

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YIĞMA KOLON VE KEMERLERİN DOĞAL
FREKANSLARININ BULUNMASI**

Kubilay ÇARKANAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YIĞMA KOLON VE KEMERLERİN DOĞAL
FREKANSLARININ BULUNMASI

Kubilay ÇARKANAT tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT
ALEMDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Barış SEVİM, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serkan SAĞIROĞLU, Üye

Uludağ Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Yığma Kolon ve Kemerlerin Formunun Doğal Frekanslarının Bulunması” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kubilay ÇARKANAT

İmza



Yeğenim Aybüke'ye

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin oluşturulması aşamalarında desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren başta kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR olmak üzere, deneysel ve teorik çalışmalarımda bilgilerini tarafıma aktaran her aşamada desteğini hissettiğim Sayın Doç. Dr. Fatih ALEMDAR hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca çalışmalarımı destekleyen başta yöneticim Sn. İhsan İlkan KOZAN olmak üzere NESTLE ailesine,

Yüksek lisans çalışmalarına katkılarından dolayı değerli meslektaşım Hakan VURMAZ ve kıymetli mimar arkadaşım Neslişah KAHRAMAN'a

Yüksek lisans süresince desteklerini gördüğüm kıymetli dostlarım ve meslektaşlarım Arş. Gör. Sezer ÖZTÜRK ve Y.Müh Beycan YAVUZ'a,

Her daim yanımda olan ve desteğini hissettiğim canım kardeşim Ceren ÇARKANAT, abim Gökhan ÇARKANAT ve beni bu günlere getiren annem Filiz ÇARKANAT ve babam Nuri ÇARKANAT'a,

Kararlarım, çalışmalarım ve başarılarımda her zaman beni destekleyen, hayat enerjim, motivasyon kaynağım ve müstakbel eşim Selin BALTA'ya

sonsuz teşekkür ederim.

Kubilay ÇARKANAT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	. xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	5
2 ANALİZ MODELLEMELERİ	6
2.1 Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi.....	6
2.1.1 Modelleme Türleri.....	7
2.2 Malzeme Özellikleri	8
2.2.1 Harman Tuğlası Özellikleri	8
2.2.2 Silikon Özellikleri	9
2.3 Malzeme Geometrik Özellikleri	9
2.4 Kolon Formlarının Modal Analizleri.....	10
2.4.1 4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi.....	11
2.4.2 4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi.....	12
2.4.3 4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi.....	13
2.4.4 5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi.....	14
2.4.5 5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi.....	15
2.4.6 5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi.....	16
2.5 Kemer Formlarının Modal Analizleri	17
2.5.1 Kemer Formu – 1 Numunesi	18
2.5.2 Kemer Formu – 2 Numunesi	20
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
3.1 Sarsma Tablası Deneyleri	22
3.2 Kemer Formları.....	23
3.3 Kolon Formları Sarsma Tablası Deneyleri	24

3.3.1	4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	24
3.3.2	4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	27
3.3.3	4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	29
3.3.4	5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	31
3.3.5	5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	34
3.3.6	5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	37
3.4	Kemer Formları Sarsma Tablası Deneyleri	39
3.4.1	Kemer Formu-1 Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	39
3.4.2	Kemer Formu-2 Numunesi Sarsma Tabla Deneyi	41
4	MALZEME DENEYİ VERİLERİYLE MODAL ANALİZLER	43
4.1	Silikon Malzeme Analiz Deneyi.....	43
4.2	Modal Analizler	45
4.2.1	4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	45
4.2.2	4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	46
4.2.3	4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	46
4.2.4	5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	47
4.2.5	5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	48
4.2.6	5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi	48
4.2.7	Kemer Formu-1 Numunesi Modal Analizi.....	49
4.2.8	Kemer Formu-1 Numunesi Modal Analizi.....	50
5	SONUÇ	51
	KAYNAKÇA	57



SİMGELİSTESİ

K	Bilinen Sabitler Matrisi
f_b	Darbe Faktörü
E_b	Elastisite Modülü
f	Frekans
Hz	Hertz
S	Kemer Açıklığı
S_w	Kemer Genişliği
kg	Kilogram
γ_{du}	Kütle Yoğunluğu
MPa	Megapascal
m	Metre
mm	Millimetre
N	Newton
μ_b	Poisson Oran
sn	Saniye
D	Vektör Matrisi
R	Yük Vektörleri Matrisi

KISALTMA LİSTESİ

FFT Fast Fourier Transform

M.Ö. Milattan Önce



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Sayısal analizde uygulanan modelleme yöntemleri	7
Şekil 2.2	Harman tuğlası malzeme boyutlandırması	9
Şekil 2.3	Silikon malzeme boyutlandırması	9
Şekil 2.4	Harman tuğlası malzeme ABAQUS tanımlaması	10
Şekil 2.5	Silikon malzeme ABAQUS tanımlaması	10
Şekil 2.6	4 adet tuğla – 1 milimetre silikon modeli.....	11
Şekil 2.7	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	12
Şekil 2.8	4 adet tuğla – 2 milimetre silikon modeli.....	12
Şekil 2.9	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	13
Şekil 2.10	4 adet tuğla – 3 milimetre silikon modeli.....	13
Şekil 2.11	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	14
Şekil 2.12	5 adet tuğla – 1 milimetre silikon modeli.....	14
Şekil 2.13	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	15
Şekil 2.15	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	16
Şekil 2.16	5 adet tuğla – 3 milimetre silikon modeli.....	16
Şekil 2.17	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon ABAQUS modal analizi	17
Şekil 2.18	Kemer Formu-1 geometrisi	18
Şekil 2.19	Kemer Formu-2 geometrisi	18
Şekil 2.20	Kemer Formu-1 modeli	19
Şekil 2.21	Kemer Formu-1 modeli mesnet şartları.....	19
Şekil 2.22	Kemer Formu- 1 ABAQUS modal analizi	20
Şekil 2.23	Kemer Formu-2 modeli	20
Şekil 2.24	Kemer Formu-2 modeli mesnet şartları.....	21
Şekil 2.25	Kemer Formu- 2 ABAQUS modal analizi	21
Şekil 3.1	Tek eksenli sarsma tablası	22
Şekil 3.2	Kemer formları	23
Şekil 3.3	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi	24
Şekil 3.4	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri.....	25
Şekil 3.5	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans deneyi	26
Şekil 3.6	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri.....	26

Şekil 3.7	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi	27
Şekil 3.8	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri.....	28
Şekil 3.9	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans deneyi.....	28
Şekil 3.10	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri	29
Şekil 3.11	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi.....	29
Şekil 3.12	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri.....	30
Şekil 3.13	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans deneyi.....	30
Şekil 3.14	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri	31
Şekil 3.15	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi	31
Şekil 3.16	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi FFT analizi İvme değerleri.....	32
Şekil 3.17	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans deneyi.....	33
Şekil 3.18	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri	33
Şekil 3.19	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi	34
Şekil 3.20	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri.....	35
Şekil 3.21	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans deneyi.....	36
Şekil 3.22	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri	36
Şekil 3.23	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi	37
Şekil 3.24	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri.....	38
Şekil 3.25	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans deneyi.....	38
Şekil 3.26	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri	39
Şekil 3.27	Kemer Formu-1 numunesi sarsma tablası deneyi	40
Şekil 3.28	Kemer Formu-1 doğal frekans analizi.....	40
Şekil 3.29	Kemer Formu-2 numunesi sarsma tablası deneyi	41
Şekil 3.30	Kemer Formu-2 doğal frekans analizi.....	42
Şekil 4.1	Silikon Basınç Deneyi	43

Şekil 4.2	Silikon basınç deneyi gerilme-şekil değiştirme deneysel verileri	44
Şekil 4.3	Silikon basınç deneyi gerilme-şekil değiştirme tayini	44
Şekil 4.4	Modal analiz silikon malzeme tanımlamaları	45
Şekil 4.4	4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans analizi	45
Şekil 4.5	4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans analizi	46
Şekil 4.6	4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans analizi	47
Şekil 4.7	5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans analizi	47
Şekil 4.8	5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans analizi	48
Şekil 4.9	5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans analizi	49
Şekil 4.10	Kemer Formu-1 doğal frekans analizi.....	49
Şekil 4.11	Kemer Formu-2 doğal frekans analizi.....	50



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Harman tuğlası mekanik özellikleri	8
Tablo 5.1	Kolon numuneleri sarsma tablası FFT analiz sonucu değerleri.....	51
Tablo 5.2	Kolon numuneleri ABAQUS modal analizleri doğal frekans değerleri	52
Tablo 5.3	Kolon numuneleri sarsma tablası deneyi doğal frekans değerleri	52
Tablo 5.4	Kolon numuneleri malzeme deneyi verileyle hazırlanan doğal frekans değerleri.....	53
Tablo 5.5	Kolon numuneleri doğal frekans değerleri.....	54
Tablo 5.6	Kolon numuneleri doğal frekans değişim oranları	55
Tablo 5.7	Kemer formları doğal frekans değerleri	55

Yığma Kolon ve Kemerlerin Doğal Frekanslarının Bulunması

Kubilay ÇARKANAT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR

Kemer yapıları duvarlar veya kolonlar arası açıklıkların geçilmesi için eğrisel biçimde tasarlanan yapı elemanlarıdır. Tarihten günümüze kadar yığma yapılarda karşılaştığımız farklı formlarda oluşturulan kemer formları, üzerine gelen yükleri, taşıyıcıyı sütun, kolon veya duvar elemanları vasıtasıyla zemine sağlam bir biçimde aktarmaktadır. Geleneksel süreçlerde yığma yapılarda kapı, pencere gibi açıklıkların geçilmesi kemer formlarıyla karşımıza çıkmaktadır. Kemer yapılarının geliştirilmesiyle birlikte köprü ve su kemerleri gibi geniş açıklıklı yapılar oluşturulmasına olanak sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında yığma yapılarda sıklıkla karşılaştığımız kolon ve kemer formlarının doğal frekans değerlerinin, sarsma tablası deneyleri ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve analizleri için ABAQUS programı kullanılarak, hesaplanması amaçlanmıştır. Sarsma tablasında incelenecek olan deney numunelerinde, 50x50x100 mm boyutlarında harman tuğlası ve tuğla boyutunun 1/50, 2/50 ve 3/50 oranlarında birleştirici malzeme olarak silikon kullanılmıştır. 4 ve 5 adet harman tuğlası ile farklı oranlarda silikon kalınlıkları kullanılarak hazırlanan kolon numuneleri test edilmiş ve deneysel veriler doğrultusunda seçilen silikon kalınlığıyla kemer formu oluşturulmuştur.

Sarsma tablasında belirli bir frekans değerinde, oluşturulan yapı elemanlarının sarsma tablası ve tepe noktaları arasındaki ivme farkları karşılaştırılarak kemer formu için en uygun birleşim oranı tayin edilmiştir. Sarsma tablası deneyleri sonucunda hazırlanan kemer formunun, tanımlanan boyut ve malzeme özellikleriyle birlikte ABAQUS programında sonlu elemanlar metodu ile modellenerek, doğal frekans değeri hesaplanmış ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kemer yapıları, yığma yapılar, doğal frekans, sonlu elmanlar analizi



Determining the Natural Frequencies of Masonry Columns and Arches

Kubilay ÇARKANAT

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Zeynep FIRAT ALEMDAR

Arch structures are structural elements designed in a curvilinear shape to pass gaps between columns, walls. Installation of arch forms in different shapes, which we have encountered in masonry buildings from history to the present, transfer the loads through the supporting pillars, columns or wall elements to the floor in a safe way. In traditional periods, it is possible to pass through the openings of masonry structures such as doors and windows with arch forms. With the development of arch structures, widely spaced structures such as bridges and aqueducts are made possible. Within the scope of this study, it is aimed to calculate the natural frequency values of arch forms and columns, which we frequently encounter in masonry structures, by using the ABAQUS program for three-dimensional finite element modal and analyses and making shaking table experiments. In the test samples to be examined on the shaking table, clay brick with dimensions of 50x50x100 mm and silicone as a binding material in the ratios of 1/50, 2/50 and 3/50 in brick thickness were used. Column samples prepared using 4 and 5 clay bricks and different silicone thicknesses were tested and an arch form was created with the silicone thickness selected according to the experimental data. The most

appropriate combination ratio for the arch form was determined by comparing the acceleration differences between the shaking table and the top of the columns at a certain frequency value in the shaking table. The arch form prepared as a result of the shaking table experiments was modeled with the finite element method in the ABAQUS program, along with the defined dimensions and material properties, and its natural frequency value was calculated and compared with the experimental data.

Keywords: Arch structures, masonry structures, natural frequency, finite element analysis



Yığma yapılar geçmişten bugüne ülkemizde ve dünyada sıklıkla karşılaştığımız yapı türlerindendir. Farklı taş türlerinin farklı özellikteki harç malzemelerle üst üste koyularak inşa edilen bu yapılar uzun yıllar boyunca ayakta kalarak insanlığa hizmet etmektedir. Yığma yapıların ise en gösterişli ve büyük yapıları kemer köprüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Kemer köprüler, su kemerleri gibi yapılar başta olmak üzere birçok tarihi yapıda geniş açıklıkların geçilmesine olanak veren kemer formları karşımıza çıkmaktadır.

Kemer formları dairesel bir geometriye sahip olmakla birlikte taşların birbiri üstüne belli açılarda koyularak ve harç malzemeleriyle birleştirilmesi suretiyle inşa edilen yapı elemanlarıdır. Kemer formları üzerlerine gelen yükleri dairesel yapısı sayesinde kolon, sütun perde gibi elemanlara aktaran yapılardır. Farklı genişlik, derinlik ve yükseklikte oluşturulan kemer formları başta köprü yapıları olmak üzere kapı ve pencere gibi açıklıkların geçilmesine olanak sağlamıştır.

Kemer ve kolon formlarının doğal frekanslarının bulunabilmesi için yapılan bu çalışmada harman tuğlası kemer formunu oluşturacak ana malzeme olarak seçilmiştir. Harman tuğlalarının birbirine kenetlenmesi için kullanılacak harç malzemesi ise silikon olarak seçilmiştir. Tayin edilen malzemelerle birlikte kolon ve kemer formlarının sarsma tablası deneyleri yapılarak oluşturulan elemanlarının ivme değerleri elde edilerek karşılaştırılabilir veriler ölçülebilmektedir.

Teorik olarak yapılan çalışmalarda ise sonlu elemanlar metodu kullanılarak ABAQUS programında modal analiz verileri elde edilebilmektedir. Sarsma tablası ve modal analiz verilerinin karşılaştırması sonucunda kemer formlarının doğal frekans değerleri ölçülebilmektedir.

Literatürde irdelenen çalışmalarda kemer formlarının dinamik verileri farklı analiz yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmaların genelinde kemer köprü formlarının bir bütün olarak değerlendirildiğini görmekteyiz. Sarsma tablasında da kullanılan ivme ölçerlerle dinamik değerlerin bulunması ve sonlu elemanlar

metoduyla teorik verilerin karşılaştırması kemer formlarının dinamik verilerinin bulunmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da sarsma tablası ve ABAQUS sonlu elemanlar metodu kullanılarak modal analizlerden elde edilen teorik veriler karşılaştırılmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A., C., Kemer formlarının sıklıkla kullanıldığı tarihi köprülerle ilgili 2007 yılında yapılan bildiride, Trabzon ili içerisinde yer alan tarihi Şinik Köprüsü'nün doğal frekans analizleri ivme ölçerler ile yapılmış ve ANSYS sonlu elemanlar programında üç boyutlu olarak modellenip, köprünün deprem davranışı araştırılmıştır. Köprünün dinamik analiz verilerinin, iyileştirilmiş modal analiz verileriyle karşılaştırılması sonucunda köprünün mevcut durumu hakkında veriler elde edilebilecek üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Elde edilen verilerde köprünün doğal frekans değerleri, teorik çalışmada 12.265 Hz, deneysel çalışmada ise 14.220 Hz olarak ölçülmüştür. Deneysel verilerin teorik verilerden daha büyük olduğu görülmüştür [1].

Barros,R., Dick,A., Cesar M., Kemer köprülerin doğal frekanslarının bulunması amacıyla 2021 yılında Portekiz'de yer alan yirmi sekiz adet köprü üzerinde ivme ölçerler ile deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler neticesinde köprülerin ortalama doğal frekans değerleri 14 Hz (5-25 Hz) olarak saptanmıştır. Elde edilen veriler akabinde oluşturulan, kemer açıklıkları (S) ve genişlikleri (Sw) arasındaki bağıntıdan, $f=14.735 (S/Sw)^{(-0.429)}$ formülü ile yığma kemer köprülerin en yakın doğal frekans değerlerinin elde edilmesinde olanak sağladığını bildirmişlerdir [2].

Nichols, J., Tomor, A., Benedetti, A., Nichols, J. tarafından yapılan çalışmada, İtalya Parma şehrinde bulunan yığma kemer köprüde yapılan analizlerde, ivme ölçerler yardımıyla kemer köprülerin doğal frekansları Fast Fourier Transform (FFT) yöntemiyle ölçülmüştür. Aynı köprünün sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda incelenen yapıların FFT yöntemiyle doğal frekanslarının bulunabileceği sonucuna varılmıştır. Elde edilen verilerde köprünün ölçülebilen doğal frekans değerlerinin 17.5 Hz ile 20.0 Hz aralığında olduğu gözlemlenmiştir [3].

Toket, S., Ünay, A. İ. Kemer Köprülerin modellemesi için 2004 yılında yapılan çalışmada, tarihi taş köprülerin modal analizlerinin yapılması için en uygun analiz yönteminin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilebileceği belirtilmiştir. Kemer davranışının anlaşılması açısından en uygun örneklerden biri olan Mostar Köprüsü'nün portatif modeli oluşturularak analiz yapılmıştır. SAP2000 Sonlu elemanlar metoduyla hazırlanan modal analizinde kemer köprülerin mesnet ve yapının zayıf noktaları dikkate alınarak doğrusal olmayan malzeme tanımları yapılarak daha ayrıntılı veriler elde edileceği belirtilmiştir. İyileştirilmiş analizde köprüye ait periyot değerinin 0.1059'dan 0.1188 değerine yükseldiği sonucu elde edilmiştir [4].

Yılmaz, E. G., Sayın, E., Özmen, A., Kütahya ilinde yer alan kemer formuyla 1460 yılında yığma yapı olarak inşa edilmiş Murat Bey Köprüsü'nün SAP2000 programıyla makro modelleme yapılarak sonlu elemanlar metoduyla yapısal davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmada köprünün doğal frekans değeri, mod şekilleri ve periyotları bulunmuştur. Dinamik analizlerde %5 sönüm oranı dikkate alınarak, 1998 Adana, 2003 Bingöl, 2011 Van ve 2020 Elazığ depremlerine ait sismik veriler analiz değerlendirmesine alınmıştır. Yapılan çalışma neticesinde köprüye ait dinamik değerler elde edilmiştir [5].

Kurt, M., 2016 yılında yüksek lisans tezi olarak yapılan çalışmada, Ordu ilinde bulunan tek açıklıklı Sarpdere Kemer köprüsünün inceleme çalışmaları yapılmıştır. Çalışma içerisinde Köprünün 1/12,5 oranında ölçekli modellemesi yapılmış, SOLIDWORKS programında 3 boyutlu olarak sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda tek eksenli ivme ölçerler kullanılarak sistemin dinamik karakteristik özellikleri elde edilmiştir. Deneysel ve teorik olarak yapılan çalışmalar neticesinde yığma taş kemer köprüye ait frekans değerleri elde edilmiştir. Deneysel ve teorik hesaplanan verilerde, teorik doğal frekans değeri 10.208 Hz, deneysel doğal frekans değeri ise 9.646 Hz olarak elde edilmiştir. Doğal frekans değerleri arasındaki fark %5,8 olduğu sonucuna varılmıştır [6].

