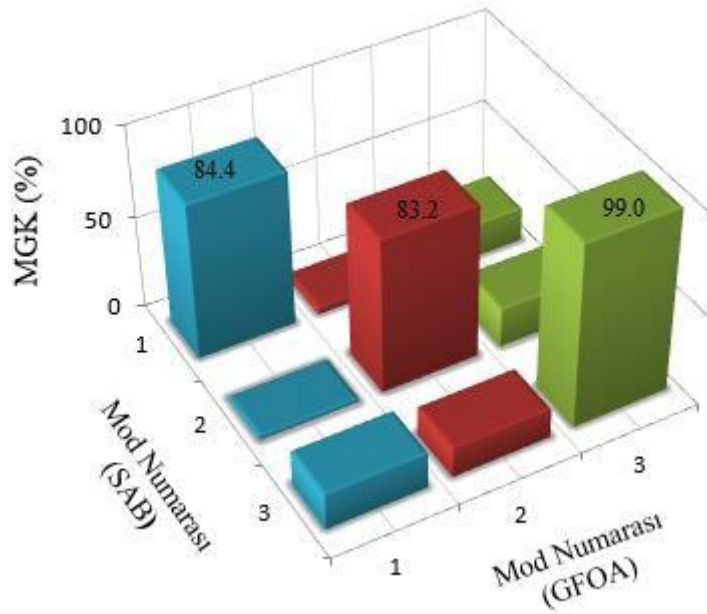
GFOAve SAB yöntemlerinden elde edilen doğal frekanslar, sönüm oranları Tablo 2.4'te verilmiştir. Verilen bu değerlere bakılarak bu iki yöntem arasında iyi bir uyum olduğu söylenebilir. Hesaplanan fark değerlerine bakıldığında en fazla farkın üçüncü mod için

%1.05 olduğu görülmüştür. Her iki yöntem için sönüm oranlarına bakıldığında ise farklılıkların, frekans değerleri arasındaki farklılık değerleri kadar az olmadığı görülmüştür.

Tablo 2.4. GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen dinamik karakteristikler

Mod Numarası	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)	
	GFOA	SAB	Fark (%)	GFOA	SAB
1	4.23	4.19	0.95	1.10	1.36
2	4.74	4.79	1.05	0.43	3.49
3	5.49	5.54	0.91	1.68	1.20

Bu uyumu göstermek ve mod şekillerinin korelasyonunu değerlendirmek için deneysel mod şekilleri kullanılarak modal güvence kriterleri (MGK) grafiği çizilmiştir. Her bir mod için 0.83 ile 1.00 arasında hesaplanan MGK değerleri, GFOA ve SAB yöntemleri ile elde edilen sonuçların tutarlı olduğunu göstermiştir. Şekil 2.9’da GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen sonuçların uyumunu gösteren MGK grafiği verilmiştir.

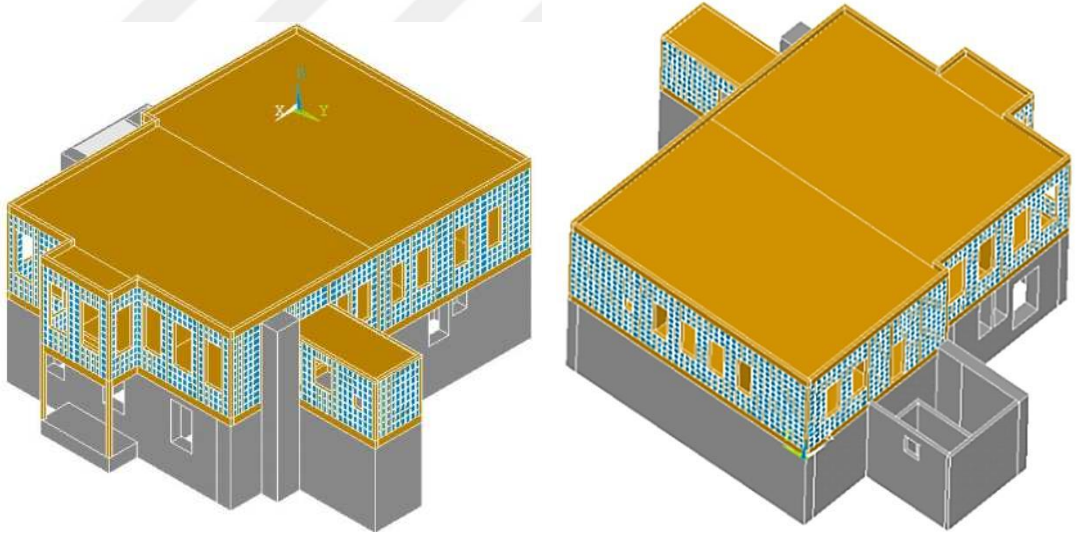


Şekil 2.9. MGK sonuç grafiği

2.4. Sonlu Eleman Modellemesi ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

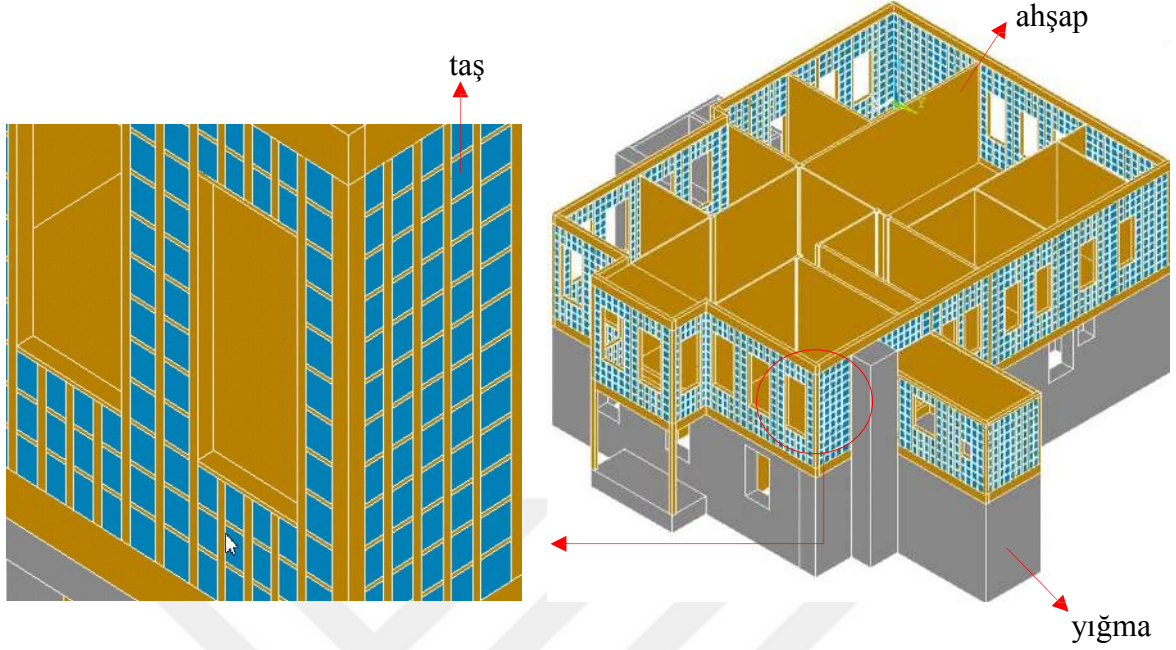
Bir yapının yapısal davranışının belirlenmesi için sonlu eleman modelinin yapılması önemli bir adımdır. Tez kapsamında ele alınan tarihi hımiş konak, yığma duvarlardan oluşan bodrum katından ve taş dolgulu ahşap karkas yapısında zemin kattan oluşan kompozit bir yapıdır.

Hımiş konağın modellemesinde öncelikle tercih edilen yöntem mikro modellemedir. Çünkü mikro modelleme tekniğinde yapı tüm geometrik özellikleriyle modellenir ve bu nedenle daha detaylı bir model olmakla birlikte çok sayıda düğüm noktası oluşur. Konağın sonlu eleman modelinin, ANSYS yazılımında önce mikro olarak modellenmesi yapılmıştır. Fakat yazılımda eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı sınırı aşıldığı için çalışma başarılı bir şekilde tamamlanamamıştır. Bu nedenle sonlu eleman modelinin, makro modelleme yöntemiyle oluşturulmasına karar verilmiştir. Şekil 2.10’da hımiş konağın sonlu eleman modellemesine ait bazı detaylar gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Tarihi hımiş konağın sonlu eleman modellemesine ait bazı görünüşler

Şekil 2.10'un devamı



Bodrum ve zemin kat döşemeleri ile iç duvarlar mimari projeye göre ahşap olarak modellenmiştir. Bodrum ve zemin kat tavanları sert döşeme olarak kabul edilmiştir. Çatı sistemi tamamen ahşap çerçevelerden oluşturulmuş bir sistem ve kaplama katmanından oluşmaktadır. Modelde çatı elemanları modellenmemiş sadece ağırlıkları dikkate alınmıştır.

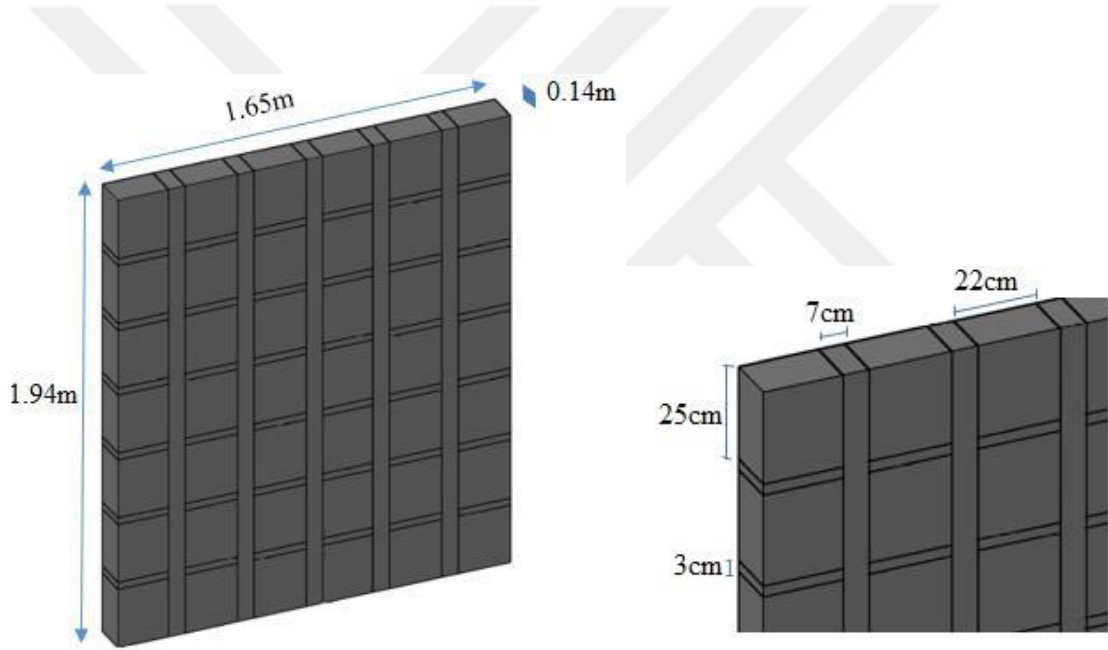
Analizlerde mikro model yerine güncellenmiş eşlenik bir model kullanılmasına karar verilmiştir. Konağın bodrum katındaki yığma duvar, taş ve harçtan oluşmaktadır. Literatürde taş ve harç bileşiminin eşlenik malzeme olarak özellikleri mevcuttur. Fakat zemin katta kullanılan ahşap ve taş için literatürde eşlenik malzeme özelliği pek fazla mevcut değildir. Bu nedenle ahşap-taş sistemini temsil eden eşlenik malzemeyi elde etmek için yapının güney cephe duvarı seçilmiş ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kolaylık sağlanması için eşlenik malzemenin birim hacim ağırlığı sayısal bir hesapla belirlenmiştir. Örnek duvar Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Aşağıdaki belirtilen formülasyon kullanılarak birim hacim ağırlığı elde edilmiştir.

$$V_s \times \gamma_s + V_a \times \gamma_a = V_t \times \gamma_t \quad (36)$$

Denklem (36)'da V_s taşın hacmini, V_a ahşabın hacmini, V_t ise toplam hacmi temsil etmektedir. γ_s taşın birim hacim ağırlığını, γ_a ahşabın birim hacim ağırlığını ve γ_t ise eşlenik malzemenin birim hacim ağırlığını temsil etmektedir.