Ural, A., Kemer tipindeki taş yığma köprülerin sonlu eleman metoduyla analizi için yapılan çalışmada Trabzon iline bağlı Coşandere köprüsü incelenmiştir. Köprünün kendi ağırlığı altında yapılan çalışma neticesinde köprüye ait dinamik veriler elde

edilebilmiştir. Ölü yükler etkisindeki köprünün maksimum gerilme noktaları tespit edilmiştir [7].

Çoruhlu, B., Tarihi taş kemer köprülerin doğal frekanslarının belirlenmesi için boyutlara bağlı yaklaşık hesabı için çoklu Regresyon Yöntemi kullanılarak köprülerin doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan 30 farklı tek açıklıklı taş kemer köprüye ait doğal frekans değerleri ölçülmüş, 6.2- 50 Hz değerleri arasında değişen frekans değerleri bulunmuştur [8].

Alaboz, M., Ülkemizde yapılan bir diğer çalışmada ise Marmara Bölgesi'nde yer alan Mimar Sinan Köprüleri incelenmiş, köprüde oluşan hasarlara yol açan durumlar ve uygun onarım-koruma yöntemleri araştırılmıştır. İncelenen köprülerin kemer formlarının modal analizleri yapılarak köprüye etkileyen dinamik kuvvetler irdelenmiştir [9].

Rafiee, A., Vinches, M. ve Bohatier, C., Kemer formlarının sismik davranışlarının incelenmesi adına yapılan bir diğer çalışmada kemer formunun düzgün olmayan temas dinamiği metoduyla değerlendirilmesi yapılmıştır. Kemer formunun harçlı ve harçsız oluşturulan modal analizler incelendiğinde kemer formlarının karşılaştırılabilir dinamik verileri elde edilmiştir [10].

1.2 Tezin Amacı

Yapılan çalışmanın amacı sarsma tablası deneyleri ve sonlu elmanlar yöntemi kullanılarak, tarihi yapılarda geniş açıklıkların inşaatına olanak sağlayan farklı kolon ve kemer formlarının doğal frekanslarının deneysel ve teorik olarak karşılaştırılmasıdır.

Belirli boyut ve tasarım kriterleri gözetilerek, harman tuğlası ve silikon malzemelerle kolon ve kemer formları oluşturulmuştur. İlk olarak farklı kolon boyutlarında, farklı oranlarda kullanılan silikon kalınlıklarıyla referans bir çalışma yapılmıştır. Kolon numunelerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle kemer formunda silikon kalınlığının etkisinin minimum ölçekte sistemin bütününe etki etmesi hedeflenmiştir.

Tayin edilen silikon kalınlığıyla kemer formları sarsma tablası deney sonuçları ve ABAQUS programında üç boyutlu olarak modellenerek doğal frekans analizleri

neticesinde kullanıcılar için karşılaştırılabilir doğal frekanslar değerlerinin bulunması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılan çalışmayla birlikte kemer formlarının farklı boyut ve özellikteki tuğla ve dolgu malzemeleri ile doğal frekans değerlerinin tespiti ve yapısal davranış şekilleri hakkında karşılaştırılabilir veriler elde edilmektedir. Kemer formları ve referans olarak kullanılacak kolon numuneleri, harman tuğlaları ve silikon bağlantıları kullanılarak hazırlanmıştır. Sarsma tablası deneyleri ve ABAQUS programı modellemeleriyle elde edile doğal frekans sonuçları karşılaştırılabilmektedir. Sonlu elemanlar metoduyla hazırlanan modal analiz verilerinin aynı ölçekte yapılan deneysel çalışmalarda elde edilecek verilerin karşılaştırılması istenen dinamik verilerin tutarlılığı açısından önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında kolon ve kemer formlarının dinamik verileri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

ANALİZ MODELLEMELERİ

2.1 Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi

Yapıların sayısal analizlerinde istenilen dinamik değerlere ulaşılabilmesi adına sonlu elemanlar modelleme yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Analiz yapının bütününe veya belirli yapısal elemanların matematiksel olarak modellenmesiyle başlamaktadır. Sonlu elemanlar modellemesinde yapı veya yapı elemanları, analizin amacına uygun olacak şekilde küçük parçalara ayrılır. Yapıyı oluşturan elemanları, geometrik özellikleri, mesnet noktaları, etki eden yükler, birleşim noktalarının özellikleri ve serbestlik dereceleri tanımlanır. Karmaşık özellikler gösteren yapı ve yapı elemanlarının bu yöntemle birlikte spesifik noktalardaki davranışları belirlenebilmektedir. Modelleme yapılırken tanımlamaların doğru yapılması, gerçeğe yakın davranışların gözlemlenebilmesi adına, basitleştirilmiş yalın bir modelleme yapılması gerekmektedir. Modellemede istenen verileri elde edebilmek için malzemelerin mekanik özelliklerin doğru bir biçimde belirlenmesi ve uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir [11].

Sonlu elemanlar analiz yönteminde yapısal sistemler temelde aşağıda gösterilen matris formuna dönüştürülmektedir.

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (2.1)$$

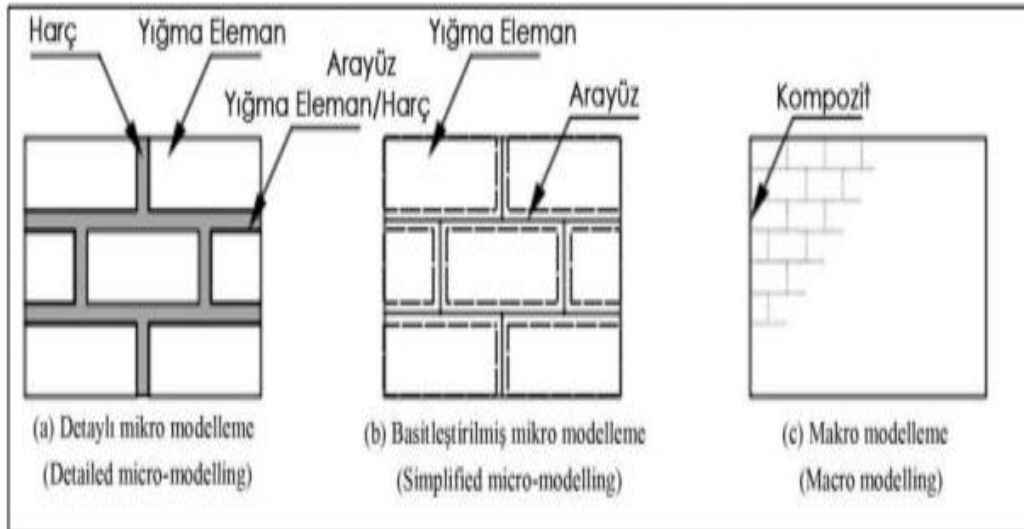
İletilen matris formülünde düğüm noktalarının bilinmeyen değerlerinin ifade edildiği vektör matrisi $[D]$, bilinen yük vektörlerinin matrisi $[R]$, bilinen sabitler matrisi ise $[K]$ olacak şekilde gösterilmiştir. Burada ifade edilen isimlendirmelerde sonlu elemanlar analizine konu olacak sınır şartları R , sistemin malzeme özellikleri ise K , aranan düğüm noktalarının verileri (gerilme, kuvvet, moment vb.) D matrisinde gösterilmektedir [11].

2.1.1 Modelleme Türleri

Yığma yapılarda dinamik analizlerin yapılması için modelleme teknikleri, ayrıntılı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak 3 ana başlık altında toplanmaktadır [12,13]:

- a. Ayrıntılı Mikro Modelleme:** Yapıyı oluşturan malzemeler (taş, tuğla, harç malzemeleri vb.) birbirlerinden bağımsız olacak şekilde tanımlanmaktadır. Malzemelerin mekanik özellikleri, Elastisite modülü, Poisson oranı gibi değerler ayrı ayrı modellenir. Bu şekilde gerçeğe yakın detaylı analizler yapılabilmektedir.
- b. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme:** Yapıyı oluşturan malzemeler, harç tabakasının yarısı kadar büyütülerek, ana malzemeler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılacak şekilde yapılan modellemedir.
- c. Makro Modelleme:** Yapıyı oluşturan malzemeler, taş tuğla ve birleştirici malzeme olarak kullanılan harç arasında bir ayrım olmaksızın homojen bir bütünlük sağladığı kabul edilerek modelleme yapılır. Mikro modellemelere göre daha kısa sürelerde analiz sonuçlarına ulaşılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda da mikro modellemelerde olduğu gibi gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Yukarıda detayları iletilen modelleme türleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sayısal analizde uygulanan modelleme yöntemleri

2.2 Malzeme Özellikleri

Tarihsel süreçlerde geçmişten günümüze kadar gelen yığma yapılar incelendiğinde, ana taşıyıcı eleman olarak doğal taşların kullanıldığını gözlemlemekteyiz. Farklı geometri ve özellikteki taşların birbiriyle bir bütün halinde hareket edebilmesi için harç malzemeleri kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılacak malzemeler harman tuğlası ve birleştirici unsur olan harç malzemesi silikon olarak seçilmiştir.

2.2.1 Harman Tuğlası Özellikleri

Harman tuğlası Türk Standartlarında belirtildiği üzere kil veya killi toprağın yüksek sıcaklıkta pişirilmesi neticesinde elde edilen kâgir birim olarak açıklanmaktadır. [14].

Yığma yapılarda kullanılan harman tuğlasının özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 2020 yılında yapılan deneysel analiz çalışmaları sonucunda, harman tuğlasına ait Elastisite modülü, Poisson oranı ve Young modülü verileri elde edilmiştir [15].

Tablo 2.1 Harman tuğlası mekanik özellikleri

Özellik	Deneysel Çalışma	Fabrika Üretim Verileri
Özgül Ağırlık γ_{du} (kg/m ³)	2200	2310
Darbe Faktörü f_b (N/mm ²)	87.9	75
Elastisite Modülü E_b (N/mm ²)	32470	≤ 34000
Poisson Oranı μ_b (/)	0.26	0.3-0.5

Yaptığımız çalışma kapsamında harman tuğla tanımlamalarında kullanılacak Kütle Yoğunluğu: 2310 kg/m³, Poisson Oranı: 0.3, Elastisite Modülü: 34000 N/mm² olarak tanımlanmıştır.

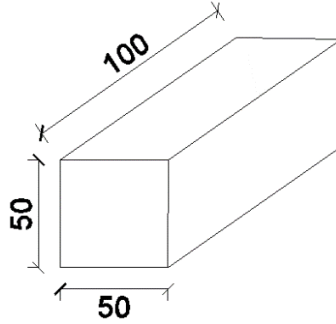
2.2.2 Silikon Özellikleri

Harman tuğlalarının birleşiminde kullanılacak olan malzeme silikon olarak seçilmiştir. Silikonun mekanik özellikleri 2016 yılında silikon malzemelerin özelliklerinin araştırmasını konu alan çalışmada, silikon malzemelerinin Kütle yoğunluğu 1040 kg/m^3 , Poisson Oranı: 0.3, Elastisite modülü ise 1 N/mm^2 olarak dikkate alınmıştır [16].

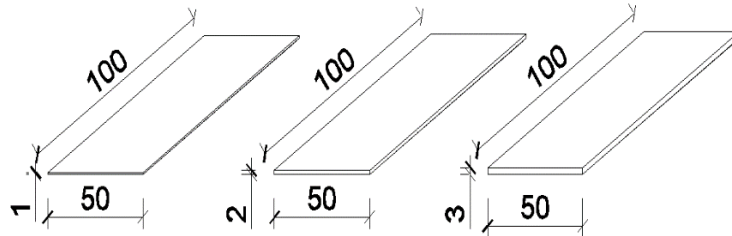
Çalışmamız kapsamında silikon malzemelerin tanımlanmasında bu değerler dikkate alınarak modal analiz verisi olarak kullanılmıştır.

2.3 Malzeme Geometrik Özellikleri

Yapı taşıyıcı elemanların oluşturulmasında öncelikli olarak harman tuğlalarının ve silikon malzeme kalınlıkları belirlenmiştir. Harman tuğlalarının boyutlandırması $50 \times 50 \times 100$ milimetre olacak şekilde yapılmıştır. Birleştirici malzeme olarak kullanılan silikon ise harman tuğlası boyutları esas alınarak 1/50, 2/50 ve 3/50 oranlarında olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu şekilde 1 mm, 2 mm ve 3 mm olacak şekilde silikon kalınlıkları modal analizde kullanılmıştır.



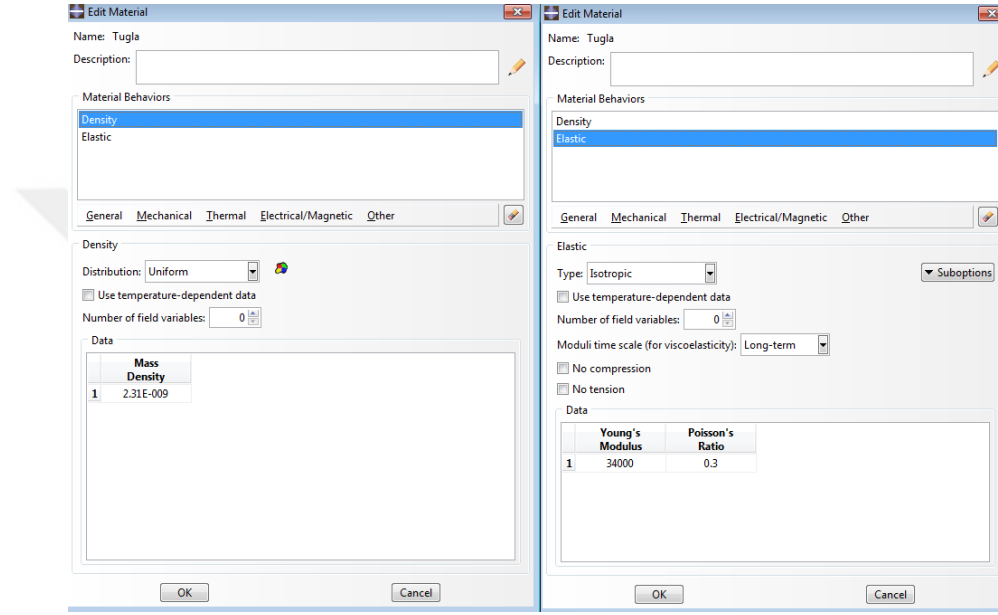
Şekil 2.2 Harman tuğlası malzeme boyutlandırması



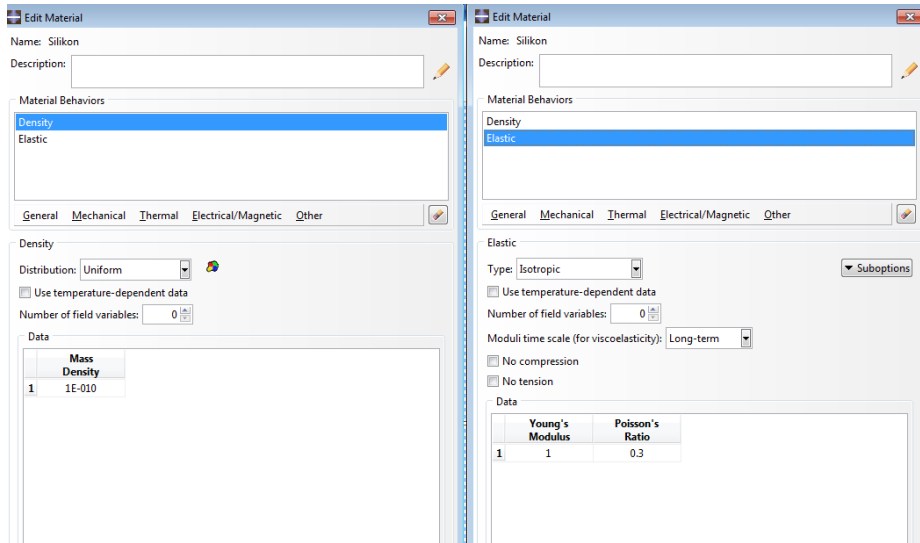
Şekil 2.3 Silikon malzeme boyutlandırması

2.4 Kolon Formlarının Modal Analizleri

Kemer formalarının modellenmesi açısından ideal silikon kalınlığının belirlenmesinde, kolon formlarının farklı silikon kalınlıklarıyla birbirine bağlanması sonucunda elde edilen analiz verileri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile ABAQUS programı kullanılarak kolon formlarının modellenmesi yapılmıştır. Malzemelerin tanımları için Bölüm 2.2’de belirtilen malzeme özellikleri aşağıdaki şekilde programda dikkate alınmıştır.



Şekil 2.4 Harman tuğlası malzeme ABAQUS tanımlaması

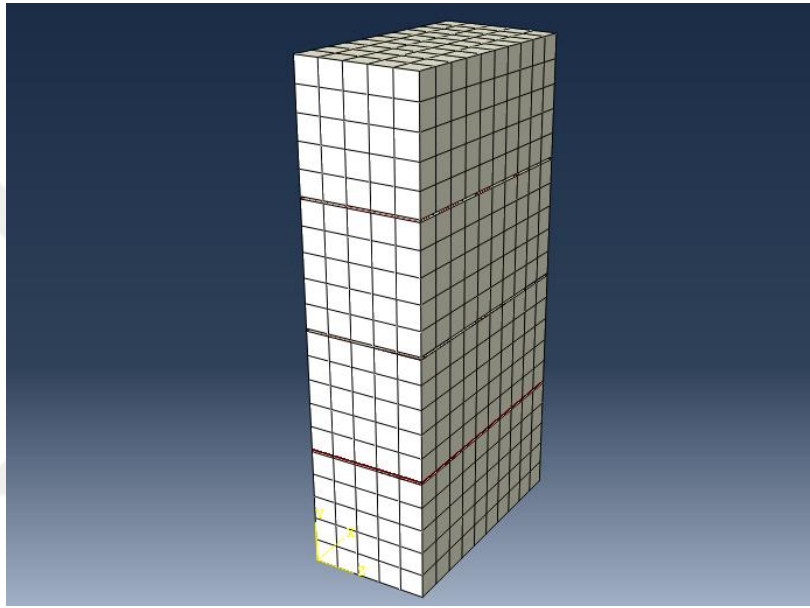


Şekil 2.5 Silikon malzeme ABAQUS tanımlaması

Tanımlanan malzeme özellikleriyle birlikte 6 farklı kombinasyonda kolon numunelerin geometrileri oluşturulmuştur. 4 adet tuğla 1 mm, 2 mm, 3 mm silikon kalınlığı ve 5 adet tuğla 1 mm, 2 mm, 3 mm silikon kalınlığı kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

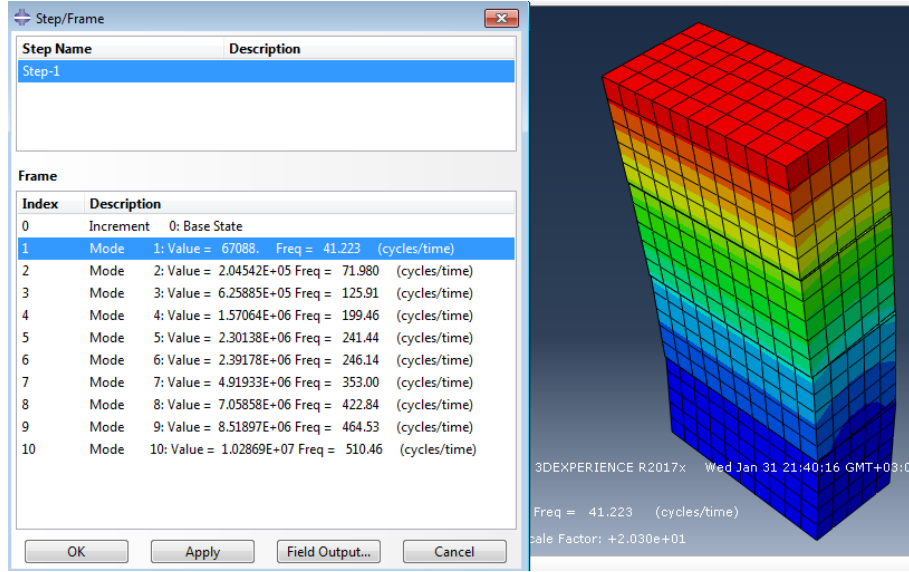
2.4.1 4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi

Malzeme özellikleri ve boyutları tanımlanan kolon numunesi, 4 adet tuğla ve 1 mm kalınlığında silikon katmanı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli ile oluşturulan kolon numunesi Şekil 2.6 da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 4 adet tuğla – 1 milimetre silikon modeli

Oluşturulan modelde tuğla ve silikon malzemelerin her bir yüzeyi tek tek tanımlanarak “Surface to Surface” olacak şekilde birbirlerine bağlantısı sağlanmaktadır. Numuneler zemine ankastre oturacak şekilde mesnetlenmektedir. Kolon numunesinin Modal analizi gerçekleştirilerek kolona ait modal değerler elde edilmiş ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

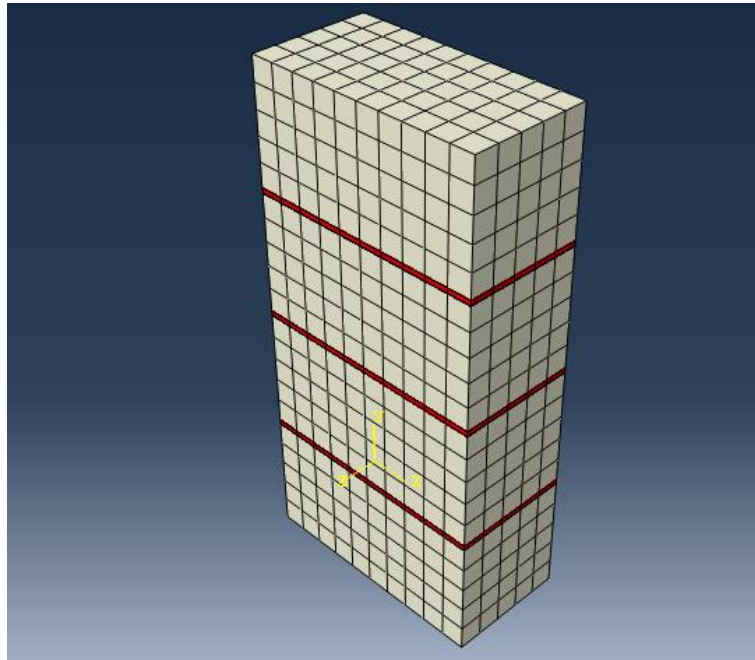


Şekil 2.7 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

Kolon numuneye ait doğal frekans değeri 41.23 Hz olarak bulunmuştur.

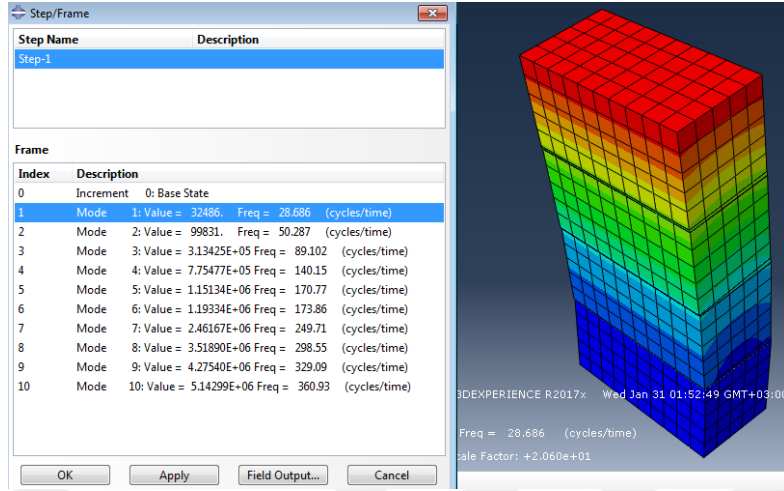
2.4.2 4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi

Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen bir diğer kolon numunesinde silikon kalınlığı 2 milimetre olarak tayin edilerek sonlu elemanlar yöntemiyle modellemesi yapılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 4 adet tuğla – 2 milimetre silikon modeli

Mesnet şartları ankastre olarak tanımlanan kolon numune analizinde, etkin mod şekilleri bulunmuş ve doğal frekans değeri elde edilmiştir (Şekil 2.9).

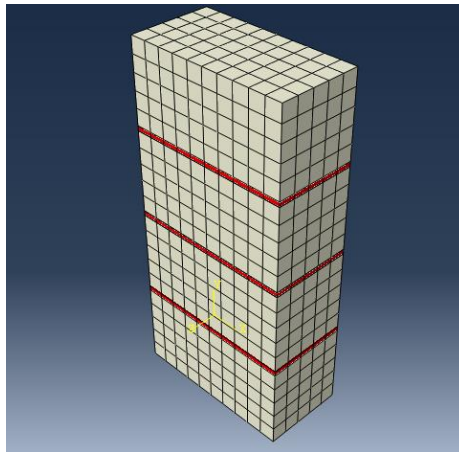


Şekil 2.9 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

Yapılan analiz neticesinde 4 adet tuğlanın, 2 milimetre kalınlığındaki silikon kullanılarak oluşturulan kolon numunenin doğal frekans değerinin 28.686 Hz olduğu görülmüştür.

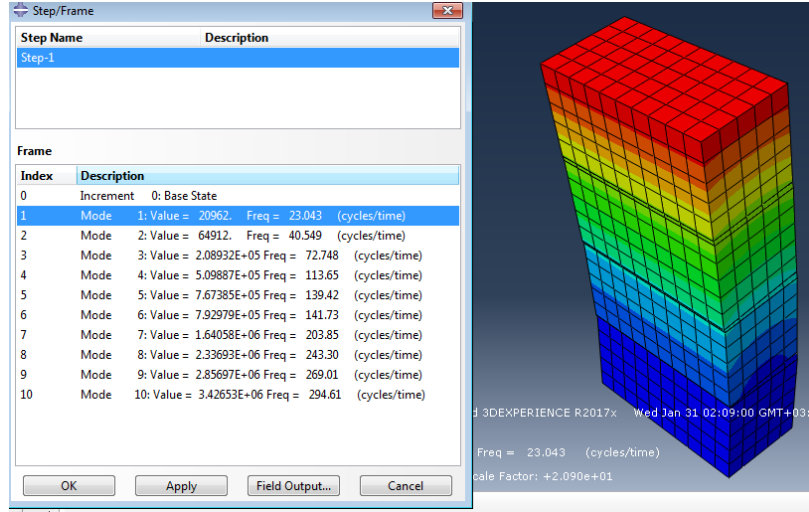
2.4.3 4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi

4 adet tuğla kullanılarak hazırlanan bir diğer numunede silikon kalınlığı 3 mm olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 2.10). Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çözümde modal analiz verileri elde edilmiştir.



Şekil 2.10 4 adet tuğla – 3 milimetre silikon modeli

Modal analiz sonucunda yapısal elemanın modal değerlerine ulaşılmış, doğal frekans değeri elde edilmiştir.

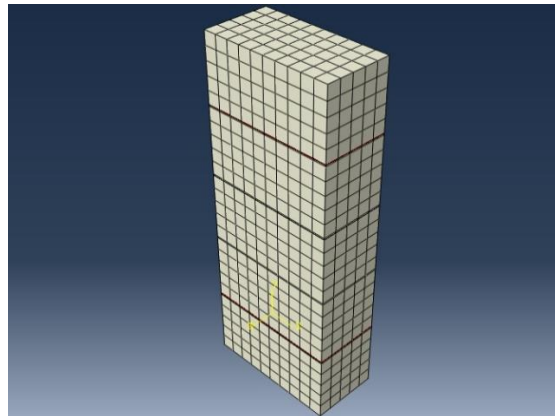


Şekil 2.11 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

Yapılan analiz sonucunda 4 adet harman tuğlası ve 3 mm kalınlıkta silikon ile hazırlanan kolon numunesinde 1. moda ait doğal frekans değerinin 23.043 Hz olarak elde edilmiştir. (Şekil 2.11).

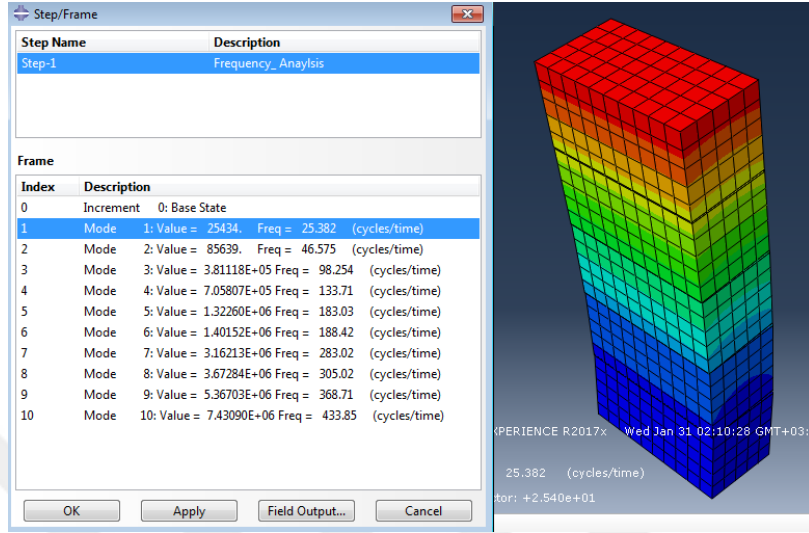
2.4.4 5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi

Yükseklik artışının yığma yapılarıdaki değişiminin anlaşılabilmesi adına kolon numuneleri harman tuğlası adedi arttırılmıştır. 5 adet tuğlanın kullanıldığı kolon numuneleri sonlu elemanlar modeliyle modellenmiştir (Şekil 2.12). 1 milimetre olarak seçilen silikon kalınlığıyla modal analizi yapılmıştır.



Şekil 2.12 5 adet tuğla – 1 milimetre silikon modeli

Diğer analizlerde olduğu gibi karşılaştırılabilir veriler elde edebilmek amacıyla kolon numunenin mesnet şartları ankastre olarak tanımlanmış, harman tuğlası ve silikon malzemenin birbirine “Surface to Surface” komutuyla bağlantıları sağlanmıştır.

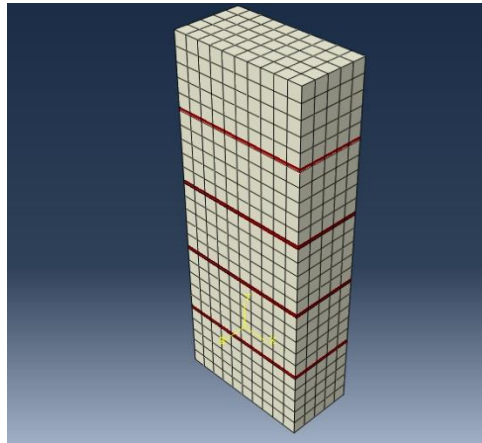


Şekil 2.13 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

Analiz verileri sonucunda 5 adet tuğla ve 1 mm silikon numunenin mod değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.13’de görüleceği üzere kolon numunesinin doğal frekans değeri 25.382 Hz olarak bulunmuştur.

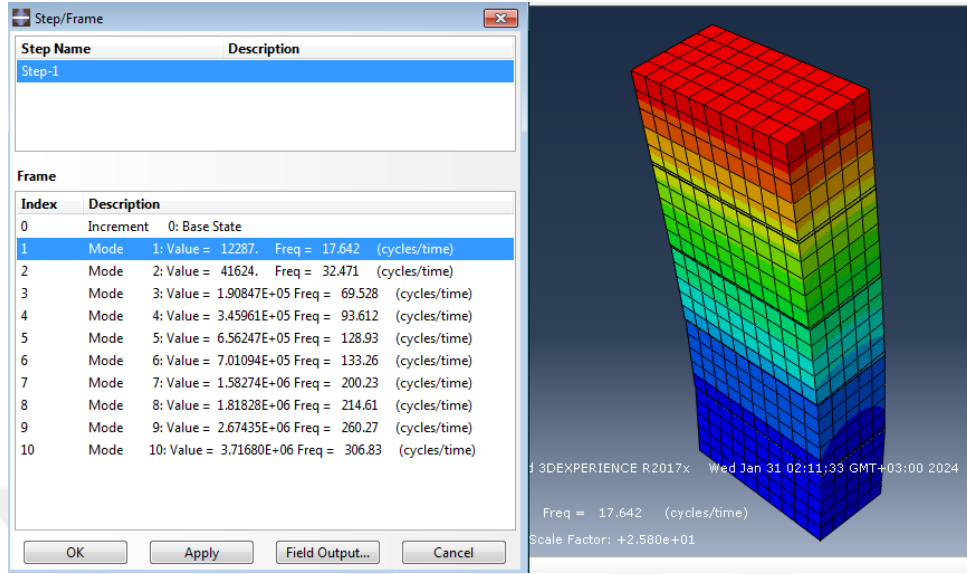
2.4.5 5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi

5 adet tuğla kullanılan numunelerde de farklı silikon kalınlıklarında davranışın gözlemlenebilmesi için 2 milimetre kalınlıkta silikon kullanılarak kolon modellemesi yapılmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 5 adet tuğla – 2 milimetre silikon modeli

Diğer analiz modellerinde kullanılan ankastre mesnet ve surface to surface tanımlama yöntemleri ilgili numune için de kullanılmaktadır.

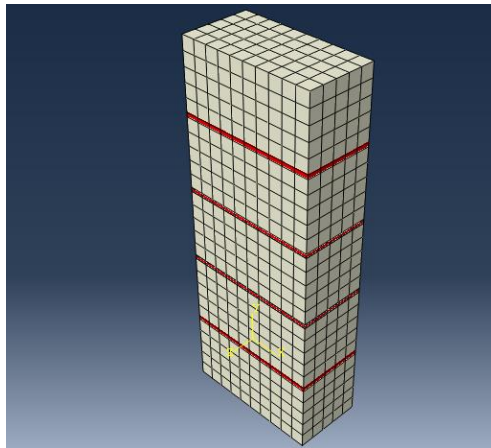


Şekil 2.15 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

Analiz verileri sonucunda 5 adet harman tuğlası ve 2 mm silikon malzemeyle modellenen kolon formunun mod değerleri elde edilmiştir. Analiz sonucuna göre sistemin doğal frekans değeri 17.642 Hz olarak karşımıza çıkmaktadır.

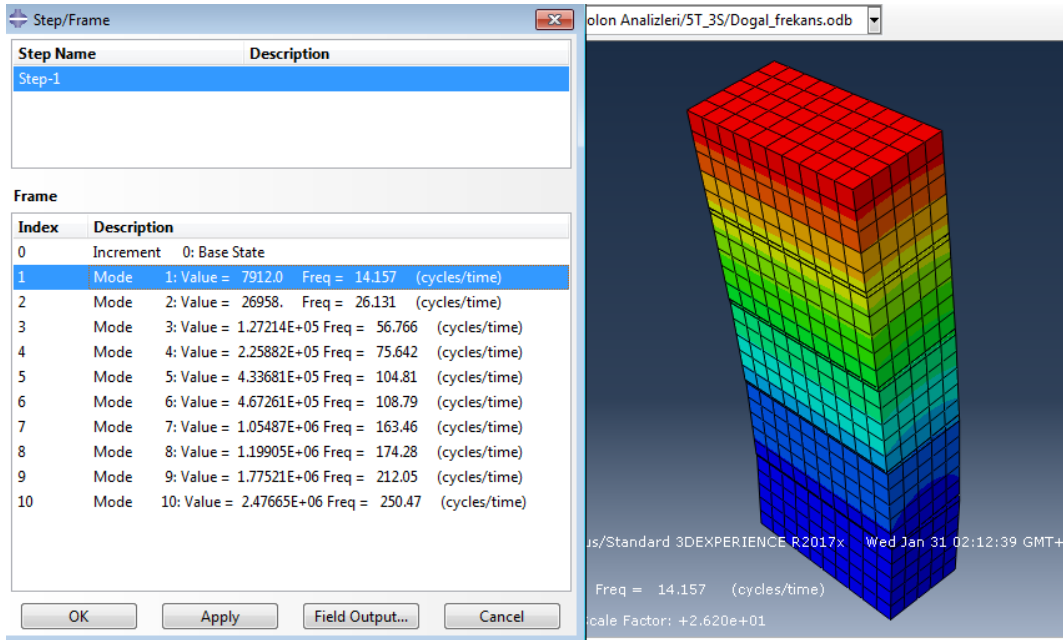
2.4.6 5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi

Kemer formu analizleri için referans olacak bir diğer numune 5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon kullanılarak modellenmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 5 adet tuğla – 3 milimetre silikon modeli

Benzer özelliklerde mesnet şartları ankastre ve silikon- tuğla birleşimleri Surface to surface olarak oluşturulmuştur.

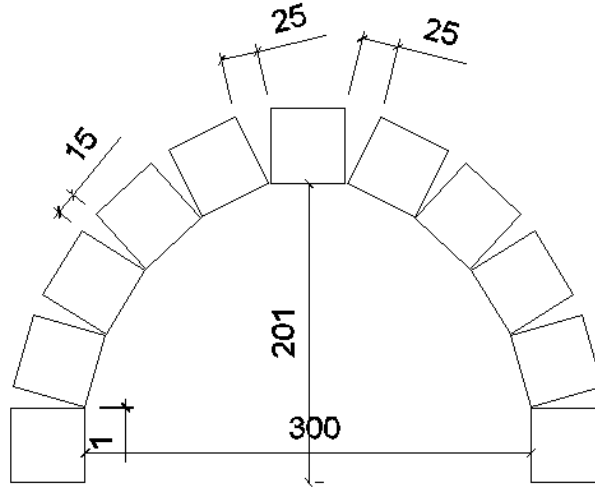


Şekil 2.17 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon ABAQUS modal analizi

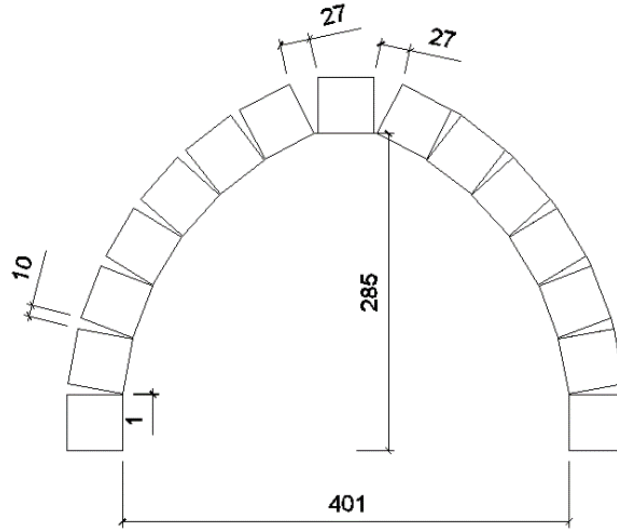
Sonlu elemanlar metodu modal analiz verileri neticesinde, 5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre kalınlıktaki silikon malzeme kullanılarak hazırlanan modelde sistemin doğal frekans değeri 14.157 Hz olarak elde edilmiştir (Şekil 2.17).

2.5 Kemer Formlarının Modal Analizleri

Teorik ve deneysel olarak incelenecek olan kemer formlarının çizimleri oluşturularak modelleme için ABAQUS programında tanımlamaları yapılmıştır. Kemer formunu oluşturacak olan harman tuğlası ve silikon malzemelerin tanımları için Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.3’de belirtilen malzeme özellikleri dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Silikon kalınlığı kemer formlarında iç kısımda 1 milimetre olarak geometrisi oluşturulmuştur. 2 farklı kemer formu çalışma kapsamında incelemiştir. Kemer Formu-1 için iç açıklık değeri 300 milimetre ve iç yükseklik değeri 201 milimetre olarak, yükseklik ve açıklık oranı 0.67 olacak şekilde tayin edilmiştir (Şekil 2.18). Kemer Formu-2 ise iç açıklık değeri 401 milimetre ve iç yükseklik değeri 285 milimetre olmak üzere, yükseklik-açıklık oranı 0,71 olarak tayin edilmiştir (Şekil 2.19).