Eşlenik malzemenin birim hacim ağırlığını hesaplamak için Denklem (36) kullanılmıştır. Yapının seçilen örnek duvarından taşın hacmi 0.3185m^3 , ahşabın hacmi ise 0.1276m^3 olarak hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlık değerleri Tablo 2.5'te verilmiş olup, denklemde yerine yazılmış ve eşlenik malzemenin birim hacim ağırlığı 1852kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

$$0.3185 \times 2400 + 0.1276 \times 500 = 0.4471 \times \gamma_t, \gamma_t = 1852\text{kg/m}^3$$

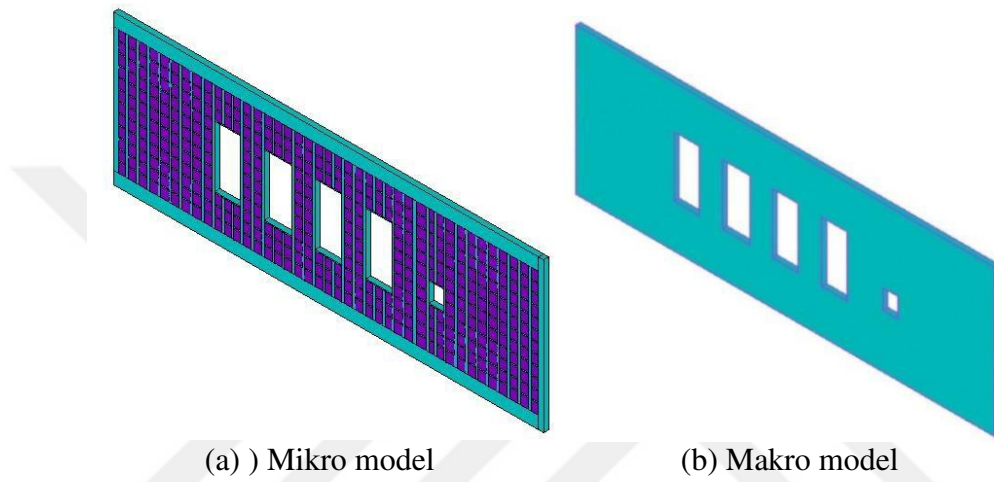


Şekil 2.11. Ahşap-taş modelin eleman boyutları

Analiz yapmak için seçilmiş güney cephe duvarı ANSYS yazılımında mikro model olarak ahşap-taş ve makro model olarak tek bir blok şeklinde modellenip modal analizi yapılmıştır. Ahşap-taş modellemekten elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri, eşlenik malzeme özelliklerinin belirlenmesi işlemi için referans alınır ve blok duvar modeli için kullanılacak eşlenik malzeme özellikleri belirlenir. Analizleri yapılacak her iki model için de kullanılan malzeme değerleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

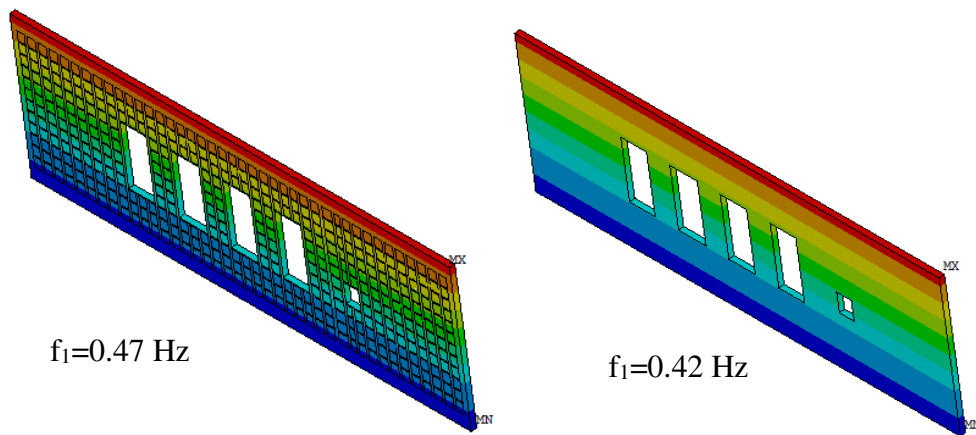
Tablo 2.5. Ahşap, taş ve eşlenik malzeme özellikleri

	Elastisite Modülü (N/m ²)	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı (-)
Taş	3.70E9	2400	0.17
Ahşap	5.08E8	500	0.04
Eşlenik Malzeme	1.00E9	1852	0.10



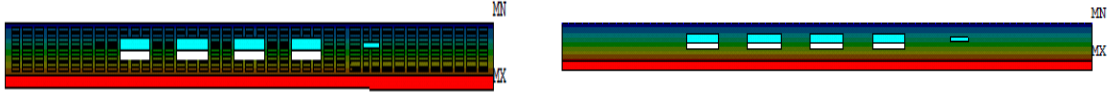
Şekil 2.12. Ahşap-taş model ve eşlenik blok model

Şekil 2.12’de görülen mikro ve makro modellerin, yukarıda da bahsedildiği üzere Şekil 2.13’te modal analizi sonucunda ilk üç mod şekilleri ve frekans değerleri gösterilmiştir.

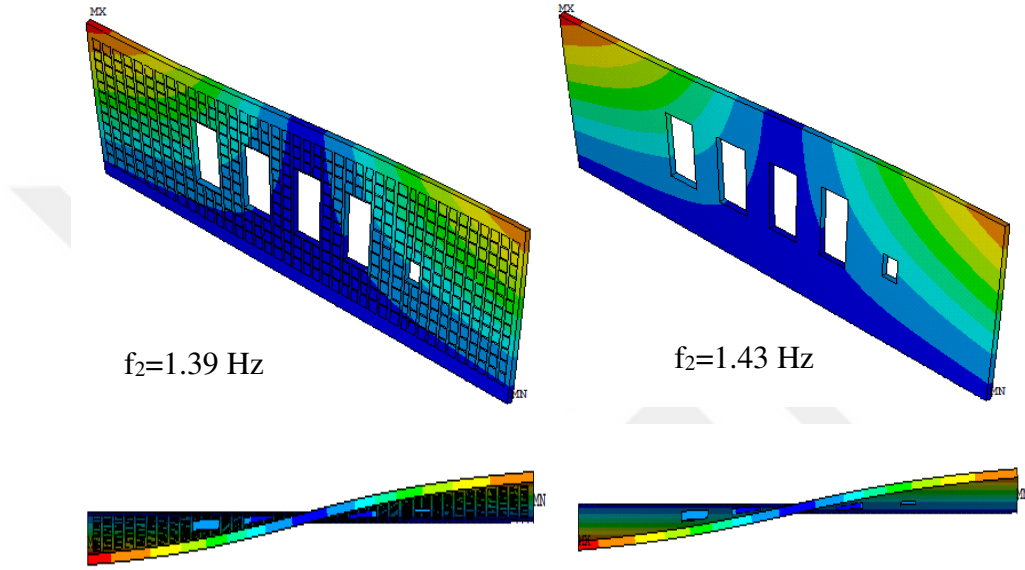


Şekil 2.13. Ahşap-taş ve eşlenik blok modelin ilk üç doğal frekansı ve ilgili mod şekilleri

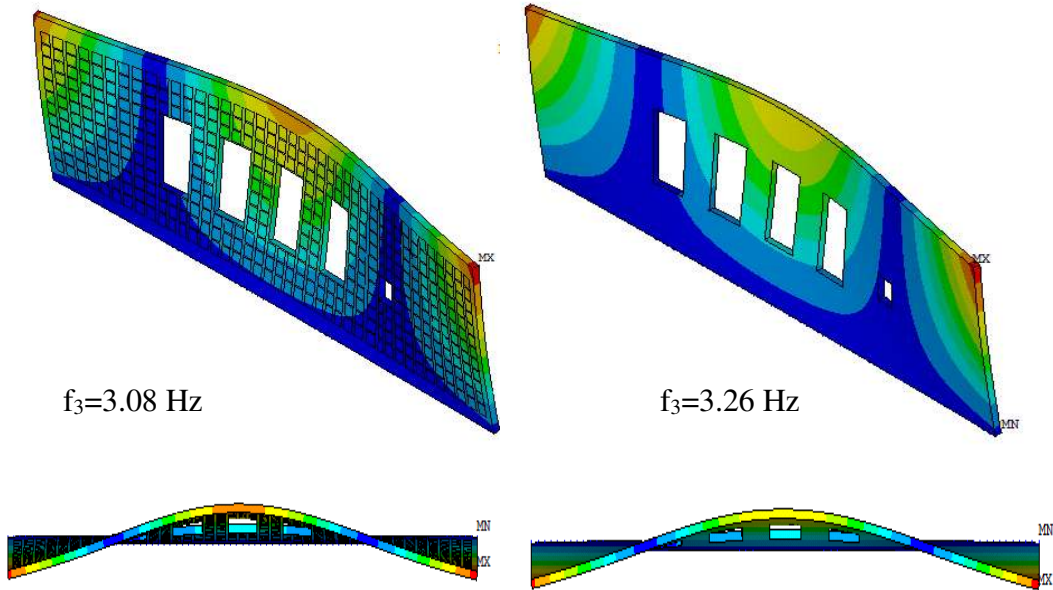
Şekil 2.13'ün devamı



(a) Birinci mod şekli



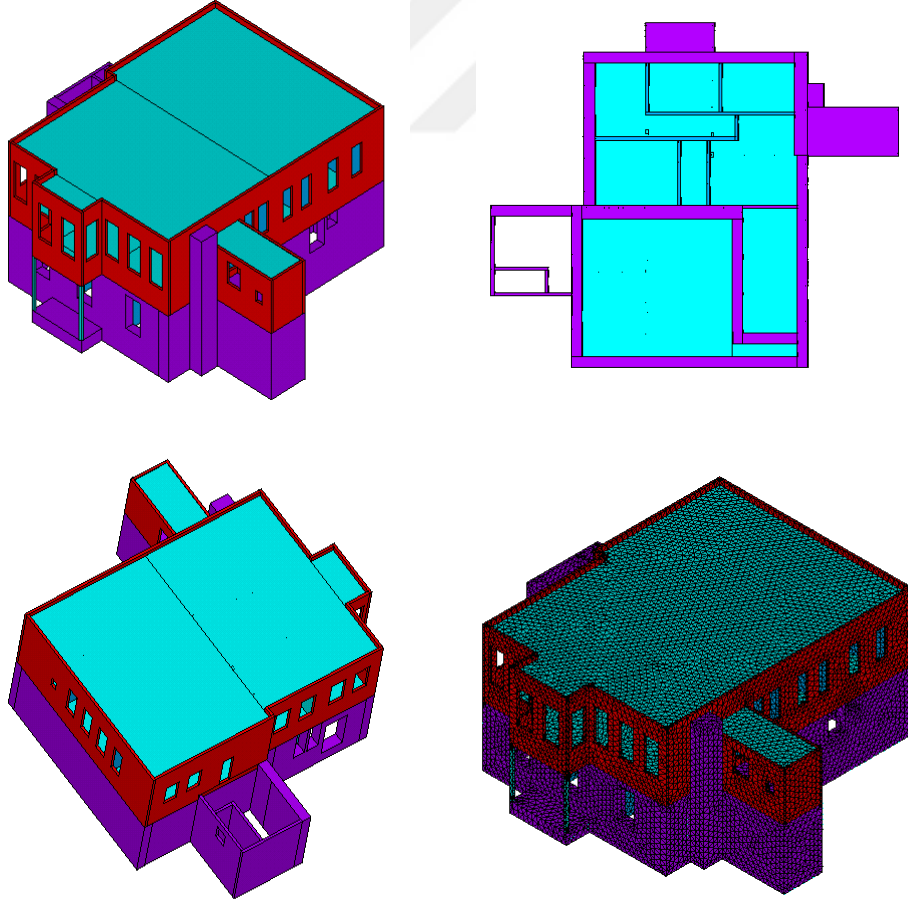
(b) İkinci mod şekli



(c) Üçüncü mod şekli

Her iki model için yapılan modal analiz sonuçlarına bakıldığında mod şekilleri ve doğal frekans değerleri arasında bir uyum olduğu görülmüştür. Bu nedenle eşlenik blok model için belirlenen malzeme özelliklerinin, ahşap-taş modelin malzeme özelliklerini temsil ettiği sonucuna varılmıştır. Böylece ilk başta mikro olarak modellenmesi planlanan yapıda, ahşap-taş malzeme özelliklerini iyi bir şekilde temsil eden eşlenik malzeme özellikleri kullanılarak çalışma daha verimli bir şekilde devam etmiştir.

Elde edilen eşlenik malzeme değerlerinin yapıyı iyi temsil etmesinden dolayı bu değerler tüm yapıya uygulanarak ANSYS yazılımında eşlenik blok model oluşturulmuştur. üç boyutlu sonlu eleman modelinde tüm elemanlar Solid65 tipi eleman kullanılarak modellenmiştir. Yapının alt düğümlerine x, y ve z yönlerinde yay elemanları atanmıştır. Mesh aralığı 30cm olarak kabul edilmiştir ve takribi 150.000 elemandan meydana gelen bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Tarihi hımmış konağın eşlenik blok sonlu eleman modeli

Eşlenik malzeme özellikleri tayini, sayısal işlemler ve modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri referans alınarak yapılmıştır. Daha sonra elde edilen eşlenik malzeme özellikleri tüm yapıya uygulanıp, sayısal dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ayrıca yapılan işlemin bir teyidi olması açısından yapı aynı zamanda SAP2000 programında da analiz edilmiştir. Tarihi hımış konağın SAP2000 yazılımındaki sonlu eleman modeli mikro model yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Modellenen yapıda tüm elemanlar birleşim noktalarında bölünmüştür ve ağırlara ayrılmıştır. Üç yöndeki yay sabitleri alt düğüm noktalarına atanmıştır. Model için ahşap, taş ve yığma (bodrum kat için) malzeme değerleri ayrı olarak belirtilmiştir. Bu değerler ANSYS programında mikro model için kullanılan değerlerin aynısıdır. Şekil 2.15'te hımış konağın SAP2000 programındaki sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Tarihi hımış konağın SAP2000 sonlu eleman modeli

ANSYS ve SAP2000 programlarında modeli oluşturulan yapının her iki program için de kullanılan malzemeler için Elastisite Modülü, yoğunluk ve Poisson Oranı değerleri Tablo 2.6'da gösterilmiştir.