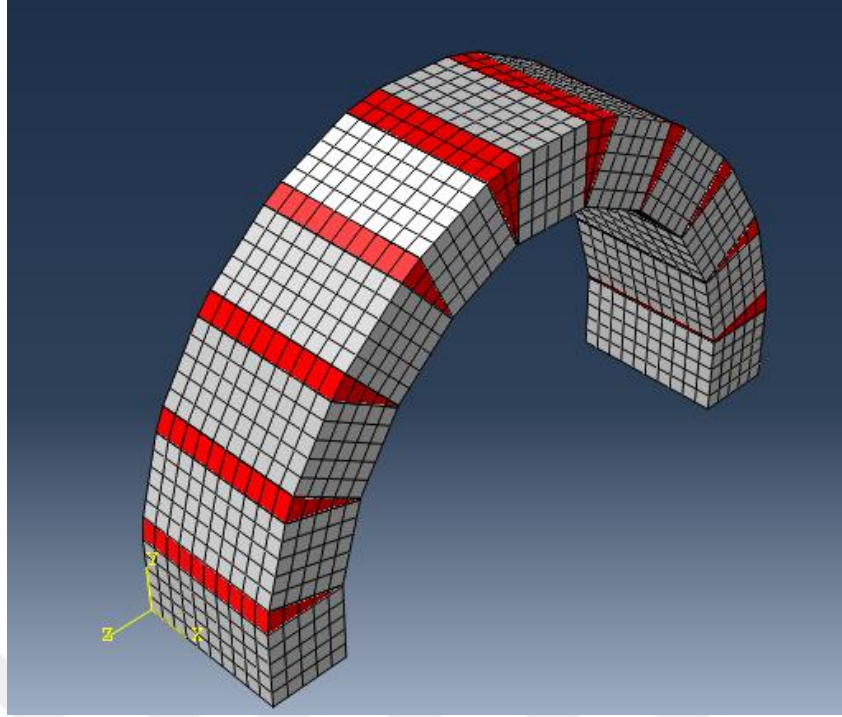
Şekil 2.18 Kemer Formu-1 geometrisi



Şekil 2.19 Kemer Formu-2 geometrisi

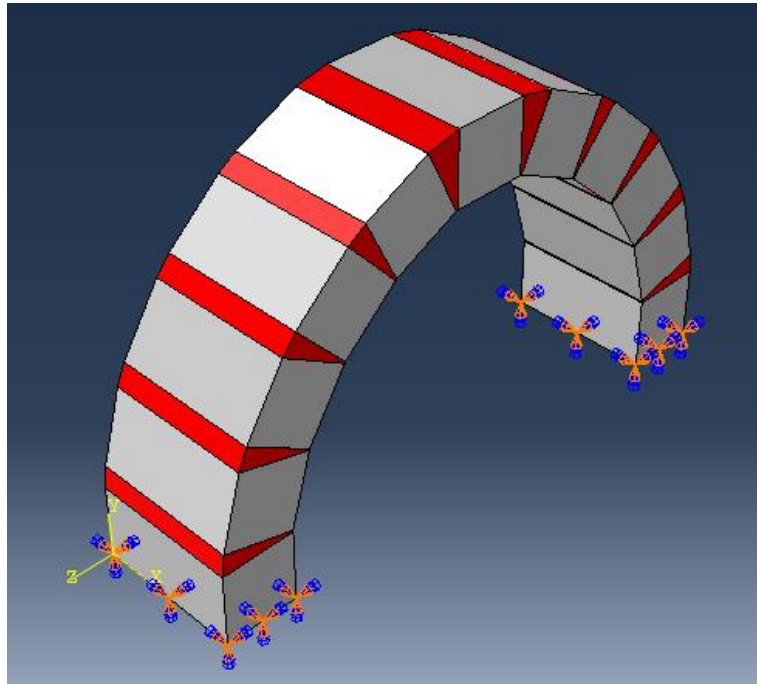
2.5.1 Kemer Formu – 1 Numunesi

Geometrik formu Şekil 2.18’de verilen kemer formunun ABAQUS programında modellemesi yapılmıştır. İç açıklıkta harman tuğlalarının aralıkları 1 milimetre olacak şekilde silikon tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 2.20).



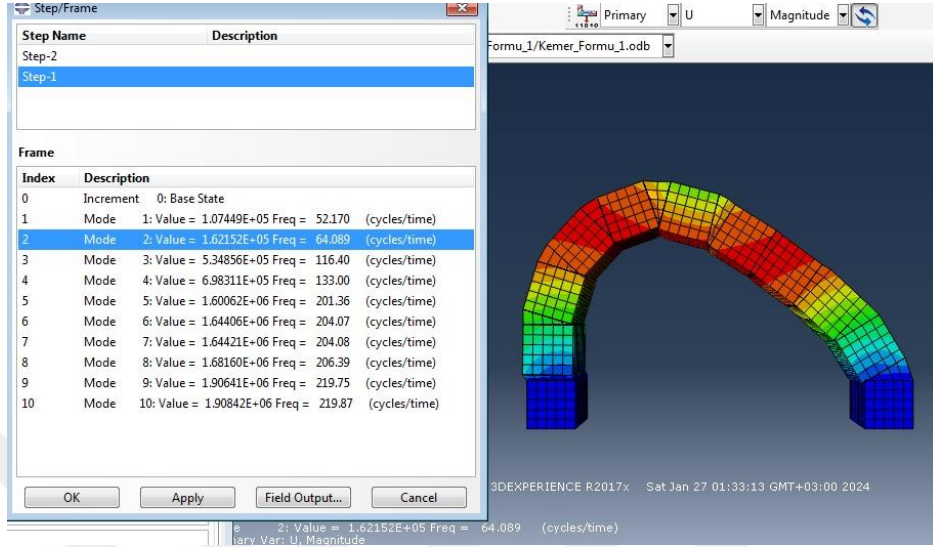
Şekil 2.20 Kemer Formu-1 modeli

Kolon formlarında olduğu gibi kemer formlarında da mesnet şartları ankastre olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.21). Harman tuğları ve silikon bağlantıları için ‘Surface to surface’ tanımıyla birbirlerine bağlanmıştır.



Şekil 2.21 Kemer Formu-1 modeli mesnet şartları

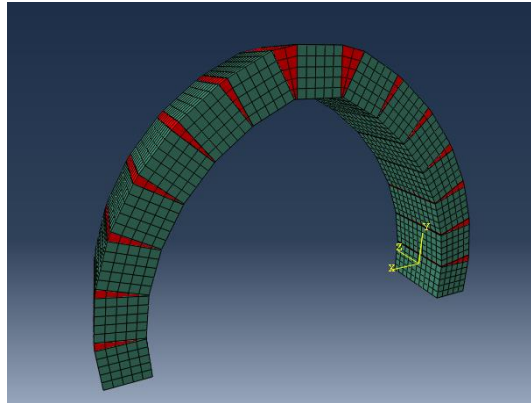
Kemer Formu-1 için ABAQUS programında yapılan sonlu elemanlar modal analizi sonucunda kemer formuna ait doğal frekans değeri 19.380 Hz olarak elde edilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Kemer Formu- 1 ABAQUS modal analizi

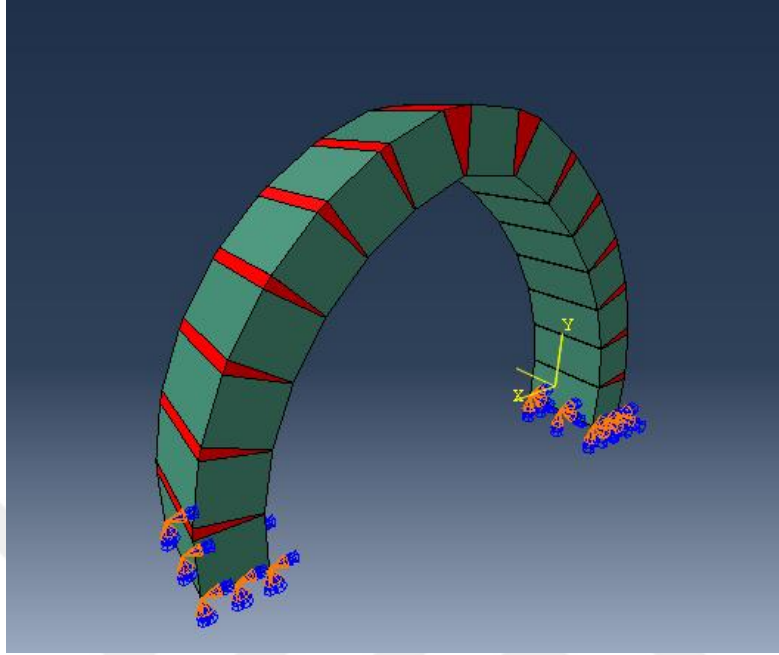
2.5.2 Kemer Formu – 2 Numunesi

Geometrik formu Şekil 2.19’de tanımlanan ikinci kemer formunun ABAQUS programında modellenmesi yapılmıştır. İç açıklıkta harman tuğlalarının aralıkları 1 milimetre olacak şekilde silikon tanımlamaları yapılmıştır. Kemer Formu-1’den farklı olarak daha geniş açıklık ve yükseklikte oluşturulan Kemer Formu-2’nin yükseklik ve genişlik oranı 0.71 olarak dikkate alınmaktadır. Oluşturulan kemer formunun ABAQUS programındaki görseli Şekil 2.23’de verilmiştir.



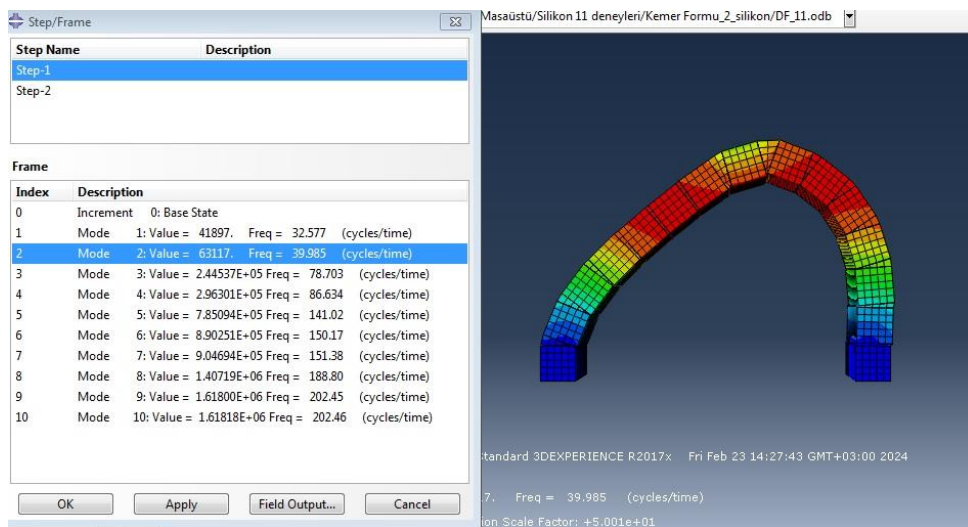
Şekil 2.23 Kemer Formu-2 modeli

Oluşturulan kemer formunun zemine oturan alt noktalarında mesnet tanımlamaları yapılmıştır. İki ayakta da mesnet şartları ankastre olacak şekilde tanımlanmış ve Şekil 2.24’de gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Kemer Formu-2 modeli mesnet şartları

Kemer Formu-2 için ABAQUS programında yapılan sonlu elemanlar metoduyla analizinde kemer formun istenilen doğrultudaki mod değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.25’de görüleceği üzere Kemer Formu-2’nin doğal frekans değeri 12.096Hz olarak hesaplanmıştır.



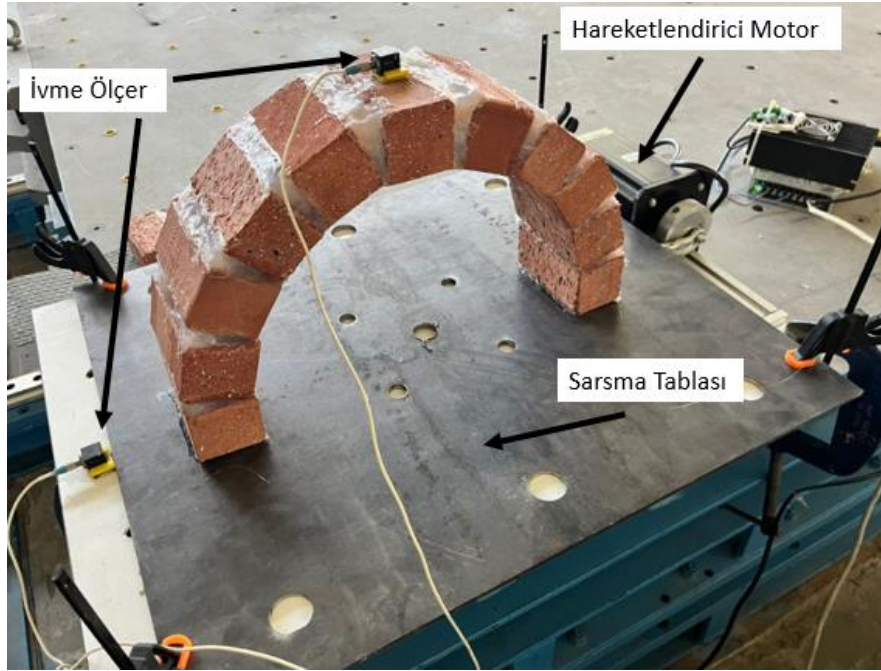
Şekil 2.25 Kemer Formu- 2 ABAQUS modal analizi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Sarsma Tablası Deneyleri

Sarsma tablaları, mühendislik çalışmalarının laboratuvar ortamında küçük ölçekli modellerin deneysel verilerinin elde edilmesi için kullanılan cihazlardır. Özellikle yapı mühendisliği açısından sarsma tablaları, deprem sebebiyle oluşan dinamik yüklerin küçük ölçekli yapı veya yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi için kullanılmaktadır. Sabit bir tabla üzerine, hızı ayarlanabilen bir motor vasıtasıyla hareket eden bir diğer tabla yerleştirilmesiyle çalışma mekanizması oluşturulmaktadır [17].

Yapılan deneylerin verilerinin toplanması sarsma tablasına ve hazırlanan numune üzerine yerleştirilen sensörler ile sağlanmaktadır. Bu sensörler ile iletilen veriler bilgisayar ortamına aktararak hazırlanan numunelere ait ivme, frekans gibi değerlere ulaşılmasını sağlamaktadır. Küçük ölçekli deney formlarının analizine imkân veren tek eksenli sarsma tablasının görseli Şekil.3.1 de gösterilmiştir.



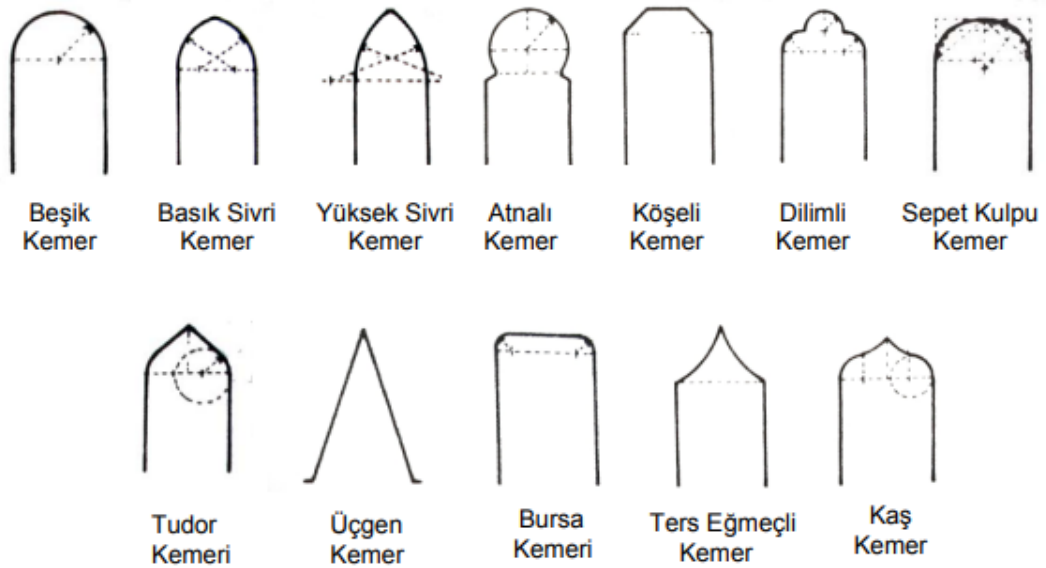
Şekil 3.1 Tek eksenli sarsma tablası

3.2 Kemer Formları

Yığma yapılarda yatay olarak kullanılan kiriş boyutlarının istenilen taşıma kapasitesini karşılamadığı durumlarda açıklıkların geçilmesi için farklı bir yöntem ihtiyacı oluşmuştur. Bu noktada oluşturulan kemer formları, “İki sütun veya iki ayak arasındaki bir açmanın üstünü örtmek için, uçları bu sütun ve ayaklara oturmak üzere yay şeklinde yapılan ahşap, maden ya da kâgir yapı parçası.” [18] olarak tanımlanmıştır.

Kemer formları tarihsel süreçlerde geniş açıklıkların geçilmesini sağlamak amaçlı yapılan yapısal elemanlardır. İlk örneklerine M.Ö. 2700-2250 yıllarına Mısır’da rastlanan kemer formları ters v şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Yapılan ilk örneklerin kapı boşluklarının geçilmesi için kullanılmıştır [19].

Yapıların tarihsel gelişimiyle birlikte daha geniş açıklıkların geçilmesi isteği kemer formlarının gelişmesine ve farklı geometrilerde karşımıza çıkmasına olanak sağlamıştır. Geniş açıklıklardaki basınç yüklerinin dikey taşıyıcı elemanlara aktarılması için kemer formlarını oluşturan malzemeler, taş ve tuğla gibi basınç dayanımı yüksek olan yapı elemanlarından seçilmiştir. Kemer formları farklı yapılarda geometrik özellik olarak şişkin, beşik, düz, üçgen, ters eğmeçli, köşeli vb. şekillerde oluşturulmuştur [19].



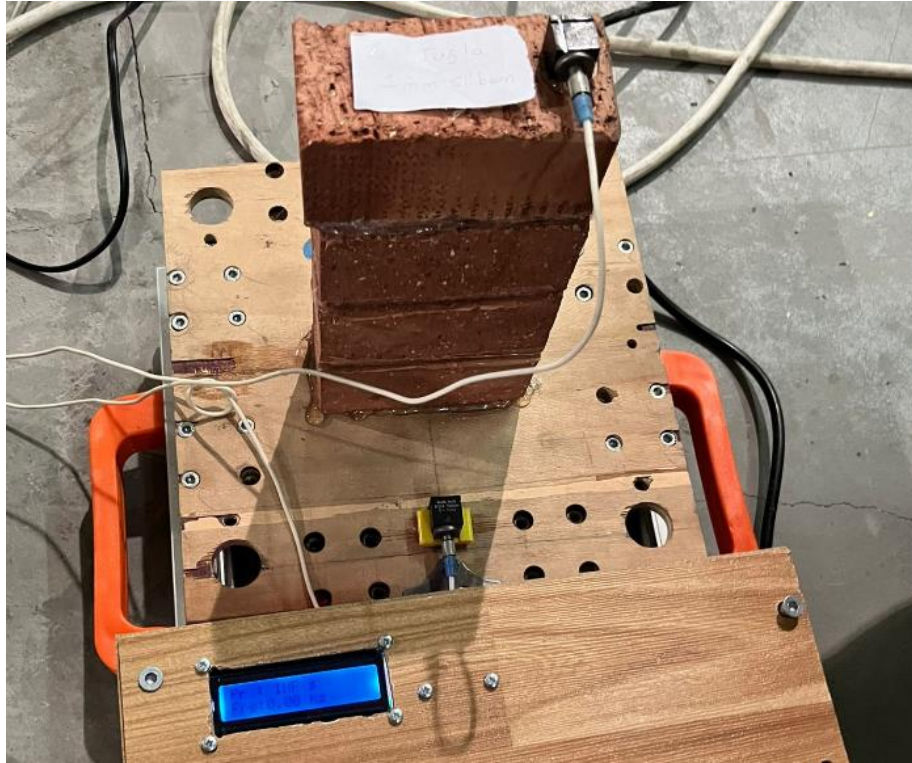
Şekil 3.2 Kemer formları

3.3 Kolon Formları Sarsma Tablası Deneyleri

Kolon ve kemer formlarının oluşturulabilmesi için harman tuğlası boyutları 50x50x100 milimetre seçilmiştir. Harman tuğlalarının birleşimi için silikon malzeme olarak seçilmiştir. Silikon malzemenin kalınlıkları ise 1 mm, 2 mm ve 3 mm olarak seçilmiştir. Kolon numunelerin belirli bir frekans değeri altında ivme değerleri ölçümleri yapılmış ve farklı silikon kalınlıklarında elde edilen ivme değerleri karşılaştırılmıştır.