Tablo 2.6. ANSYS ve SAP2000 sonlu eleman modelleri için kullanılan malzeme özellikleri

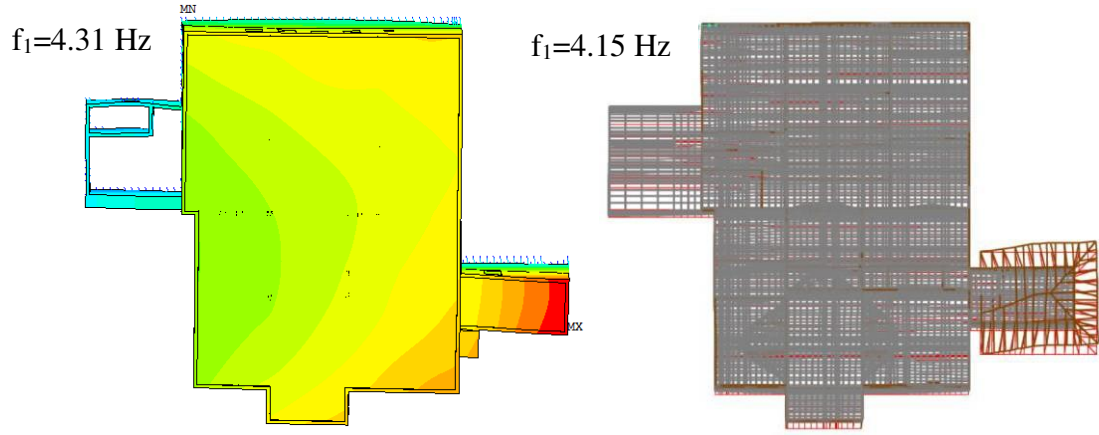
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı
ANSYS Sonlu Eleman Modeli			
Eşlenik Malzeme	1.0E9	1852	0.10
Ahşap	5.0E8	500	0.04
Yığma	1.2E9	2300	0.17
SAP2000 Sonlu Eleman Modeli			
Taş	3.7E9	2400	0.17
Ahşap	5.0E8	500	0.04
Yığma	1.2E9	2300	0.17

ANSYS ve SAP2000 yazılımlarında yapı modellenirken x, y ve z yönlerindeki yay sabitleri, modelin taban mesnet düğüm noktalarına atanmıştır. Fakat yay sabitlerinin her iki programda farklı değerler almasının sebebi, ANSYS ve SAP2000 modelleri farklı düğüm numaralarına sahip olmasındandır. ANSYS programındaki modelde en altta 1334 düğüm noktası bulunurken, SAP2000’de ise 613 düğüm noktası bulunmaktadır. Tablo 2.7’de her üç yöndeki yay sabiti değerleri iki program için de verilmiştir.

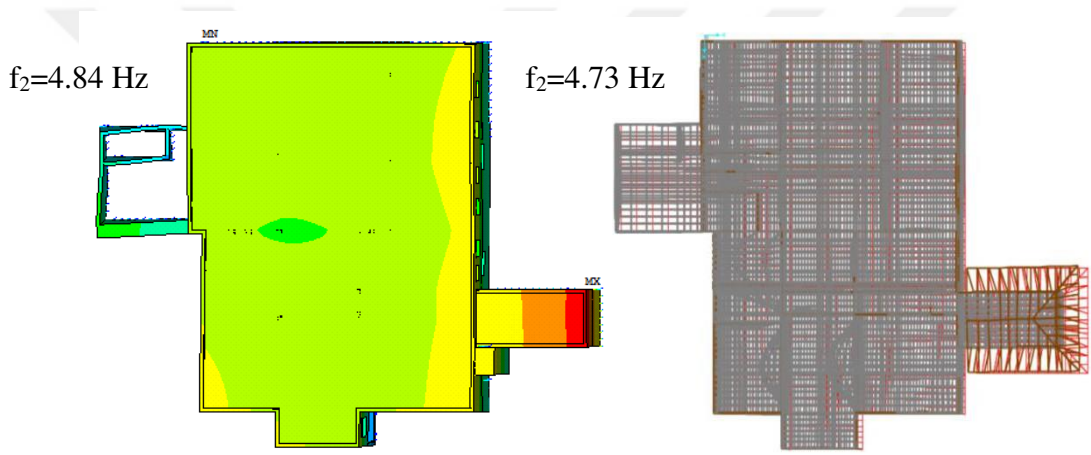
Tablo 2.7. ANSYS ve SAP2000 sonlu eleman modelleri için yay sabiti değerleri

Yay Eleman Yönleri	ANSYS (1334 Düğüm Noktası) (N/m)	SAP2000 (613 Düğüm Noktası) (N/m)
Ux	5.0E5	2.00E6
Uy	8.0E5	2.02E6
Uz	6.0E5	2.00E6

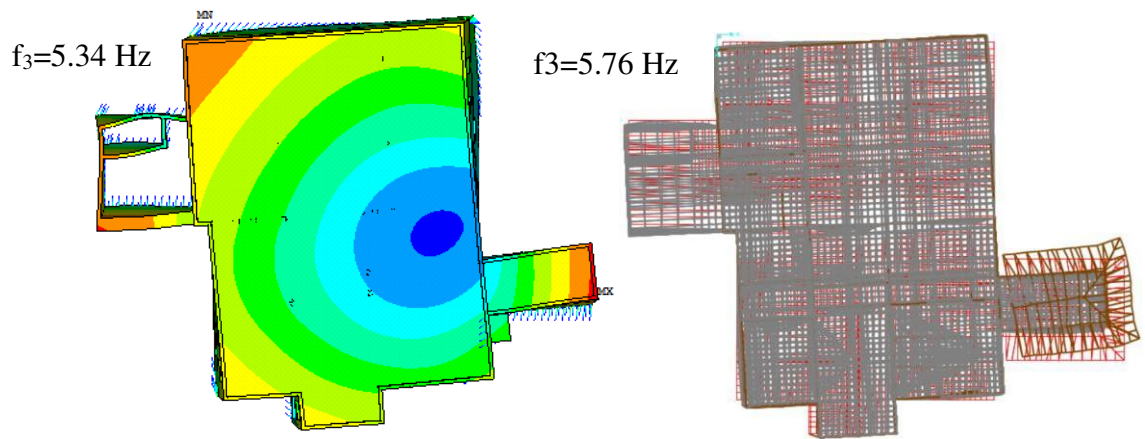
Tablo 2.6’da malzeme değerleri ve Tablo 2.7’de yay sabiti değerleri verilen modellerin ANSYS ve SAP2000 programlarında modal analizleri yapılmıştır. İlk üç doğal frekans ve ilgili mod şekilleri sonuçlarına bakılmış ve karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür. Şekil 2.16’da her iki model için ilk üç mod şekilleri gösterilmiştir.



(a) Birinci mod şekli/ X doğrultusunda ötelenme



(b) İkinci mod şekli/ Y doğrultusunda ötelenme



(c) Üçüncü mod şekli/ Burulma

Şekil 2.16. ANSYS ve SAP2000 sonlu eleman modellerinin mod şekilleri ve doğal frekansları

Tarihi hımmış konağın ANSYS modelinde, eşlenik malzeme kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmıştır. Doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler 4.31 Hz-5.34 Hz aralığındadır. SAP2000’de mikro olarak modellenen konağın sonlu eleman analizi yapılmıştır. Bu analizden elde edilen doğal frekans değerleri ise 4.15 Hz-5.76 Hz arasında değişmektedir. Her iki programda yapılan modal analiz sonuçlarına bakıldığında, mod şekilleri ve doğal frekans değerleri arasında bir uyum olduğu görülmüştür. Bu aşamadan sonra, sayısal olarak elde edilen frekanslar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Malzeme özellikleri ve sınır şartları dikkate alınarak yapılan güncellemeden sonra, ANSYS için elde edilen farkların maksimum değerinin %2.73 olduğu görülmüştür. SAP2000 modeli için ise farkların maksimum değeri %4.91 olduğu görülmüştür. Tablo 2.8’de deneysel ve sayısal olarak belirlenen doğal frekanslar ve bunlar arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 2.8. Sayısal ve deneysel olarak hesaplanan doğal frekans değerleri

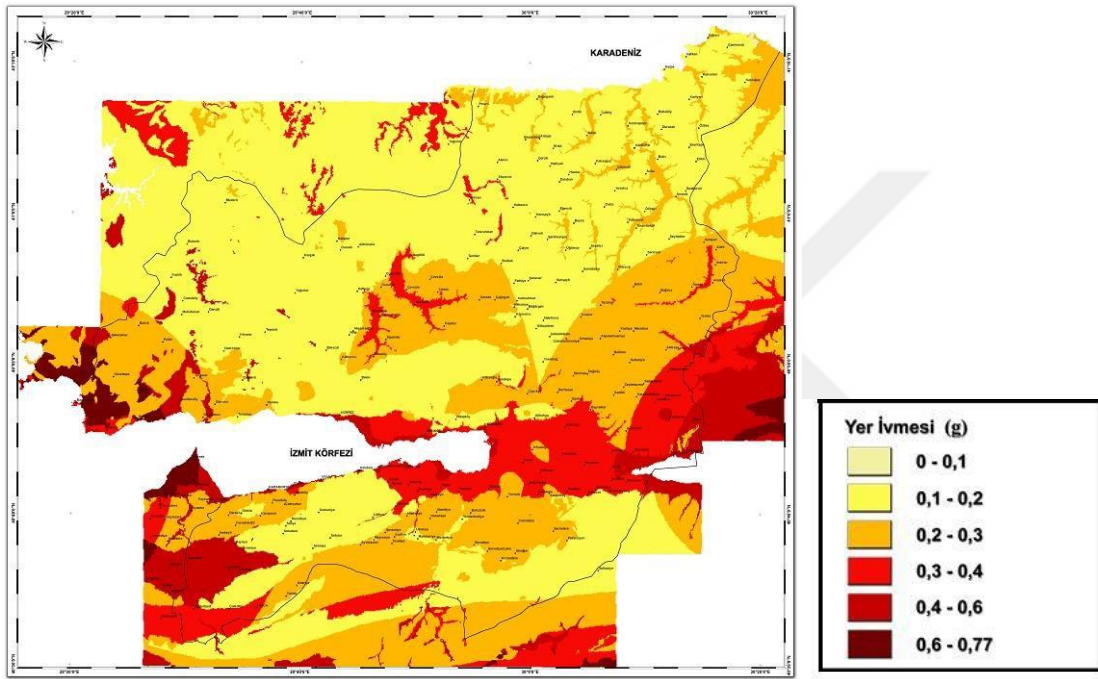
Mod Numarası	ANSYS (Hz)	Fark (%)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	SAP2000 (Hz)
1	4.31	1.89	4.23	1.89	4.15
2	4.84	2.11	4.74	0.21	4.73
3	5.34	2.73	5.49	4.91	5.76

2.5. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Analiz

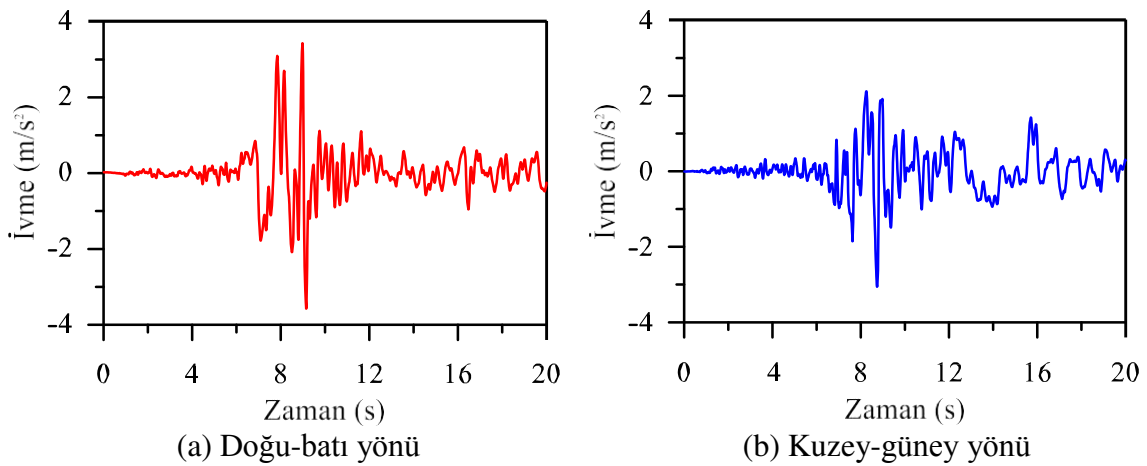
Geleneksel tarihi hımmış konağın dinamik karakteristikleri deneysel olarak Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlara dayanarak sonlu eleman modelinde güncelleme yapılmıştır. Güncelleme sonrası analizleri yapılan modelin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında uyum sağlandığı görüldüğünden, güncellenen model kullanılarak lineer dinamik analizi yapılmasına karar verilmiştir. Bu analizler ANSYS yazılımında yapılmış olup, yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin sonuçları gösterilmiştir.

Konağın, depreme karşı davranışını belirleyebilmek için zaman tanım alanında lineer dinamik analizi yapılmıştır. Analizde, modele etki ettirilecek ivme kaydı olarak 1999 Kocaeli depreminin kayıtları seçilmiştir. Şekil 2.17’de Kocaeli ili sismik tehlike haritası gösterilmiştir.

1999 Kocaeli deprem ivme kayıtların yatay yöndeki yani kuzey-güney ve doğu-batı yönlerindeki bileşenleri kullanılarak yapıya iki yönlü olarak etkittirilmiştir. Kullanılan deprem ivme kaydı, dinamik analiz için 0.01sn zaman aralıkları ile dikkate alınmıştır. Sonlu eleman analizleri çok uzun zaman aldığı için deprem ivme kaydının tamamı kullanılmamış, depremin en etkili 20sn'lik kısmı dikkate alınmıştır. Şekil 2.18'de deprem ivmesinin kuzey-güney ve doğu-batı yönlü kayıtlarının en etkili 20sn'lik kısımları verilmiştir.



Şekil 2.17. Kocaeli sismik tehlike haritası



Şekil 2.18. 1999 Kocaeli depreminin doğu-batı ve kuzey-güney yönlü ivme kayıt bileşenleri

Her iki yönü için ivme kayıtları verilen 1999 Kocaeli yer hareketi hakkında derinlik, zemin grubu, maksimum ivme değeri gibi bilgiler Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9. Hesaplamalar için seçilen güçlü yer kayıtları

No	Yakın Faylı Güçlü Yer Hareketleri				Maksimum Yer İvmesi	
	Deprem	Bileşen	Büyüklük (Mw)	Derinlik (km)		Arazi
1	1999	D-B	7.6	17	B	0.364g
	Kocaeli	K-G				0.312g
Arazi: Yerel arazi sınıfı (B zemin grubu)						

Şekil 2.18’de verilen ivme kayıtlarının kullanıldığı analizde, sönüm oranı %5 olarak kabul edilmiştir. Girilen bir başka değer olan Rayleigh sönüm katsayıları Alfa ve Beta, birinci ve üçüncü modlar kullanılarak Denklem (37) ve Denklem (38)’de verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Alfa değeri 1.4982 ve Beta değeri ise 0.001649 olarak elde edilmiştir.

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (37)$$

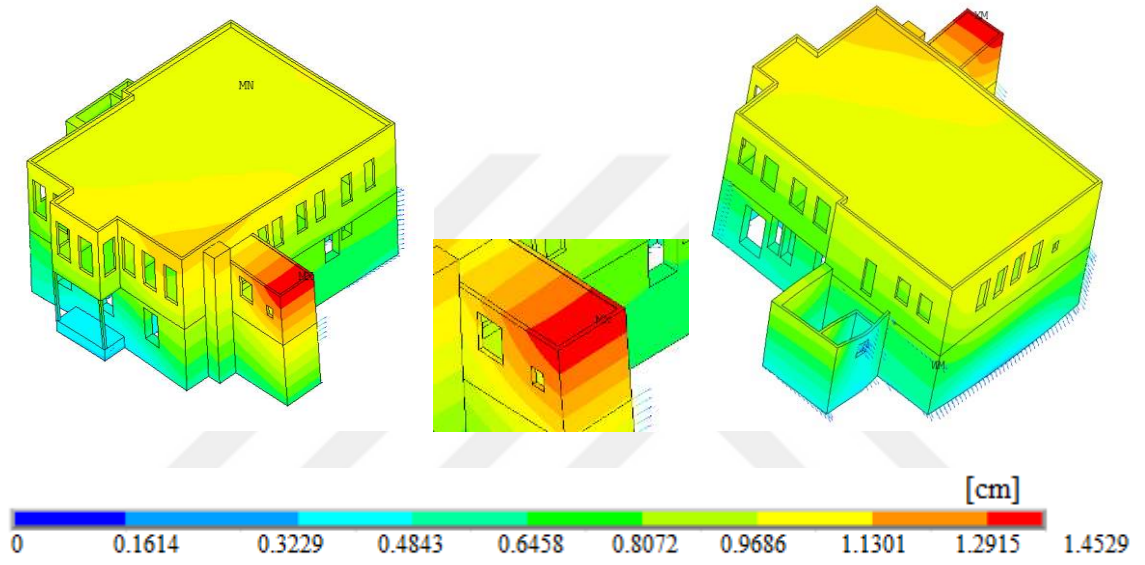
$$\beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (38)$$

Denklem (37) ve Denklem (38)’de ζ sönüm oranını, ω_i birinci mod şekli için doğal frekansı, ω_j ise üçüncü mod şekli için doğal frekansı temsil etmektedir.

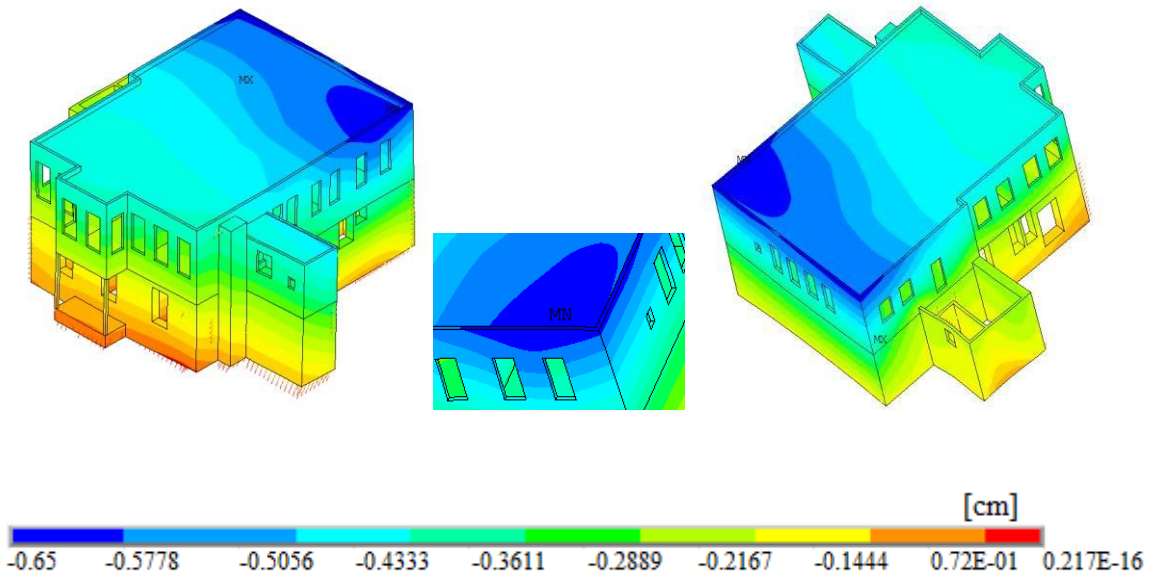
2.5.1. Yer Değiştirme

Yapılan analiz sonucunda, yer değiştirmelere ait kontur diyagramları elde edilmiştir. Yer değiştirme değerlerinin görüldüğü kontur diyagramları Şekil 2.19’da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere yer değiştirme miktarları her iki doğrultuda, yapının yüksekliği boyunca artmaktadır. Yer değiştirmeler, yapının tepe noktasında x yönünde 9.14s’de

1.45cm, y yönünde ise 8.92s’de 0.63cm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri, sadece maksimum değerleri temsil etmekte olup, konağın belirli bölgelerinde lokal olarak elde edildikleri görülmüştür. Bu noktalar haricinde yapıda ortaya çıkan yer değiştirmeler x yönü için 8cm arasında, y yönü için 3cm arasında değiştiği görülmüştür. Yapının lokal ve genel noktaları için x ve y yönlerinde zamana göre yer değiştirmelerin zamana göre yer değiştirme grafikleri Şekil 2.20’de verilmiştir.