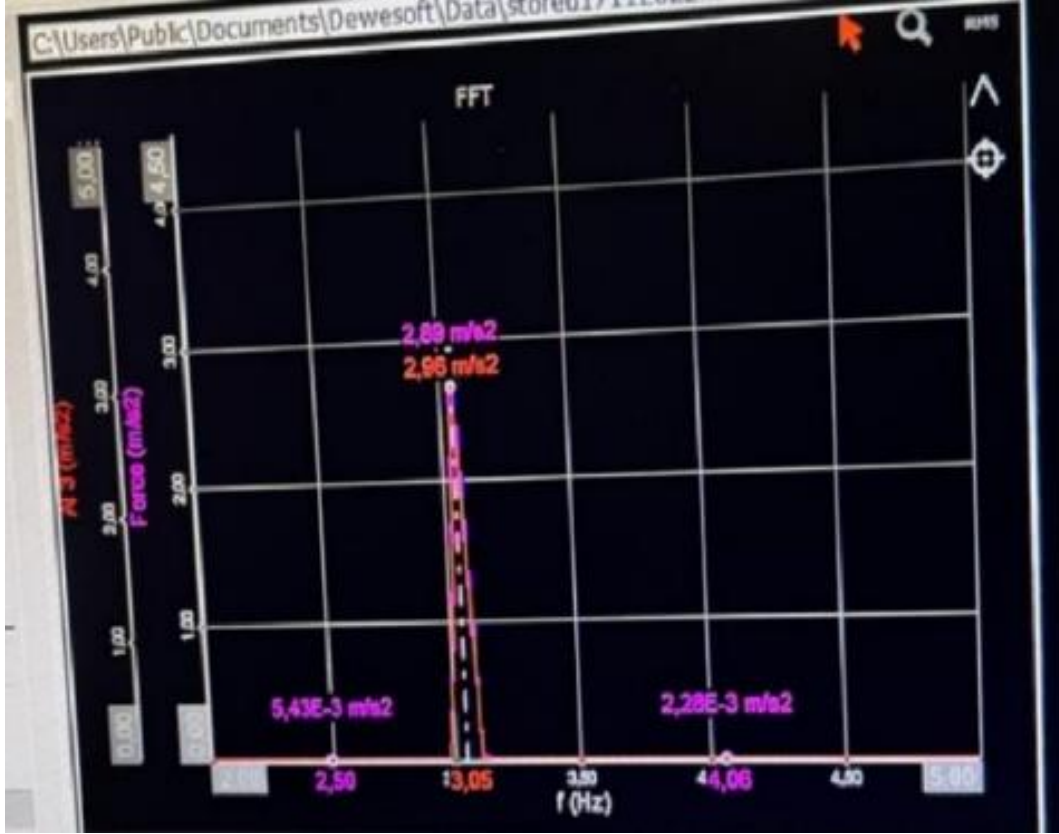
3.3.1 4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tablası Deneyi

Kolon formu, 50x50x100 milimetre ölçülerinde 4 adet harman tuğlasının aralıkları, kalınlığı 1 milimetre olan ve harman tuğlası yüzeyini tamamen kaplayacak şekilde birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Toplam kolon numune yüksekliği 203 milimetredir. Sıcak silikonla birleştirilen harman tuğlaları sarsma tablası üzerine ankastre mesnetli olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

Sarsma tablasına yerleştirilen kolon numune, 3 Hz frekans değerinde sarsma etkisine maruz bırakılmasıyla, ivme verileri ölçülmüştür. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen ivme ölçer 3 Hz frekanstaki FFT analiz sonucunda elde edilen ivme değerini, kolon numune tepe noktası üzerine yerleştirilen ivme ölçer ise sarsma tablasıyla birlikte kolon numunenin ivme değerini göstermektedir (Şekil 3.4).



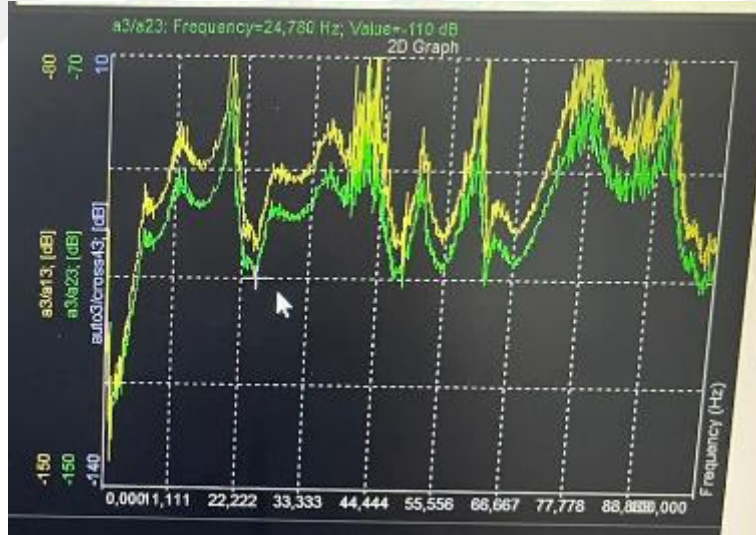
Şekil 3.4 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri

Şekil 3.4’de verilen grafik görüntüsünde sarsma tablasının FFT analiz sonucunda elde edilen ivme değerini $2,89 \text{ m/s}^2$, kolon tepe noktasındaki ivme değerinin ise $2,96 \text{ m/s}^2$ olduğu görünmektedir. Grafikten elde edilen verilerden, 4 adet harman tuğlası ve 1 mm silikon ile hazırlanan numunenin FFT analiz sonucunda elde edilen ivme değeri ölçülen değerler farkından $0,07 \text{ m/s}^2$ olarak elde edilmiştir.

4 adet harman tuğlası ve 1 milimetre silikon kullanılarak hazırlanan kolon numunesinin doğal frekanslarının analizi için, sarsma tablası üzerine sabitlenmiştir (Şekil 3.5). Kolon numune tepe noktasına yerleştirilen ivme ölçer vasıtasıyla bilgisayar ortamında numunenin frekans grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.6)



Şekil 3.5 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans deneyi



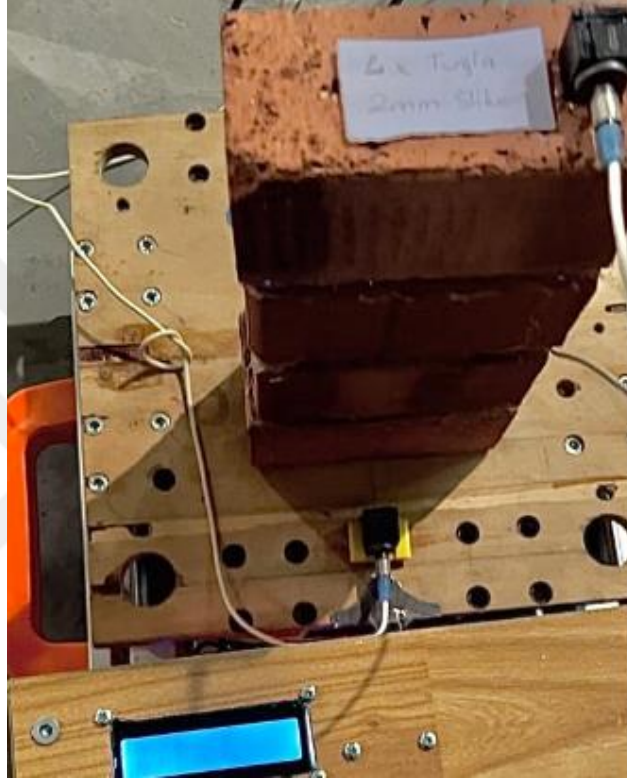
Şekil 3.6 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Elde edilen frekans grafiğinde eğriler, sistemin tekrarlayan doğal frekans eğrilerini göstermektedir. İşaretlenen noktayla birlikte 4 adet harman tuğlası ve 1 milimetre silikon kalınlığı kullanılarak hazırlanan kolon numunesinin doğal frekans değerleri 24.780 – 47.241 Hz olarak ölçülmektedir (Şekil 3.6).

3.3.2 4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma

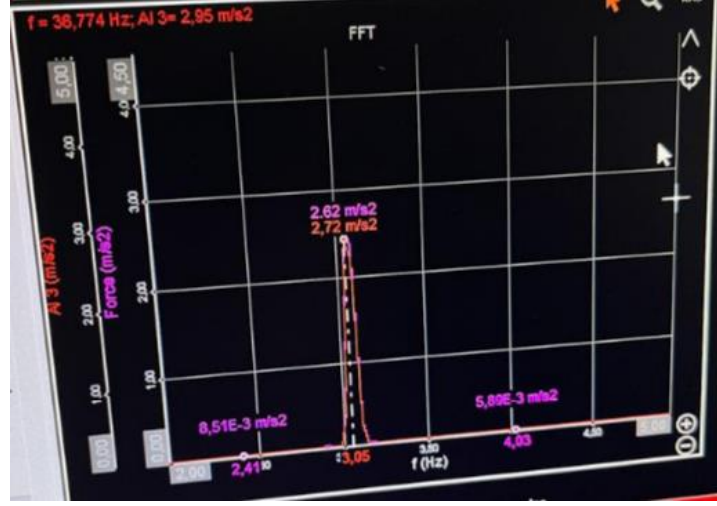
Tabla Deneyi

Harman tuğlasının üst yüzeyini kaplayacak şekilde kalınlığı 2 mm olan silikonla birleştirilen 4 adet harman tuğlasıyla, 206 mm yüksekliğinde kolon numune elde edilmiştir. Elde edilen numune sarsma tablası üzerine sabitlenerek dinamik verileri ölçülmüştür (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

3 Hz frekans değeri altında sarsılan sarsma tablasında, ivme ölçerler yardımıyla sarsma tablası ivme değeri ve sarsma tablası üzerindeki kolon numunenin FFT analiz sonucunda elde edilen ivme değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.8 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri

Şekil 3.8’da görülen eğrilerden, 3 Hz frekans etkisinde ivme verileri görülmektedir. Elde edilen verilerde sarsma tablası FFT analiz sonucunda elde edilen ivme değeri $2,62 \text{ m/s}^2$, sarsma tablası üzerindeki kolon numune ivme değeri ise $2,72 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülmüştür. Sadece kolon numuneye ait FFT analizi ivme değeri, elde edilen değerlerin farkından $0,10 \text{ m/s}^2$ olarak elde edilmiştir.

Doğal frekans değerinin bulunması için hazırlanan kolon numunesi sarsma tablası üzerine ankastre mesnet davranışı sağlayacak şekilde sabitlenmiştir (Şekil 3.9). Kolon tepe noktasına yerleştirilen ivme ölçer ile bilgisayar ortamında yapı elemanın doğal frekans değeri elde edilmektedir (Şekil 3.10)



Şekil 3.9 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans deneyi



Şekil 3.10 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Bilgisayar ortamında elde edilen grafikte 4 adet harman tuğlası ve 2 milimetre silikon kalınlığı kullanılarak hazırlanan kolon numunesinin doğal frekans değerleri 22.220 – 44.444 Hz olarak elde edilmiştir.

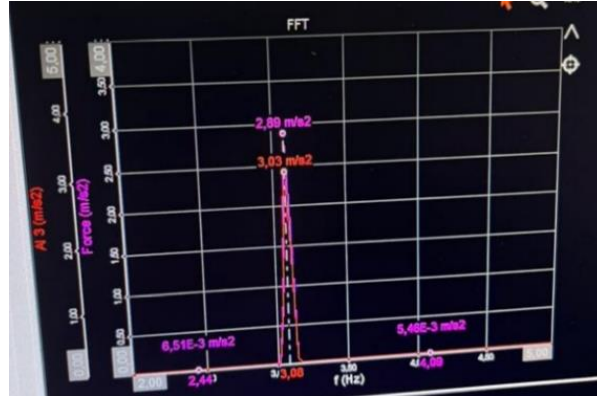
3.3.3 4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi

4 adet harman tuğlası ve 3 mm kalınlıkta silikon kullanılarak 209 mm yüksekliğinde kolon numune elde edilmiştir. Kolon numune sarsma tablası üzerine sabitlenerek dinamik verileri ölçülmüştür.



Şekil 3.11 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

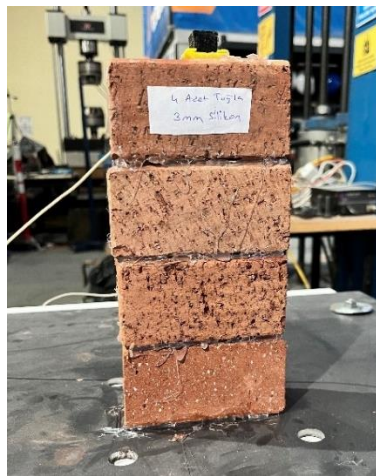
3 Hz frekans değeriyle yapılan sarsma tablası deneyinde, tabla üzerine yerleştirilen ivme ölçer ve kolon numunesi tepe noktası üzerine yerleştirilen ivme ölçerle ivme değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.12).



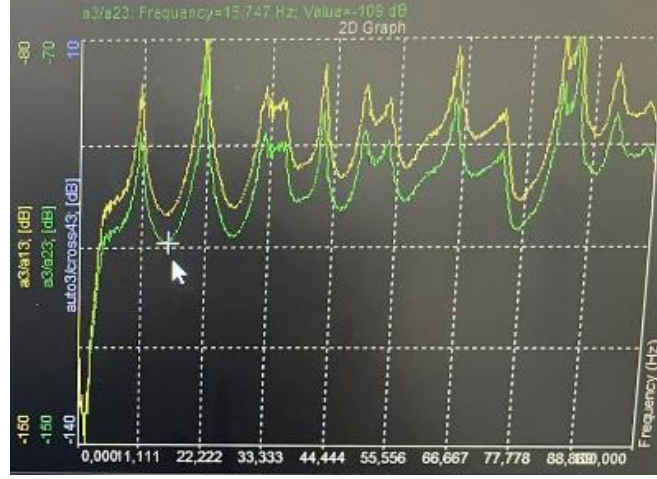
Şekil 3.12 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri

Şekil 3.12’de gösterilen değerler ivme ölçerler vasıtasıyla öğrenilen ivme değerleridir. Sarsma tablası FFT analizi ivme değeri $2,89 \text{ m/s}^2$, kolon numunesi üst noktasında ölçülen değer ise $3,03 \text{ m/s}^2$ olarak elde edilmiştir. FFT analizi farklarında kolon numunesi ivme değeri $0,14 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülmüştür.

4 harman tuğlasının 3 milimetre silikon ile birleştirilmesiyle oluşturulan kolon formu sarsma tablasına doğal frekans deneyi yapılmıştır (Şekil 3.13). Tepe noktası üzerine yerleştirilen ivme ölçerler ile doğal frekans değeri elde edilmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.13 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans deneyi



Şekil 3.14 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Yapılan analizde 4 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon kullanılarak hazırlanan kolon numunesinin doğal frekans değerleri 15.747 – 27.446 Hz olarak tespit edilmiştir.

3.3.4 5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma

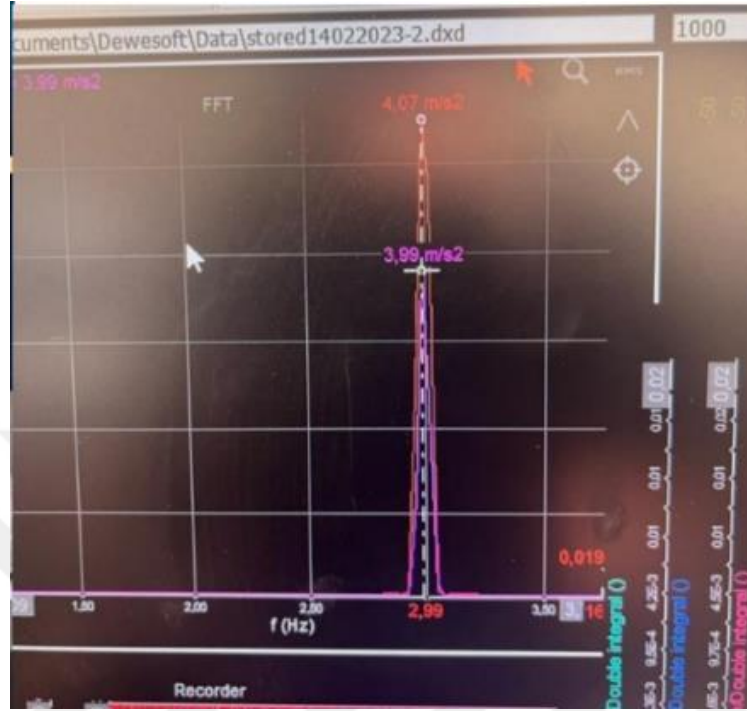
Tabla Deneyi

5 adet harman tuğlası ve 1 mm silikon kalınlığıyla, yüksekliği 254 mm olan kolon numunesi oluşturulmuştur. Oluşturulan kolon numunesi sarsma tablası üzerine yerleştirilerek dinamik verileri elde edilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

Kolon numunesi sarsma tablası üzerine ankastre mesnet olacak şekilde sabitlenerek, 3 Hz frekans değeri altında FFT analizi ivme değerleri ölçülmektedir (Şekil 3.16).



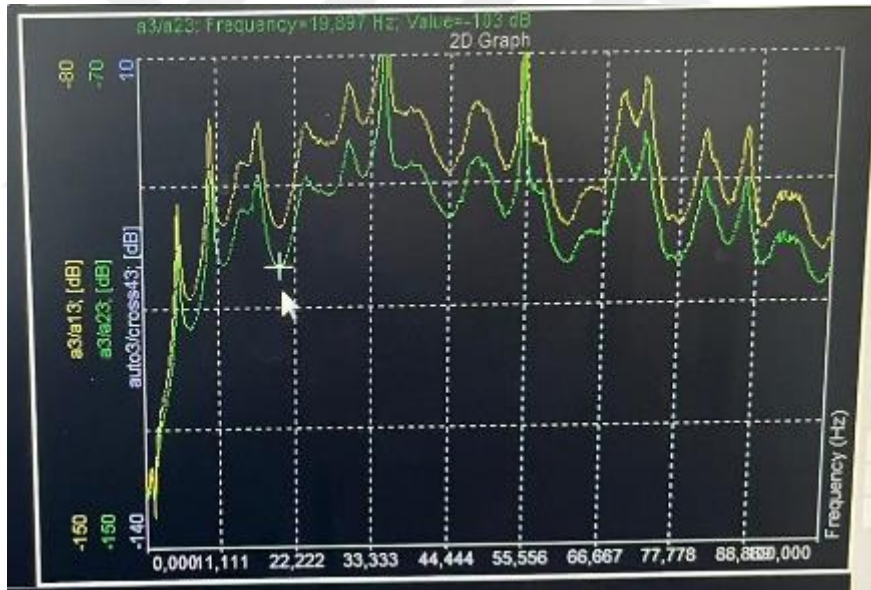
Şekil 3.16 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi FFT analizi İvme değerleri

Şekil 3.16’da görünen grafikte 3 Hz frekans değeri altında sarsma tablasının ivme değeri 3.99 m/s^2 , kolon üst noktasına yerleştirilen ivme ölçerin gösterdiği değer 4.01 m/s^2 olduğu görünmektedir. İvme değerleri farkından 5 Adet harman tuğlası ve 1 mm kalınlıktaki silikon malzeme ile hazırlanan kolon numunenin FFT analizi ivme farkları değeri $0,08 \text{ m/s}^2$ olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hazırlanan kolon numunenin doğal frekansının bulunması için tepe noktası üzerine yerleştirilen ivme ölçer ile birlikte sarsma tablasına ankastre mesnetli olarak sabitlenmiştir (Şekil 3.17). İvme ölçerden alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılması sonucunda doğal frekans grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3.18).