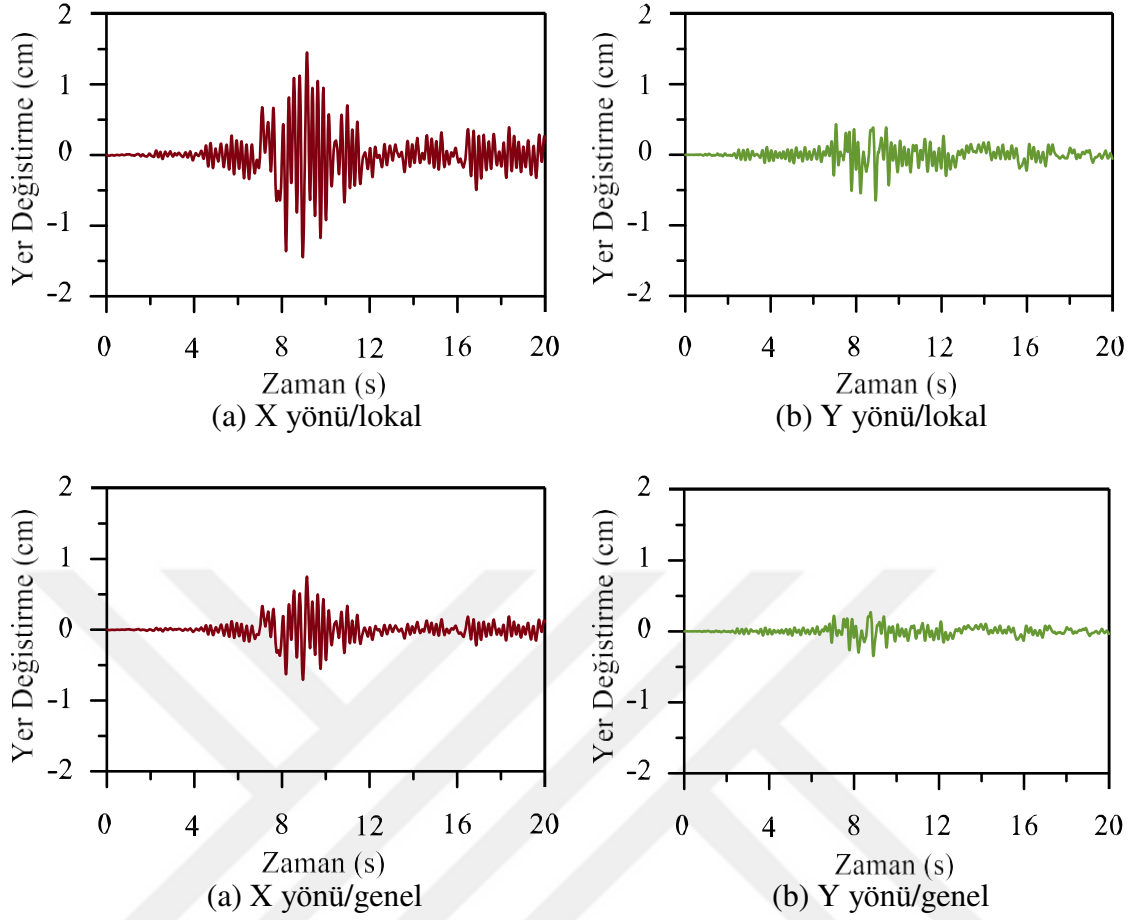


(a) X yönü



(b) Y yönü

Şekil 2.19. Yatay doğrultu yönleri için yer değiştirme kontur diyagramları

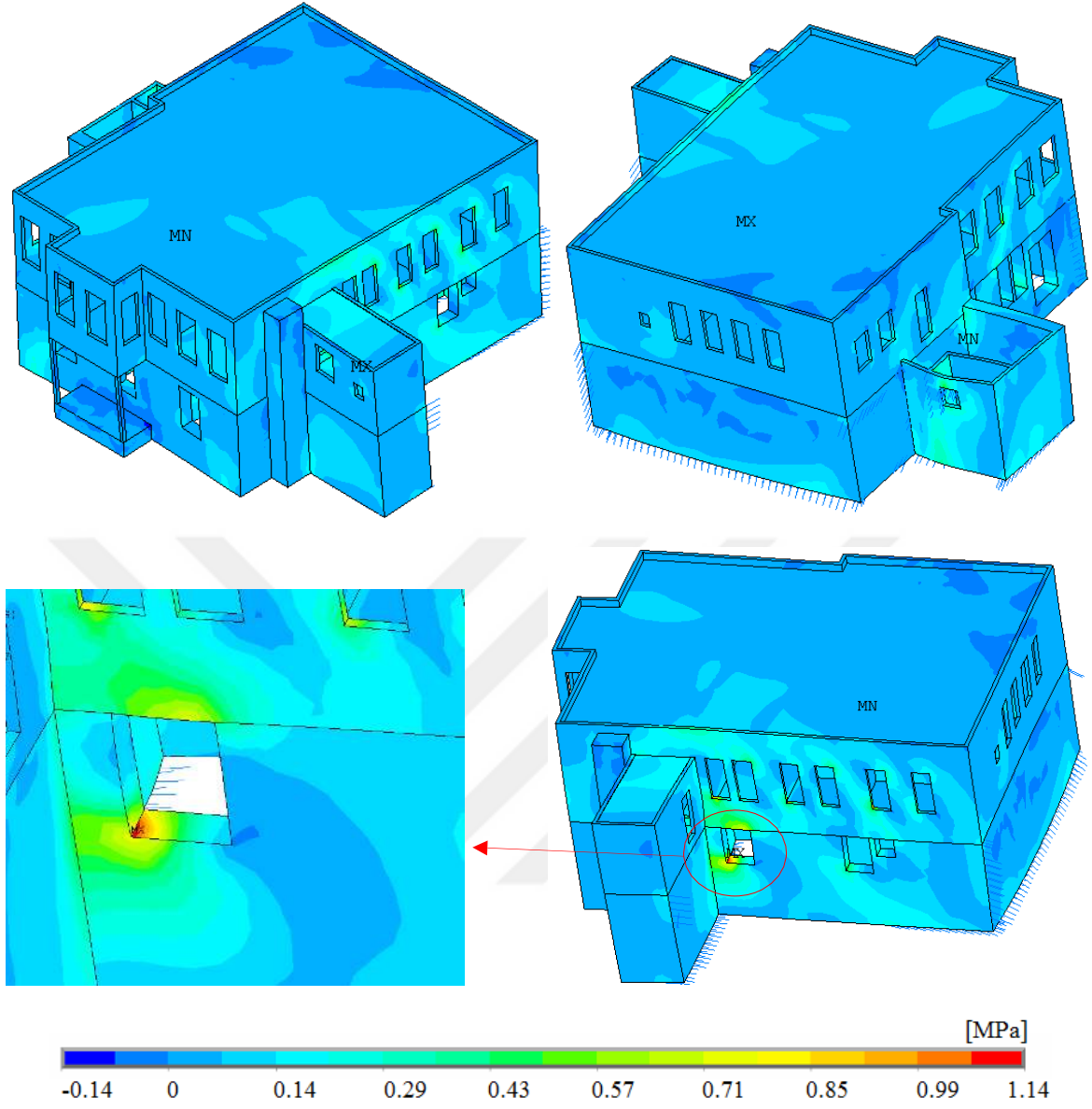


Şekil 2.20. Yapının x ve y yönlerinde zamana göre yer değiştirme grafikleri

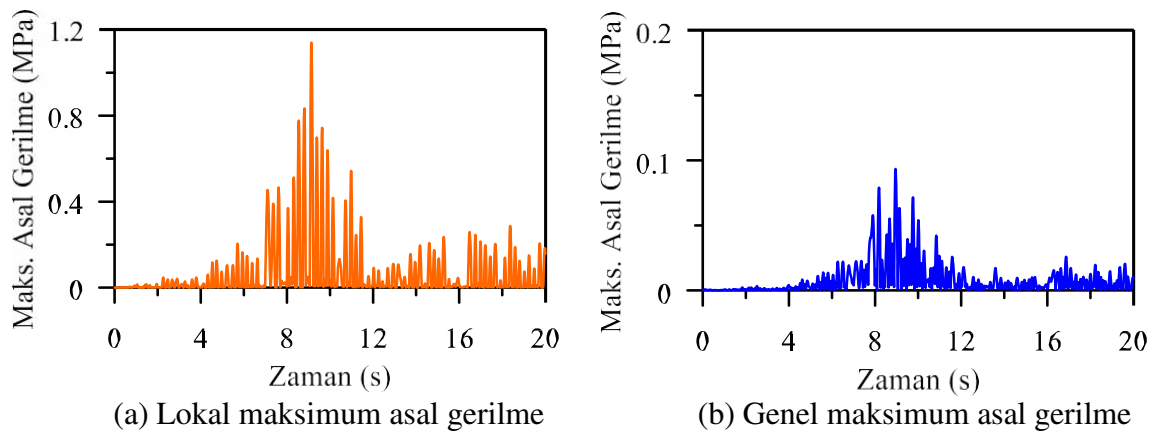
2.5.2. Asal Gerilmeler

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucu maksimum asal gerilme (çekme gerilmesi) ve minimum asal gerilme (basınç gerilmesi) değerleri elde edilmiştir.

Yapının maksimum asal gerilmelerinin dağılımı Şekil 2.21’de verilmiştir. Kontur diyagramı incelendiğinde maksimum asal gerilmenin, yapının yığma olarak tanımlanan bodrum katında boşluk olan bölgede olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen lineer dinamik analizde en büyük çekme gerilmesi değeri, 1.14MPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer tüm yapıyı temsil etmemektedir. Bu maksimum değer haricinde çekme gerilmeleri genellikle duvar yüzlerinde ve boşluk kenarlarında meydana geldiği ve yapıda çekme gerilmesi değerleri 0.14MPa-1.14MPa arasında değiştiği görülmüştür. Maksimum çekme gerilmesinin elde edildiği ve yapının genel maksimum asal gerilme değerleri zaman geçmişi grafikleri Şekil 2.22’de verilmiştir.

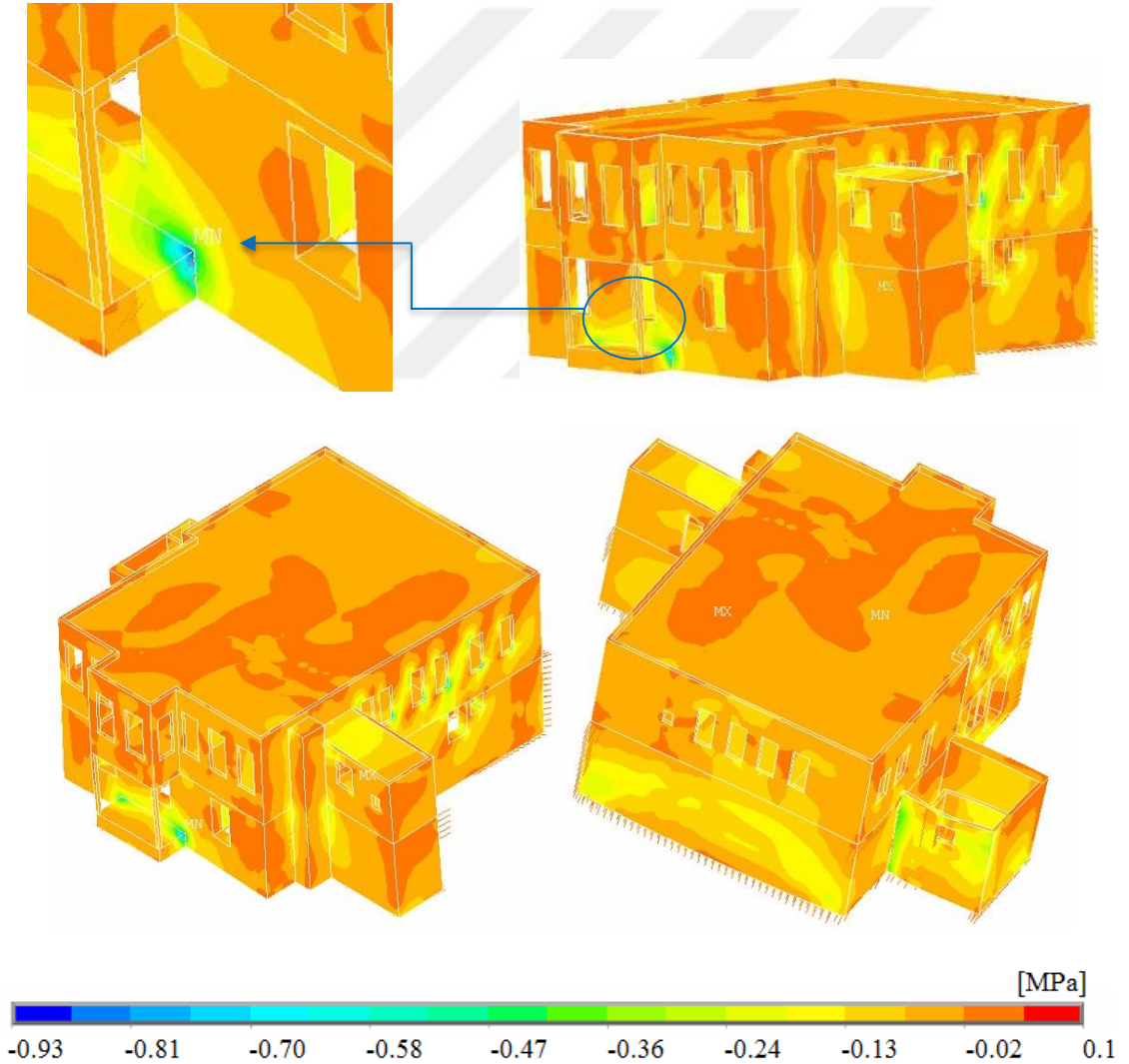


Şekil 2.21. Maksimum asal gerilmelerin kontur diyagramı

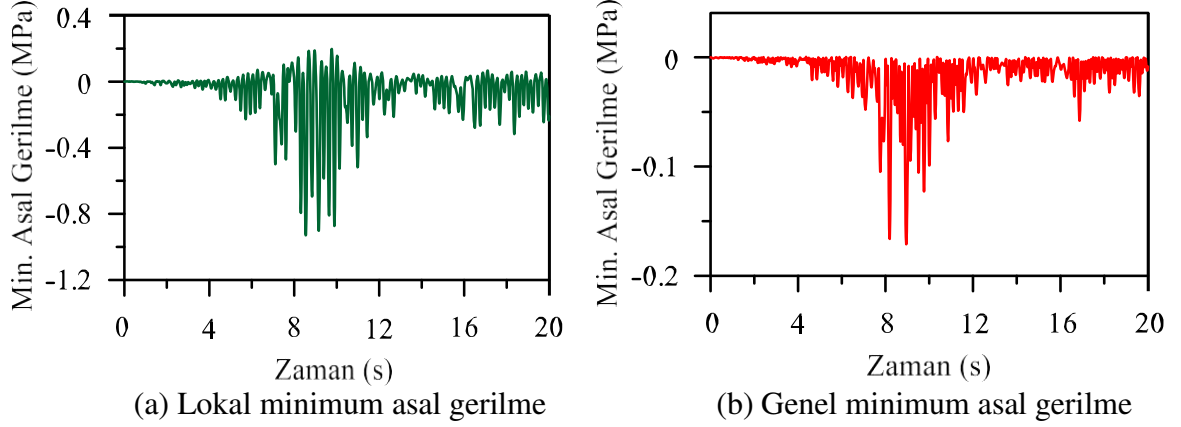


Şekil 2.22. Maksimum asal gerilmelerin lokal ve genel zaman geçmişleri

Yapının minimum asal gerilmelerinin dağılımı Şekil 2.23'te verilmiştir. Kontur diyagramı incelendiğinde maksimum asal gerilmenin, yapının yığma olarak tanımlanan bodrum katında ek bölge birleşim yerinde olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen lineer dinamik analizde en büyük basınç gerilmesi değeri 0.93MPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer tüm yapıyı temsil etmemektedir. Bu maksimum değer haricinde basınç gerilmeleri genellikle duvar yüzlerinde ve boşluk kenarlarında meydana geldiği ve yapıda çekme gerilmesi değerleri 0.13MPa-0.93MPa arasında değiştiği görülmüştür. Maksimum basınç gerilmesinin elde edildiği ve yapının genel minimum asal gerilme değerleri zaman geçmişi grafikleri Şekil 2.24'te verilmiştir.



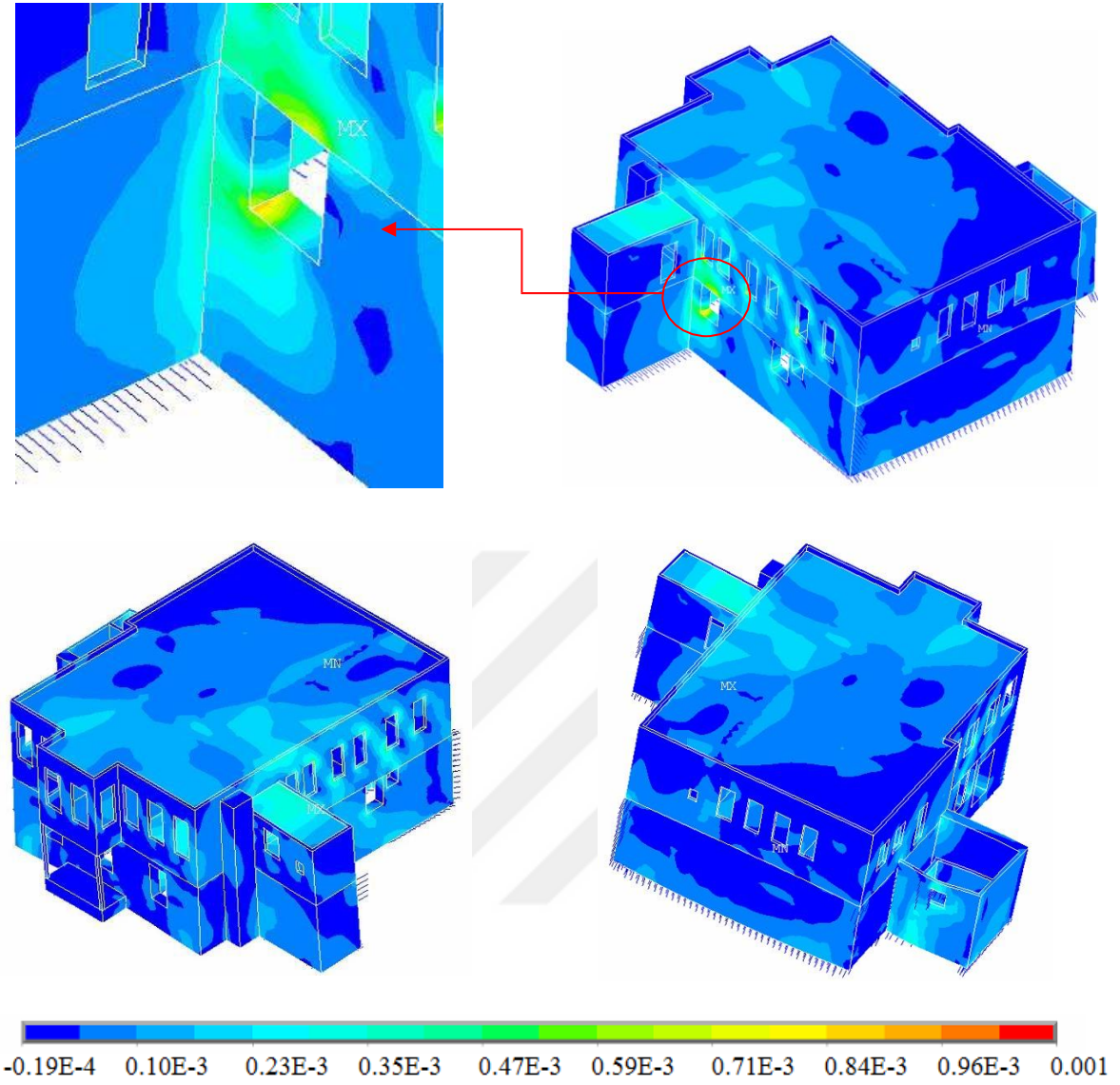
Şekil 2.23. Minimum asal gerilmelerin kontur diyagramı



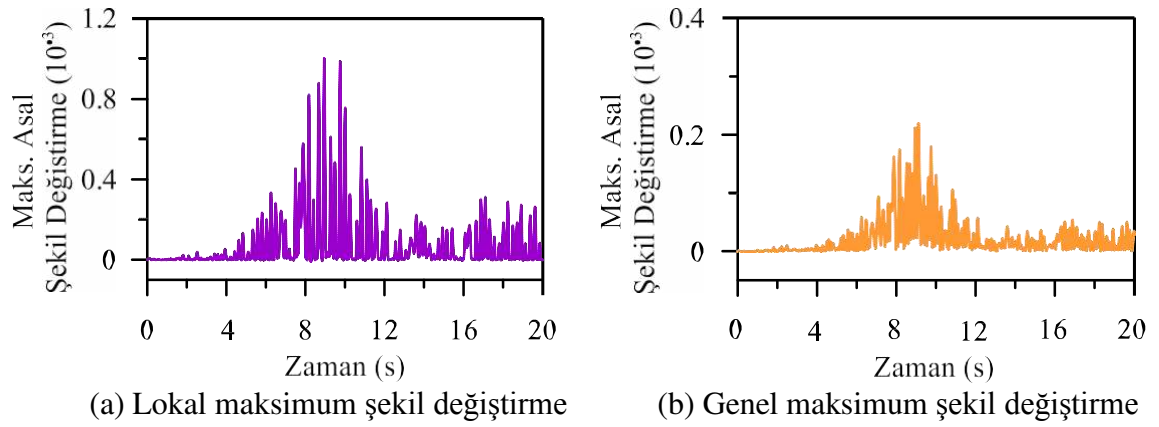
Şekil 2.24. Minimum asal gerilmelerin lokal ve genel zaman geçişleri

2.5.3. Asal Şekil Değiştirme

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonucunda maksimum asal şekil değiştirme ve minimum asal şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen maksimum şekil değiştirme kontur diyagramı Şekil 2.25'te verilmiştir. Kontur diyagramının incelenmesi üzerine, maksimum asal şekil değiştirmenin, yapının bodrum katında bir bölgede meydana geldiği görülmüştür. Gerçekleştirilen lineer dinamik analizde en büyük asal şekil değiştirme değeri, bodrum katında pencere kenarında $1.00E-3$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer tüm yapıyı kapsamamaktadır ve yapıda maksimum asal şekil değiştirme değerlerinin $-0.19E-4$ ile $1.00E-3$ arasında değiştiği yapılan analiz sonucunda görülmüştür. Yine kontur diyagramına bakılarak asal şekil değiştirme değerlerinin, maksimum değer görülen bölge dışında genel olarak boşluk kenarlarında ve yapı duvar yüzeylerinde meydana geldiği görülmüştür. Yapılan analizden elde edilen maksimum asal şekil değiştirme değerlerinin zamana bağlı değişiminin lokal ve genel grafikleri Şekil 2.26'da verilmiştir.

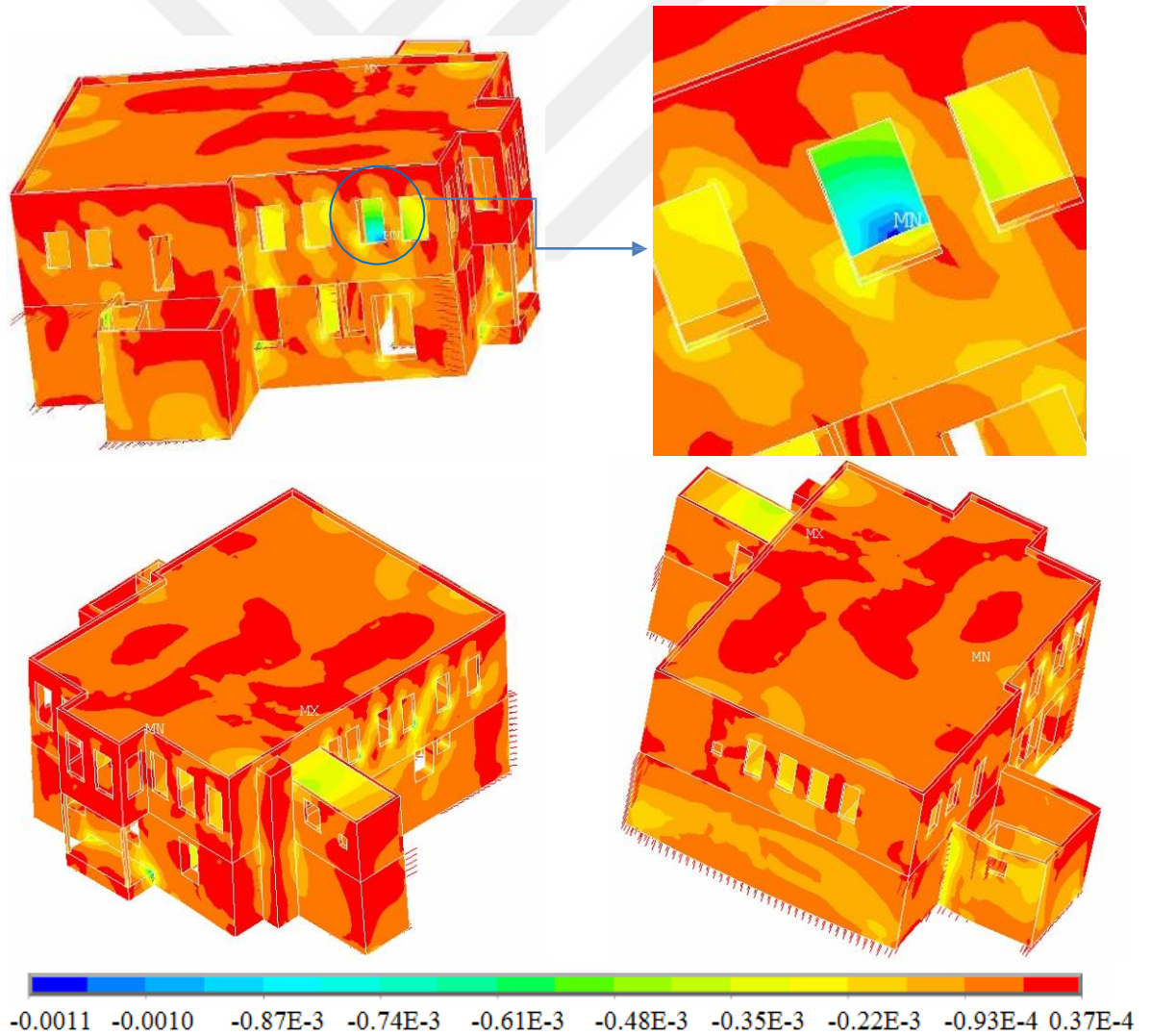


Şekil 2.25. Maksimum asal şekil değiştirme kontur diyagramı

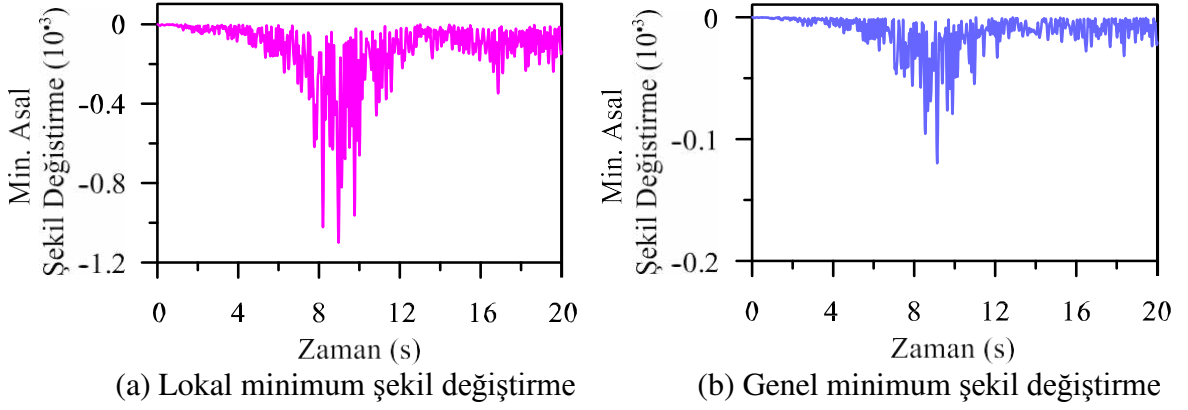


Şekil 2.26. Maksimum asal şekil değiştirmenin zamana göre lokal ve genel değerleri

Yapılan analiz sonucunda elde edilen minimum şekil değiştirme kontur diyagramı Şekil 2.27’de verilmiştir. Minimum asal şekil değiştirmenin nerelerde meydana geldiğini görmek için kontur diyagramına bakılmıştır. Kontur diyagramının incelenmesi üzerine minimum asal şekil değiştirmenin, yapının üst katında bir bölgede meydana geldiği görülmüştür. Gerçekleştirilen lineer dinamik analizde en küçük asal şekil değiştirme değeri, üst katında iç duvar bölgesinde $-1.10E-3$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer tüm yapıyı kapsamamaktadır ve yapıda minimum asal şekil değiştirme değerlerinin $0.37E-4$ ile $-1.100E-3$ arasında değiştiği yapılan analiz sonucunda görülmüştür. Yine kontur diyagramına bakılarak asal şekil değiştirme değerlerinin, genel olarak boşluk kenarlarında ve duvar yüzeylerinde meydana geldiği görülmüştür. Yapılan analizden elde edilen minimum asal şekil değiştirme değerleri zaman geçmişi grafiği Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.27. Minimum asal şekil değiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.28. Minimum asal şekil değiştirmenin zamana göre değerleri

Yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda elde edilen maksimum asal gerilmeleri (çekme gerilmeleri) ve minimum asal gerilmelerinin (basınç gerilmeleri) değerleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda yapının maksimum asal gerilme (çekme gerilmesi) değerinin en fazla 0.93MPa, minimum asal gerilme (basınç gerilmesi) değerinin en fazla 1.14MPa olarak elde edildiği görülmüştür. 1999 Kocaeli depreminin kuzey-güney ve doğu-batı yönlü ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizde, yapının deprem kuvvetlerine karşı ne denli dirençli olduğunu belirlemek için izin verilen emniyet gerilmeleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Yapının bodrum katı yığma yapıdadır ve yığma duvar için deneyler yapılamaması durumunda TBDY-2018’de elastisite modülünün 750fk değerine eşit kabul edilmesi durumu dikkate alınarak karakteristik basınç dayanımı değeri 1.6MPa olarak belirlenmiştir. Karakteristik çekme dayanımı ise karakteristik basınç dayanımının yaklaşık %10’u olarak kabul edilmiştir. Karakteristik çekme dayanım değeri 0.16MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda ahşap malzemede güvenlik için müsaade edilen çekme gerilmesi değeri 10.79MPa’dır. Müsaade edilen basınç gerilmesi ise 11.77MPa’dır. Ayrıca ahşap yapılar yönetmeliği olan TS647’ye bakıldığında ahşap için dikkate alınabilecek sınır gerilme değerleri basınç için 10.78MPa ve çekme için 9.8MPa olarak belirlendiği görülmüştür. Hımış konağı, ahşap-taş malzemelerden oluşan kompozit bir sistem olduğu için izin verilen gerilme değerleri bu malzeme değerleri arasında sayılabilir. Özellikle ahşap karkas sisteminin taşıyıcı sistemi oluşturduğu düşünülürse yapıda oluşan gerilme değerlerinin izin verilen değerlerin altında olduğu ve deprem karşısında iyi bir performans sergilediği söylenebilir.

Zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda tarihi hımış konağın yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirme sonuçları Tablo 2.10’da verilmiştir.

Tablo 2.10. ANSYS modelinin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonuçları

Dinamik Davranış		Değerler
Maksimum yer değiştirme(cm)	X yönü	1.45
	Y yönü	0.63
Maksimum asal gerilme(MPa)		1.14 / 0.14
Minimum asal gerilme(MPa)		-0.93 /-0.13
Maksimum asal şekil değiştirme		1.00E-3 / 0.10E-3
Minimum asal şekil değiştirme		1.10E-3 / -0.93E-4

Tablo 2.10’da zaman tanım alanında dinamik analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirme değerleri verilmiştir. Kalın punto olarak yazılan değerler lokal olarak elde edilen ve yapının tamamını temsil etmeyen maksimum değerleri göstermektedir.

Hımsı konağın ANSYS yazılımında yapılan dinamik analizine ek olarak SAP2000 yazılımında da zaman tanım alanında dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde deprem ivme kaydı olarak ANSYS yazılımında olduğu gibi 1999 Kocaeli deprem ivme kaydının yatay bileşenleri kullanılmıştır. Yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen sonuçların, ANSYS’teki analiz sonuçlarıyla iyi bir uyum sağladığı da görülmüştür. Yapıdan elde edilen maksimum ve ortalama değerler Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11. SAP2000 modelinin zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonuçları

Dinamik Davranış		Değerler
Maksimum Yer Değiştirme (cm)	X yönü	1.21
	Y yönü	0.63
Maksimum Asal Gerilme (MPa)	Alan elemanlar	2.98 / 0.11
Minimum Asal Gerilme (MPa)		2.23 / 0.10
Maksimum Asal Gerilme (MPa)	Çerçeve elemanlar	0.93 / 0.18
Minimum Asal Gerilme (MPa)		0.81 / 0.15
Maksimum Asal Şekil Değiştirme	Alan elemanlar	2.4E-3 / 0.10E-3
Minimum Asal Şekil Değiştirme		1.8E-3 / 0.95E-4

3.SONUÇLAR

Bu tez çalışması, Rize ili Fındıklı ilçesinden bulunan geleneksel tarihi hımış bir konağın, DMA ölçüm sonuçları kullanılarak sonlu eleman model güncellemesi ve güncellenmiş model kullanılarak bu hımış konağın zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi aşamalarını kapsamaktadır.