Şekil 3.17 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans deneyi

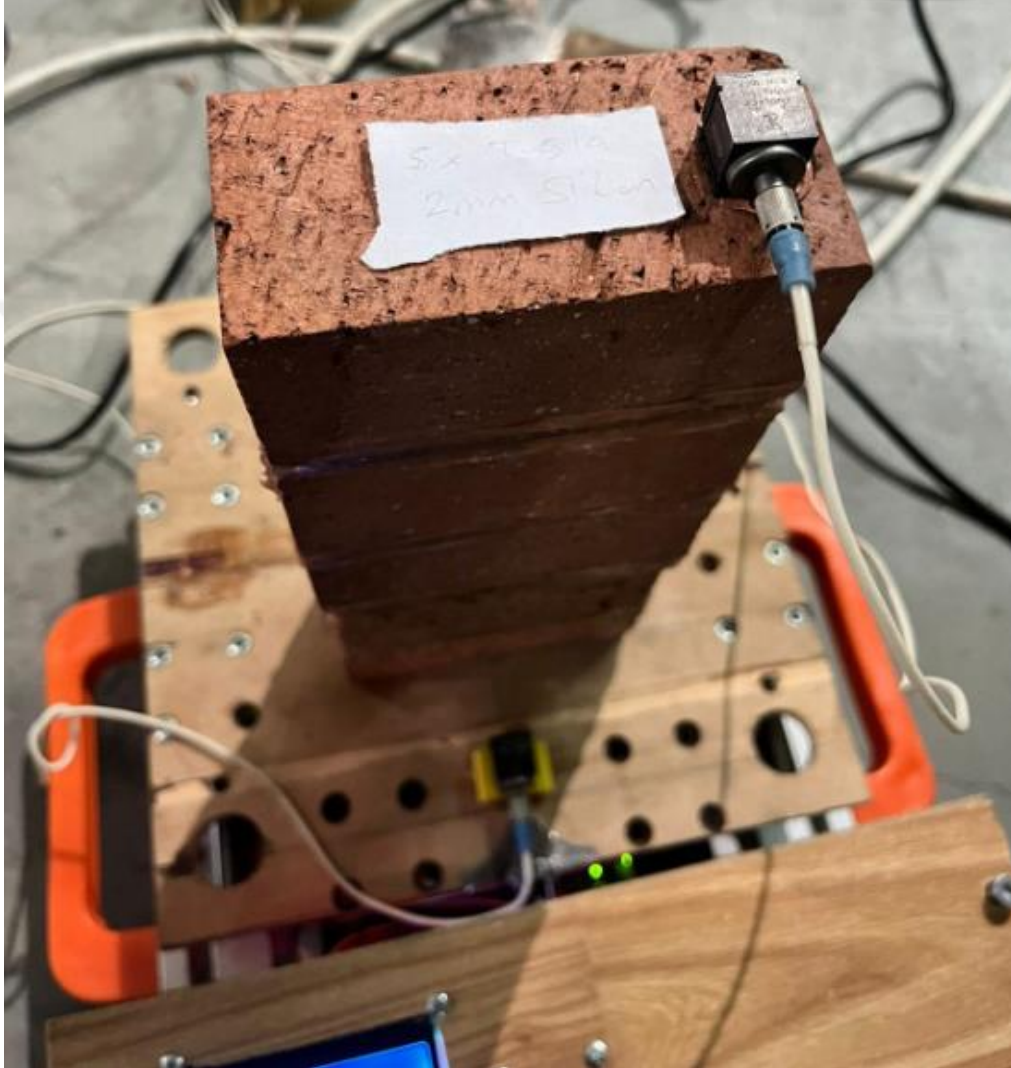


Şekil 3.18 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Şekil 3.18’de gösterilen ivme frekans grafiğinde, grafik çizgilerinin pik noktası incelediğimiz kolon numunenin doğal frekans değerleri 19.897 – 44.189 Hz olarak elde edilmiştir.

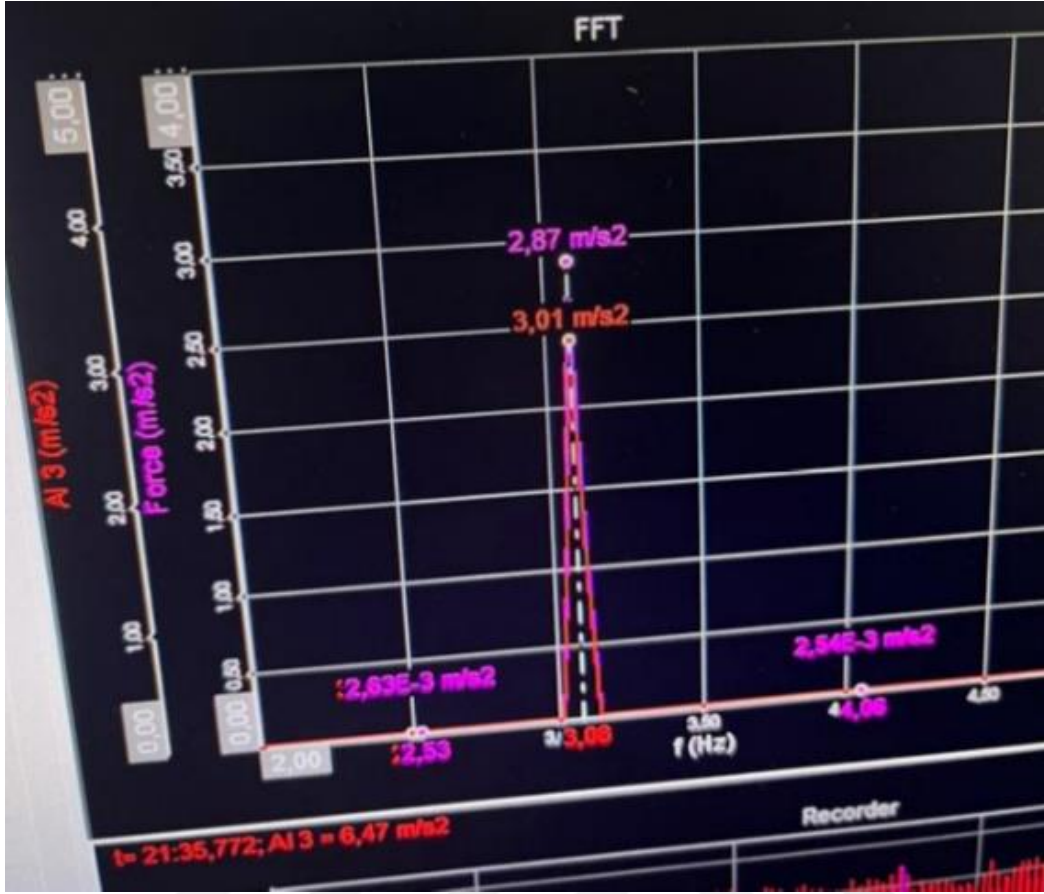
3.3.5 5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi

5 adet harman tuğlası ve 2 milimetre silikon kullanılarak yüksekliği 258 milimetre olan kolon numunesi hazırlanarak sarsma tablası üzerine yerleştirilmek suretiyle dinamik verileri hesaplanmaktadır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

Hazırlanan kolon numunesi sarsma tablası üzerine sabitlenerek 3 Hz frekans etkisinde sarsma tablası ve kolon üst noktasına yerleştirilen ivme ölçerler aracılığıyla sistemin ivme değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.20).



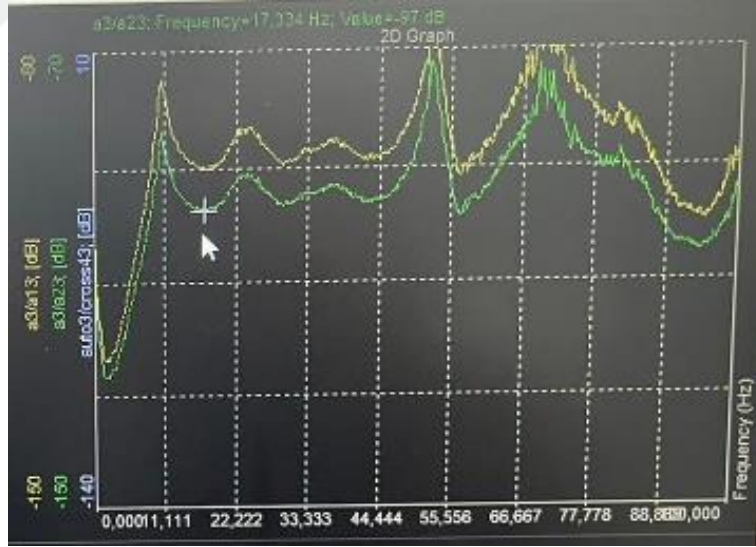
Şekil 3.20 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri

Şekil 3.20’de görülen değerlerde sarsma tablasının FFT analizi ivme değeri $2,87 \text{ m/sn}^2$ iken kolon numune üzerine yerleştirilen ivme ölçerden elde edilen değer $3,01 \text{ m/sn}^2$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulunan ivme değerleri arasındaki fark $0,14 \text{ m/sn}^2$ olarak kolon numunesinin FFT analizi ivme değerini ifade etmektedir.

Hazırlanan kolon numunesi sarsma tablası üzerine ankastre mesnetli olarak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil.3.21). Tepe noktasına yerleştirilen ivme ölçerler ile doğal frekans değeri grafiği elde edilmiştir (3.22).



Şekil 3.21 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans deneyi

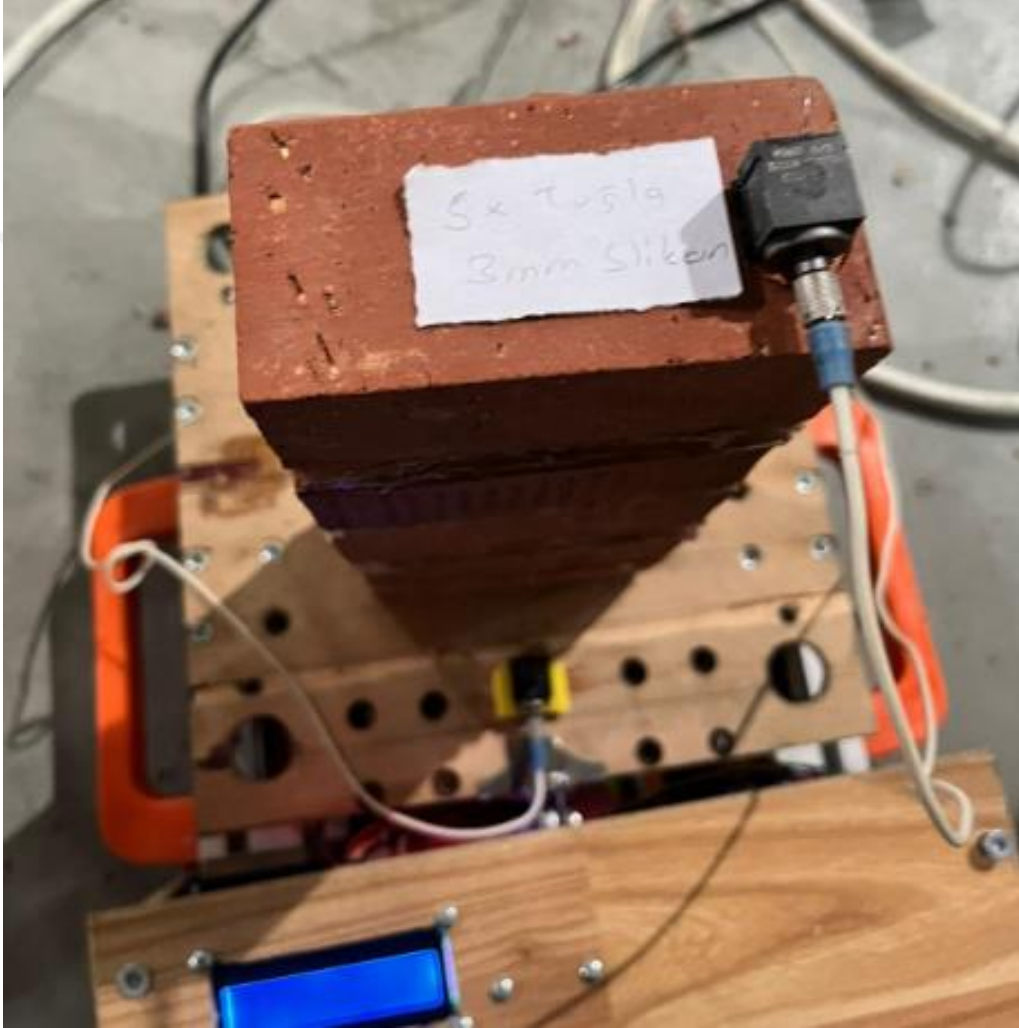


Şekil 3.22 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Şekil 3.22’de gösterilen ivme frekans grafiğinde, grafik çizgilerinin pik noktası incelediğimiz kolon numunenin doğal frekans değerleri 17.334 – 29.419 Hz olarak elde edilmiştir.

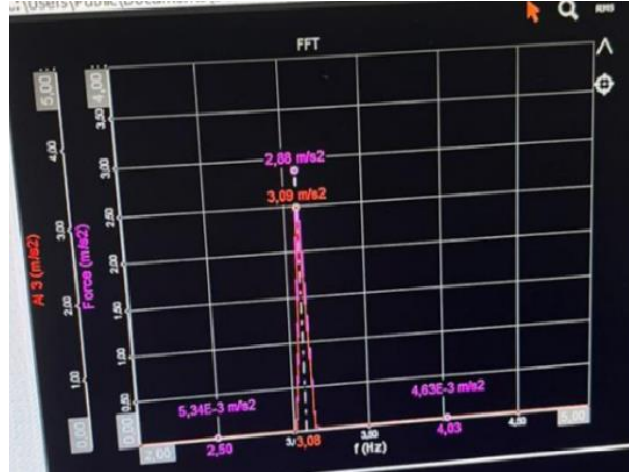
3.3.6 5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Sarsma Tabla Deneyi

5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre kalınlıkta silikon kullanılarak yüksekliği 262 milimetre yüksekliğinde kolon numunesi oluşturularak sarsma tablası üzerinde dinamik analizleri yapılmıştır (şekil 3.23)



şekil 3.23 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi sarsma tablası deneyi

Oluşturulan kolon numunesi sarsma tablası üzerine sabitlenerek 3 Hz frekans değerine etkisiyle sarsıldığında, tablaya ve kolon üst noktasına yerleştirilen ivme ölçerler aracılığıyla ivme değerleri elde edilmiştir (şekil 3.24).



Şekil 3.24 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi FFT analizi ivme değerleri

Şekil 3.24’de görüleceği üzere sarsma tablasının ivme değeri $3,88 \text{ m/sn}^2$ olarak ölçülmektedir. Aynı görselde görüleceği üzere kolon üst noktasında ölçülen FFT analizi ivme değeri $3,09 \text{ m/sn}^2$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Kolon numuneye ait ivme değeri ise elde edilen FFT analizi ivme değerleri farklarında $0,21 \text{ m/sn}^2$ olduğu görüşmüştür.

Hazırlanan numunenin sarsma tablası üzerine ankastre mesnet davranışı gösterecek şekilde sabitlenerek doğal frekans analizi yapılmıştır (Şekil 3.25). Kolon tepe noktasına yerleştirilen ivme ölçerler ile doğal frekans grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.25 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans deneyi



Şekil 3.26 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon numunesi doğal frekans değeri

Yapılan analiz neticesinde elde edilen ivme-frekans grafiğinde kolon numunenin doğal frekans değerleri 16.235-21.279 Hz olduğu tespit edilmiştir.

3.4 Kemer Formları Sarsma Tablası Deneyleri

Kolon formlarının analizi sonrasında 2 farklı kemer formunun sarsma tablasında deneyleri yapılmıştır. 50x50x100 milimetre boyutlarında kullanılan harman tuğlaları, kemer formunun iç dairesel kısmında silikon kalınlığı 1 milimetre olarak seçilerek numuneler oluşturulmuştur. Autocad programında çizilen kemer formları sonlu elemanlar metodunda kullanılan geometrik özelliklerde oluşturulmuştur (Şekil 2.18) (Şekil 2.19).

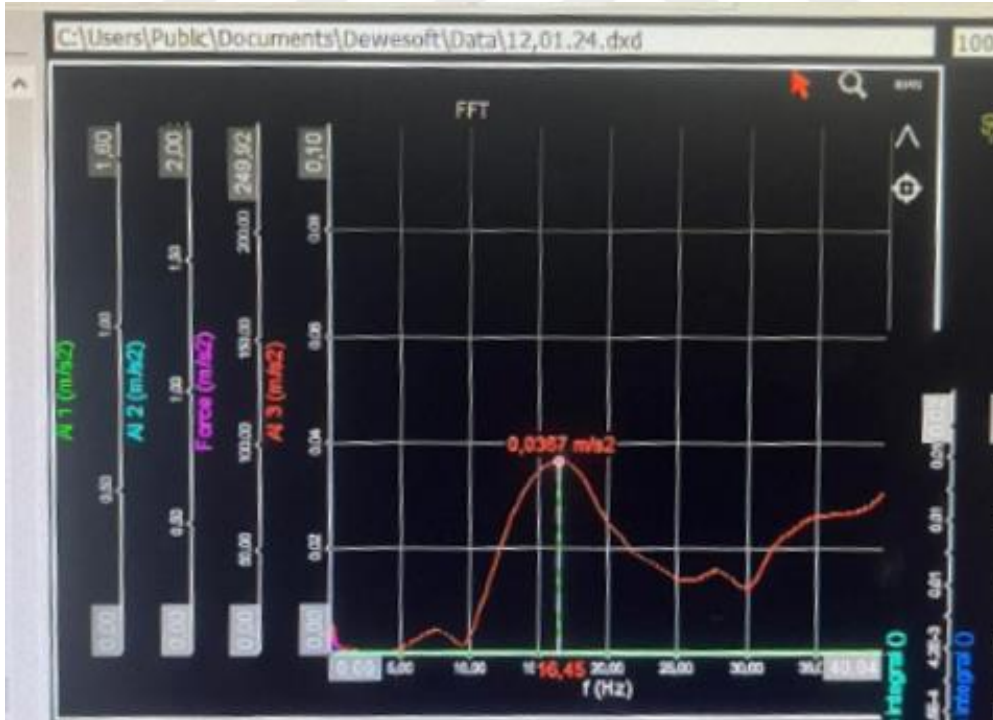
3.4.1 Kemer Formu-1 Numunesi Sarsma Tabla Deneyi

Kemer formu-1 Şekil 2.18’de belirtilen geometrik ölçülerde oluşturulmuştur. 11 adet harman tuğlası kullanılarak oluşturulan kemer formunun iç açıklığı 300 milimetre olarak tayin edilmiştir. Silikon kalınlığı 1 milimetreden 15 milimetre kalınlığa ulaşacak şekilde kemer formunda kullanılmıştır. Kemer formunun iç açıklıktaki yüksekliği 201 milimetre olarak dizayn edilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Kemer Formu-1 numunesi sarsma tablası deneyi

Oluşturulan kemer formu, sonlu elemanlar metodunda tanımlanan mesnet şartları ankastre olacak şekilde sarsma tablasına sabitlenmiştir. Sarsma tablası üzerine ve kemer formunun tepe noktasına yerleştirilen ivme ölçerler yardımıyla bilgisayar ortamında sistemin doğal frekans noktaları tespit edilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Kemer Formu-1 doğal frekans analizi

Kemer Formu-1'in sarsma tablası deneyinde stabil halde ivme ölçerlerin pik değerleri dikkate alındığında doğal frekans değerinin 16.450 Hz olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 3.28).

3.4.2 Kemer Formu-2 Numunesi Sarsma Tabla Deneyi

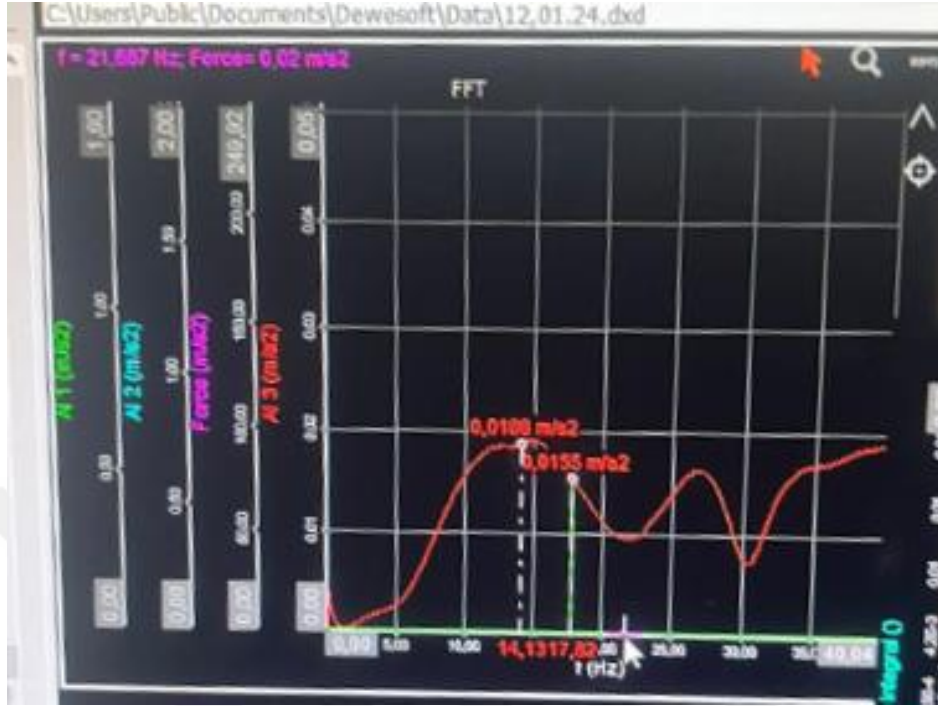
Farklı kemer formlarının incelenmesi için oluşturulan ikinci numune Kemer Formu-2, 15 adet harman tuğlasının, 1 milimetreden 10 milimetre değerine kadar artış gösteren silikon kalınlığıyla birleşimi sağlanmıştır. İç açıklığı 401 milimetre olan kemer formunun yüksekliği 285 milimetre olarak dizayn edilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Kemer Formu-2 numunesi sarsma tablası deneyi

Bölüm 2'de bahsedilen kemer formlarının sonlu elemanlar metoduyla analizi için tanımlanan mesnet şartları Kemer Formu-2 için sarsma tablası üzerinde uygulanmıştır. Mesnet şartları ankastre tanımlandığından kemer formunun sarsma tablası üzerine sabitlemesi yapılmıştır. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen ivme ölçer ve kemer üst noktasına yerleştirilen ivme ölçerler vasıtasıyla kemer formuna

ait dinamik veriler elde edilmiştir. Bilgisayar ortamında görülebilen verilerde kemer formunun doğal frekans verileri incelenebilmiştir (Şekil 3.30).



Şekil 3.30 Kemer Formu-2 doğal frekans analizi

Yapılan sarsma tablası deneyinde Kemer Formu-2 için ölçülen doğal frekans değeri, Şekil 3.18’de görüleceği üzere düşey ekseninde görülen sarsma tablasının ivme değerinin pik yaptığı tepe noktasının, yatay ekseninde iletilen frekans değerlerindeki izdüşümü olan 14.13 Hz olarak elde edilmiştir.

MALZEME DENEYİ VERİLERİYLE MODAL ANALİZLER

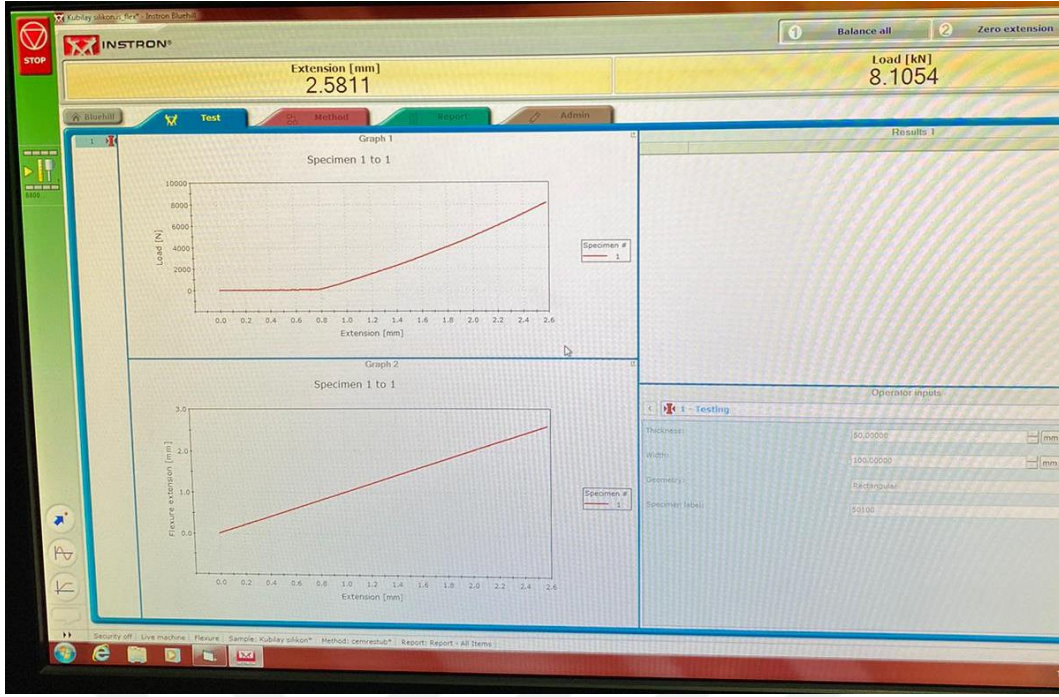
Çalışma kapsamında birleştirici malzeme olarak seçilen silikon mekanik verilerinin tayin edilmesi ve modal analizlerde tanımlanarak doğal frekans değerleri elde edilmektedir. Elde edilen elastisite modülü ABAQUS programında tanımlanarak kolon ve kemer formlarının modal analizleri sonlu elemanlar metodu ile yapılmaktadır. Harman tuğlası mekanik özellikleri ise Bölüm 2.2.1’de bahsedildiği şekilde kullanılmaktadır.

4.1 Silikon Malzeme Analiz Deneyi

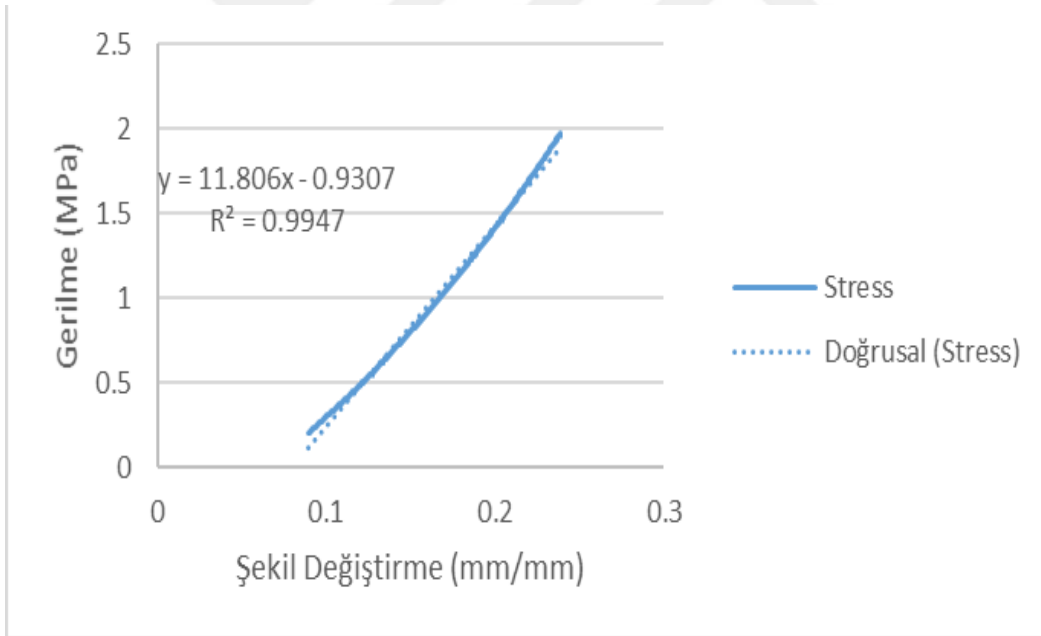
Silikon malzemenin mekanik verilerinin bulunması amacıyla 5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon kalınlığıyla oluşturulan numune üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 4.1). Yapılan bu çalışmada 5 tuğla arasında yer alan toplamda 12 milimetre silikon kalınlığının basınç yüklemesiyle gerilme ve şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Toplamda 2,58 milimetre sıkıştırılan numunenin şekil değiştirme verileri ölçülerek, şekil değiştirme sırasında üzerine etkiyen yük miktarlarıyla birlikte belirlemek mümkün olmaktadır (Şekil 4.2). Elde edilen verilerle birlikte silikon malzemenin gerilme değeri megapascal (MPa) ve şekil değiştirme değeri milimetre (mm) şeklinde grafik gösterimi elde edilmiştir (Şekil 4.3)



Şekil 4.1 Silikon Basınç Deneyi



Şekil 4.2 Silikon basınç deneyi gerilme-şekil değiştirme deneysel verileri

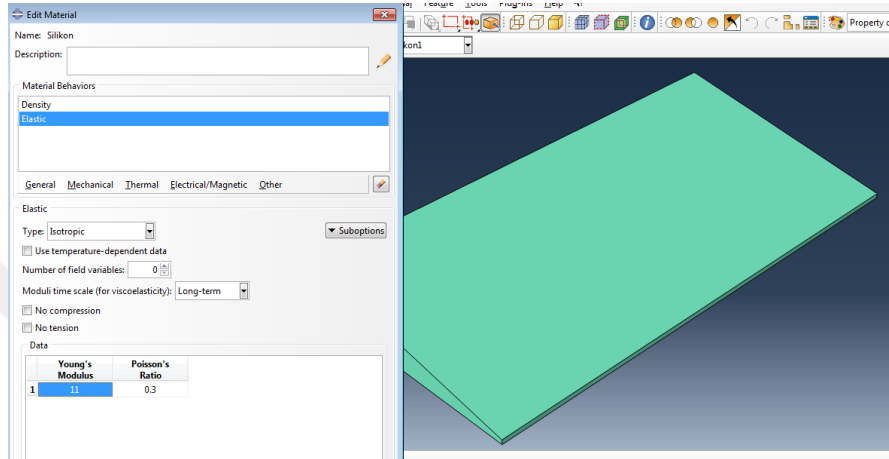


Şekil 4.3 Silikon basınç deneyi gerilme-şekil değiştirme tayini

Silikon malzemenin elastisite modülü tayini için yapılan deneysel çalışmalarda Şekil 4.3’de görülen grafik elde edilmiştir. Grafik üzerinde yer alan değerde görüleceği üzere, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan silikon malzemenin elastisite modülü 11 N/mm² olduğu görülmektedir.

4.2 Modal Analizler

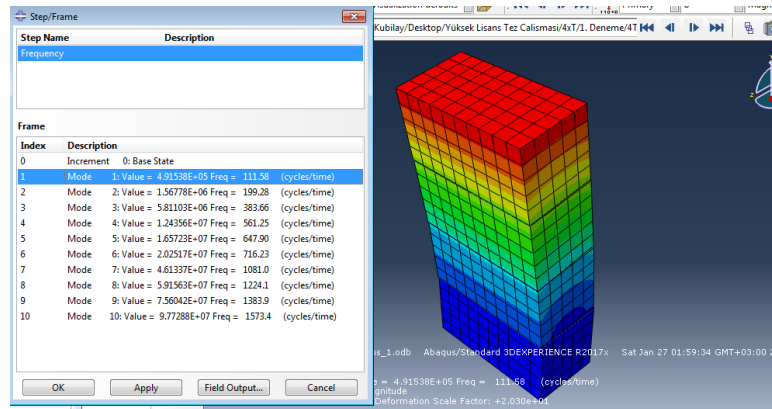
Elde edilen silikon malzeme elastisite modülü ABAQUS programı içerisinde tanımlanarak kolon ve kemer formlarının sonlu elemanlar metoduyla tekrar analizleri yapılmıştır. Oluşturulan analizlerde numunelerin geometrik özellikleri Bölüm 2’de detaylandırılmıştır. Çalışmalarda silikon elastisite modülü 11 N/mm^2 olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Modal analiz silikon malzeme tanımlamaları

4.2.1 4 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

Silikon malzeme deneyi sonucunda elde edilen elastisite modülü değeri ABAQUS programında tanımlanarak 4 adet harman tuğlası ve 1 milimetre silikon malzeme kullanılarak sonlu elemanlar metodu ile analizi yapılmıştır (Şekil 4.5).

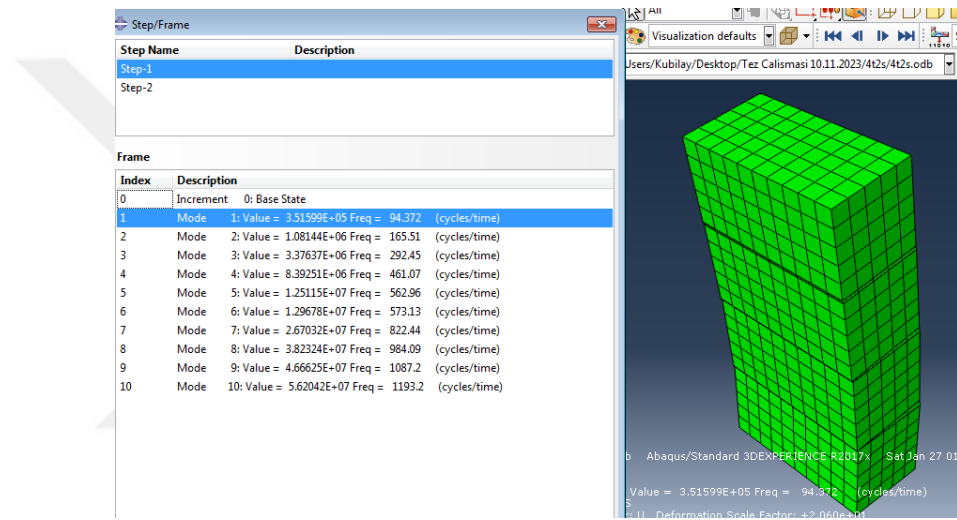


Şekil 4.4 4 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans analizi

Şekil 4.4’de görüleceği üzere silikon malzemenin elastisite modülü değerinin 11 N/mm² olduğu durumda, kolon numunesinin doğal frekans değeri 111.58 Hz olarak elde edilmektedir.

4.2.2 4 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

4 adet harman tuğlası ve 2 milimetre silikon kullanılarak hazırlanan kolon numunesinde elastisite modülü Şekil 4.1’de gösterilen analiz neticesinde elde edilen silikon elastisite modülü ile doğal frekans analizi yapılmıştır (Şekil 4.5)

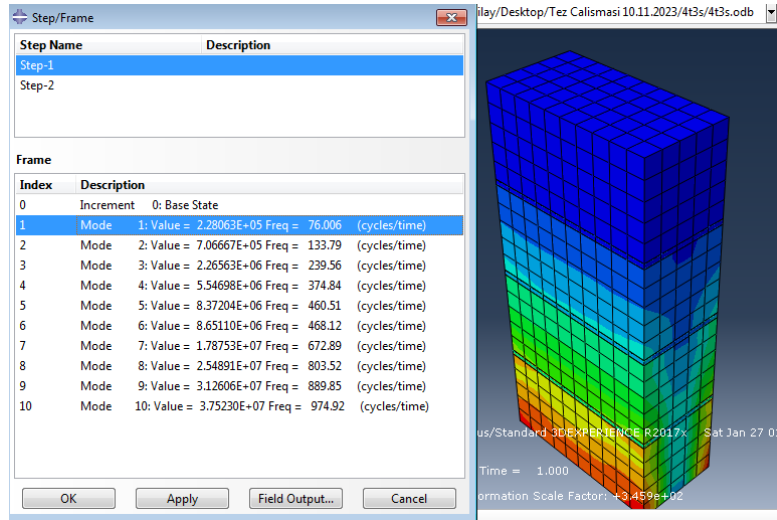


Şekil 4.5 4 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans analizi

Şekil 4.5’de gösterilen modal analiz tablosunda görüleceği üzere kolon numunesinin doğal frekans değeri 94.372 Hz olarak elde edilmiştir.

4.2.3 4 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

Diğer kolon numunelerinde olduğu gibi deneysel verilerle elde edilen silikon elastisite modülü ABAQUS programında tanımlanarak 4 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon malzeme kullanılarak doğal frekans analizi yapılmıştır (Şekil 4.6).

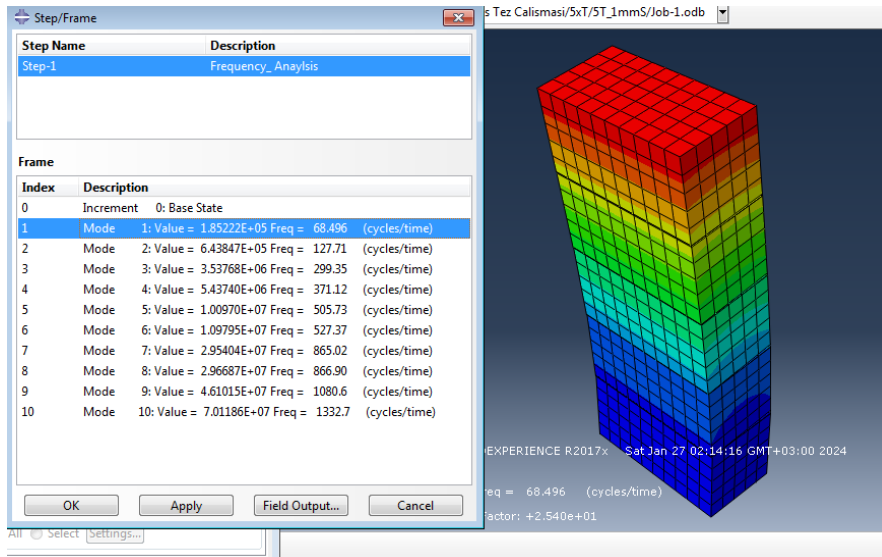


Şekil 4.6 4 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans analizi

Şekil 4.6’da görülen modal analiz tablosunda 4 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon malzeme kullanılarak oluşturulan kolon numunesinin doğal frekans değeri 76,006 Hz olarak bulunmuştur.

4.2.4 5 Adet Harman Tuğlası – 1 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

5 adet harman tuğlası ve 1 milimetre silikon malzemeye oluşturulan kolon formunun ABAQUS sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizinde silikon malzemenin elastisite modülü 11 N/mm² olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.7).