Tez çalışmasında, geleneksel hımış konağın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel ölçümler yapılmıştır. Yapılan hasarsız çevresel titreşim testleriyle, hımış konağın deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra hımış konağın sayısal dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için sonlu eleman modellemesi mikro olarak oluşturulmak istenmiş, karmaşık yapısından dolayı mikro model oluşturulamamıştır. Yapının, makro olarak modellenmesine karar verilmiştir. Mikro model malzeme özelliklerinin makro modele aktarılabilmesi için eşlenik malzeme özellikleri tayin edilmiştir. Eşlenik malzeme özelliklerinin atandığı makro modelin modal analizleri ANSYS yazılımında yapılmış, sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu işlemde sonra Hımış konağın sonlu eleman modellemesi mikro olarak SAP2000 yazılımında yapılmış ve dinamik karakteristikler elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model güncellemesinden sonra sonlu eleman modelinin depreme karşı göstereceği davranışı belirleyebilmek için zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda yapının x ve y yönlerinde maksimum yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme ile maksimum ve minimum asal şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Tarihi yapılarda gerçek davranışlarını elde etmek için hasarsız yöntemlerin kullanılması çok önemlidir. Bu çalışma kapsamında da hasarsız ölçümler yapılmış, yapının ilk üç modu için frekans aralığı 4.23-5.74 Hz olarak elde edilmiştir.
- Tarihi yapılar karmaşık sistemlere sahip olduklarından dolayı, sonlu eleman modellerinin mikro olarak modellenmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Yazılımlarda eleman sınırının aşılması gibi sorunlar yaşanabildiği için, mikro model malzeme özelliklerini temsil eden bir eşlenik malzeme tayin etmek çok önemlidir. Bu tez çalışmasında, bu amaçla eşlenik malzeme tayini yapılmıştır. Bu işlemin başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda; bu

işlemin, eşlenik malzeme tayin etmek isteyen araştırmacılara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

- Sonlu eleman analizleri, her nasıl yapılırsa yapılsın deneysel ölçümlerle karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen fark değerleri, kabul edilebilir fark düzeyine indirilene kadar model güncellemesi yapılmalıdır. Model güncellemesi yapmak, yapının gerçek davranışını temsil eden bir sonlu eleman modeli oluşturulmasında da çok önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış, güncellenen modelin yapının davranışını iyi bir şekilde temsil edebildiği görülmüştür.
- Yapının dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi, depreme karşı göstereceği performansı anlayabilmek için önemli bir adımdır. Çalışma kapsamında yapılan zaman tanım alanında dinamik analizden elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri dikkate alındığında görelî öteleme oranı %0.2 olarak elde edilmiştir. Elde edilen basınç ve çekme gerilmeleri, izin verilen sınır değerleriyle karşılaştırılarak tahkikleri yapılmıştır. Yapının, izin verilen gerilme değerlerini sağladığı ve depreme karşı iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Ülkemizde çalışma alanı betonarme ve çelik yapılara göre daha az olan ahşap yapılar üzerinde çalışmalar artırılabilir. Yapıların dinamik davranışları belirlenerek geleceğe güvenle aktarılması sağlanabilir.
- Eşlenik malzeme özelliklerinin elde edilmesi için uygulanan işlemler diğer karmaşık mühendislik yapıları için de uygulanabilir. Böylece yapıların dinamik karakteristikleri ve dinamik davranışları daha rahat belirlenebilir.
- Tez kapsamında doğrusal dinamik davranışı belirlenen yapının doğrusal olmayan dinamik davranışı belirlenebilir.
- Yapının prototipi laboratuvar ortamında yapıp, sarsma masası deneyleriyle hasar tespiti yapılabilir.
- Tez çalışmasında incelenen Hımmış yapı ile karşılaştırılması amacıyla bir diğer ahşap yapı türü olan bağdadi bir yapı incelenebilir ve aynı deprem kayıtları altında dinamik davranışı belirlenebilir.

4. KAYNAKLAR

- Adanur, S., Altunışık, A., C., Soyluk, K., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A., A., 2016. Multiple-Support Seismic Response of Bosphorus Suspension Bridge for Various Random Vibration Methods, Structural Engineering International, 5, 54-67.
- Aksoy, D. ve Ahunbay, Z., 2005. Geleneksel Ahşap İskeletli Türk Konutu'nun Deprem Davranışları, itüdergisi, 4, 1, 47-58.
- Aktaş, Y., D., Akyüz, U., Türer, A., Erdil, B. ve Şahin Güçhan, N., 2014. Seismic Resistance Evaluation of Traditional Ottoman Timber-Frame Houses: Frame Loadings and Material Tests, Earthquake Spectra, 30, 4, 1711-1732.
- Allemang, R., J., 2003. The Modal Assurance Criterion: Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, 37, 14-23.
- Altunışık, A., C., Bayraktar, A., Sevim, B. ve Birinci, F., 2011. Vibration-Based Operational Modal Analysis of the Mikron Historic Arch Bridge after Restoration, Civil Engineering and Environmental Systems, 28, 3, 247-259.
- Altunışık, A., C., Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2012a. Operational Modal Analysis of a Scaled Bridge Model Using EFDD and SSI Methods, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 19, 320-330.
- Altunışık, A., C., Bayraktar, A. ve Özdemir, H., 2012b. Seismic Safety Assessment of Eynel Highway Steel Bridge using Ambient Vibration Measurements, Smart Structures and Systems, 10, 2, 131-154.
- Altunışık, A., C. ve Bayraktar, A., 2014. Finite Element Model Updating Effect on the Structural Behavior of Long Span Concrete Highway Bridges, Computers and Concrete, 1, 1-20.
- Altunışık, A., C., Günaydın, M., Sevim, B., Bayraktar, A. ve Adanur, S., 2015a. CFRP Composite Retrofitting Effect on the Dynamic Characteristics of Arch Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 74, 1-9.
- Altunışık, A., C., Sevim, B., Bayraktar, A., Adanur, S. ve Günaydın, M., 2015b. Time Dependent Changing of Dynamic Characteristics of Laboratory Arch Dam Model, KSCE Journal of Civil Engineering, 19, 1069-1077.
- Altunışık, A., C., Bayraktar, A. ve Genç, A., F., 2016a. A Study on Seismic Behaviour of Masonry Mosques After Restoration, Earthquakes and Structures, 10, 1331-1346.
- Altunışık, A., C., Günaydın, M., Sevim, B. ve Bayraktar, A., 2016c. Dynamic Characteristics of an Arch Dam Model before and after Strengthening with Consideration of Reservoir Water, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30, 6.

- Altunışık, A., C., Günaydın, M., Sevim, B., Bayraktar, A. ve Adanur, S., 2016d. Retrofitting Effect on the Dynamic Properties of Model-Arch Dam with and without Reservoir Water Using Ambient-Vibration Test Methods,, Journal of Structural Engineering, 142, 10.
- Altunışık, A., C. ve Genç, A., F., 2017a. Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques after Restoration, Natural Hazards and Earth System Sciences, 17, 1811-1821.
- Altunışık, A., C., Adanur, S., Genç, A., F., Günaydın, M. ve Okur, F., Y., 2017b. An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion Using Non-Destructive and Numerical Methods, Experimental Mechanics, 57, 245-259.
- Altunışık, A., C., Günaydın, M., Sevim, B. ve Adanur, S., 2017c. System Identification of Arch Dam Model Strengthened with CFRP Composite Materials, Steel and Composite Structures, 25, 231-244.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2017d. Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam, Engineering Failure Analysis, 79, 154-170.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2017e. Structural Identification of a Cantilever Beam with Multiple Cracks: Modeling and Validation, International Journal of Mechanical Sciences, 130, 74-89.
- Altunışık, A., C., 2017f. Shaking Table Test of Wooden Building Models for Structural Identification, Earthquakes and Structures, 12, 67-77.
- Altunışık, A., C. ve Bayraktar, A., 2017g. Manual Model Updating of Highway Bridges under Operational Condition, Smart Structures and Systems, 19, 39-46.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2017h. Automated Model Updating of Multiple Cracked Cantilever Beams for Damage Detection, Journal of Constructional Steel Research, 138, 499-512.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y., Genç, A., F., Günaydın, M. ve Karahasan, O., Ş., 2018a. Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures, Experimental Techniques, 42, 605-621.
- Altunışık, A., C., Genç, A., F., Günaydın, M., Okur, F., Y. ve Karahasan, O., Ş., 2018b. Dynamic Response of a Historical Armory Building using the Finite Element Model Validated by the Ambient Vibration Test, Journal of Vibration and Control, 24, 5472-5484.
- Altunışık, A., C., Kalkan, E. ve Başağa, H., 2018c. Structural Behavior of Arch Dams Considering Experimentally Validated Prototype Model using Similitude and Scaling Laws, Computers and Concrete, 22, 101-116.

- Altunışık, A., C., Genç, A., F., Günaydın, M., Adanur, S. ve Okur, F., Y., 2018d. Ambient Vibration-Based System Identification of a Medieval Masonry Bastion for Health Assessment using Nonlinear Analyses, International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 19, 107-124.
- Altunışık, A., C., Karahasan, O., Ş., Genç, A., F., Okur, F., Y., Günaydın, M. ve Kalkan, E., 2018e. Effect of Fiber-Reinforced Polymer Strengthening on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Frame Using Model Updating, ACI Structural Journal, 115, 1589-1601.
- Altunışık, A., C., Karahasan, O., Ş., Genç, A., F., Okur, F., Y., Günaydın, M. ve Adanur, S., 2018f. Sensitivity-Based Model Updating of Building Frames using Modal Test Data, KSCE Journal of Civil Engineering, 22, 4038-4046.
- Altunışık, A., C., Karahasan, O., Ş., Genç, A., F., Okur, F., Y., Günaydın, M., Kalkan, E. ve Adanur, S., 2018g. Modal Parameter Identification of RC Frame under Undamaged, Damaged, Repaired and Strengthened Conditions, Measurement, 124, 260-276.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y., Genç, A., F., Günaydın, M. ve Adanur, S., 2018h. Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32, 1.
- Altunışık, A., C., Kalkan, E., Okur, F., Y., Özgan, K., Karahasan, O., Ş. ve Bostancı, A., 2019a. Non-Destructive Modal Parameter Identification of Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Tests after Restoration, Measurement, 146, 411-424.
- Altunışık, A., C., 2019b. Tarihi Yığma Köprülerin Deneysel Modal Parametrelerinin Hasarsız Deneysel Ölçümler ile Belirlenmesi, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı: 401-412.
- Altunışık, A., C., Yetişken, A. ve Kahya, V., 2019c. Annular Cylindrical Liquid Column Dampers for Control of Structural Vibrations, Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 43, 479-490.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Kahya, V., 2019d. Vibrations of a Box-Sectional Cantilever Timoshenko Beam with Multiple Cracks, International Journal of Steel Structures, 19, 635-649.
- Altunışık, A., C., Okur, F., Y., Karaca, S. ve Kahya, V., 2019e. Vibration-Based Damage Detection in Beam Structures with Multiple Cracks: Modal Curvature vs. Modal Flexibility Methods, Nondestructive Testing and Evaluation, 34, 33-53.
- Altunışık, A., C., Kanbur, B., Genç, A., F. ve Kalkan, E., 2019f. Structural Response of Historical Masonry Arch Bridges under Different Arch Curvature Considering Soil-Structure Interaction, Geomechanics and Engineering, 18, 141-151.

- Altunışık, A., C., Sesli, H., Hüsem, M. ve Akköse M., 2019g. Performance Evaluation of Gravity Dams Subjected to Near- and Far-Fault Ground Motion using Euler Approaches, Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 43, 297-325.
- Altunışık, A. C., Karahasan, O. Ş., Okur, F. Y., Kalkan, E., ve Özgan, K., 2019h. Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of a Restored Historical Timber Mosque Based on Ambient Vibration Tests, Journal of Testing and Evaluation, 47,5, 3533-3562.
- Altunışık, A. C., Kalkan, E., Okur, F. Y., Karahasan, O. Ş. ve Özgan, K., 2020. Finite-Element Model Updating and Dynamic Responses of Reconstructed Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Test Results, Journal of Performance of Constructed Facilities, 34, 1.
- ANSYS, 2016. Swanson Analysis System, USA.
- Aras, F., Krstevska, L., Altay, G. ve Tashkov, L., 2011. Experimental and Numerical modal Analyses of a Historical Masonry Palace, Construction and Building Materials, 25, 81-91.
- Avlar, E., 2008. Türkiye’de Ahşap Yapı Üretimine Yönelik Durum Tespiti, Mimarlıkta Malzeme, 8, 71-77.
- Bağbancı, M., B., 2013. Examination of the Failures and Determination of Intervention Methods for Historical Ottoman Traditional Timber Houses in the Cumalıkızık Village, Bursa–Turkey, Engineering Failure Analysis, 35, 470-479.
- Bathe, K., J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008. Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 516-524.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve Yıldırım, F., 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 37–47.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A., C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, D. M., 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 337, 5185-5205.
- Bayraktar, A., Çalık, İ. ve Türker, T., 2013. Restorasyon Sonrası Tarihi Sundura Camisi ve Minaresinin Çevresel titreşim Testi Yöntemiyle Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, Vakıf Restorasyon Yıllığı, 6, 54-62.

- Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A., C., 2015. Experimental Frequencies and Damping Ratios for Historical Masonry Arch Bridges, Construction and Building Materials, 75, 234-241.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C. ve Türker, T., 2016. Structural Condition Assessment of Birecik Highway Bridge using Operational Modal Analysis, International Journal of Civil Engineering, 14, 35-46.
- Bayülke, N., 2001. Ahşap Yapılar ve Deprem, Türkiye Mühendislik Haberleri, 414.
- Birinci, F., 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bozkurt, A. Yılmaz ve Erdin, N., 1997. Ağaç Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Brincker, R., Zhang L. and Andersen, P., 2000. Output-only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition, Proceedings of the ISMA 25 Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 2, 717-723.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2001. Yapı Dinamiği, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Chopra, A., K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Compan, V., Pachon, P. ve Camara, M., 2017. Ambient Vibration Testing and Dynamic Identification of a Historical Building. Basilica of the Fourteen Holy Helpers (Germany), Procedia Engineering, 199, 3392–3397.
- Çalık, İ., Bayraktar, A. ve Türker, T., 2015. Yığma ve Betonarme Kubbeli Tarihi Camilerin DeneySEL Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması, Vakıf Restorasyon Yıllığı, 10, 1-15.
- Dikmen, N., 2010. An Investigation on Traditional Timber-Framed Buildings in Çankırı Province of Turkey, Trakya University Journal of Science, 11, 1, 15-27.
- Doğan, M., 2010. Seismic Analysis of Traditional Buildings: Bagdadi and Himis, Anadolu University Journal of Science and Technology, 11, 1, 35-45.
- Duman, N. ve Ökten, S., 1988. Ahşap Yapı Dersleri.1, 2. Baskı, Yapı Endüstri Merkezi Yayın Bölümü, İstanbul.
- DynaMo, 2018. Dynamic Modal Identification Software, Dynamic Academy, Version 1.0, Trabzon. www.dynaaca.com
- Efe, H., ve Çağatay, K., 2011. Determination of Some Physical and Mechanical Properties of Various Wood Materials. Journal of Polytechnic, 14, 1, 55–61.

- Eldem, S., H., 1987. Türk Evi III Osmanlı Dönemi, Türkiye Anıt Çevre Turizm Değerlerini Koruma Vakfı, İstanbul.
- Er Akan, A., 2004. Some Observations on the Seismic Behaviour of Traditional Timber Structures in Turkey, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ercan, E., 2018. Assessing the Impact of Retrofitting on Structural Safety in Historical Buildings via Ambient Vibration Tests, Construction and Building Materials, 164, 337-349.
- Erkoç, E., 2004. Günümüz Teknolojileriyle Üretilen Ahşap Konutların Tasarım-Uygulama-Kullanım Üçgeninde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N., I. ve Mongelli, M., 2012, Ambient Vibration Testing, Dynamic Identification and Model Updating of a Historic Tower, NDT&E International, 47, 88-95.
- Genç, A., F., Ergun, M., Günaydın, M., Altunışık, A., C. Ateş, Ş., Okur, F., Y. ve Ayman, S., M., 2019. Dynamic Analyses of Experimentally-Updated FE Model of Historical Masonry Clock Towers Using Site-Specific Seismic Characteristics and Scaling Parameters According to the 2018 Turkey Building Earthquake Code, Engineering Failure Analysis, 105, 402-426.
- Gentile, C. ve Saisi, A., 2007. Ambient Vibration Testing of historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and Building Materials, 21, 6, 1311-1321.
- Gentile, C. ve Gallino, N., 2008. Ambient Vibration Testing and Structural Evaluation of an Historic Suspension Footbridge, Advances in Engineering Software, 39, 4, 356-366.
- Giordano, A., Mele, E. ve Luca, A., 2002. Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study, Engineering Structures, 24, 1057-1069.
- Güler, K. ve Bilge, A., C., 2013. Doğu Karadeniz Ahşap Karkas Yapı Geleneği ve Koruma Sorunları, Ahşap Yapılarda Koruma ve Onarım Sempozyumu, 2, İstanbul, Bildiri Kitabı: 178-189.
- Güler, M., S. ve Şen, S., 2015. Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5, 1, 56-66.
- Gülhan, D. ve Güney, İ. Ö., 2000. The Behaviour of Traditional Building Systems Against Earthquake and Its Comparison to Reinforced Concrete Frame Systems; Experiences of Marmara Earthquake Damage Assessment Studies in Kocaeli and Sakarya, International Conference on Earthquake-Safe: Lessons to Be Learned From Traditional Construction, İstanbul, Türkiye.

- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve Bayraktar, A., 2017. Finite Modeling Updating Effects on the Dynamic Response of Building Models, Journal of Testing and Evaluation, 45, 5.
- Günaydın, M., 2018. Tarihi Bir Yığma Minarenin Onarım Sonrasındaki Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8, 2, 381-395.
- Günaydın, M., Adanur, S. ve Altunışık, A., C., 2019. Experimental Investigation on Acceptable Difference Value in Modal Parameters for Model Updating Using RC Building Models, Structural Engineering International, 29, 150-159.
- Günaydın, M., Genç, A., F., Karahasan, O., Ş., Altunışık, A., C., Okur, F., Y. ve Adanur, S., 2020. Nonlinear Dynamic Response of a RC Frame for Different Structural Conditions Including the Effect of FE Model Updating, International Journal of Civil Engineering, 18, 551-567.
- Güneş, S. ve Anıl, Ö., 2017. Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir.
- Gürel, F., 2018. Çok Katlı Ahşap Yapıların Deprem Yüğü Altında Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hiraoğlu, E., 2007. Ahşap ve Çelik Makas Sistemlerin Malzeme ve Sistem Özelliklerinin İncelenmesi, Bir Örnek Yapı Üzerinde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hökelekli, E., Ercan, E., Nohutcu, H., Demir, A. ve Gençel, O., 2017. Tarihi Bir Camiinin Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon.
- Hüsem, M., Nasery, M., M., Okur, F., Y. ve Altunışık, A., C., 2018. Experimental Evaluation of Damage Effect on Dynamic Characteristics of Concrete Encased Composite Column-Beam Connections, Engineering Failure Analysis, 91, 129-150.
- Işık, B., 2006. Seismic Rehabilitation Study in Turkey for Existing Earthen Construction, Sunum, Getty Conservation Institute, USA.
- Jacobsen, N., J., Andersen, P., and Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F., Y., Altunışık, A., C. ve Aslan, M., 2019. Free Vibrations of Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks: Numerical Model and Experimental Validation, International Journal of Mechanical Sciences, 159, 30-42.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F., Y., Altunışık, A., C. ve Aslan, M., 2020. Damage Localization in Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks Based on Vibration Measurements, Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering.
- Kalkan, E., Altunışık, A. C., Karahasan, O. Ş., Okur, F. Y. ve Özgün, K., 2019. Ambient Vibration Test and FE Modelling of Historical Timber Mosques after Restoration, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 173, 12, 956-968.
- Kaplan, B., 2013. Geleneksel Osmanlı Mimarisine Sahip Ahşap Yalılarının Deprem Kuvvetleri Altında İncelenmesi ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karabulut, C., 2000. Ahşap Birleşim Detayları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karaesmen, E., 1996. Deprem ve Sonrası, Türkiye Mühendisler Birliği, Ankara.
- Köylü, A., 2008. Geleneksel Yapıların Yatay Yükler Etkisinde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kudu, F. N., Bayraktar, A., Bakır, P. G., Türker, T. ve Altunışık, A. C., 2014. Ambient Vibration Testing of Berta Highway Bridge with Post-Tension Tendons, Steel and Composite Structures, 16, 23-46.
- Langenbach, R., 2000. Intuition From The Past: What Can We Learn From Traditional Construction, Keynote Address, International Conference: Earthquake-Safe: Lessons To Be Learned From Traditional Construction, İstanbul, Türkiye.
- Liu, G., R. and Quek, S., S., 2003. The Finite Element Method: Practical Course, Ed: Liu G.R. and Quek S.S. Butterworth Heinemann, Oxford, 1-11.
- Lourenço, P., B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Delft, Hollanda.
- Lourenço, P., B., 2000. Current Experimental and Numerical Issues in Masonry Research, Universidade do Minho, Portugal.
- Meng, X., Li, T. ve Yang, Q., 2019. Experimental Study on the Seismic Mechanism of a Full-Scale Traditional Chinese Timber Structure, Engineering Structures, 180, 484-493.

- Nasery, M. M., Hüsem, M., Okur, F. Y. ve Altunışık, A. C., 2020. Damage Effect on Experimental Modal Parameters of Haunch Strengthened Concrete-Encased Composite Column-Beam Connections, International Journal of Damage Mechanics, 29, 297-334.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark
- Örs, Y. ve Keskin H., 2011. Ağaç Malzeme Bilgisi, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Öztunali, İ., 1975. Yapı Ahşabı ve Yapılarda Kullanma Esasları, Bayındırlık Bakanlığı, ANKARA.
- PEER. (Pacific Earthquake Engineering Research Centre). [last accessed: 01.02.2020; <https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/151438/searches/139822/edit>]
- Pınar, E., 2018. Doğu Karadeniz Kırsal Mimarisinde Taşıyıcı Sistem Detaylarının İrdelenmesi, International Journal of Social Sciences, 6, APG Özel Sayısı.
- Poletti, E. ve Vasconcelos, G., 2015. Seismic Behaviour of Traditional Timber Frame Walls: Experimental Results on Unreinforced Walls, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 885–916.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- SAP2000, 2016. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Adanur, S. ve Akköse, M., 2010. Modal Parameter Identification of a Prototype Arch Dam Using Enhanced Frequency Domain Decomposition and Stochastic Subspace Identification Techniques, Journal of Testing and Evaluation, 38, 5.
- Sevim, B., Bayraktar, A. ve Altunışık, A., C., 2011. Finite Element Model Calibration of Berke Arch Dam Using Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, 17, 1065-1079.
- Sevim, B., Altunışık, A., C. ve Bayraktar, A., 2012a. Earthquake Behavior of Berke Arch Dam Using Ambient Vibration Test Results, Journal of Performance of Constructed Facilities, 26, 780-792.
- Sevim, B., Altunışık, A., C. ve Bayraktar, A., 2012b. Experimental Evaluation of Crack Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam Using Ambient Vibration Tests, Computers and Concrete, 10, 277-294.

- Sevim, B., Atamturktur, S., Altunışık, A., C. ve Bayraktar, A., 2016. Ambient Vibration Testing and Seismic Behavior of Historical Arch Bridges under Near and Far Fault Ground Motions, Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 241-259.
- Sonderegger, W., Kránitz, K., Bues, T., C., ve Niemz, P., 2015. Aging Effects On Physical and Mechanical Properties of Spruce, Fir and Oak Wood, Journal of Cultural Heritage, 16, 6, 83-88.
- Sunca, F., Okur, F., Y., Altunışık, A., C. ve Kahya, V., 2020. Optimal Sensor Placement for Laminated Composite and Steel Cantilever Beams by the Effective Independence Method, Structural Engineering International, 1-8.
- Szczepański, M., Migdal, W. ve Jankowski, R., 2016. Modal Analysis of Real Timber Frame Houses with Different Insulation Materials, Advances in Science and Technology Research Journal, 10 ,31, 215–221.
- Şahin Güçhan, N., 2007. Observations on Earthquake Resistance of Traditional Timber-Framed Houses in Turkey, Building and Environment, 42, 840–851.
- Şenkal, F., 1996. Konutlarda Dünden Bugüne Ahşap Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- TSE, 1979. TS647 Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TSE.
- Uçak, Ş., Bayraktar, A., Türker, T. ve Osmancıklı, G., 2016. Finite-Element Model Calibration of Historical Masonry Domes Using Operational Modal Testings, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30, 2.
- Uzunoglu, M. M., Emiroğlu, M., Kap, T. ve Yuca, Y., 2009. Ahşap İskelet Sistemlerin DeneySEL ve Nümerik Olarak İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.
- Üner, A., 2006. Düzlem Çerçeve Yapıların Dinamik Yükler Altında Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Vieux-Champagne, F., Sieffert, Y., Grange, S., Belinga Nko'ol, C., Bertrand, E., Duccini, J. C., Faye, C. ve Daudeville, L., 2017. Experimental Analysis of a Shake Table Test of Timber-Framed Structures with Stone and Earth Infill, Earthquake Spectra, 33, 3, 1075–1100.
- Yu, DJ. ve Ren, WX., 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Yücel, G., 2018. Ahşap ve Mimarlık Eğitimi: İstanbul Örneği, Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 1, 2, 62-77.

Zhao, X., Zhang, F., Xue, J. ve Ma, L., 2019. Shaking Table Tests on Seismic Behavior of Ancient Timber Structure Reinforced with CFRP Sheet, Engineering Structures, 197.

Xie, Q., Wang, L., Zhang, L., Hu, W. ve Zhou, T., 2019. Seismic Behaviour of a Traditional Timber Structure: Shaking Table Tests, Energy Dissipation Mechanism and Damage Assessment Model, Bulletin of Earthquake Engineering, 17, 1689–1714.

URL-1, www.insaatim.com/ahsap-evler-ahsap-malzeme-evler/ 26.09.2020

URL-2, www.rizeningelenekselmimarisi.blogspot.com/2011/08/r-izenin-geleneksel-mimarisi-konut-ve_13.html. 7.10.2020

URL-3, www.bursahayat.com.tr/haber/marmara-depreminin-yiktigi-125-yasindaki-tarihi-konak-yeniden-hayat-buluyor-171754.html. 08.10.2020

URL-4, www.turkiyegazetesi.com.tr/yasam/728935.aspx. 8.10.2020

URL-5, www.serdarkorkut.com/2017/05/09/sonlu-elemanlar-metodu. 29/10/2020

URL-6, www.insapedia.com/sonlu-elemanlar-yontemi-nedir-sinir-sartlari-uygulama-adimlari/. 30.10.2020

URL-7, www.zwickroell.com/tr-tr/construction-materials/asphalt-wood-glass/wood. 12.11.2020

URL-8, <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/accelerometers/8340>. 18.11.2020

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Yılmaz Soyak İlköğretim Okulu ve Cudibey İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini Trabzon Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında “Yüksek Lisans” eğitimine başladı.