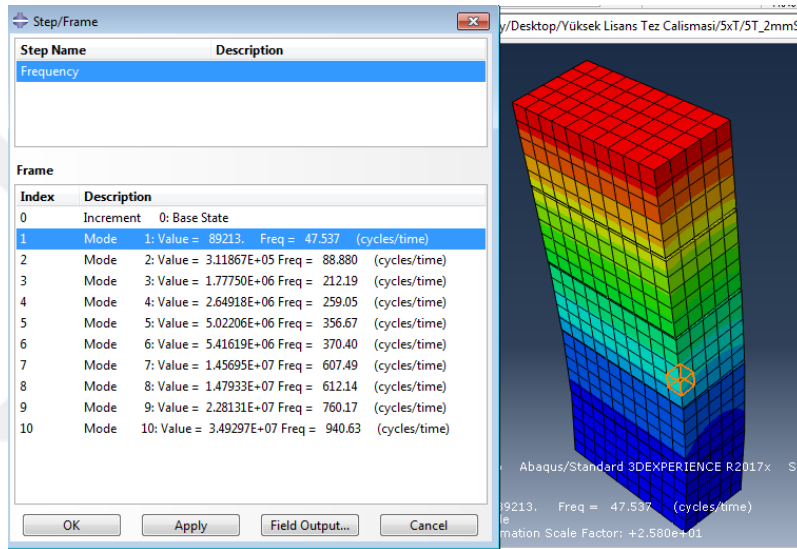


Şekil 4.7 5 adet harman tuğlası – 1 milimetre silikon doğal frekans analizi

ABAQUS sonlu elemanlar metodu ile yapılan doğal frekans analizinde 5 adet harman tuğlası ve 1 milimetre silikon kullanılarak oluşturulan modal analiz neticesinde, kolon numunenin doğal frekans değeri 68.496 Hz olarak elde edilmiştir.

4.2.5 5 Adet Harman Tuğlası – 2 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

Sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılan 5 adet harman tuğlası ve 2 milimetre silikon malzeme numunesinde, silikon malzemenin elastisite modülü 11 N/mm² olarak tayin edilmiştir (Şekil 4.8).

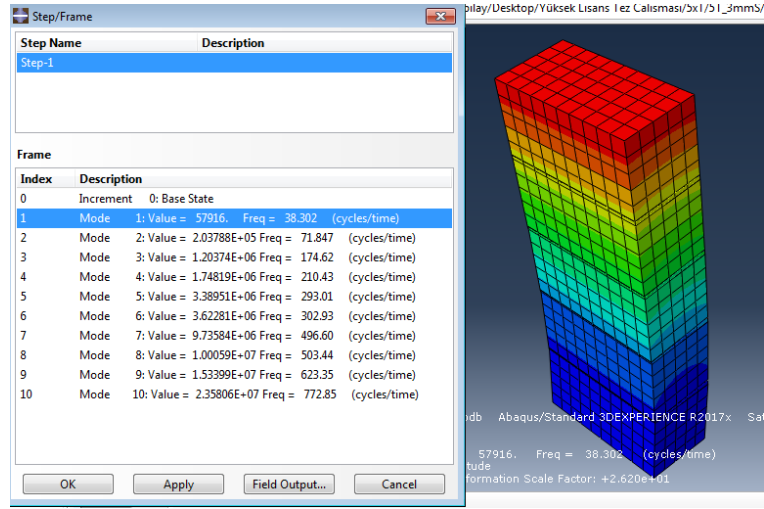


Şekil 4.8 5 adet harman tuğlası – 2 milimetre silikon doğal frekans analizi

Şekil 4.8’de gösterilen modal analiz verilerinde, 5 adet harman tuğlasının 2 milimetre silikon malzemeyeyle birleştirilmesi durumunda tanımlanan modal analizinde doğal frekans değerinin 47,537 Hz olduğu görülmektedir.

4.2.6 5 Adet Harman Tuğlası – 3 Milimetre Silikon Numunesi Modal Analizi

Son olarak kullanılan altıncı kolon numunesi 5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon kullanılacak şekilde ABAQUS programında tanımlanmıştır. Silikon tanımlaması yapılırken Bölüm 4.1’de tanımlanan silikon elastisite modülü değeri kullanılmıştır (Şekil 4.9)

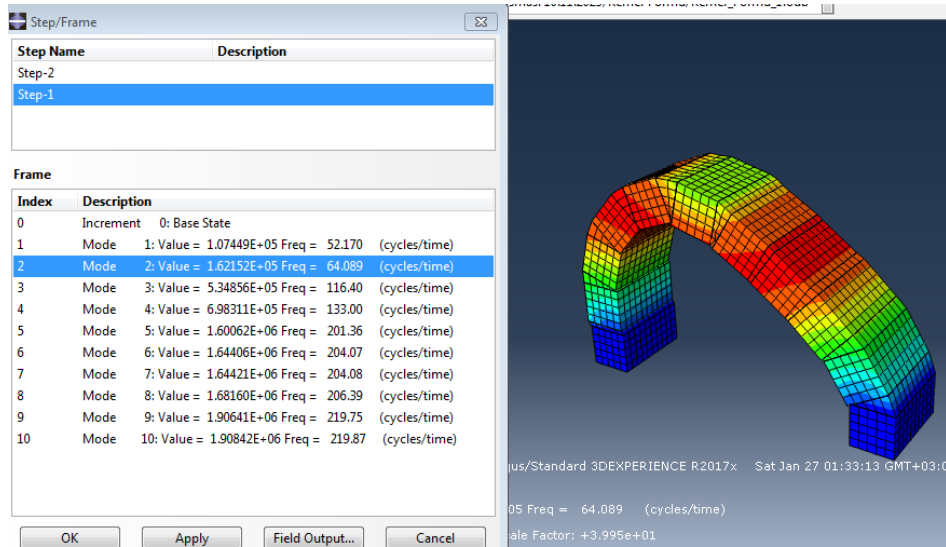


Şekil 4.9 5 adet harman tuğlası – 3 milimetre silikon doğal frekans analizi

Yapılan analizde Şekil 4.9’da görüleceği üzere 5 adet harman tuğlası ve 3 milimetre silikon malzeme kullanılması durumunda modal analiz sonucunda doğal frekans değerinin 38.302 Hz olduğu görülmektedir.

4.2.7 Kemer Formu-1 Numunesi Modal Analizi

Kolon numunelerinin analizlerin akabinde kemer formları içinde kullanılan silikon malzemenin elastisite modülü ABAQUS programında 11 N/mm^2 olarak tanımlanmıştır. Kemer formunun sonlu elemanlar metodu ile doğal frekans analizi yapılmıştır (Şekil 4.10)

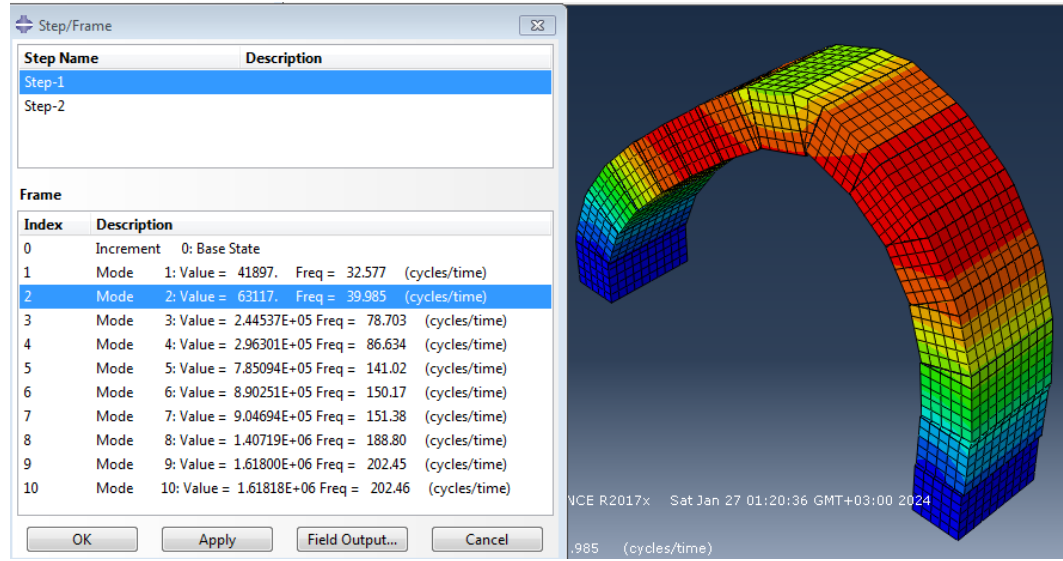


Şekil 4.10 Kemer Formu-1 doğal frekans analizi

Kemer Formu-1 için yapılan doğal frekans analizinde modal analiz tablosunda görüleceği üzere kemer formunun doğal frekans değeri 64,089 Hz olarak elde edilmiştir.

4.2.8 Kemer Formu-1 Numunesi Modal Analizi

Kemer Formu-2 içinde silikon elastisite modülü Bölüm 4.1’de verilen değer tanımlanarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar metodu ile ABAQUS programında doğal frekans analizleri yapılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Kemer Formu-2 doğal frekans analizi

Yapılan sonlu elemanlar modal analiz verilerinde Kemer Formu-2 için elde edilen doğal frekans değerimin 39.985 Hz olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Hazırlanan bu çalışma kapsamında, numune kolon formları sarsma tablası kullanılarak, sarsma tablası ve kolon tepe noktaları arasındaki FFT analizi sonucu elde edilen ivme farkları Tablo 5.1 de belirtilmiştir.

Tablo 5.1 Kolon numuneleri sarsma tablası FFT analiz sonucu değerleri

Numune Özellikleri	FFT Analiz Değeri (m/s ²)	Numune Özellikleri	FFT Analiz Değeri (m/s ²)
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	0.07	5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	0.08
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	0.10	5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	0.14
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	0.14	5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	0.21

Sarsma tablası deneylerinde 4 adet harman tuğlası, 1 mm silikon ve 5 adet harman tuğlası, 1 mm silikon numunelerinin 3 Hz salınım için FFT analizi sonucu elde edilen ivme farkları değerleri 0.07 m/sn² ve 0.08 m/sn² olacak şekilde birbirine yakın değerler elde edilmiş ve Tablo 1’de de gösterilmiştir. Silikon kalınlığının artmasıyla FFT analizi sonucunda numunelerin rijitliğinin azalması ve kolon yüksekliğin artmasıyla rijitliğin azalması sonuçlarında, artan bir ivme farkı olduğu tabloda karşımıza çıkmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu ile hazırlanan deneysel çalışmaların modal analizleri oluşturularak doğal frekans değerleri hesaplanmıştır. Doğal frekans değerlerinin silikon kalınlığı arttıkça, azaldığı görülmüştür. (Tablo 5.2).

Tablo 5.2 Kolon numuneleri ABAQUS modal analizleri doğal frekans değerleri

Numune	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 1 \text{ N/mm}^2$	Numune	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 1 \text{ N/mm}^2$
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	41.23	5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	25.38
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	28.68	5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	17.62
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	23.04	5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	14.16

Elde edilen veriler karşılaştırıldığında kemer numunenin oluşturulması için en uygun değer olan 1 mm silikon seçilmiştir. Seçilen bu kalınlığın kemer formlarının oluşturulmasında, silikon malzeme etkisinin daha az olması açısından uygulanabilir bir değer olacaktır.

Tablo 5.3 Kolon numuneleri sarsma tablası deneyi doğal frekans değerleri

Numune	Sarsma Tablası Analizi Doğal Frekansı (Hz)	Numune	Sarsma Tablası Analizi Doğal Frekansı (Hz)
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	24.780 – 47.241	5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	19.897 – 44.189
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	22.220 – 44.444	5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	17.334 – 29.419
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	15.747 – 27.446	5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	16.235 – 21.279

Tablo 5.3’de kolon numunelerinin sarsma tablası analizlerinde elde edilen doğal frekans değerleri gösterilmektedir. 4 adet harman tuğlası ile hazırlanan numunelerde silikon miktarının artışına bağlı olarak doğal frekans değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir. 5 adet harman tuğlasıyla hazırlanan numunelerde silikon artışına bağlı olarak doğal frekans değerlerin azaldığı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bölüm 4.1 de belirtilen silikon malzemenin elastisite modülünün 11 N/mm^2 olarak tanımlandığında ABAQUS sonlu elemanlar metoduyla yapılan analizlerde kolon numunelerin doğal frekans değerleri Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4 Kolon numuneleri malzeme deneyi verileyle hazırlanan doğal frekans değerleri

Numune	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 11 \text{ N/mm}^2$	Numune	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 11 \text{ N/mm}^2$
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	111.50	5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	68.49
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	94.37	5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	47.54
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	76.01	5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	38.30

Silikon elastisite modülü değeri 11 N/mm^2 olarak tanımlandığında doğal frekans değerlerinin silikon kalınlığı arttıkça düştüğü görülmüştür.

Kolon numunelerinin sarsma tablası deney sonuçları, farklı malzeme özellikleriyle tanımlanan ABAQUS modal analizlerinden elde edilen veriler Tablo 5.5’te verilmiştir.

Elde edilen değerler ile ABAQUS modal analizleri ve sarsma tablası deneyleri karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde malzeme özelliklerinin değişimiyle elde edilen

modal analizlerinde karşılaştırması yapılarak değişim oranları elde edilmiştir (Tablo 5.6).

Tablo 5.5 Kolon numuneleri doğal frekans değerleri

Numune	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 1 \text{ N/mm}^2$	Doğal Frekans Değerleri (Hz)		ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekansı (Hz) $E_{\text{silikon}} = 11 \text{ N/mm}^2$
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	41.23	24.780	47.241	111.50
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	28.68	22.220	44.444	94.37
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	23.04	15.747	27.446	76.01
5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	25.38	19.897	44.189	68.49
5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	17.62	17.334	29.419	47.54
5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	14.16	16.235	21.279	38.30

Tablo 5.6 Kolon numuneleri doğal frekans değişim oranları

Numune	Teorik-Deneysel Analizleri Doğal Frekans Değişim Oranı (%)
4 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	136%
4 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	112%
4 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	177%
5 Adet Harman Tuğlası 1 mm Silikon	55%
5 Adet Harman Tuğlası 2 mm Silikon	62%
5 Adet Harman Tuğlası 3 mm Silikon	80%

Kemer Formu 1 ve 2 için sonlu elemanlar metodu ile hazırlanan ABAQUS modellemesi, sarsma tablası deneyleri ve malzeme deneyi neticesinde elde edilen verilerle oluşturulan ABAQUS modellerinin doğal frekans değerleri Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Kemer formları doğal frekans değerleri

Numune	Sarsma Tablası Doğal Frekans Değeri (Hz)	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekans Değeri (Hz) $E_{\text{silikon}} = 1 \text{ N/mm}^2$	ABAQUS Modal Analiz Doğal Frekans Değeri (Hz) $E_{\text{silikon}} = 11 \text{ N/mm}^2$
Kemer Formu - 1	16.45	19.38	64.09
Kemer Formu - 2	14.13	12.10	39.99

Tablo 5.7 incelendiğinde kemer formlarının yükseklik geniş oranlarının artması neticesinde doğal frekans değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde;

- Değişen malzeme geometrilerine rağmen sarsma tablası ve sonlu elemanlar metodu ile yapılan modal analizler karşılaştırılabilir veriler elde edilebilmesi için kullanılabilir.
- Deneysel çalışmalarda, yığma yapı elemanlarının birleştirilmesinde harç malzemesi olarak silikon kullanılabileceği gözlemiyle birlikte, silikon kalınlığının artması yapısal elemanların ivme değerlerinde artış gözlemlenmektedir.
- Yığma yapı kolon formları için, 1/50 oranın kullanılan harç malzemesiyle ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplamada kolon formların FFT analizi sonucu elde edilen ivme değeri ortalama 0.075 m/sn² olduğu görülmüştür.
- ABAQUS sonlu elemanlar modal analizlerinde silikon kalınlığının artmasıyla doğal frekans değerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Kolon formlarının doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında, 4 adet tuğla kullanılarak hazırlanan numunelerin rijitliğinin fazla olması sebebiyle teorik ve deneysel çalışmalardaki doğal frekans değerleri değişim oranı, 5 adet tuğla ile hazırlanan numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür.
- Kemer formunun yükseklik/genişlik oranının artmasıyla deneysel ve teorik olarak doğal frekanslar değerlerinin düşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen karşılaştırılabilir veriler incelendiğinde kemer formlarının yüksekliğinin arttıkça doğal frekans değerlerinde azalma durumu olduğu görülmüştür. Yığma yapılarda bulunan farklı kemer formlarının doğal frekanslarının bulunmasında, hassas ölçümler yapılabilmesi için kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel çalışmalarla belirlenmesi önerilmektedir. Yapılacak olan benzer çalışmalarda ölçekli modellemeler ve detaylı malzeme analizleri kullanılması kemer formlarının davranışları ve doğal frekanslarının bulunmasında fayda sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A., C., “Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerinin Farklı Taşıyıcı Sistemli Uzun Açıklıklı Tarihi Köprülere Uygulanması”, 3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu, Mayıs, Bursa, *Bildiriler Kitabı*, 291-301, 2015.
- [2] Barros, R., Dick,A., Cesar M., “Expeditious measurements for frequency estimation on masonry arch bridges”, International Congress on Phenomenological Aspects in Civil Engineering, June, Erzurum, Turkey, 2021.
- [3] Nichols, J., Tomor, A., Benedetti, A., “Use of Accelerometer Technology for Quantifying Condition of Masonry Arch Bridges”, 13th Canadian Masonry Symposium, June Halifax, Canada, 2017.
- [4] Toket, S., Ünay, A. İ. “Mathematical Modelingand Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2): 129-139, 2004.
- [5] Yılmaz, E. G., Sayın, E., Özmen, A., “Dynamic Analysis of Historical Masonry Arch Bridges under Different Earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge”, *Turkish Journal of Science and Technology*, vol. 17, pp. 461-473, 2022.
- [6] Kurt, M., “Tarihi Taş Kemer Köprülerin Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi”, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun, 2016.
- [7] Ural, A., “Tarihî Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi”, Deprem Sempozyumu Kocaeli, 2005.
- [8] Çoruhlu, B. “Doğu Karadeniz Bölgesindeki Tek Açıklıklı Kemer Köprüler İçin Doğal Frekans, Yer Değiştirme ve Gerilme Formülleri”, (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 2017.
- [9] Alaboz, M., “Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [10] Rafiee, A., Vinches, M. ve Bohatier, C., “Application of the NSCD Method to Analyse the Dynamic Behaviour of Stone Arched Structures”, *International Journal of Solids and Structures*, 45, 6269–6283, 2008.
- [11] Özkaya,S. G., “Tek Açıklıklı Yığma Kemer Köprülerin (Ordu, Sarpdere Köprüsü) Göçme Yüklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi”, (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 2013.
- [12] Lourenço, P., B., “Computational Strategies for Masonry Structures”, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Holland, 222 s, 1996.

- [13] Çufalı, G., “Tarihi Taş Köprülerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kemer Formunun Dinamik Etkiler Altında Yapısal Olarak Değerlendirilmesi”, (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2023.
- [14] TS EN 771-1 “Kâgir Birimler- Özellikler -Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (Tuğlalar)”,2005
- [15] Dauda, J.A, Iuorio, O., Lourenço, P.B., “Numerical Analysis and Experimental Characterization of Brick Masonry”. *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 5 (3). pp. 321-347. ISSN 2056-9459,2020.
- [16] Ba, A. et al. “Soft Porous Silicone Rubbers with Ultra-low Sound Speeds in Acoustic Metamaterials”. *Sci. Rep.* 7, 40106; doi: 10.1038/srep40106, 2017.
- [17] Çelik S.B., Kumsar H., Aydan Ö. “Mekanik Bir Sarsma Masasıyla Elde Edilebilen Hareket Parametreleri ve Bir Uygulama”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 19, Sayı 5, Sayfalar 224-230,2013.
- [18] Hasol, D., “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, s. 245, YEM Yayınları, İstanbul, 1998.
- [19] Özer, S. S., “Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Elemanların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Ankara, Türkiye, 2006.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Çarkanat K. Alemdar Fırat Z. Yığma Binalardaki Farklı Kemer Formlarının Doğal Frekanslarının Bulunması,12. Uluslararası Mühendislik ve Tasarım Kongresi, s.865,2023.

